

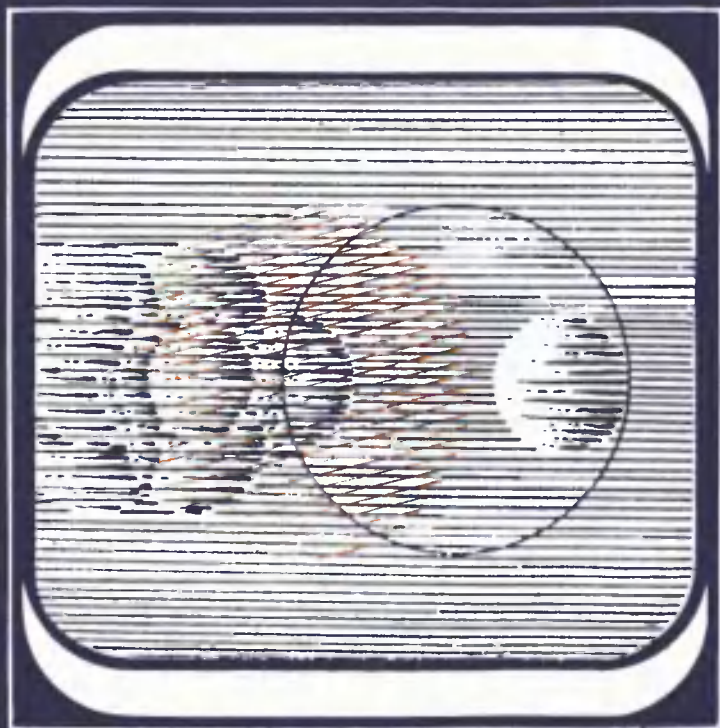
# ФИЗИКА

ПОДПИСНАЯ НАУЧНО-ПОПУЛЯРНАЯ СЕРИЯ



1984/5

**В.М.Шехтер  
А.А.Ансельм  
АТОМ И  
КВАНТОВАЯ  
МЕХАНИКА**



## ЗНАНИЕ

НОВОЕ В ЖИЗНИ, НАУКЕ, ТЕХНИКЕ

НОВОЕ В ЖИЗНИ, НАУКЕ, ТЕХНИКЕ

ПОДПИСНАЯ НАУЧНО-ПОПУЛЯРНАЯ СЕРИЯ

**ФИЗИКА**

5/1984

Издается ежемесячно с 1967 г.

**В. М. Шехтер**

**А. А. Ансельм**

**АТОМ  
И КВАНТОВАЯ  
МЕХАНИКА**

Издательство «Знание» Москва 1984

**Владимир Михайлович ШЕХТЕР** , Алексей Андреевич АН-  
СЕЛЬМ — доктора физико-математических наук, специали-  
сты в области теории элементарных частиц. Основные ра-  
боты авторов относятся к изучению фундаментальных взаимо-  
действий элементарных частиц.

Рецензент: академик А. Б. Мигдал

## **СОДЕРЖАНИЕ**

Введение . . . . .	3
Глава 1. Атомные спектры и планетарная модель Резерфор- да—Бора . . . . .	5
Глава 2. Частицы и волны . . . . .	16
Глава 3. Основы квантовой механики . . . . .	24
Глава 4. Квантовая теория атома . . . . .	50

**Шехтер В. М., Ансельм А. А.**

**Ш 54** Атом и квантовая механика. — М.: Знание,  
1984. — 64 с. — (Новое в жизни, науке, технике.  
Сер. «Физика»; № 5).

11 к.

Авторы рассказывают об основных экспериментальных фактах, приведших к созданию модели Бора и квантовой механики. Излагают физические основы теории, прослеживают путь развития квантовой механики от истоков до современной квантовой теории поля.

Брошюра рассчитана на научных работников, а также на тех читателей, которые интересуются успехами современной физики, в том числе на преподавателей и слушателей народных университетов.

1703010000

**ББК 22.2**  
**531**

Когда прерывается жизнь активно действующего ученого, это всегда вызывает сожаление. Но особенно грустно, если это происходит неоправданно рано.

Доктор физико-математических наук В. М. Шехтер находился на возрастающей кривой своей научной активности, когда тяжелая болезнь остановила его сердце.

Будучи глубоким физиком, он не считал для себя вазорным, как это часто бывает с физиками-теоретиками, заниматься популяризацией своей науки... Он оставил черновики предполагаемой популярной книги о квантовой механике. Довести эти записи до завершения взял на себя труд его друг и коллега доктор физико-математических наук А. А. Ансельм.

Я с удовлетворением прочел и рекомендую вниманию читателей эту интересную книгу.

Академик А. Б. Мигдал

## ВВЕДЕНИЕ

Человеческая фантазия всегда охотнее воспринимала количественные аномалии, чем качественные. В мозгу наших далеких предков родились мифы о великанах и карликах, о многоголовых и многоруких чудовищах. Никто, однако, не представлял себе дракона на колесах или русалку с винтом вместо хвоста — существа с такими конечностями не были известны, а потому и не появлялись в воображении людей. Только в ходе длительной эволюции мы узнали и даже успели привыкнуть к мысли, что на колесах можно передвигаться по суше без помощи ног, а винт позволяет развить большую скорость в воде.

Подобную картину можно наблюдать и в науке. Новые открытия, даже самые сенсационные, проходили довольно безболезненно, когда они не затрагивали «качественную» основу наших взглядов на природу вещей. Обнаружение, скажем, атомного ядра, многих элементарных частиц, нейтронных звезд и т. п. было неожиданным, но вполне укладывалось в картину мира, которую каждый человек создает себе на основе жизненного опыта и знаний, доставшихся по наследству от предыдущих поколений. Значительно труднее было принять новые воззрения, если они противоречили сложившейся картине мироздания. В XVI в. люди были готовы отправиться на костер еретика, осмелившегося оспаривать тот очевидный факт, что Солнце крутится вокруг Земли. В наше время аутодафе вышли из моды, но мозг

людей по-прежнему протестует, когда их пытаются убедить в чем-то, противоречащем ежедневным наблюдениям. Особенно трудно оказалось смириться с утверждениями, которые содержатся в двух теоретических концепциях, лежащих в основе почти всей физики XX в., — теории относительности и квантовой механики.

Настоящая брошюра посвящена квантовой механике и физике атома, где ярко проявляются ее удивительные законы. В нескольких отношениях квантовая механика идет вразрез с установившимися до XX века «классическими» представлениями. Прежде всего следует, наверное, упомянуть скачкообразный характер изменения энергии, открытый Планком в 1900 г. Далее весьма неожиданным с классической точки зрения оказывается то, что квантовая механика приписывает всем частицам и другим объектам как корпускулярные, так и волновые свойства. Следующим шагом является отказ от привычного понятия траектории, по которой движется частица, — для волны такое понятие лишено смысла. Наконец, многие закономерности квантовой механики имеют вероятностный характер. Даже точно зная начальное состояние какой-либо системы, невозможно однозначно предсказать результаты будущих экспериментов или измерений. Имеет смысл говорить только об их вероятности.

Как ни парадоксально звучат эти утверждения, они неизбежны. К ним приводит не «злая воля» физиков, а неодолимая логика экспериментальных фактов. Если результаты новых опытов противоречат сложившимся взглядам, эти взгляды приходится менять. Квантовая механика возникла в итоге целой цепи экспериментальных открытий, сопровождавшихся пересмотром старых представлений.

В период своего зарождения квантовая механика была неотделима от физики атома. По этой причине брошюра строится следующим образом. В главе 1 рассказывается об атомных спектрах и их объяснении, данном в знаменитой модели Бора. Глава 2 посвящена дуализму частиц и волн. В центральной главе 3 излагаются история и основные черты квантовой механики, давшей объяснение как отмеченному дуализму, так и постулатам Бора. В главе 4 говорится о квантовомеханической теории атома.

# Глава 1. АТОМНЫЕ СПЕКТРЫ И ПЛАНЕТАРНАЯ МОДЕЛЬ РЕЗЕРФОРДА—БОРА

## 1. Атомные спектры

Еще Ньютон показал, что обычный белый свет представляет собой довольно сложный набор лучей разного цвета, называемый спектром.

Разные источники света, вообще говоря, обладают неодинаковым спектром. В простейшем случае, когда источник света дает окрашенный луч с определенной длиной волны ( $\lambda$ ), никакого спектра после преломления в призме не возникает. Освещенной оказывается лишь узкая полоска, которая отвечает данной длине волны.

Исследование атомных спектров началось в 1860 г., когда была опубликована работа немецких ученых Г. Кирхгофа и Р. Бунзена «Химический анализ с помощью наблюдений спектра». В последующие годы изучение атомных спектров велось весьма интенсивно. Найденные в них закономерности позволили получить неоценимую информацию о внутреннем устройстве атомов.

Наиболее характерной чертой атомных спектров оказалась их дискретность — спектры состоят из набора узеньких полосок с вполне определенной длиной волны. Например, в видимую часть спектра атомарного водорода попадают 4 линии, которые принято обозначать  $H_\alpha$ ,  $H_\beta$ ,  $H_\gamma$ ,  $H_\delta$ .

Соотношение между длинами волн в видимой части водородного спектра выражается формулой Бальмера:

$$\lambda = B \frac{n^2}{n^2 - 4},$$

где  $n$  — целое число, равное 3, 4, 5, 6, а  $B$  — эмпирическая константа, равная 3647,0 Å. Формула Бальмера становится более наглядной, если написать ее не для длины волны  $\lambda$ , а для частоты световых колебаний  $\nu$ . Эти величины связаны простым соотношением

$$\nu = c/\lambda,$$

где  $c$  — скорость распространения света, равная 299 792,5 км/с. Согласно Бальмеру

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

Если ввести обозначение  $R = 4 \text{ с/В}$  — постоянную Ридберга, то

$$\nu = R \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (n = 3, 4, 5, 6).$$

Открытие швейцарского учителя Бальмера усилило интерес к исследованию спектра атомарного водорода. В 1906 г. Лайман обнаружил еще одну серию в далекой ультрафиолетовой области. Пашен, Брэккет, Пфунд и другие нашли новые серии в инфракрасной области. Для частоты спектральных линий в каждой области оказалась справедливой своя формула, имевшая, однако, ту же структуру, что и формула Бальмера. «Обобщенная» формула Бальмера

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

годится для любой серии, если  $m$  и  $n$  — целые числа. В таком виде эта формула была написана шведским физиком Ридбергом.

## 2. Опыты Резерфорда и планетарная модель атома

Модель Бора основывалась на трех предпосылках — результатах исследования атомных спектров, о которых шла речь в предыдущем параграфе, квантовой теории излучения, развитой в работах Планка и Эйнштейна, и планетарной модели атома, автором которой был Эрнест Резерфорд. История теории излучения выходит за рамки этой брошюры. Мы ограничимся здесь рассказом об экспериментах Резерфорда.

К концу XIX в. было установлено, что в состав атомов химических элементов входят отрицательно заряженные электроны. Сами атомы электрически нейтральны. Следовательно, где-то в них должен помещаться и положительный заряд. Дж. Дж. Томсон полагал, например, что положительный заряд размазан по всему объему атома в виде какой-то аморфной массы (Томсон называл ее «сферой однородной положительной электризации»), а точечные электроны плавают в положительно заряженной среде. Такие взгляды пришлось пересмотреть после знаменитых опытов Резерфорда и его сотрудников, которые были выполнены в Манчестере в первом десятилетии XX в. и привели к открытию атомного ядра.

Уроженец Новой Зеландии (1871), Резерфорд три года проработал в Кэвендишской лаборатории (Англия, 1895—1898), а затем переехал в Канаду. Там он начал интенсивное изучение радиоактивных превращений. Эти исследования стали особенно плодотворными после 1907 г., когда Резерфорд вернулся в Англию и занял должность профессора в университете Виктории (Манчестер).

Резерфорд воспользовался тем обстоятельством, что при распаде некоторых радиоактивных веществ испускаются альфа-частицы, которые представляют собой, как мы знаем сейчас, ядра гелия ( $\text{He}^4$ ), состоящие из двух протонов и двух нейтронов. Альфа-частицы электрически заряжены. Их заряд равен  $+2$  в тех единицах, в которых заряд электрона равняется  $-1$ .

В 1906 г. Резерфорд начал систематическое изучение фотографического действия альфа-частиц. Это исследование привело к неожиданному и чрезвычайно далеко идущему открытию. Схема первоначальных опытов была крайне проста. От радиоактивного источника альфа-частицы пропускались через узкое отверстие, после чего они попадали на фотопластинку и давали на ней четкое изображение щели. Резерфорд заметил, что изображение щели становилось размытым, если стеклянный вакуумированный прибор, в котором проводились исследования, заполнялся воздухом или каким-либо иным газом. Объяснение этого эффекта на первый взгляд очень просто: быстрая альфа-частица, взаимодействуя с атомами газа, слегка отклоняется от первоначального направления — происходит рассеяние. Согласиться с таким объяснением, однако, было не просто, потому что даже небольшое отклонение быстрых частиц свидетельствует о существовании больших сил, действующих на них. Было неясно, откуда эти силы могут взяться в томсоновском атоме, который в среднем электрически нейтрален.

Опыты Резерфорда были продолжены его учениками — Гейгером и Марсденом, которые ставили на пути пучка тонкие фольги различных материалов. По свидетельству Марсдена, Резерфорд однажды попросил своих сотрудников поискать, нет ли наряду с падающими частицами частиц отраженных. Можно себе представить, что ход его рассуждений был таков: если какие-то силы вызывают рассеяние, то они могут привести и к



рассеянию назад, т. е. отражению. (По другой версии обнаружение отраженных альфа-частиц произошло случайно.) Гейгер и Марсден обнаружили искомый эффект: на флюоресцирующем экране, который был помещен перед мишенью — фольгой и защищен от попадания на него прямых альфа-частиц, хотя и чрезвычайно редко, загорались яркие звездочки — вспышки — следы попадания на него отраженных частиц.

Резерфорду стало ясно, что внутри атомов должны действовать огромные силы или иначе, что в них существуют чрезвычайно сильные поля, которые способны отбросить назад частицу с большой энергией. Коль скоро в обратном направлении по отношению к первичному пучку отражается чрезвычайно мало частиц — одна из 8000 в случае опытов с платиновой фольгой, — вероятность попадания в область сильного поля, очевидно, очень мала. Отсюда следует, что большую часть атома «занимает» пустота. Интересно отметить, что соображения о пустотном строении атомов были высказаны немецким физиком Ленардом еще в 1903 г. Ему, однако, представлялся удивительным факт прохождения катодных лучей — электронов сквозь тонкие металлические пленки без существенного рассеяния; отражение, вероятно, его не удивило бы.

Что же тогда представляет собой атом? Резерфорду потребовалось около двух лет, чтобы сформулировать ответ на этот вопрос. Чтобы представить себе масштабы чисто психологических трудностей, достаточно обратиться к самому Резерфорду, который, вспоминая о впечатлении, которое произвели на него следы — вспышки, зажигаемые рикошетирующими альфа-частицами, писал позднее: «Это было почти столь же неправдоподобно, как если бы вы произвели выстрел по обрывку папиросной бумаги 15-дюймовым снарядом, а он вернулся бы назад и угодил в вас». Подход к решению этой задачи осуществлялся у Резерфорда, по свидетельству его сотрудников, постепенно. Поначалу он как бы ронял соответствующие фразы в частных беседах с коллегами, затем, по мере того как росла его уверенность, — на семинарах и съездах и, наконец, в публикации «Рассеяние альфа- и бета-частиц в веществе и структура атома», которая увидела свет в майском номере журнала *Philosophical Magazine* за 1908 г. Резерфорд писал: «Поскольку масса, импульс и кинетическая энергия альфа-

частицы очень велики по сравнению с соответствующими величинами для электрона, представляется невозможным, чтобы альфа-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». Название «ядро» для этого центрального заряда было предложено Резерфордом в 1912 г. По мысли Резерфорда, большинство альфа-частиц проходит вдали от ядра и потому мало меняет направление своего движения, но те немногие частицы, которые подходят близко к ядру, встречаются с сильным отталкиванием и потому отклоняются на большие углы.

