

тельные максимумы (например, для  $g$ -электронов  $m = \pm 2, \pm 1, 0$ ); они не имеют себе аналогов в боровской теории.

Вероятность нахождения электрона между двумя сферами радиусов  $r, r + dr$  определяется величиной  $D = [R_{nl}(r)]^2 \cdot 4\pi r^2 dr$ , изображенной на рис. 251. Площадь, ограниченная этой кривой, на рис. 251 заштрихована. На этом же рисунке приведены графики функций  $R_{nl}(r)$  и показаны соответствующие боровские орбиты. За единицу расстояния принят радиус первой круговой орбиты Бора  $a_0 = 0,53 \text{ \AA}$ .

Мы видим, что электронное облако сосредоточивается приблизительно в области боровских орбит.

Зная все три множителя  $R, \theta, \Phi$ , можно построить модель электронного облака как целого. Хорошее представление о возникающей здесь картине дает механическая модель Уайта: стержень переменной длины вращается вокруг оси, проходящей через его конец; на другом конце помещается зажженная лампочка, свет которой фотографируется с длительной экспозицией. На рис. 252 воспроизведены фотографии модели электронного облака для различных квантовых состояний. Сравнивая рис. 252 и 250, можно видеть, что электронное облако представляет собой как бы туманный прообраз боровских орбит.

Квантовая механика в 1928—1930 гг. была развита Дираком. Четырехкомпонентное уравнение Дирака описывает электрон не одной волной, а четырьмя волнами. Наличие спина у электрона оказалось одним из следствий уравнения Дирака. Уравнение Дирака дало также точное описание эффекта Комптона, фотоэффекта, рассеяния быстрых электронов атомами и других явлений.

Дальнейшее развитие принципиальных основ квантовой механики было предложено Гейзенбергом в 1957 г. Гейзенберг поставил целью так обобщить основное уравнение квантовой механики, чтобы одним из его следствий была наблюдаемая в природе дискретность масс элементарных частиц,

## § 65. Соотношение неопределенностей и его разные трактовки

Когда была обнаружена дифракция электронов, это было воспринято многими физиками не только как подтверждение формулы де Бройля, но также и как прямое указание опыта на реальное существование волн, направляющих движение в отдельности каждого электрона.

Однако такое понимание волновых процессов, определяемых квантовой механикой, не согласуется с основами квантовой механики. В частности, например, амплитудное уравнение Шредингера (9) не содержит времени и поэтому, очевидно, не характеризует движения частицы в смысле изменения ее положения в зависимости от времени. Квадрат амплитуды волновой функции, как пояснено в предыдущих параграфах (после умножения на элемент объема), дает вероятность пребывания частицы в элементе объема.

Волновые функции, фигурирующие в квантовой механике, не изображают какой-либо физический волновой процесс, осуществляющийся в реальном пространстве; это волны в воображаемом «конфигурационном пространстве», где каждая точка условно определяет положение всей рассматриваемой системы частиц. Если рассматриваемая система состоит из  $n$  частиц, имеющих каждая три степени свободы, то положение (конфигурация) такой системы определяется  $3n$  координатами и изменение функции  $\psi$  для указанной системы является аналогичным картине волн в  $3n$ -мерном пространстве.

Понимание волновой функции как величины, определяющей вероятность состояния системы, было обосновано в 1926—1928 гг. Максом Борном и быстро сделалось общепринятым.

Представление о вероятности возникает тогда, когда имеется ряд возможных событий, из которых в действительности реализуется одно. Аппарат квантовой механики охватывает возможные явления в микромире и выделяет действительно происходящие. Законом математики подчинено все возможное, но сами по себе, без дополнительных предпосылок, они ничего не могут сказать о действительно происходящем. Соответственно этому исходные уравнения квантовой механики шире действительности; только на основе дополнительных, однако самых общих и надежных положений эти уравнения приводят к заключениям о реальных состояниях микросистем. (Примером может служить обоснование теории атома водорода, поясненное в предыдущем параграфе.) Существенно, что микросистема считается сначала представленной самой себе (как изолированная), но предполагается, что в интересующий нас момент установлена ее связь с внешним миром, без чего невозможно измерение параметров ее состояния (т. е. всегда определяется состояние неизолированной системы).

Одним из основных положений квантовой механики является *соотношение неопределенностей*, согласно которому точное и одновременное определение координаты и скорости (или импульса) частицы невозможно; неизбежные неточности при одновременном определении координаты и импульса частицы таковы, что их произведение всегда больше или равно постоянной Планка:

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2\pi}. \quad (19)$$

Чтобы разобраться, почему квантовая механика приводит к соотношению (19), полезно рассмотреть представление о *волновом пакете*.