Вскоре было установлено, что электрический заряд центрального ядра (точнее, число содержащихся в нем положительных зарядов, равных по величине заряду электрона) в точности равен номеру данного элемента в периодической таблице Менделеева. В начале 1913 г. эту идею высказал голландский физик Ван ден Брук, а ее экспериментальное доказательство было получено спустя несколько месяцев молодым учеником Резерфорда Мозли, который погиб через два года в сражении при Галлиполи. Мозли выполнил серию блестящих измерений спектра рентгеновских лучей, характерных для разных элементов. Оказалось, что длина волны этих лучей систематически уменьшается по мере возрастания «атомного номера»  $Z$  в периодической системе. Мозли пришел к выводу, что эта закономерность обусловлена увеличением заряда атомного ядра, который «возрастает от атома к атому на одну электронную единицу», и что число таких единиц «совпадает с номером места, занятого элементом в периодической таблице».

С другой стороны, атом электрически нейтрален, так что отрицательный заряд электронов должен в точности компенсировать положительный заряд ядра. Это значит, что полное число электронов в атоме также равно  $Z$ . Таким образом, Резерфорд пришел к выводу, что атом похож на Солнечную систему. Ядро является аналогом центрального светила — Солнца, а электроны выступают в роли планет. Отличие от Солнечной системы в том, что положительный заряд ядра  $+E$  компенсируется отрицательным зарядом электронного облака  $-Ze$ , тогда как в случае сил тяготения никакой компенсации быть не может. Гравитация всегда приводит к притяже-

нию различных тел и никогда к отталкиванию. Планетарная модель атома была впоследствии многократно подтверждена и вскоре стала общепризнанной.

Обращаясь к истории, можно все же заметить, что первоначально работа Резерфорда не получила того признания, которого заслуживала. Свидетельством тому может служить 1-й Сольвеевский конгресс, собравшийся в Брюсселе в сентябре 1911 г. В числе ведущих физиков мира, съехавшихся в Брюссель (а там присутствовали Эйнштейн, Планк, Мария Кюри, Ланжевен и другие), был и Резерфорд. На конгрессе обсуждалась теория квантов и ее первые приложения — теория фотоэлектрического эффекта, теплоемкость твердых тел и т. п., но никто и словом не обмолвился об идее Резерфорда.

С другой стороны, после триумфального успеха модели Резерфорда, выразившегося в повсеместном подтверждении полученных на ее основе формул для рассеяния, а также после работ Бора в памяти физиков всплыли исследования предшественников планетарной гипотезы, в которых высказывались аналогичные соображения, не подкрепленные, однако, какими-либо экспериментальными фактами и носившие поэтому чисто умозрительный характер. В 1901 г. Жан Перрен в научно-популярном журнале «Научное обозрение» опубликовал статью «Ядернопланетарная структура атома». Спустя два года в еще менее читаемом физиками журнале — «Трудах Токийского физико-математического общества» японский физик Нагаока (ученик Больцмана) опубликовал свою модель атома, которую тоже можно назвать планетарной. Атом мыслился им как образование, подобное планете Сатурн с твердым ядром, средоточием положительного заряда и с кольцами, на которых располагаются электроны. В 1904 г. Нагаока писал об этой модели в *Philosophical Magazine*, но Резерфорд, который, несомненно, знакомился с каждым номером этого журнала и публиковал в нем большинство своих статей, не обратил тогда внимания на эту работу.

Тем не менее именно Резерфорду принадлежит выдающаяся заслуга экспериментального обоснования и утверждения планетарной модели атома. Традиционная картина этой модели с ее четким рисунком электронных орбит стала своеобразной эмблемой XX в., кочующей по книгам, выставкам, экслибрисам и т. п.

Интересно, что, как мы увидим в дальнейшем, согласно квантовой механике в действительности электронных орбит не существует. И все же эти рисунки — заслуженная дань Резерфордовской модели атома, сыгравшей роль краеугольного камня в истории создания квантовой механики.

### 3. Постулаты Бора

Несмотря на все успехи планетарной модели атома, ее было очень трудно принять с позиций классической физики. Главная неприятность состояла в том, что согласно классической теории электромагнитных явлений заряженный электрон, движущийся по круговой или любой другой искривленной орбите, должен все время излучать световые волны. Спектр такого излучения должен определяться частотой обращения электрона по орбите и меняться непрерывно. На опыте, напротив, атомные спектры всегда дискретны. Кроме того, потратив свою энергию на излучение световых волн, электрон должен был бы двигаться по орбите все меньшего и меньшего радиуса — подобно спутнику Земли, тормозящемуся в ее атмосфере, — и в конце концов упасть на ядро. Такое явление, однако, отсутствует: в обычных условиях атомы вполне стабильны. Поэтому, принимая планетарную модель атома, надо было отказаться от классических представлений. Наиболее ясно это понял великий датский физик Нильс Бор, говоривший позднее: «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 1913 г. Бору исполнилось 28 лет. К этому времени он уже успел провести 4 месяца в манчестерской лаборатории, руководимой Резерфордом, а затем вернулся в Данию. Бор был в курсе всех экспериментальных результатов атомной физики, и в то же время на него произвели глубокое впечатление работы Планка и Эйнштейна, в которых развивалась идея квантов. Поняв, что планетарная модель Резерфорда противоречит классической физике, Бор с небывалой смелостью отказался

от последней и выдвинул свои знаменитые постулаты. Они были опубликованы в трех статьях, посланных в журнал *Philosophical Magazine* в 1913 г.

Первый постулат Бора гласит, что электроны движутся в атоме по замкнутым орбитам и вопреки классической электродинамике световые волны при этом не излучаются. Такие орбиты могут оставаться стабильными сколь угодно долго. Бор назвал соответствующие атомные состояния стационарными. Каждое стационарное состояние обладает вполне определенной энергией  $E$ , которая неодинакова для разных состояний.

Второй постулат Бора относится к переходам между двумя стационарными состояниями. В отличие, скажем, от своего предшественника Никольсона, также говорившего о заполнении электронами каких-то колец вокруг ядра, Бор не считал, что частота испускаемого света связана с частотой обращения электрона, как того требовала классическая электродинамика. Вместо этого он предположил, что переход из стационарного состояния с энергией  $E_1$  в состояние с энергией  $E_2$ , который возможен без внешних воздействий на атом, если  $E_1 > E_2$ , сопровождается испусканием светового кванта с энергией  $E_1 - E_2$ . Квантовая теория Планка и Эйнштейна утверждает, что энергия кванта  $E$  связана с его частотой  $\nu$  равенством  $E = h\nu$ , где  $h$  — постоянная Планка, равная  $6,62 \cdot 10^{-27}$  эрг·с. Поэтому указанный переход должен сопровождаться испусканием света с определенной частотой, равной

$$\nu = \frac{E_1 - E_2}{h} .$$

Этой частоте соответствует также вполне определенная длина волны

$$\lambda = \frac{hc}{E_1 - E_2} .$$

Поскольку возможны разные стационарные состояния с разными значениями энергии, постольку разность  $E_1 - E_2$  может принимать довольно большое число дискретных значений, каждому из которых отвечает своя частота  $\nu$  или длина волны  $\lambda$ . Бор писал: «Переход системы между двумя стационарными состояниями... сопровождается испусканием однородного излучения, для которого соотношение между частотой и величиной излученной энергии дается теорией Планка... Второе пред-

положение находится в противоречии с обычными идеями электродинамики, но представляется необходимым для объяснения экспериментальных фактов».

Любопытно, что эта, по сути, основная идея Бора не понравилась Резерфорду. Он никак не мог понять, каким образом, начиная прыжок с одной стационарной орбиты на другую, электрон уже знает, какой квант ему надо испустить. Доводы Бора, что здесь ситуация точно такая же, как при радиоактивном распаде, и что частота светового кванта определяется не чем иным, как законом сохранения энергии, не смогли убедить его учителя во всяком случае в первое время.

Первый постулат Бора конкретизирует планетарную модель атома, придавая ей наглядный образ. Электроны, двигаясь вокруг центрального ядра, не заполняют равномерно все внутриатомное пространство, а обращаются по вполне определенным орбитам. Первоначально Бор полагал, что орбиты имеют вид окружностей, однако немецкий физик Зоммерфельд показал позднее, что они могут иметь также форму эллипса, в одном из фокусов которого располагается ядро. Это делает аналогию между атомом Резерфорда — Бора и Солнечной системой еще более наглядной.

Второй постулат Бора позволил объяснить прерывную, линейчатую структуру атомных спектров. Более того, в случае наиболее простого атома — водорода, который состоит из ядра — протона и только одного электрона, стала понятной закономерность, заключенная в обобщенной формуле Бальмера для частоты спектральных линий:

$$\nu = R \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right) \cdot (n > m = 1, 2, 3 \dots).$$

Чтобы получить эту формулу, достаточно принять, что энергия электрона на  $n$ -й стационарной орбите зависит от ее номера  $n$  следующим образом:

$$E_n = -\frac{R h}{n^2}.$$

В соответствии со вторым постулатом Бора частота световой волны, испускаемой при переходе из состояния с номером  $n$  в состояние с номером  $m$ , равна

$$\nu = \frac{E_n - E_m}{h} = \frac{1}{h} \left( -\frac{R h}{n^2} + \frac{R h}{m^2} \right) = R \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right),$$

что совпадает как раз с обобщенной формулой Бальмера.

Бор сформулировал также количественное «условие квантования» для нахождения стационарных орбит в атоме водорода. Исходя из аналогии с квантовой теорией излучения, он потребовал, чтобы электрон, находящийся на круговой орбите с номером  $n$ , обладал моментом количества движения  $r \cdot p$  ( $r$  — радиус этой орбиты,  $p$  — импульс электрона), равным  $n \cdot \hbar$  \*. Используя это условие, Бор вычислил энергию электрона в кулоновском поле водородного ядра. Оказалось, что она имеет как раз тот вид, какой необходим для получения формулы Бальмера, именно

$$E = -\frac{me^4}{2\hbar^2} \cdot \frac{1}{n^2}.$$

В этом выражении постоянная Ридберга оказалась выраженной через массу и заряд электрона, а также постоянную Планка:

$$R = \frac{me^4}{4\pi\hbar^3}.$$

Численное значение этой величины очень хорошо совпадало с данными спектроскопических измерений, что знаменовало собой триумф теории Бора. Одновременно Бор смог рассчитать радиус орбиты с произвольным номером  $n$ , который оказался равным

$$r = n^2 \cdot \frac{\hbar^2}{me^2} = n^2 \cdot 0,5 \cdot 10^{-8} \text{ см.}$$

Постулаты Бора были применимы не только в случае атома водорода, но и для других атомов. В ряде сравнительно простых случаев, когда вычисления можно было довести до конца, согласие с экспериментальными данными оказалось превосходным.

Теория Бора позволила разобраться в огромном количестве экспериментальных сведений, казавшихся до нее непонятными и взаимно противоречивыми. В своей автобиографии 1949 г. А. Эйнштейн писал: «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

---

\* В ряде случаев удобно пользоваться не постоянной Планка  $\hbar$ , а величиной  $\hbar$ , которая в  $2\pi$  раз меньше:  $\hbar = h/2\pi$ . Эта величина равна  $\hbar = 1,05459 \cdot 10^{-27} \text{ эрг} \cdot \text{см.}$

линий и электронных оболочек атомов, включая их значение для химии. Это кажется мне чудом и теперь. Это — наивысшая музыкальность в области мысли».

Вскоре были поставлены новые опыты. Результат был всегда один: теория Бора верна. Широкую известность, например, приобрел эксперимент Франка и Герца, поставленный ими в 1914 г. Если бы его авторы исходили из постулатов Бора, они могли бы рассуждать так. Пусть атом находится в наинизшем стационарном состоянии. Если энергия частицы, налетающей на такой атом, очень мала, то ее может быть недостаточно, чтобы перевести атом в более высокое стационарное состояние. (Для атома водорода, например, минимальная энергия, при которой этот атом «возбуждается», составляет 10,15 эВ.) В этом случае возможно лишь упругое рассеяние налетающей частицы на атоме, подобное столкновению двух бильiardных шаров. Если же энергия налетающей частицы достаточно велика, то часть ее, равная разности энергий в двух стационарных состояниях, может быть поглощена атомом и потрачена на его «возбуждение». Такое столкновение будет уже неупругим, однако «неупругая» потеря энергии должна быть вполне определенной.

В опытах Франка и Герца атомы «обстреливались» сравнительно медленными электронами, энергия которых могла меняться по желанию экспериментаторов. Оказалось, что характер рассеяния именно таков, каким он должен быть в модели стационарных состояний, предложенной Бором.

Интересно, что сами Франк и Герц этого не понимали и в своей статье даже не упомянули о теории Бора. Правильность объяснения Бора была признана ими лишь в 1917 г. после добавочных экспериментов.

Хотя теория Бора была блестяще подтверждена опытом, физики оставались неудовлетворенными. В сущности, она еще не являлась теорией, а представляла собой лишь набор постулатов. Логика фактов заставила Бора пойти на отказ от классических представлений. В то же время нового эквивалента старой теории создано не было. Ограниченный характер постулатов Бора проявился и с другой стороны; с их помощью можно было вычислить далеко не все физические величины. Даже в простейшем случае атома водорода модель Бора позволяла рассчитать только частоту или длину волны спект-



ральных линий. Что же касается яркости, или, как говорят, интенсивности таких линий, то сосчитать ее было невозможно. Для этой цели пришлось ввести дополнительные предположения, основанные на соответствии новой теории классической электродинамике. Физики продолжали поиск новой теории, которая была бы последовательной с самого начала и из которой естественным образом следовали бы постулаты Бора. Такая теория — квантовая (или волновая) механика — была создана лишь в 1925—1926 гг. Она смогла не только объяснить строение атомных спектров, но и поразительным образом позволила согласовать волновые и корпускулярные свойства атомных систем и частиц, о которых пойдет речь в следующей главе.

## **Глава 2. ЧАСТИЦЫ И ВОЛНЫ**

### **1. Взгляды физиков XIX в.**

Еще со времен Ньютона и Гюйгенса суждения физиков о природе света были противоречивы. Одни считали его потоком каких-то частиц — корпускул. Другие полагали, что свет представляет собой волновое явление. До начала XIX в. обе точки зрения отстаивались с переменным успехом. С помощью гипотезы о корпускулах было легко понять, почему световые лучи распространяются по прямым линиям, тогда как волновая теория позволила объяснить явления интерференции, дифракции и поляризации света.

Важное событие произошло в 1819 г. Парижская академия наук объявила конкурс на лучшее сочинение о дифракции света. На конкурс были представлены два мемуара под девизами № 1 и № 2. Мемуар № 1 особыми достоинствами не отличался, зато мемуар № 2 содержал крайне убедительные доводы в пользу гипотезы о волновой природе света. Автору удалось естественным образом объяснить прямолинейность световых лучей как результат сложения большого числа волновых колебаний. Этим автором был тридцатилетний инженер по надзору за мостовыми Парижа Огюстен Френель.

При обсуждении мемуара в конкурсной комиссии произошел драматический эпизод. Докладывая о нем на заседании академии, председатель комиссии Ф. Араго

сказал: «Один из членов нашей комиссии, господин Пуассон, вывел из сообщенных автором интегралов тот удивительный результат, что центр тени от круглого непрозрачного экрана должен быть таким же освещенным, как и в том случае, если бы экран не существовал, — это при условии, что лучи проникают в тень под малыми углами падения». Это следствие было проверено прямым опытом (узнав о возражении Пуассона, опыт поставил сам Араго. — *Прим. авт.*).

После этого эпизода и многочисленных исследований самого Френеля, Араго, Юнга, а позднее Максвелла и других физики окончательно убедились, что свет представляет собой чисто волновое явление, подобное звуку или колебаниям волн на поверхности воды.

Если на пути света поставить экран с двумя отверстиями, то они будут играть роль двух источников световых колебаний, подобно двум камням, брошенным в воду. Свет от этих источников складывается или погашается, так что на некотором отдалении от них можно наблюдать интерференционную картину. При этом существенно, что световая волна проходит одновременно через оба отверстия. Невозможно сказать, какая часть волны прошла через одно отверстие, а какая через другое.

Что касается дифракции света, то это явление проще всего наблюдать на примере пылинок, находящихся на пути солнечного луча. Огибая пылинку, световая волна меняет свое направление. В результате нам кажется, что маленькая область около пылинки «светится».

Необходимо подчеркнуть, что дифракционные или интерференционные явления могут наблюдаться только в том случае, если размеры тела — пылинки, расстояния между отверстиями в экране и т. п. — не слишком велики по сравнению с длиной волны. Если на пути световых лучей поставить большой предмет, скажем, стол, то его тень будет вполне отчетливой. Явление «огибания» здесь незаметно. Только для очень маленьких тел край тени становится нерезким: он размывается вследствие дифракции света. Еще более мелкие предметы вообще не отбрасывают тени или даже «светятся», подобно пылинкам.

Звуковые волны имеют длину порядка нескольких сантиметров или даже метров — много больше, чем для видимого света. Поэтому звук легко огибает предметы, которые совершенно непрозрачны для световых лучей.

Голос человека, стоящего за забором, слышен вполне отчетливо, хотя сам он при этом не виден. В то же время даже звуковой «луч» не в состоянии «обогнуть» предметы еще больших размеров, скажем, многоэтажный дом.

В дальнейшем мы еще не раз повторим утверждение, что волновые явления становятся ненаблюдаемыми, когда размеры используемых в эксперименте тел или приборов велики по сравнению с длиной волны. В таком случае волновая оптика становится геометрической.

Перейдем теперь от волн к частицам. Согласно представлениям XIX в., никакие явления типа дифракции или интерференции для них невозможны. Частицы движутся по определенным траекториям; для нахождения которых с помощью уравнений классической механики достаточно знать все действующие на них силы, а также задать их начальные положения и скорости. Если, например, поставить на пути частиц экран с двумя отверстиями, то большая часть частиц застрянет в экране, а те, что пройдут сквозь него, попадут на второй экран в местах, находящихся точно позади отверстий в первом экране... Интерференции здесь быть не может. Всегда можно сказать, через какое отверстие прошла та или иная частица. Ее положение и скорость строго определены в любой момент времени.

Никакой неоднозначности в XIX в. не было. Частицы — это частицы, а свет — это волны, длина которых, впрочем, довольно мала. Но тут на смену логичному и «здравомыслящему» XIX в. пришел XX в., и, как писал Лев Толстой, «все смешалось в доме Облонских».

## 2. Световые волны становятся частицами

Проводившееся в конце прошлого столетия исследование инфракрасного излучения, испускаемого и поглощаемого всеми телами даже при комнатной температуре, завершилось революционным открытием Планка, которое было сделано в 1900 г. — на грани двух веков. Согласно Планку энергия теплового излучения, складывающаяся из энергий индивидуальных излучателей, испускается или поглощается не как угодно, а только определенными порциями, зависящими от длины волны излучения  $\lambda$  или его частоты  $\nu = c/\lambda$ . Величина наименьшей порции — «квант» энергии

$$E = h\nu,$$

где  $h$  — постоянная Планка. Теория Планка резко противоречила классической картине излучения световых волн. Энергия обычной волны никак не связана с ее длиной или частотой, а определяется только интенсивностью, которая характеризует, так сказать, «размах» колебаний.

Через 5 лет А. Эйнштейн создал свою знаменитую теорию фотоэлектрического эффекта, согласно которой электромагнитное излучение, в частности видимый свет, не только поглощается или испускается определенными порциями — квантами (кстати, именно Эйнштейн ввел термин «квант энергии»), но и распространяется в пространстве в виде какой-то частицы — фотона (название предложено в 1928 г. американским физиком Комптоном), движущегося со скоростью света и несущего энергию  $E = h\nu$ .

Обсуждение деталей теории Планка и Эйнштейна, равно как и экспериментов, лежащих в ее основе, выходит за рамки настоящей брошюры. Для нас имеет значение лишь сам факт, что в большом круге явлений световая волна ведет себя как поток частиц, движущихся с определенной энергией и импульсом. «Корпускулярные» свойства электромагнитного излучения особенно наглядно проявляются при рассеянии на электронах рентгеновских или гамма-лучей, несущих еще большую энергию. Это явление получило название эффекта Комптона по имени ученого, обнаружившего его в 1923 г.

Когда рентгеновские лучи попадали в вещество (исследовался целый ряд материалов со сравнительно небольшими атомными номерами — от лития до меди), то они рассеивались на атомных электронах. Оказалось, что рассеянные лучи имеют большую длину волны по сравнению с падающими. Изменение длины волны было тем значительнее, чем больше был угол рассеяния. Комптон заметил, что рассеяние рентгеновских лучей было в точности таким, как если бы они состояли из отдельных частичек, несущих энергию  $E = h\nu$  и импульс \*  $p = E/c =$

---

\* Согласно теории относительности для частицы с массой покоя  $m$  справедливо следующее соотношение между энергией  $E$  и импульсом  $p$ :  $E = \sqrt{m^2 c^4 + p^2 c^2}$ . Для света  $m = 0$ , так что  $E = pc$ ,

$= h\nu/c = h/\lambda$ . Столкновение такой частицы с покоящимся электроном подобно соударению двух бильiardных шаров. После столкновения энергия налетающего шара уменьшается — часть ее передается другому шару, который ранее покоился. В соответствии с формулой Планка  $E = h\nu$  уменьшение энергии рентгеновского кванта эквивалентно уменьшению его частоты  $\nu$ , а следовательно, увеличению длины волны  $\lambda = c/\nu$ . Этот эффект как раз и наблюдается на опыте. Более того, чем больше угол рассеяния, тем большую долю энергии получает тело, которое первоначально покоилось. Именно этим объясняется зависимость длины волны рассеянного рентгеновского излучения от угла рассеяния.

Из теории Комптона вытекало, что наряду с рассеянными лучами Рентгена — квантами электромагнитного излучения — из атома должны вылетать также электроны «отдачи». Это предсказание сразу же подтвердилось в опытах с камерой Вильсона. Следы электронов отдачи были отчетливо видны на фотографиях.

В рамках принятого в XIX в. представления о чисто волновой природе электромагнитного излучения объяснить комптоновское рассеяние невозможно. С «классической» точки зрения электромагнитная волна должна воздействовать сразу на все электроны мишени. При этом доля энергии и импульса волны, передаваемая одному электрону, должна быть ничтожно малой. В комптоновском рассеянии, напротив, энергия и импульс передаются отдельному электрону, причем во вполне заметных количествах. Эксперимент показывает, что законы сохранения энергии и импульса выполняются не для волны «в целом», а в одиночном, так сказать, «элементарном» акте рассеяния, именно так, как это предписывает теория «бильiardных шаров».

Итак, в XIX в. было твердо установлено, что ряд явлений, включая интерференцию, дифракцию и поляризацию света, объясняется его волновыми свойствами. Столь же убедительно физики XX столетия показали, что в большом числе других явлений — фотоэлектрический эффект, комптоновское рассеяние и т. п. — световой луч ведет себя, как совокупность частиц с определенной энергией и импульсом. Возник так называемый корпускулярно-волновой «дуализм»: в одних процессах свет представляет собой волну, в других — частицу. Долгое время этот дуализм был совершенно непонятен. Только

после создания квантовой механики выяснилось, что «раздвоение личности» света закономерно и представляет собой проявление специфических свойств, присущих микромиру.

### 3. Частицы становятся волнами. Теория де Бройля

В 1919 г. герцог Луи де Бройль оставил военную службу и приступил к изучению физики. Для начинающего ученого он был уже не молод — ему исполнилось 27 лет. Сперва он работал в лаборатории своего старшего брата Мориса, а затем под руководством П. Ланжевена. В 1923 г. он опубликовал три короткие заметки в *Comptes Rendue de l'Academie des Sciences*, которые были посвящены исследованиям квантовой теории. В следующем году он завершил свою диссертацию на соискание ученой степени доктора философии. Еще через год диссертация была напечатана в журнале *Annales de Physique*.

Де Бройль не смущал корпускулярно-волновой дуализм. Его работа начиналась словами: «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». Автор рассуждал следующим образом. После классических работ Планка и Эйнштейна выяснилось, что в ряде случаев свет ведет себя как поток частиц — квантов с определенной энергией и импульсом. В этом плане квант света отличается от других частиц, скажем, от электрона, лишь тем, что его масса покоя равна нулю. Вряд ли такое различие можно считать принципиальным.

С другой стороны, свет представляет собой волновой процесс, который характеризуется частотой колебания электрического или магнитного поля в световой волне  $\nu$ , либо длиной этой волны  $\lambda = c/\nu$ . Де Бройль высказал смелое и далеко идущее предположение: раз уж корпускулярно-волновой дуализм имеет место для световых квантов, он должен быть справедлив и для всех других частиц. В частности, электрону должна соответствовать какая-то волна, характеризующаяся частотой колебаний  $\nu$  и длиной волны  $\lambda$ . Как и в случае фотона, величина  $\nu$  должна быть связана с энергией частицы  $E$  соотношением Планка  $E = h\nu$ .

В начале 20-х годов такое предположение было крайне смелым. На него отважились только два человека — де Бройль и независимо Эйнштейн. Де Бройль, однако, пошел дальше. Исходя из требований теории относительности, он нашел, что импульс частицы  $p$  должен выражаться через ее длину волны согласно равенству  $p = h/\lambda$ .

Соотношение де Бройля представляет особенный интерес в трех отношениях. Во-первых, оно узаконивает корпускулярно-волновой дуализм. Волновой процесс с длиной волны  $\lambda = h/p$  сопоставляется теперь всякому телу, движущемуся с импульсом  $p$  независимо от его природы. Во-вторых, из него видно, в каких явлениях волновые свойства существенны, а в каких нет. Для больших макроскопических объектов импульс  $p$ , как правило, очень велик. В этом случае длина волны  $\lambda$  мала — много меньше размеров самого тела, и волновые свойства становятся незаметными в соответствии с тем, что было сказано в предыдущем параграфе.

В-третьих, соотношение  $\lambda = h/p$  позволяет дать наглядную интерпретацию знаменитого условия Бора для нахождения электронных орбит в атоме водорода, о котором говорилось в § 3 главы 1:  $r \cdot p = nh/2\pi$  ( $n$  — номер орбиты,  $r$  — ее радиус,  $p$  — импульс электрона). Это условие эквивалентно требованию, чтобы на длине  $n$ -й орбиты уложилось ровно  $n$  длин волны де Бройля. Убедимся, что это действительно так. Длина  $n$ -й орбиты равна  $2\pi r$ . Приравнявая ее величине  $n\lambda$ , находим

$$2\pi r = n\lambda = nh/p,$$

что представляет собой как раз условие Бора.

До сих пор мы говорили о волнах де Бройля в чисто теоретическом аспекте. Не менее важным оказался тот факт, что гипотеза о наличии волновых свойств у электрона и других «частиц», высказанная сперва чисто умозрительно, может быть проверена на опыте, хотя сам де Бройль и не предлагал поставить какие-либо конкретные эксперименты. Здесь опять-таки следует иметь в виду, что длина волны де Бройля, как правило, весьма мала. Пучок электронов, ускоренных, например, до энергии 150 эВ (для этого им достаточно пройти между пластинами конденсатора, заряженного как раз до напряжения 150 В), характеризуется значением  $\lambda = 1 \text{ \AA} = 10^{-8} \text{ см}$ . Электромагнитное излучение с такой длиной волны попало бы в диапазон рентгеновских лучей. Дифракция

этих лучей наблюдается только при их прохождении через кристалл какого-либо вещества. Это и понятно, ибо расстояния, характерные для расположения атомов в кристаллической решетке, имеют как раз порядок  $10^{-8}$  см, а, как уже говорилось, волновые свойства, в частности дифракция, могут наблюдаться лишь в том случае, если размеры «оптического» прибора имеют тот же порядок величины, что и длина волны. Поэтому естественно было бы пропустить электроны через какой-либо кристалл и посмотреть, не возникает ли при этом дифракционная картина, похожая на ту, что наблюдается в рентгеновских лучах.

На самом деле история была более сложной. Интерференционные явления при прохождении электронов через кристалл никеля наблюдались еще до опубликования работы де Бройля. В 1921—1923 гг. американские физики Дэвиссон и Кунсман исследовали рассеяние электронов в тонких металлических пленках. Стекланный аппарат, использовавшийся в их эксперименте, однажды лопнул, и находившаяся в нем никелевая пластинка окислилась. Чтобы снять слой окиси никеля, ее прокалили в вакууме. Во время этой операции в пластинке появилось несколько крупных монокристаллов никеля. Когда ее снова поставили на пути пучка электронов, то на кривой, показывавшей зависимость интенсивности от угла рассеяния, появились характерные интерференционные максимумы и минимумы. Понять такую картину было тогда невозможно. Только в 1925 г., когда авторы послали свои результаты в Геттинген, М. Борн и Дж. Франк объяснили их как результат интерференции волн де Бройля.

Следующие эксперименты были поставлены Дэвиссоном и Джермером, а также независимо Г. П. Томсоном спустя несколько лет — в 1927 г. За это время была не только высказана гипотеза де Бройля, но и создана квантовая механика. Эксперимент ставился уже не вслепую, а с ясной целью — подтвердить существование волновых свойств у электрона.

В опыте Дэвиссона и Джермера измерялась интенсивность потока электронов, отраженных от монокристалла никеля. Наблюдалась отчетливая интерференционная картина. Зная зависимость интенсивности от угла рассеяния и параметры кристаллической решетки, можно было определить длину волны пучка электронов. Бы-



ло найдено, например, что электроны с энергией 54 эВ имеют длину волны 1,65 Å. В то же время по формуле де Бройля  $\lambda = h/p$  эта длина должна быть равна 1,67 Å. Столь же хорошее согласие было получено и при других энергиях.

В опытах Г. П. Томсона, сына знаменитого Дж. Дж. Томсона, было показано, что пучок электронов, прошедших через тонкую металлическую пленку и попавших потом на фотопластинку, демонстрирует типичную интерференционную картину, состоящую из набора концентрических кругов. Картина поразительно напоминала дифракцию рентгеновских лучей, пропущенных через такую же пленку, однако ее можно было разрушить, поместив всю установку в магнитное поле. Последнее действовало на заряженные электроны, отклоняя их в сторону. В случае незаряженных рентгеновских лучей магнитное поле, разумеется, ничего не меняет. Много позже М. Борн писал: «Замечателен исторический факт, что сыну человека, который установил корпускулярную природу катодных лучей, выпала судьба показать их волновую природу».

Интерференционные и дифракционные явления были найдены позднее не только для электронов, но и для других «частиц» — протонов, нейтронов, альфа-частиц и т. д. Развилась новая отрасль — электронная оптика, занимающаяся исследованием, построением и использованием в практических целях электронных пучков. Стало ясно, что корпускулярно-волновой дуализм является общим свойством всех микроскопических объектов. В одних явлениях они ведут себя как частицы, локализованные в пространстве, в других — проявляют черты нелокализованных волновых процессов. Отсюда следует, что классическая физика, противопоставляющая частицы и волны, непригодна для описания микромира. Тем самым теория де Бройля, которая исходила из корпускулярно-волнового дуализма, возведенного в принцип, подготовила почву для создания квантовой механики.

## Глава 3. ОСНОВЫ КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ

### 1. Проблемы

К началу 20-х годов физики накопили большое число фактов, указывавших на необходимость пересмотра

классических представлений при рассмотрении явлений микромира. Прежде всего исследование атомных спектров, завершившееся созданием теории Бора, показало, что для микромира характерна дискретность ряда величин, таких, как уровни энергии в атоме, частота света, излучаемого при переходе с одного уровня на другой, и т. п. Идея непрерывности физических величин типа энергии, характерная для физики XIX в., оказалась неправильной. Возник корпускулярно-волновой дуализм, который резко противоречил общепринятым в то время взглядам.

Де Бройль усугубил это противоречие, показав, что «частицам» также можно приписать волновые свойства. Появилась проблема — как согласовать противоположные утверждения, как объединить непротиворечивым образом волновое и корпускулярное описание одного и того же объекта, как увязать непрерывность волновых процессов с дискретностью ряда физических величин.

Ответом на поставленные вопросы явилось создание квантовой (иногда ее называют волновой) механики в работах В. Гейзенберга и Э. Шредингера 1925—1926 гг. В течение нескольких лет была завершена разработка математического аппарата новой теории, выяснена ее физическая структура и решено большое число конкретных задач атомной физики. Помимо Гейзенберга и Шредингера, в решении этой грандиозной задачи, революционизировавшем взгляды физиков на природу, участвовали также П. Дирак, М. Борн, В. Паули, П. Иордан, Н. Бор. Излагая историю квантовой механики, мы можем назвать здесь только несколько имен тех физиков, которые внесли в ее создание наиболее значимый и заметный вклад. Читателю следует иметь в виду, что вне этого узкого круга имен остались многие выдающиеся ученые, чьи работы, высказывания и замечания имели неоценимое значение для построения новой теории. Узкие рамки популярной брошюры не позволяют отдать должное каждому из них.

В дальнейшем изложении мы постараемся, следуя исторической последовательности событий, рассказать об идеях, из которых исходили те или иные ученые, о мучивших их проблемах и физическом содержании их результатов. При этом мы не будем пользоваться математическим аппаратом квантовой теории.

## 2. Вернер Гейзенберг строит квантовую теорию для наблюдаемых величин

В 1925—1927 гг. в физике произошел взрыв, ознаменовавшийся созданием и утверждением квантовой механики. Хронологически этот взрыв имеет своим началом работу В. Гейзенберга, напечатанную в журнале *Zeitschrift für Physik*. Статья предшествовала краткая аннотация: «В этой работе будет сделана попытка получить основу для квантотеоретической механики, базирующуюся исключительно на соотношениях между принципиально наблюдаемыми величинами».

Автору статьи было тогда всего 24 года. Несмотря на свою молодость, он был уже признан как подающий большие надежды теоретик и довольно близко был знаком с Нильсом Бором — создателем теории атома и главой знаменитой копенгагенской школы. Весну 1923 г. и зимний семестр 1924—1925 гг. Гейзенберг провел в Копенгагене. Позднее он вспоминал об этом времени: «С первых дней между Бором, его ближайшим сотрудником Крамерсом и мной установилось тесное научное сотрудничество. Беседы, которые мы вели вдвоем или втроем, скоро стали постоянными и имели для меня более важное значение, чем семинары и лекции».

С осени 1923 г. Гейзенберг работал в Геттингене ассистентом профессора М. Борна. Маленькая геттингенская группа сосредоточила свое внимание на проблемах атомной теории. В мае 1925 г. Гейзенберг заболел сенной лихорадкой и в июне уехал лечиться на остров Гельголанд в Балтийском море. Спокойная обстановка позволила ему сосредоточиться на работе и выполнить ряд необходимых расчетов. Результатом явилась знаменитая статья, с аннотации которой начинается этот параграф.

Гейзенберг полагал, что такие величины, как точное положение электрона в атоме, ненаблюдаемы. Теория Бора была непоследовательна именно по той причине, что она оперировала понятиями типа «орбита электрона». На самом деле их необходимо исключить, ограничив теорию установлением соотношений, в которые входят только наблюдаемые величины. Последними являются, например, энергетические уровни стационарных состояний, а также амплитуды перехода из одного такого состояния в другое, Гейзенберг писал: «Даже в слу-

чае простейших квантовомеханических проблем абсолютно невозможно думать о какой-либо справедливости классической механики. При таком состоянии дел представляется разумным полностью и сразу оставить надежду на наблюдение ненаблюдаемых величин (таких, как положение или время обращения электрона), принять, что частичное согласие известных квантовых правил с опытом основано в большей или меньшей степени на удаче, и попытаться сформулировать квантовотеоретическую механику, в которую, как и в классическую механику, входят только соотношения между наблюдаемыми величинами».

Свои идеи Гейзенберг проиллюстрировал на модельном, т. е. реально неосуществимом, примере, сосчитав энергетические уровни и вероятности переходов между ними для так называемого осциллятора, макроскопическим аналогом которого могут служить колебания пружинки с подвешенным к ней грузом. С помощью последовательно повторяющейся аналогии с соотношениями классической механики Гейзенбергу удалось получить (правильнее, вероятно, было бы сказать — угадать) систему алгебраических уравнений, в которую входили только амплитуды квантовых переходов в осцилляторе, а «ненаблюдаемые» величины отсутствовали.

В начале лета 1925 г. Гейзенберг передал свою работу Борну, который сразу понял важность развиваемых в ней идей и немедленно направил статью в журнал. В отсутствие Гейзенберга, продолжавшего лечение на морском побережье, Борн привлек к работе другого своего ученика, Петера Йордана. Вскоре появилась их совместная работа, где было показано, что систему уравнений Гейзенберга для амплитуд перехода удобно писать на давно известном математикам языке матриц. За этим последовал оживленный обмен письмами между Геттингеном и островом Гельголанд, закончившийся появлением новой статьи, подписанной уже тремя авторами: Борном, Гейзенбергом и Йорданом. Ее результаты, однако, в значительной степени были предвосхищены в опубликованной несколькими неделями раньше работе английского физика Поля Дирака, который ознакомился с теорией Гейзенберга, прослушав его лекцию, прочитанную в Англии зимой 1925—1926 гг. Интересно, что 23-летний стипендиат из Кембриджа в то время не знал математической теории матриц и, по сути, создал ее заново.

Перечисленные работы завершили построение математического фундамента новой квантовой теории в ее матричной версии. Гейзенберг, правда, был несколько удручен тем, что ему не удалось решить свою систему уравнений в реальном случае атома водорода и вывести спектр его энергетических уровней. Эта задача, однако, была вскоре решена его другом, 25-летним Вольфгангом Паули, который работал тогда в Гамбургском университете в качестве приват-доцента. 35 лет спустя Гейзенберг писал: «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 Вы смогли так быстро ее разработать». Постулаты Бора наконец-то получили свое квантовомеханическое обоснование. Одновременно исчезли сомнения в правильности новой теории.

Итак 1925 год ознаменовался небывалым успехом квантовой теории, которая в своей основе исходила из идеи прерывности и преуспела в описании стационарных состояний атома и переходов между ними. С другой стороны, записанная в своей первоначальной матричной форме, теория не могла еще пролить свет на проблему природы корпускулярно-волнового дуализма. Такой вопрос здесь вообще не мог быть поставлен, ибо из теории были изгнаны какие-либо траектории частиц; в ней фигурировали лишь довольно абстрактные «стационарные» состояния.

### **3. Эрвин Шредингер создает волновую механику**

Центральным событием следующего 1926 года явились пять статей Э. Шредингера, которые были напечатаны в журнале *Annalen der Physik*. Четыре из них были посвящены изложению новой теории, которую автор назвал волновой механикой. В пятой (хронологически третьей) устанавливалась полная эквивалентность этой теории с квантовой механикой Гейзенберга.

В отличие от большинства других создателей квантовой теории Шредингер был уже не молод. В 1926 г. ему исполнилось 39 лет. Он приобрел известность как создатель законченной теории цвета, в которой были установлены законы смешения цветов (1920). Уроженец

Австрии, Шредингер успел уже получить профессиуру в Штутгарте и Бреслау (Вроцлав). В середине 20-х годов он работал профессором физики в университете Цюриха. Представление о прерывности или каких-либо скачках в природе было ему антипатично. Шредингеру больше импонировала идея де Бройля об электро́не как о волновой частице. Эту идею, почти абстрактную в ее первоначальной форме, Шредингеру удалось воплотить в элегантный математический аппарат, который стал основным орудием в руках физиков при описании или истолковании явлений микромира.

Физический смысл теории Шредингера легче понять, если вспомнить о свойствах хорошо известного объекта — о колебаниях натянутой струны. Зажав струну в двух точках и заставив ее колебаться, можно получить звук вполне определенного тона, а также его высшие гармонические тоны, или обертоны, частота которых равна частоте основного тона, помноженной на целые числа.

Колебание с максимально возможной длиной волны  $\lambda$  получается, когда на длине струны  $L$  укладывается ровно половина волны, так что  $\lambda = 2L$ . Возможно колебание с длиной волны, в два раза меньшей  $\lambda = L$ , вообще с  $\lambda = 2L/n$ , где  $n$  — целое число.

С нашей точки зрения, колебание струны представляет особый интерес, ибо мы встречаемся здесь с непрерывным волновым процессом, характеризуемым, однако, дискретным набором параметров — допустимых значений частоты колебаний. Шредингер усмотрел здесь аналогию с атомными системами, где наблюдался дискретный набор энергетических уровней электронов на стационарных орбитах. Следуя идее де Бройля, Шредингер полагал, что сами электроны могут рассматриваться при этом как некоторые волновые процессы, подобные колебаниям струны.

Первая работа Шредингера начиналась словами: «В этом сообщении я прежде всего хотел бы показать на примере простейшего случая атома водорода (нерелятивистского и невозмущенного), что обычная процедура квантования может быть заменена другим условием, в котором более нет ни слова о «целых числах». Напротив, целочисленные величины появляются столь же естественным образом, как, например, целочисленность числа узлов вибрирующей струны. Новое представление поддается обобщению и очень близко затра-

гивает, как я полагаю, истинную сущность квантовых постулатов».

Следует сразу заметить, что в своей «волновой» идеологии работа Шредингера никоим образом не означала возврата к представлениям классической физики. Согласно последней только частота колебаний струны является прерывной величиной. Энергия колебаний, напротив, может быть какой угодно. Она определяется не частотой, а амплитудой колебаний, которая меняется непрерывно в зависимости от начальных условий. В волновой механике Шредингера дело обстоит совсем иначе. В силу квантового равенства  $E = h\nu$  энергия выступает в роли дискретной величины типа частоты. Она уже никак не связана с амплитудой волнового процесса, физический смысл которого сначала даже не был ясен. Кроме того, спектр частот в классической задаче о колебаниях струны представляет собой гармонический ряд: основной тон  $\nu_1$  и кратные ему обертоны  $\nu_N = N \cdot \nu_1$ . В задаче о стационарных состояниях атома спектр энергетических уровней имеет куда более сложную структуру.

Итак, Шредингер рассматривает электрон в атоме как некий волновой объект, свойства которого в каждой точке пространства с координатами  $x, y, z$  характеризуются некоторой «волновой» функцией  $\psi(x, y, z)$ , зависящей от этих координат. Волновая функция представляет собой аналог амплитуды колебаний струны. О ней мы еще будем говорить позже. Для  $\psi(x, y, z)$  Шредингер написал «волновое» уравнение, за которым прочно закрепилось его имя. В случае струны мы знаем, что дискретный спектр частот колебаний возникает по той причине, что оба ее конца закреплены и в колебаниях не участвуют; в результате на длине струны должно уложиться обязательно целое число полуволн. Иными словами, дискретный набор частот появляется в силу «граничного» условия. Аналогичным образом Шредингер стал выбирать из бесчисленного множества решений своего уравнения лишь такие, для которых волновая функция исчезает в точках, бесконечно удаленных от атомного ядра. Физический смысл этого условия очевиден: волновой процесс, о котором мы говорим, представляя свойства электрона, должен быть сосредоточен внутри атома; вдали от него он должен отсутствовать.

«Граничное» условие Шредингера позволило ему немедленно получить искомый результат. Оказалось, что в атоме водорода решение для  $\psi(x, y, z)$ , обращающееся в нуль на бесконечности, существует не всегда, а лишь тогда, когда энергия удовлетворяет определенному соотношению. Именно

$$E = -\frac{me^4}{2\hbar^2} \cdot \frac{1}{n^2},$$

где  $n$  — любое целое число. Это равенство в точности совпадает с условием Бора, полученным с помощью его знаменитых постулатов. Тем самым было показано, что волновая механика позволяет обойтись без таких постулатов, приводя к правильным результатам.

Волновая механика Шредингера была с самого начала сформулирована в ясной и весьма простой форме. По сей день производя квантовомеханические расчеты, физики в большинстве случаев предпочитают работать с дифференциальным уравнением Шредингера, а не с системой алгебраических уравнений Гейзенберга. Кроме того, уравнение Шредингера позволило дать квантовомеханическое описание процессов, меняющихся во времени. В рамках теории Гейзенберга это было затруднительно.

Шредингер знал о работах Гейзенберга, но они ему не нравились. В примечании к своей третьей статье он писал: «Моя теория была инспирирована работами Л. де Бройля и коротким, но бесконечно дальновидным замечанием А. 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»\*. Тем более неожиданным для цюрихского профессора, видимо, явился факт, что уровни энергии осциллятора, сосчитанные двумя способами — с помощью его волновой механики или квантовой механики Гейзенберга, — полностью совпали. Шре-

---

\* Позиция Гейзенберга, естественно, была противоположной. В одном из его писем, написанных летом 1926 г., говорилось: «Чем больше я размышляю о физической части теории Шредингера, тем ужаснее она мне кажется. Ведь Шредингер просто выбрасывает за борт все квантотеоретическое, т. е. фотоэлектрический эффект, ионизационные толчки Франка, опыты Штерна, Герлаха и т. д.».



дингер почувствовал, что этот факт не случаен. После непродолжительного, но интенсивного изучения проблемы он пришел к неожиданному выводу, что обе теории, по сути дела, тождественны. Можно построить математическое преобразование, которое переводит одну теорию в другую, и наоборот. Исходя в некотором смысле из противоположных исходных позиций, Гейзенберг и Шредингер получили одни и те же результаты. Названия их теорий «матричная механика» и «волновая механика» оказались синонимами. В некотором смысле работы этих замечательных физиков явили собой пример «корпускулярно-волнового» дуализма, ибо одна из них исходила из «корпускулярной» идеи о прерывности стационарных состояний, а другая была основана на представлении о чисто волновой непрерывной природе атомных объектов.

В этой связи уместно сказать, что даже в форме, предложенной Шредингером, новая теория еще не давала ответа на вопрос о природе корпускулярно-волновой двойственности атомных явлений. В то время как Гейзенберг, избавляясь от ненаблюдаемых величин, вообще отказался обсуждать вопрос о том, что представляет собой электрон — волну или частицу, Шредингер твердо стоял на волновой точке зрения. Он писал: «Что я сейчас подозреваю с большой определенностью — это следующее: реальное механическое явление описывается должным образом или изображается волновым процессом в координатном пространстве, а не движением точек, характеризующих положение в этом пространстве. Изучение движения точек, характеризующих положение, которое составляет предмет классической механики, является только приближенным подходом и как таковое имеет точно такое же оправдание, как геометрическая, или лучевая, оптика в сравнении с истинным оптическим процессом».

#### **4. Макс Борн говорит о волнах вероятности**

Перенесемся теперь снова в Геттинген. Если даже 39-летний Шредингер был «стариком» по сравнению с Гейзенбергом, Дираком, Паули или Иорданом, старшему из которых едва исполнилось 25 лет, то главу геттингенской школы теоретиков М. Борна можно было смело

считать патриархом. В 1926 г. ему исполнилось 44 года; он был тремя годами старше Бора и лишь двумя годами моложе Эйнштейна. Это, однако, не препятствовало ему с успехом участвовать в создании основ новой теории. Борн внес весомый вклад в разработку обеих ее версий. Именно он разъяснил математический смысл системы уравнений Гейзенберга, записав ее в «матричной» форме. Он же дал объяснение физического смысла волновой функции Шредингера.

Борну казалась неудовлетворительной чисто волновая интерпретация электрона, на которой настаивал Шредингер. Спустя много лет, он писал: «...В то время уже имелась возможность считать частицы посредством сцинтилляций или счетчиком Гейгера и фотографировать их следы с помощью камеры Вильсона... Мой институт и институт Джеймса Франка были расположены в одном здании Геттингенского университета. Каждый эксперимент Франка и его учеников по столкновению электронов казался мне новым доказательством корпускулярной природы электрона». С другой стороны, уравнение Шредингера явно описывало какой-то волновой процесс, амплитуда, т. е. «размах», которого в любой точке пространства с координатами  $x, y, z$  определялась значением в этой точке «волновой функции»  $\psi(x, y, z)$ .

Для объяснения столь двойственного «шизофренического» поведения атомных объектов явно требовался кардинальный пересмотр установившихся представлений.

Геттингенский профессор решился на чрезвычайно смелый шаг, который имел важные последствия как в физическом, так и в философском плане. В отличие от Шредингера, который полагал, что квадрат волновой функции (точнее квадрат ее абсолютной величины, так как эта функция представляется в каждой точке комплексным числом) определяет плотность «распределения» частицы, размазанной по пространству. Борн заявил, что такая величина характеризует плотность вероятности для точечной частицы попасть в данную область пространства. Таким образом, волновое уравнение Шредингера определяет не материальную волну, а волну вероятности. Как и полагается для вероятности, квадрат абсолютной величины волновой функции  $[\psi(x, y, z)]^2$  всегда положителен.

Можно заметить, что, подобно многим физикам первой половины XX в., Борн руководствовался идеей

Эйнштейна. Последний заметил как-то, что квадрат амплитуды оптической волны в каком-либо месте можно интерпретировать как плотность вероятности появиться в этом месте частицам света — фотонам. Эту идею Борн распространил на волну электронов, подчиняющуюся уравнению Шредингера.

В физике XIX в. понятие вероятности использовалось для описания только таких явлений, информация о которых была неполной. Согласно классической механике, созданной еще Галилеем и Ньютоном, движение всех частиц и предметов должно быть строго определенным, если только заданы все силы, действующие между телами, и в какой-то начальный момент времени известны их положения и скорости. Если отвлекаться от непреодолимых, но чисто вычислительных трудностей, связанных с необходимостью совместного решения огромного числа дифференциальных уравнений для сложной системы, состояние последней в любой момент времени может быть в принципе определено вполне однозначно. Именно из этого утверждения исходил Лаплас в своей концепции абсолютного детерминизма: поскольку в настоящий момент все тела имеют неизвестные, но вполне определенные положения и скорости, будущее мира предопределено заранее на все времена. Если бы мы были всемогущими математиками и могли решать систему невероятно большого числа уравнений, можно было бы заранее вычислить, чьей победой закончится следующий футбольный чемпионат мира и какую фразу произнесет первый человек, высадившийся на поверхности Марса.

На самом деле, разумеется, человеческие возможности ограничены, и строгое решение задачи о движении очень многих тел невозможно даже в рамках классической механики. Именно по этой причине при рассмотрении сложных систем приходится применять статистические методы, использующие понятие вероятности. В классической физике такие методы рассматриваются как вспомогательные, к ним прибегают лишь в тех случаях, когда исследователям не хватает знаний о подробностях того или иного процесса.

В квантовой механике согласно Борну ситуация совсем иная. Даже задав все начальные условия в какой-то момент времени, т. е. произведя в этот момент максимально полный опыт и полностью решив систему уравнений для волновых функций, мы смогли бы только

установить вероятность тех или иных процессов. Вероятность обнаружить электрон в данном месте, например, может оказаться в 5 раз больше вероятности попадания его в другую область пространства, однако предсказать его положение со стопроцентной достоверностью, как это было в классической механике, уже нельзя.

Это означает в первую очередь отказ от лапласовского детерминизма. В будущем теперь может реализоваться не одна определенная возможность, а любая из бесчисленного множества, какая именно — заранее неизвестно. Можно лишь говорить о том, какая возможность более вероятна, а какая менее. В этой связи приходится отказаться и от привычного представления об определенной и непрерывной траектории, по которой движется частица. Электрон в стационарном состоянии, например, может присутствовать в любом месте внутри атома, однако, как показывает вычисление, с наибольшей вероятностью он находится где-то около боровской орбиты. В этом смысле планетарная модель атома, созданная Резерфордом и Бором, представляет собой грубое приближение квантовой механики.

В своей знаменитой работе 1926 г. Борн писал: «Значения функции  $\psi$  определяют лишь вероятность того, что будет найдена определенная траектория... Движение частиц следует законам вероятности, но сама вероятность распространяется в соответствии с законом причинности». Слова «закон причинности» он снабдил примечанием: «Это подразумевает, что знание состояния во всех пространственных точках, в один момент определяет распределение состояния во все последующие времена».

Отказ от однозначно предсказуемого будущего и от понятия о траекториях противоречит привычным представлениям большинства людей, которые складываются на основе так называемого «жизненного опыта». Поэтому имеет смысл произвести мысленный опыт, из которого будет видно, почему при рассмотрении процессов, происходящих в микромире, неизбежно приходится говорить о волнах вероятности.

Пусть пучок электронов образуется в источнике и попадает на экран с двумя отверстиями 1 и 2; прошедшие сквозь них электроны регистрируются затем с помощью фотопластинки, расположенной позади экрана. Чтобы исключить какое бы то ни было воздействие одного электрона на другой, будем выпускать их из источ-

ника по очереди через произвольно большие интервалы времени. Тогда всякий раз через систему проходит только одна частица.

Если сперва закрыть отверстие 2, то электроны, прошедшие сквозь отверстие 1, попадут в некоторую точку фотопластинки. Собираясь там один за другим, они приведут к заметному почернению фотоэмульсии в точке, расположенной за отверстием 1. Если, напротив, закрыть отверстие 1, то на фотопластинке почернеет участок, расположенный за открытым отверстием 2. Поочередно открывая и закрывая каждое из отверстий, мы должны получить фотоснимок с двумя темными пятнами.

Откроем теперь сразу оба отверстия 1 и 2. Пуская электроны один за другим, будем фиксировать место попадания каждого из них на фотопластинку. Всякий раз электрон попадает в одно определенное место фотоэмульсии; в этом отношении он с несомненностью ведет себя как точечная частица. Казалось бы, что как частица он должен пройти через одно из двух открытых отверстий — либо через 1, либо через 2. Соответственно надо ожидать его попадания либо в точку, расположенную за отверстием 1, либо за отверстием 2, так что результатом прохождения достаточно большого числа частиц должна быть снова картина с двумя темными пятнами. На опыте, однако, возникает совсем иная интерференционная картина, подобная картине интерференции света от двух щелей. Это значит, что электрон «чувствует», открыто ли только одно отверстие или же оба сразу. Иными словами, он способен «проходить» сразу через оба отверстия 1 и 2. Последнее свойство естественно для волнового процесса, тогда как электрон, падая в строго определенное место пластинки, ведет себя как частица. Только пропустив через установку достаточно большое число электронов, мы смогли установить, что они «предпочитают» теперь попадать не в изолированные точки, а располагаются вдоль некоторых интерференционных полос.

Это может означать только одно: открыв отверстие 1 и 2 одно за другим или оба сразу, мы меняем вероятность попадания частиц в разные места фотопластинки. Как ни сопротивляйся, без понятия вероятности здесь не обойтись. С другой стороны, как только оно появилось в теории, все становится на свои места. Волна вероятности проходит по-разному через одно или через два

отверстия, и потому распределение вероятности зарегистрировать электрон на фотопластинке зависит от условий эксперимента. Все это не мешает отдельному электрону попадать в одну и только одну точку пластинки. Совокупность же большого числа частиц создает на ней распределение темных и светлых полос в строгом соответствии с законом распределения вероятности. Понятно, что, говоря о волне вероятности, мы не можем сохранить понятие непрерывной траектории частицы — волна проходит сразу через оба отверстия, а частица — только через одно. Сказать, через какое из двух открытых отверстий прошла частица, невозможно.

В этом опыте отчетливо проявилось отличие квантовой концепции вероятности от классической. Согласно последней вероятностное распределение возникает лишь по причине большого числа событий и их неупорядоченности. В квантовой механике приходится говорить уже о вероятности одиночных, элементарных событий. Даже прохождение отдельного электрона через монокристалл управляется законом вероятности.

Объяснив смысл волновой функции Шредингера, Борн получил возможность для исследования не только стационарных состояний в атоме и переходов между ними, но и процессов столкновения свободно движущихся частиц. Он показал, как можно вычислить вероятность рассеяния друг на друге двух атомных объектов с заданными скоростями. Это дало возможность распространить квантовую теорию на новый круг явлений. В дальнейшем исследование атомных столкновений превратилось в большую и разветвленную отрасль физики, и только квантовомеханическая теория, основанная на вероятностной трактовке волновой функции, позволила понять и успешно объяснить огромное количество экспериментальных фактов.

Согласно Борну рассеяние электрона на атоме подобно столкновению морской или речной волны со свайей, стоящей на ее пути. Падающая волна возбуждает вторичные круговые волны, которые расходятся от сваи во все стороны. Точно так же падающая электронная волна в результате столкновения частично преобразуется во вторичные сферические волны, амплитуда которых, характеризуемая волновой функцией  $\psi$ , различна для разных направлений. Квадрат этой амплитуды на боль-

шом расстоянии от рассеивающего центра определяет вероятность рассеяния в данном направлении. Здесь опять можно говорить только о вероятности.

В заключение этого параграфа приведем слова Борна, сказанные им еще в 1928 г.: «Было доказано утверждение, что свет состоит из частиц. Но и обратное утверждение, согласно которому свет состоит из волн, было совершенно точно доказано... Каждое явление интерференции дает нам такую же ясную, наглядную картину световых волн, какую являют собой волны на поверхности воды или звуковые колебания. Но одновременное существование корпускулы и волны для нашего наглядного представления кажется совершенно несовместимым. И все-таки, несмотря на это, теория должна как-то совместить эти два представления, хотя это можно сделать, разумеется, не в сфере наглядности, а в сфере объективных физических взаимосвязей, в которой только то имеет право на существование, что основано на взаимном согласии теоретических предсказаний и эксперимента наряду с логической непротиворечивостью. Эта проблема была решена путем критического пересмотра фундаментальных понятий подобно тому, как это сделала теория относительности».

## **5. Снова Гейзенберг: соотношение неопределенности**

Весной 1926 г. В. Гейзенберг переехал из Геттингена в Копенгаген, где работал почти до конца 1927 г. Ежедневно он встречался с Бором и обсуждал с ним проблемы атомной теории. Важнейшей темой их бесед была интерпретация квантовой механики. Позднее Гейзенберг писал: «Дискуссии о смысле квантовой теории лишь ненадолго были прерваны рождественскими каникулами. Вероятно, тот факт, что в середине февраля 1927 г. 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 квантотеоретической кинематики и механики» была напечатана в майском номере журнала *Zeitschrift für Physik* за 1927 г. Она позволила понять глубокую природу вероятностных закономерностей, присущих квантовой механике. Основное утверждение Гейзенберга состояло в том, что невозможно измерить одновременно положение и скорость частицы в пространстве. Чем точнее определяется положение, тем больше неопределенность в значении скорости и связанного с ней импульса. Чем лучше измеряется импульс, тем хуже может быть локализована область пространства, где находится частица.

Из основных положений квантовой механики Гейзенберг вывел свое знаменитое соотношение неопределенности, которое является количественной мерой сделанных выше утверждений. Если  $\Delta x$  — неточность, с какой определяется координата частицы вдоль оси  $x$ , а  $\Delta p_x$  — неопределенность в импульсе ее движения вдоль той же оси, то согласно Гейзенбергу произведение этих величин не может быть сколь угодно мало; оно всегда должна быть больше  $\hbar$  — постоянной Планка  $h$ , поделенной на  $2\pi$ ;

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \hbar = h/2\pi.$$

Такие же неравенства справедливы для неопределенностей в значении координаты и импульса по двум другим осям  $y$  и  $z$ :

$$\Delta y \cdot \Delta p_y \geq \hbar,$$

$$\Delta z \cdot \Delta p_z \geq \hbar.$$

Наконец, Гейзенберг получил еще одно неравенство, которое связывает  $\Delta E$  — погрешность в определении энергии какой-либо системы — с  $\Delta t$  — временем, потраченным на соответствующее измерение. Именно

$$\Delta t \cdot \Delta E \geq \hbar.$$

Все эти неравенства носят очень общий характер. Они справедливы для любой системы без какого-либо исключения. С другой стороны, они могут показаться весьма удивительными. Поэтому оставшаяся часть это-



го параграфа посвящена обсуждению их смысла. Рассматриваются следующие вопросы: 1. В какой связи находятся соотношения неопределенности и вероятностная интерпретация квантовой механики? 2. Почему эти соотношения вытекают из основ квантовой теории? 3. Каков их экспериментальный смысл? 4. Что можно сказать о взаимоотношении квантовой и классической физики? Разберем эти вопросы по очереди.

### *Статистическая интерпретация*

Соотношения Гейзенберга ограничивают применимость понятий классической физики к объектам из микромира. В классической механике, чтобы полностью определить движение тела во все времена, надо было задать его положение и скорость в какой-нибудь начальный момент времени. Согласно соотношению неопределенности сделать это невозможно. Положение и скорость не могут быть определены одновременно. Поэтому произвести «классическое» вычисление нельзя и представление о траектории частицы лишается смысла. Приходится говорить лишь о вероятности, с какой последняя находится в том или ином месте. Как писал Гейзенберг в своей статье, «эта неопределенность представляет собой подлинную основу для появления статистических связей в квантовой механике».

### *Мысленные опыты*

Покажем теперь на нескольких примерах, что соотношение неопределенности не мешает проведению физических экспериментов в микромире. Более того, оно правильно отражает ситуацию, возникающую в таких экспериментах вследствие корпускулярно-волнового дуализма.

Пусть мы хотим определить положение электрона. Для этого надо «посмотреть» на него в какой-то «супермикроскоп». «Посмотреть на электрон» означает, что его надо поставить на пути световых лучей и зарегистрировать отраженный или рассеянный сигнал. При этом положение электрона может быть определено тем точнее, чем короче длина световой волны (здесь даже надо

говорить не о видимом свете, а о рентгеновских или гамма-лучах). В самом деле, если длина волны превышает размеры предмета, то происходит явление дифракции. Свет «обтекает» такой предмет, «не замечая» его, подобно тому, как звуковая волна не чувствует стакана, стоящего на столе.

С другой стороны, чем короче длина волны света, тем больше частота и связанная с ней энергия. Коротковолновый квант, сталкиваясь с электроном, испытывает комптоновское рассеяние, передавая при этом электрону часть своего импульса. Таким образом, чем точнее определяется положение электрона, тем больший импульс ему сообщается. (Н. Бор показал, что при этом увеличивается не только сама величина импульса, передаваемого электрону, но и ее неопределенность). В пределе, когда электромагнитный квант имеет бесконечно малую длину волны и бесконечно большую энергию, электрон сможет получить какой угодно импульс. Последний становится совершенно неопределенным.

Другой пример, по сути, был рассмотрен в предыдущем параграфе, когда обсуждалось прохождение электронов через два отверстия или кристаллическую решетку. По интерференционной картине на фотопластинке можно найти длину волны электронов, а значит, и связанный с ней согласно де Бройлю импульс  $p = h/\lambda$ . При этом, однако, мы уже не можем сказать, через какое из двух отверстий или через какое именно место в кристалле прошла частица. Всякая попытка локализовать электрон — например, закрыв одно из отверстий в идеализированном опыте, — немедленно приводит к ликвидации интерференционной картины и невозможности определить импульс. Таким образом, соотношение неопределенности правильно отражает физическую ситуацию и в этом случае. По сути дела, оно представляет собой математическое выражение корпускулярно-волнового дуализма, а последний должен рассматриваться как экспериментальный факт.

Число примеров такого рода (первым их рассматривал сам Гейзенберг) можно увеличивать сколь угодно. Результат всегда одинаков. Чтобы точнее измерить положение частицы, надо сделать по возможности жесткую установку со строго фиксированным расположением всех деталей. Для измерения скорости, напротив, надо максимально «раскрепостить» установку, чтобы по отда-

че свободно движущейся части прибора судить о передаваемом ей импульсе, Совместить оба требования невозможно, и потому соотношения неопределенностей всегда выполняются.

**Подчеркнем** еще раз, что невозможность сколь угодно точного определения импульса и координаты в одно и то же время связана не с техническими трудностями, которые могут быть преодолены хотя бы в принципе, а имеет абсолютный характер закона природы, обнаруженного и подтвержденного на опыте и потому положенного в основу теории.

### *Соответствие с классической механикой*

В правой части соотношений неопределенности стоит постоянная Планка  $\hbar$ , которая имеет размерность «действия» (эрг·с). В макроскопических явлениях, где величина действия во много раз больше  $\hbar$ , этой величиной можно пренебречь. В этом случае соотношения неопределенности не накладывают практически никаких ограничений: точность измерения положения и скорости макроскопического тела всегда несравненно грубее величин, характерных для микромира. Определив положение и скорость со всей доступной точностью, мы все еще не вступаем в противоречие с неравенствами Гейзенберга.

Соотношения неопределенности не ограничивают наши возможности для получения информации о чем-то реально существующем. Они демонстрируют невозможность или ограниченность применения к микромиру понятий классической механики. В этом смысле соотношения неопределенности смыкаются с принципом дополненности, предложенным Н. Бором.

### **6. Нильс Бор и принцип дополненности**

Основатель и глава копенгагенской школы Н. Бор занимал выдающееся положение среди физиков всего мира. За исключением А. Эйнштейна, вряд ли кто-нибудь иной пользовался столь же безграничным уважением и авторитетом. Прославленный своей моделью атома, за которую он был награжден Нобелевской премией в 1922 г., Бор тем не менее отчетливо понимал ее недостатки. С тем большим энтузиазмом встретил он

рождение новой квантовой механики. Бор сосредоточил свои усилия на выяснении ее физических основ. Он не был удовлетворен ни чисто волновой интерпретацией Шредингера, ни абстрактно-корпускулярной позицией Гейзенберга. Отправным пунктом для него служил корпускулярно-волновой дуализм микромира, рассматривавшийся им как экспериментально доказанный факт. Как говорил ученик и друг Бора Л. Розенфельд, «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».

Итогом бесчисленных обсуждений, «изнурительных споров» (по словам Гейзенберга) и размышлений стала знаменитая концепция дополнительности, разработанная Бором в начале 1927 г. Подобно соотношениям неопределенности Гейзенберга, она была призвана разъяснить смысл статистических закономерностей квантовой механики. Если при этом Гейзенберга занимала, так сказать, физико-математическая сторона проблемы, то Бор интересовался, скорее, ее теоретико-познавательным аспектом. Обе теории были доведены до завершения в феврале—марте 1927 г., когда Бор проводил свой отпуск на лыжах в Норвегии, а Гейзенберг оставался в Копенгагене. Встретившись в начале весны, они сперва никак не могли согласовать свои взгляды. Позднее 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 неопределенности представляют собой лишь частный случай более общего принципа дополнительности».

Содержание концепции Бора в упрощенном виде можно представить посредством трех утверждений. 1. Вся информация о микромире, т. е. мире атомных и субатомных явлений, может быть получена лишь с помощью макроскопических тел — приборов, подчиняющихся законам классической физики. (В частности, имеются в виду приборы, которые позволяют с неограниченной точностью определять положение или импульс частицы.) Иными словами, все, происходящее в микромире, может быть воспринято лишь в терминах макромира.

2. Любое явление в микромире, которое мы исследуем, обязательно должно включать в себя взаимодействие с макроскопическим прибором. Иной «перевод» атомных явлений на несвойственный им язык понятий классической физики невозможен. 3. Такое взаимодействие, как следует из соотношений неопределенности или мысленных экспериментов типа тех, что обсуждались в предыдущем параграфе, подчиняется принципу дополнительности: с помощью каждого конкретного макроскопического прибора можно изучать либо одну сторону данного процесса в микромире, либо другую; скажем, либо координату, либо импульс частицы, но не обе величины одновременно. По мысли Бора, координаты и импульсы или же энергия и время подобны двум половинам предмета, который может быть сфотографирован либо спереди, либо сзади, но не сразу со всех сторон. Между двумя сторонами предмета не бывает «конфликта», они не «отвергают», а взаимно дополняют друг друга. То же самое можно сказать и о проявлениях корпускулярной или волновой природы частиц. О них можно сказать, что они никогда не приходят в противоречие: в одних явлениях частицы проявляют свои волновые свойства, в других — корпускулярные. Не может быть такого процесса, чтобы в нем присутствовали сразу оба типа «дополнительных» свойств. Это означало бы реальное внутреннее противоречие теории.

Обсуждая задачу о прохождении электрона через два отверстия, Бор отмечал, что экспериментальные «установки», в одной из которых открыто одно, а в другой — два отверстия, являются взаимно исключающими и потому взаимно дополняющими. В одном случае можно говорить о локализации частицы, прошедшей через единственное открытое отверстие, в другом — судить об ее импульсе, наблюдая интерференционную картину и определяя из нее длину волны электрона. Каждая установка может выполнять свою задачу — определять положение или скорость — сколь угодно точно, но только эти взаимно «дополнительные» величины не могут быть найдены одновременно в одном приборе. 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 оп-

ределена та экспериментальная установка, которая фиксирует это явление. Это Бор неоднократно подчеркивал».

Таким образом, было бы неправильно полагать, что невозможность одновременного определения координаты и импульса частицы связана с несовершенством наших знаний или измерительной аппаратуры. Причина совсем иная. Сама по себе микроскопическая частица, как правило, не обладает никакой координатой или импульсом, а характеризуется величиной другого типа — волновой функцией. Только в результате физического контакта — взаимодействия частицы с макроскопическим прибором появляется возможность говорить об ее положении или скорости. Нет ничего удивительного, что точность, с какой могут быть найдены эти или другие величины, зависит от вида макроскопического прибора. Соотношения неопределенности Гейзенберга устанавливают общие ограничения на такую точность, которые вытекают из квантовой теории и лежащего в ее основе корпускулярно-волнового дуализма. При этом волновая функция характеризует вероятность любого результата измерения или эксперимента. Поскольку она описывает свойства микроскопического объекта самого по себе, одна и та же функция позволяет судить о вероятности самых разных экспериментов, в которых определяются неодинаковые (в том числе и взаимно дополнительные) величины и которые производятся с помощью разных макроскопических приборов.

Принцип дополнительности составляет одну из важнейших концепций, на которых базируется современная интерпретация квантовой механики. Бор сделал также попытку расширить область применимости этого принципа, распространив его не только на процессы в микромире, но и на другие явления, которые изучаются, например, в биологии, психологии или этнографии. В таком аспекте принцип дополнительности приобретает общепhilosophическое значение. К этой попытке Бора можно относиться по-разному. Некоторым ученым она импонирует, другие считают ее неправомерной. Обсуждение ее, однако, выходит за рамки нашей брошюры.

## 7. «Драма идей»

Говоря об истории современной физики, А. Эйнштейн так-то сказал: «Это драма, драма идей». Эта фраза,

пожалуй, лучше всего характеризует реакцию на статистическую интерпретацию квантовой механики многих ее основоположников.

В частности, это относится к создателям волновой механики — де Бройлю и Шредингеру. В своих оригинальных работах они исходили из представления о чисто волновой природе электрона и других частиц, полагая, что можно построить последовательную теорию, выбросив из нее какие бы то ни было ссылки на дискретные свойства или точечность частиц. Де Бройль и Шредингер потратили много сил в попытках восстановить такую интерпретацию. К их сожалению, эти попытки оказались неудачными. Гейзенберг, например, вспоминал о дискуссии между Шредингером и Бором: «Он (Бор) пригласил Шредингера приехать в Копенгаген и просил его не только прочесть доклад по волновой механике, но и как можно дольше задержаться в Копенгагене, чтобы иметь достаточно времени для обсуждения интерпретации квантовой теории.

Дискуссия, насколько я помню, состоялась в Копенгагене в сентябре 1926 г. и произвела на меня особенно сильное впечатление благодаря тому, что в ней наиболее ярко проявилась личность самого Бора. Бор, бесспорно, был внимателен к людям и всегда шел им навстречу, но в дискуссии о самых важных для него проблемах познания он с фанатизмом и почти пугающей непреклонностью требовал от своих оппонентов ясного изложения всех доводов. Он вел продолжавшийся несколько часов спор и не уступил до тех пор, пока Шредингер не признал, что его толкование вовсе не объясняет закон Планка. Все попытки Шредингера уйти от этого горького признания были пункт за пунктом разбиты в бесконечных изнурительных дискуссиях.

Должно быть, из-за перенапряжения Шредингер заболел и по приглашению Бора остался на несколько дней в его доме. Сам Бор почти не отходил от постели Шредингера, непрерывно повторяя: «Но, Шредингер, вы все-таки должны согласиться...» Однажды, почти в отчаянии, Шредингер воскликнул: «Если мы собираемся сохранить эти проклятые квантовые скачки, то я вообще сожалею, что имел дело с атомной теорией!» «Зато остальные весьма признательны Вам за это, ведь благодаря Вам был сделан решающий шаг вперед в развитии атомной теории», — ответил Бор».

В 1952 г. Шредингер попытался возродить свою идею о том, что единственной реальностью в микромире являются волны, но снова потерпел неудачу. Похожая история произошла и с де Бройлем. Отчаявшись в своих попытках построить квантововолновую теорию без введения статистических понятий, он писал в начале 30-х годов: «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». Два десятилетия спустя де Бройль снова изменил свою позицию, воодушевившись работами Д. Бома, который в том же 1952 г. предложил «новую интерпретацию» квантовой механики. Последняя сводилась, по сути, к старой волновой концепции в несколько модифицированном виде. Дальнейшие усилия в этом направлении были довольно многочисленными, но мало успешными.

Помимо де Бройля и Шредингера, противниками статистической версии квантовой механики выступили люди, которые внесли наибольший вклад в ее зарождение и развитие, — М. Планк и А. Эйнштейн. Как отмечал М. Борн, «Планк всегда с осторожностью относился к революционным выводам, которые следовали из его собственного открытия». Что касается Эйнштейна, то величайший физик XX в. исходил из «критерия реальности» и до конца своих дней верил в возможность создания теории, описывающей действительные явления, а не только их вероятности. Однажды он даже заявил, полусерьезно: «Я не могу допустить, чтобы господь бог играл в кости».

Эйнштейн принимал квантовую механику с ее статистической интерпретацией и был убежден, что она согласуется с данными опыта. С другой стороны, он полагал, что эта теория не является полной, а представляет собой частный, предельный случай более полной и пока еще неизвестной теории. Он писал: «Надо признать, что новая физическая концепция обязана своим происхождением не взлету фантазии, а непреодолимой силе опыт-



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

Эйнштейн приложил немало усилий, чтобы продемонстрировать неполноту квантовой механики. Его главным оппонентом выступил Бор. Один за другим придумывал Эйнштейн мысленные эксперименты и парадоксы в поддержку своей точки зрения, и каждый раз Бор парировал его доводы. Аргументы обеих сторон отличались исключительным остроумием и глубиной, но они не столь популярны, чтобы приводить их на этих страницах. Первый акт этой драматической пьесы состоялся в Брюсселе осенью 1927 г. На Сольвеевский конгресс съехались величайшие физики-теоретики XX в.: Планк, Лоренц, Эйнштейн, Бор, де Бройль, Шредингер, Гейзенберг, Паули, Дирак, Крамерс и другие. Как писал позднее 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».

Спор между Эйнштейном и Бором возобновился на следующем Сольвеевском конгрессе через 3 года и продолжался в печати вплоть до 1935 г. В ходе дискуссии Бор смог ответить на все возражения своего выдающегося оппонента. Вспоминая об этом времени при своем последнем посещении Советского Союза, 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, но это не поколебало его собственного убеждения в неполноте квантовой механики. Оба великих физика стояли на противоположных отправных позициях: один исходил из представления о реально существующем микрообъекте вне какой-либо связи с «окружающей средой» в виде экспериментального прибора, другой настаивал на непредвзятом подходе к объективной реальности. Однажды Бор рассказал об одном из своих споров с Эйнштейном. Последний сказал: «Давайте твердо зафиксируем сначала то, что в Ваших представлениях я могу принять, с моей точки зрения, и, отправляясь с этой базы, мы будем логически рассуждать далее». Бор ответил: «Я считал бы предательством по отношению к науке, если бы я согласился зафиксировать твердо что-либо в этой новой области, где все еще не ясно».

Подавляющее большинство физиков нашего времени придерживается статистической интерпретации квантовой механики, основываясь на полном соответствии ее с опытом. В этом смысле можно говорить о победе «копенгагенской» точки зрения. Следует все же сказать, что многие выдающиеся сторонники последней допускали порой недостаточно точные, а то и просто неверные утверждения, вроде того, что в квантовой механике будто бы отсутствует причинность. В этой связи уместно напомнить слова Эйнштейна, сказанные им в 1936 г. «Если вы желаете узнать у физиков-теоретиков об их методе, то я вам советую руководствоваться следующим принципом: судите не по их словам, а по делам. Тому, кто творит, плоды собственной фантазии кажутся настолько необходимыми и естественными, что он сам считает их не образами мышления, а заданными реальностями и хочет, чтобы все так считали». Эта фраза в значительной степени объясняет и ту «драму идей», которая развернулась вокруг интерпретации квантовой механики,

несмотря на то, что ее физическое содержание и математические методы принимались всеми спорящими сторонами как соответствующие истине.

## Глава 4. КВАНТОВАЯ ТЕОРИЯ АТОМА

### 1. Квантовые числа электрона в атоме

Многообразие атомных структур и атомных спектров не исчерпывается, разумеется, простейшим атомом водорода, в котором, помимо ядра, присутствует всего один электрон. Атомы с большим числом валентных электронов, как правило, обладают сложными оптическими (а также ультрафиолетовыми и инфракрасными) спектрами. Они представляют собой систему многих тел (ядро и электроны), попарно взаимодействующих друг с другом. Задача о движении системы такого рода не поддается точному количественному анализу даже в рамках классической механики. Получить точное решение квантовомеханической задачи еще труднее. Проблема строения атома, однако, заключалась, скорее, не в точном решении системы уравнений движения, а в необходимости понять основные качественные закономерности в строении сложных атомных систем, в частности объяснить периодические свойства атомов в таблице Менделеева. Задача о разработке приближенных методов для расчета количественных свойств атомных систем, подобных методам классической задачи многих тел, стояла уже на втором плане.

Основы квантовой теории атома были заложены еще в 1913 г., когда Бор ввел представление о стационарных состояниях электрона в атоме. Согласно теории Бора, развитой Зоммерфельдом, каждый электрон в атоме обращается по замкнутой орбите. Всякую орбиту можно характеризовать тремя целыми числами  $n$ ,  $l$  и  $m$ , которые принято называть «квантовыми числами». Их целочисленность отражает «квантовый», т. е. прерывный, характер свойств атомных объектов. Их количество — три — связано с трехмерностью нашего пространства (о спиновом квантовом числе  $\sigma$  мы поговорим несколько позже).

Квантовым числам  $n$ ,  $l$  и  $m$  можно дать как физическую, так и геометрическую интерпретацию (см. табли-

Таблица квантовых чисел

Название	Определяет	Символ	Принимает значение	Полное число значений
Главное квантовое число	Размеры орбиты	$n$	1, 2, 3...	$\infty$
Орбитальное квантовое число	Вытянутость орбиты	$l$	0, 1... $n-1$	$n$
Магнитное квантовое число	Ориентацию орбиты в пространстве	$m$	$-l, -l+1, \dots, l-1, l$	$2l+1$
Спиновое число	Ориентацию спина	$\sigma$	$-1/2, +1/2$	2

цу). Начнем с последней. Для водородоподобного атома с одним валентным электроном орбиты имеют вид окружностей или эллипсов. Главное квантовое число  $n$  определяет «размеры» орбиты — ее радиус или большую полуось (в случае эллипса). Орбитальное число  $l$  характеризует вытянутость орбиты. Чем ближе  $l$  к нулю, тем больше форма орбиты приближается к круговой. Наконец, магнитное квантовое число определяет ориентацию электронной орбиты в пространстве. Угол  $\Theta$  между нормалью к плоскости орбиты и направлением какого-либо внешнего поля, например магнитного, связан с  $m$  равенством

$$\cos \Theta = \frac{m}{l}.$$

Таким образом, величина угла  $\Theta$  «квантована» — она меняется скачком при изменении  $m$ , которое обязано оставаться целым числом. Для любого угла  $\Theta$  значение  $\cos \Theta$  не может быть больше  $+1$  или меньше  $-1$ . Это значит, что

$$-1 \leq \frac{m}{l} \leq 1,$$

так что магнитное число  $m$  меняется в пределах от  $-l$  до  $+l$ :

$$m = l, l-1, l-2, \dots, -l.$$

Нетрудно сосчитать, что при заданном  $l$  полное число всех возможных значений  $m$  равно  $2l+1$ .

Чтобы покончить с арифметикой квантовых чисел,

заметим, что главное квантовое число  $n$  всегда должно быть больше орбитального числа  $l$ :

$$n \geq l + 1.$$

Иными словами, если  $n$  задано, то  $l$  может принимать значения

$$l = 0, 1, 2 \dots n-1.$$

Отсюда нетрудно подсчитать полное число всех возможных состояний с различными  $l$  и  $m$  при фиксированном  $n$ : оно равно в точности  $n^2$ .

Рассмотренная геометрическая интерпретация базируется на представлении об определенных орбитах электрона в атоме, которое лежит в основе теории Бора. С позиций квантовой механики такое представление является упрощенным и слишком «классическим». Понятие орбиты имеет здесь только приближенный смысл, поскольку оно характеризует уже не «истинную траекторию» частицы, а геометрическое место точек, около которых последняя может быть обнаружена с наибольшей вероятностью. В этой связи целесообразно перейти от геометрической трактовки  $n$ ,  $l$  и  $m$  к выяснению их непосредственного физического смысла. Оказывается, что эти квантовые числа определяют величину энергии стационарного состояния  $E$ , момент количества движения (или «механический» момент)  $M$  и его проекцию  $M_z$  на выбранную координатную ось  $z$ . При наличии внешнего электрического или магнитного поля эту ось удобно выбрать так, чтобы она была направлена по напряженности поля. В отсутствие внешних полей ось  $z$  может быть направлена совершенно произвольно.

Энергия частицы в атоме определяется с помощью уравнения Шредингера. Как уже отмечалось в предыдущей главе, она не может быть какой угодно, а принимает дискретный набор значений. Скажем, в атоме водорода энергия электрона равна

$$E = -\frac{me^4}{2\hbar^2} \cdot \frac{1}{n^2},$$

где  $n$  — главное квантовое число, которое должно быть целым и положительным ( $n = 1, 2, 3 \dots$ ). В это равенство не входят ни  $l$ , ни  $m$ . Отсутствие  $l$  является здесь в какой-то мере случайным. В общем случае энергия зависит от момента количества движения и связанного с ним числа  $l$ . Что касается зависимости от магнитного числа  $m$ , то к ней мы вернемся несколько позднее. Сперва скажем несколько слов о величинах  $M$  и  $M_z$ .

Момент количества движения  $M$  является одной из важнейших характеристик вращающейся частицы. Этот момент тем больше, чем больше частота обращения  $\nu$ ; следовательно, он характеризует скорость движения частицы по орбите. В классической механике эта величина может быть какой угодно, однако согласно квантовой теории для нее допустим лишь дискретный набор значений, равных постоянной Планка  $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ , умноженной на целое число  $l$ :  $M = l\hbar$ . Как было отмечено ранее, именно это предположение позволило Бору получить правильный спектр энергий в атоме водорода.

В квантовой механике говорить об орбите электрона можно только в приближенном смысле, однако понятие момента количества движения как точной характеристики данного состояния сохраняет смысл. Как и в модели Бора, этот момент равен  $l\hbar$ , где  $l$  — целое число. Кроме того, проекция этого момента на какое-либо направление, скажем, на направление магнитного поля, также равна величине  $\hbar$ , умноженной на целое число  $m$ :  $M_z = m\hbar$ . Проекция механического момента на ось  $z$  равна  $M_z = M \cos \Theta$ .

Если внешнего поля (электрического или магнитного) нет, то все направления в пространстве равноправны и выбор оси  $z$  произволен. Поскольку значение  $m$  зависит от выбора оси  $z$  — оно связано с величиной  $\cos \Theta$ , — ясно, что в этом случае энергия не может зависеть от магнитного числа  $m$ . Каждый энергетический уровень определяется величиной квантовых чисел  $n$  и  $l$  каким бы ни было  $m$ . Зависимость энергии от  $m$  может иметь место лишь в присутствии внешнего поля.

Классификация электронных состояний с помощью трех квантовых чисел позволила объяснить вид ряда атомных спектров, однако вскоре появились и расхождения между предписаниями теории и экспериментом. Для преодоления таких расхождений пришлось ввести четвертое квантовое число — спин, которое характеризует собственный механический момент электронов, не связанный с его движением по орбите атома.

## 2. Спин

На самых подступах к XX в. голландский физик Петер Зеeman начал изучать оптические спектры атомов,

помещенных в сильное магнитное поле. Его первые опыты были неудачными, он не обнаружил какого-либо влияния магнитного поля на спектр. Узнав, однако, что проблема влияния магнитного поля на световое излучение волновала еще Фарадея, который был для него образцом и непререкаемым авторитетом, Зееман возобновил свои исследования, существенно увеличив напряженность магнитных полей и чувствительность спектроскопа. Наблюдая за светом, который испускался атомами кадмия в магнитном поле, он обнаружил систематическое изменение в картине спектральных линий — каждая линия расщеплялась на две или три. К объяснению этого явления Зееман привлек своего знаменитого соотечественника — Лоренца, который, воспользовавшись моделью атома как классического осциллятора, рассчитал зависимость разности частот  $\Delta\nu$ , т. е. величины, на которые расходятся — расщепляются спектральные линии, от напряженности магнитного поля  $H$ . Согласно Лоренцу каждая спектральная линия должна расщепиться на три. Для одной из них частота не меняется; частота двух других либо увеличивается, либо уменьшается на величину

$$\Delta\nu = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{eH}{mc} .$$

Дальнейшие экспериментальные исследования привели, однако, к более сложной картине. Спектральные линии расщеплялись, как правило, не на три компоненты, а на большее число линий. Выбранная в первоначальных экспериментах Зеемана линия кадмия была счастливым, с «теоретической» точки зрения, исключением. Тем не менее такое исключение из правила получило название «нормального» эффекта Зеемана, а все остальные случаи объединили названием «аномальный» эффект Зеемана. Объяснение аномального эффекта встретило целый ряд трудностей, преодолеть которые не удавалось ни в рамках классической теории, ни квантовой теории Бора. Правда, проанализировав огромный материал наблюдений, Ланде нашел в 1922 г. довольно простые и изящные законы, которым подчинялось аномальное расщепление спектральных линий, однако их физический смысл был непонятен. Загадка аномального эффекта Зеемана в течение двух десятилетий продолжала волновать физиков.

Занимался ею и Вольфганг Паули, которого справед-

ливо причисляют к группе выдающихся физиков XX в.— основоположников квантовой механики. В. Паули родился в Австрии в 1900 г., до 1928 г. работал в Германии, а затем до конца жизни заведовал кафедрой теоретической физики Высшей технической школы в Цюрихе. Мировую известность он приобрел уже в 1921 г., когда в энциклопедии математических наук вышла в свет написанная им знаменитая глава о теории относительности, ставшая на несколько десятилетий одним из наиболее ценных пособий в этой области. В 1922 г. Паули приехал в Данию в Институт Нильса Бора. К этому времени он уже успел опубликовать несколько работ, посвященных строению атомов и молекул. В Копенгагене Паули начал серьезно заниматься проблемой аномального эффекта Зеемана. Эта работа продолжалась и после его отъезда в Гамбург в 1923 г. Сохранилось его собственное воспоминание о тех временах. Спустя почти четверть века Паули писал: «Коллега, встретивший меня, когда я бесцельно бродил по прекрасным улицам Копенгагена, дружески сказал: «Вы выглядите очень несчастным». На что я пылко ответил: «Как может человек выглядеть счастливым, если он думает об аномальном эффекте Зеемана?»

Прогулки и размышления Паули оказались плодотворными. В конце 1924 г. он пришел к выводу, что можно свести концы с концами, если приписать электрону еще одно квантовое число  $\sigma$ , которое принимает всего два значения, равные  $+1/2$  и  $-1/2$ . В отличие от трех остальных квантовых чисел новое число не было подкреплено какой-либо механической моделью. Паули писал: «Согласно этой точке зрения, дублетная структура спектров щелочных металлов, а также отступление от теоремы Лармора (имеется в виду аномальный эффект Зеемана. — (Прим. авт.) возникают вследствие характерной двузначности квантовых свойств электрона, которую нельзя описать классически». Двузначность электрона эквивалентна здесь тому, что  $\sigma$  может принимать два значения.

Это число согласно теории Паули должно вместе с магнитным квантовым числом  $m$  входить в формулы для  $M_z$  и  $E_{\text{магн}}$ . Энергии заряженной частицы, вращающейся в магнитном поле  $H$ . Именно

$$M_z = (m + \sigma) \hbar, \quad E_{\text{магн}} = - \frac{e\hbar}{2m_e c} \cdot H \cdot (m + 2\sigma).$$



С помощью этих равенств Паули смог полностью объяснить эффект Зеемана как в сильных, так и в слабых полях. Весьма существенно при этом, что в формуле для  $M_z$  стоит  $m + \sigma$ , тогда как выражение для  $E_{\text{магн}}$  содержит  $m + 2\sigma$ . Согласно последнему равенству при наличии магнитного поля частота света, испускаемого атомом, в процессе перехода из некоторого начального в конечное состояние меняется на величину

$$\begin{aligned}\Delta\nu &= \frac{E_{\text{магн,нач}} - E_{\text{магн,кон}}}{h} = \\ &= \frac{eH}{4\pi mc} \cdot [(m + \sigma)_{\text{кон}} - (m + \sigma)_{\text{нач}} + \sigma_{\text{кон}} - \sigma_{\text{нач}}].\end{aligned}$$

В соответствии с выведенным эмпирически «правилом отбора» при испускании светового кванта величина  $M_z/\hbar = m + \sigma$  должна меняться либо на  $\pm 1$ , либо на 0. Поэтому первые два члена в квадратных скобках ответственны за «нормальное» триплетное расщепление спектральных линий в магнитном поле. Аномальный эффект Зеемана связан с присутствием дополнительного слагаемого  $\sigma_{\text{кон}} - \sigma_{\text{нач}}$ . Произведя несколько математических выкладок, Паули получил формулу для «аномального» расщепления линий, которая полностью совпала с соотношением Ланде, найденным чисто эмпирически.

Для полного торжества теории недоставало только одного — надо было еще установить физический смысл нового квантового числа  $\sigma$  и связанного с ним механического момента  $\sigma\hbar$ . Спустя почти половину века эта задача может показаться не такой уж трудной. Действительно, в равенстве  $M_z = m\hbar + \sigma\hbar$  величина  $m\hbar$  представляет собой проекцию на ось  $z$  «орбитального» момента количества движения, который можно представить себе как результат перемещения электрона по замкнутой траектории — орбите. Эта величина складывается с выражением  $\sigma\hbar$ , которое не связано с движением электрона по орбите и потому может рассматриваться как дополнительный вклад в момент количества движения, присущий собственно электрону. Такой момент мог бы возникнуть, если бы электрон представлял собой протяженное тело (скажем, шарик), вращающееся вокруг своей оси.

В октябре 1925 г. молодые голландские физики Уленбек и Гаудсмит предложили именно такую интерпрета-

цию четвертого квантового числа Паули. Собственный механический момент электрона они называли спином (от английского to spin — вращать).

Любопытно, что Паули не понравилась мысль о вращающемся электро́не. Впервые он услышал о ней еще в начале 1925 г. от двадцатилетнего американца Р. Кронига, пришедшего к этой идее несколькими месяцами раньше Уленбека и Гаудсмита. Модель вращающегося шарика представлялась Паули слишком «классической». Кроме того, точки, расположенные на поверхности такого шарика, должны двигаться со скоростью, превышающей скорость света, в противоречии с теорией относительности. Паули, конечно, в известном смысле был прав. Квантовая механика позволила позднее получить те же результаты, не прибегая к столь сомнительным модельным представлениям. Тем не менее утверждение, что электрон обладает собственным механическим моментом — спином, равным  $\frac{1}{2}\hbar$ , и что связанный со спином магнитный момент  $M$  равняется «магнетону Бора»  $e\hbar/2m_e c$  (это следует из выражения для  $E_{\text{магн}} = -\mu H$ ), является правильным.

Не получив одобрения от Паули и Гейзенберга, Крониг свою работу не опубликовал. Уленбек и Гаудсмит, напротив, были энергично поддержаны своим учителем известным голландским физиком Паулем Эренфестом, который представил их статью в журнал *Naturwissenschaften*. Когда молодые теоретики усомнились в правильности своей работы и сказали об этом Эренфесту, тот ответил: «Я уже давно отправил ваше письмо в печать; вы оба достаточно молоды, чтобы позволить себе сделать глупость». И Паули и Эренфест были по-своему правы, но в итоге именно Уленбек и Гаудсмит оказались первыми физиками, публично выдвинувшими гипотезу о спине электрона.

Представление о спине позволило также понять, почему даже при отсутствии внешних полей спектральные линии щелочных металлов (Li, Na, K, Rb, Cs), изучаемые с помощью очень чувствительных спектрометров, оказываются расщепленными на две компоненты, так называемые дублеты. Такое явление принято называть тонкой структурой спектральных линий. Оно объясняется взаимодействием двух моментов, создаваемых орбитальным движением электрона и его спином. В зависи-

мости от того параллельны эти моменты или антипараллельны, они либо отталкиваются, либо притягиваются. Соответственно энергия стационарного состояния имеет не одно, а два близких значения. Это и приводит к дублетному расщеплению спектральных линий. В феврале 1926 г. английскому физiku Томасу, работавшему тогда в Копенгагене, удалось получить выражение для такого расщепления, правильное в количественном отношении. После этого Паули, наконец, согласился со справедливостью гипотезы о спине электрона.

Позднее (в 1927 г.) он же сам показал, как выглядит волновое уравнение Шредингера, лежащее в основе квантовой механики, когда частица обладает спином. Еще через год П. Дирак написал для электрона волновое уравнение, удовлетворяющее требованиям теории относительности. Из этого уравнения непосредственно вытекало, что электрон обладает спиновыми свойствами, которые до того вводились как постулаты.

В настоящее время мы знаем, что бесспиновая частица, точнее, частица со спином, равным нулю, представляет довольно редкое явление в мире элементарных частиц. Помимо электронов, протонов и нейтронов со спином  $1/2$  (в единицах  $\hbar$ ), обнаружено много разных частиц со спином, равным как половине, так и другим числам:  $1$ ,  $3/2$ ,  $2$ ,  $5/2$  и т. д.

### **3. Принцип запрета и Периодическая таблица элементов Менделеева**

Химикам давно известно, что свойства многих элементов подобны. Например, He, Ne, Ar, Kr, Xe представляют собой благородные газы и весьма неохотно участвуют в химических реакциях. Li, Na, K, Rb, Cs являются щелочными металлами с одной валентностью. Сходными свойствами обладают галогены F, Cl, Br, I. Число подобных примеров можно увеличить. Немногим более ста лет назад, в 1869 г., великий русский химик Менделеев обнаружил, что отмеченное подобие не случайно, а связано с определенной периодичностью в свойствах химических элементов. По мере увеличения атомного веса такие свойства меняются «циклически» — через некоторое время они повторяются.

К своим результатам Менделеев пришел чисто эмпирически на основе изучения большого эксперименталь-

ного материала. Встала задача понять, чем обусловлена найденная им закономерность.

Первый шаг в этом направлении был сделан в лаборатории Резерфорда во втором десятилетии XX в. Было выяснено, что периодичность элементов связана не с их атомным весом, как думал Менделеев, а с величиной заряда ядра, которая, будучи поделена на элементарный заряд электрона или протона, равна числу атомных электронов. Менделеев был прав постольку, поскольку атомный вес стабильных изотопов для каждого химического элемента монотонно возрастает с увеличением заряда ядра и числа электронов. Поэтому почти безразлично, как располагать элементы — по числу электронов или по атомному весу.

Следующим этапом явилась работа Н. Бора, опубликованная в 1923 г. Бор полагал, что электроны в атоме обращаются вокруг центрального ядра по замкнутым орбитам. Форма каждой орбиты и ее удаление от ядра характеризуются квантовыми числами  $l$  и  $n$ . Химические свойства атома зависят большей частью лишь от распределения электронов на орбитах с наибольшим значением главного квантового числа  $n$ , которые больше других удалены от ядра и потому связаны с ним менее прочно. Такие электроны гораздо легче отвечают на внешние возмущения, чем электроны на «внутренних» орбитах. Периодичность, открытая Менделеевым, связана с тем, что определенная совокупность электронных орбит представляет собой «замкнутую оболочку». Такая оболочка представляет собой сферически симметричное и весьма устойчивое в химическом плане образование. Атомы с полностью заполненными оболочками — инертные газы — очень слабо реагируют на внешние возмущения. В других атомах заполненные оболочки эффективно уменьшают, как говорят, экранируют, положительный заряд центрального ядра. В химических реакциях участвуют только электроны, находящиеся на еще незаполненной оболочке. Свойства атомов с одинаковым числом таких электронов оказываются подобными. Так, все атомы с одним электроном сверх заполненной оболочки — щелочные металлы — одновалентны. Атомы с двумя «лишними» электронами — щелочноземельные металлы Be, Mg, Ca, Sr, Ba — двухвалентны и т. д.

Из таблицы Менделеева видно, что в атомах благо-

родных газов He, Ne, Ar, Kr, Xe, Rn имеется соответственно 2, 10, 18, 36, 54, 86 электронов. Каждый такой атом отличается от предыдущего заполнением новой оболочки. Отсюда легко найти число электронов в замкнутых оболочках. Оно равно соответственно 2, 8, 8, 18, 18, 32, 32. Ридберг заметил, что этот ряд чисел описывается простой формулой  $2N^2$ , где  $N$  — целое число, равное по очереди 1, 2, 3, 4. Такая закономерность, как мы еще увидим, является весьма знаменательной.

В развитом Бором представлении об оболочечном строении атома было одно нечеткое место. Надо было делать специальное предположение, что на низших орбитах атома может находиться лишь ограниченное число электронов. В противном случае все электроны «свалились» бы на самую низкую орбиту, наиболее выгодную энергетически, а более высокие остались бы пустыми.

Таково было положение, когда на сцену снова выступил Паули. Он выдвинул свой знаменитый принцип запрета. В январе 1925 г. буквально через месяц после того как он пришел к выводу о наличии у электрона четвертого квантового числа, названного впоследствии спином, Паули написал новую статью в журнал *Zeitschrift für Physik*. В ней утверждалось: «В атоме не может существовать двух или больше эквивалентных электронов, для которых значения всех квантовых чисел (в современных обозначениях  $n, l, m, \sigma$ . — Прим. авт.) в магнитном поле одинаковы. Если в атоме находится электрон, для которого все эти числа имеют определенное значение, то это состояние «занято».

Принцип запрета Паули делает понятной оболочечную структуру атома. Если все состояния на низших орбитах уже заполнены электронами, то новой частице не остается ничего другого, как занять свободное место на более высокой орбите. Более того, этот принцип позволял понять правило Ридберга для числа электронов в заполненной оболочке атома. При заданном значении главного квантового числа  $n$  полное количество всех допустимых значений орбитального числа  $l$  и магнитного числа  $m$  равно  $n^2$ . Каждое состояние электрона в атоме, однако, характеризуется не только величинами  $n, l, m$ , но и значением четвертого спинового квантового числа  $\sigma$ . Последнее двузначно: оно принимает значения  $\sigma = \pm 1/2$

либо  $\sigma = -1/2$ . Поэтому полное число состояний электрона при заданном числе  $n$  и произвольных  $l, m, \sigma$  равно  $2n^2$ . Это в точности совпадает с выражением Ридберга для числа электронов в заполненной атомной оболочке, если положить  $N = n$ .

#### 4. Достижения и пределы применимости квантовой механики

Построение основ квантовой механики было завершено к концу 20-х годов. Впоследствии эта теория использовалась главным образом уже как готовый аппарат для решения конкретных проблем микромира. Как чаще всего бывает в подобных ситуациях, развитие происходило по принципу «от простого к сложному». Начав с описания простейшего из атомов — водорода, квантовая механика довольно быстро распространилась на широкий круг гораздо более сложных явлений. Мы уже говорили о квантовомеханическом понимании атомных спектров и периодической таблицы Менделеева. Перечислим по необходимости кратко некоторые из других результатов, полученных с ее помощью.

1. Английскому физику Хартри и советскому ученому Фоку удалось разработать приближенные методы для расчета свойств многоэлектронных систем. Это позволило произвести количественное вычисление энергетических уровней в сложных атомах с большим числом электронов, а также положения и интенсивности спектральных линий.

2. Гейтлер и Лондон в 1927 г. развили квантовомеханическую теорию химической связи. На этом пути удалось понять строение молекул, характер их оптических и инфракрасных спектров, вычислить скорость ряда химических реакций.

3. Квантовая теория твердых тел превратилась в самостоятельное научное направление с большим числом подразделений. С единой точки зрения было понято строение проводников электрического тока, диэлектриков и полупроводников, кристаллов и аморфных тел. Гейзенбергу удалось объяснить явление ферромагнетизма как результат квантовомеханического взаимодействия спинов электронов, вследствие которого они выстраиваются параллельно и их магнитные моменты скла-

дываются друг с другом. Получили свое объяснение также явления сверхпроводимости и сверхтекучести в некоторых материалах при низких температурах.

4. В самостоятельный раздел выделилась и квантовомеханическая теория атомных столкновений. Удалось понять основные характеристики и рассчитать вероятность огромного числа процессов, происходящих при соударениях электронов, атомов и молекул.

5. Квантовая теория электромагнитного излучения позволила создать источники света совершенно нового типа — лазеры. В этих источниках возникает чрезвычайно узкий и интенсивный пучок света со строго определенной частотой и длиной волны.

6. На основе квантовой механики построена теория атомного ядра и ядерных превращений. Лишь с ее помощью, например, было объяснено явление альфа-распада (Гамов, 1928), остававшееся непонятным с теоретической точки зрения свыше тридцати лет.

7. В 1928 г. Дирак написал свое знаменитое уравнение для электрона, представлявшее собой модификацию волнового уравнения Шредингера с учетом требований теории относительности. Уравнение Дирака позволило объяснить тонкую структуру — раздвоение спектральных линий в спектре водородного атома. Кроме того, оно обладало двумя замечательными свойствами. Во-первых, из него с необходимостью вытекало наличие у электрона спина как раз с такими свойствами, какие требовались в теории Паули. Во-вторых, анализ этого уравнения привел к предсказанию античастиц, первая из которых, позитрон, была обнаружена в 1932 г.

Приведенный перечень был очень беглым. Сказанного, однако, достаточно, чтобы судить, насколько широк круг приложений квантовой механики. По существу, она представляет собой основу для понимания всех явлений, происходящих в микромире.

Тем не менее квантовая механика не всеобъемлюща, и область ее применимости ограничена даже при изучении микромира. Причина этого не имеет никакого отношения к таким специфическим особенностям теории, как, скажем, отсутствие траекторий частиц или вероятностный характер ее закономерностей. Ограниченность квантовой механики связана не с первым словом в ее названии, а со вторым. По определению, механика представляет собой науку о движении частиц или более

сложных тел под действием заданных внешних и внутренних сил. Как только появляется «обратная» зависимость таких сил не только от расстояния между частицами, но и от их движения, «механика» становится непригодной, и надо переходить от нее к «теории поля». Классическая электродинамика представляет собой пример такой теории: она позволяет в принципе найти электрические и магнитные поля, которые создаются движением электрических зарядов.

Квантовая механика описывает процессы, протекающие в атомных системах — атомах, молекулах, кристаллических структурах и т. п., где можно считать, что все заряженные частицы взаимодействуют друг с другом известным образом — по закону Кулона. В других, более сложных явлениях взаимодействие между частицами зависит как от расстояния между частицами, так и от их скоростей. Квантовая механика должна быть заменена здесь квантовой теорией поля.

Квантовая механика привела к революционному изменению наших представлений о физическом строении материального мира. На смену лапласовскому детерминизму пришло вероятностное описание процессов, происходящих с участием атомных или субатомных частиц. Некоторые понятия, казавшиеся ранее очевидными, вроде траектории частицы, оказались, строго говоря, лишены смысла. Вообще говоря, эти понятия справедливы лишь приближенно, однако для окружающего нас мира макроскопических объектов степень такого приближения очень высока. Поэтому квантовая механика вовсе не означает, что неправильна механика классическая. Она просто делает ясным условие применимости последней: величины с размерностью «действия» (энергия  $\times$  время или импульс  $\times$  координата) должны быть велики по сравнению с постоянной Планка  $\hbar = 1,05 \cdot 10^{-27}$  эрг·с.

Квантовая механика продемонстрировала еще раз удивительную закономерность в развитии естествознания. Когда новая теория создается в результате объяснения и правильного истолкования экспериментальных фактов, ее окончательная структура подчас не зависит от исходных — чаще всего интуитивных — представлений ее творцов, а то и входит в противоречие с ними. «Драма идей» вокруг интерпретации основ квантовой механики не знает равной во всей истории физики.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Борн М. Атомная физика. — М., Мир, 1965.
2. Крайнов В. П., Смирнов Б. М. Излучательные процессы в атомной физике. — М.: Высшая школа, 1983.
3. Бете Г. Квантовая механика. — М., 1965.
4. Шифф Л. Квантовая механика. — М., ИЛ, 1957.
5. Григорьев В., Мякишев Г. Силы в природе. — М.: Наука, 1968.

**Владимир Михайлович Шехтер**

**Алексей Андреевич Ансельм**

## АТОМ И КВАНТОВАЯ МЕХАНИКА

Гл. отраслевой редактор Л. А. Ерышкин. Редактор К. А. Кутузова. Мл. редактор Н. А. Сергеева. Обложка художника М. А. Дорохова. Худож. редактор М. А. Гусева. Техн. редактор Г. В. Луговская, Л. Н. Арефьева. Корректор В. В. Каночкина.

**ИБ № 6495**

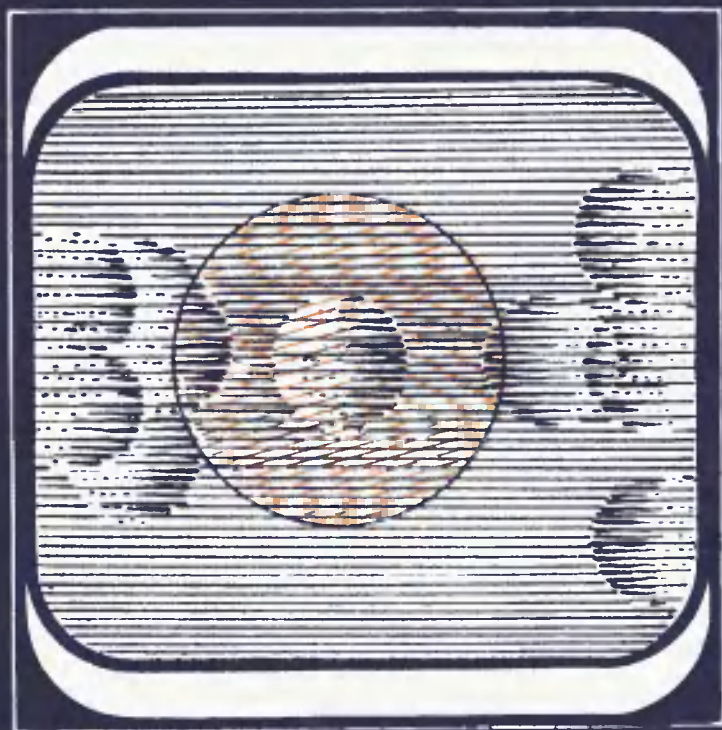
Сдано в набор 31.01.84. Подписано к печати 28.03.84. Т 03854. Формат бумаги 84×108<sup>1/32</sup>. Бумага тип № 12. Гарнитура литературная. Печать высокая. Усл. печ. л. 3,36. Усл. кр.-отт. 8,57. Уч.-изд. л. 3,43. Тираж 33 380 экз. Заказ 202. Цена 11 коп. Издательство «Знание», 101835, ГСП, Москва, Центр, проезд Серова, д. 4. Индекс заказа 844005. Типография Всесоюзного общества «Знание» Москва, Центр, Новая пл., д. 3/4.

**ДОРОГОЙ ЧИТАТЕЛЬ!**

Брошюры этой серии в розничную продажу не поступают, поэтому своевременно оформляйте подписку. Подписка на брошюры издательства „Знание“ ежеквартальная, принимается в любом отделении „Союзпечати“.

Напоминаем Вам, что сведения о подписке Вы можете найти в „Каталоге советских газет и журналов“ в разделе „Центральные журналы“, рубрика „Брошюры издательства „Знание“.

Цена подписки на год 1 р. 32 к.



СЕРИЯ

**ФИЗИКА**