Уравнение Шредингера определяет вероятность того или иного состояния движения отдельного электрона, а также и движение пучка электронов, имеющих одинаковые скорости и, следовательно, одинаковую длину волн де Бройля. Когда из пучка электронов мы выделяем какой-либо один электрон, то в волномеханическом

описании это равносильно выделению маленькой группы волн из монохроматического потока волн. Вообразим, что для выделения электрона мы воспользовались заслонкой, которую приоткрываем на короткое время. Благодаря общности математических законов и без вычислений нетрудно представить себе результаты такой операции, руководствуясь аналогией с выделением группы реальных волн, когда для этой цели применена такая же заслонка, как для выделения электрона. Действие заслонки, выделяющей маленькую

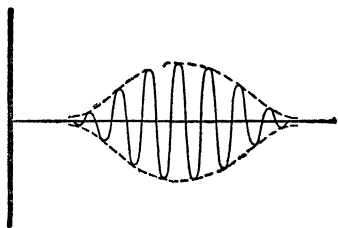


Рис. 253. Волновой пакет.

группу волн из потока волн одинаковой длины, неизбежно исказит головную и оконечную часть выделенной группы волн, а именно: выделенная группа волн — какой бы иной способ мы ни применили для ее обособления — неизбежно окажется уже не вполне монохроматической, т. е. окажется состоящей из волн с несколько различающимися длинами. Это небольшое различие в длинах волн

и определяет конечные размеры выделенной группы волн: оно приводит к взаимному ослаблению волн всюду, кроме небольшой области, где волны усиливают друг друга (рис. 253). Так образуется волновой пакет, перемещение которого характеризует движение электрона.

Волновой пакет перемещается со скоростью, равной групповой скорости волн (т. I, § 65, 1959 г.; в предыдущих изданиях § 75) и равной скорости движения электрона. Групповая скорость меньше скорости распространения волн, поэтому волны проходят сквозь волновой пакет, но благодаря тому, что они интерферируют друг с другом, результирующая амплитуда волн де Бройля всюду оказывается ничтожно малой, кроме области, занятой волновым пакетом.

Так как квадрат амплитуды  $\psi$ -волн является мерой вероятности того или иного положения электрона, то размеры волнового пакета определяют вероятность локализации электрона в той или иной области пространства, поскольку амплитуда  $\psi$ -волн всюду вне волнового пакета ничтожно мала.

Чем уже волновой пакет, тем большую роль играют искажения головной и оконечной его частей и, соответственно, оказывается возросшим разброс по длинам волн, а это по формуле де Бройля означает увеличение неопределенности импульса. Иначе говоря, чем точнее мы определяем локализацию частицы, тем неопределеннее ее скорость <sup>1)</sup>. Более полное исследование показывает, что про-

<sup>1)</sup> Положение усугубляется тем, что при перемещении волновой пакет не сохраняет своей формы, а постепенно расплывается, и это расплывание волнового пакета, согласно законам волнового движения, происходит тем быстрее, чем меньше была выделенная группа волн.

изведение этих неизбежных неточностей  $\Delta x$  и  $\Delta v$  всегда больше или равно  $\frac{h}{2\pi m}$ , где  $m$  — масса частицы:

$$\Delta x \Delta v \geq \frac{h}{2\pi m},$$

что совпадает с (19).

Для частиц с большой массой отношение  $\frac{h}{m}$  мало и, следовательно, мало произведение  $\Delta x \Delta v$ , т. е. положение и скорость частицы в этом случае практически определяются точно. Это в особенности относится к макроскопическим телам, для которых  $\frac{h}{m} \rightarrow 0$  и все величины имеют точные значения.

Волномеханическая картина атома приводит к неопределенности координат внутриатомного электрона, соизмеримой с размерами атома ( $\Delta x = 10^{-8}$  см). Из соотношения (19) следует, что неопределенность скорости внутриатомного электрона по порядку величины достигает значения  $10^8$  см/сек, т. е. оказывается соизмеримой с величиной самой скорости.

Некоторые физики считают, что соотношение неопределенностей свидетельствует о *неполноте знания, даваемого квантовой механикой* о явлениях в микромире. Гейзенберг, Бор и многие другие физики, напротив, рассматривают соотношение неопределенностей как прямое и полное отображение *действительной неопределенности в поведении микробиъектов*. Эту неопределенность они считают главной особенностью микромира, отличающей его от макромира; проявление ее в макромире вследствие большой массы объектов не может обнаружиться.

По мнению некоторых физиков, квантовая механика является статистической теорией ансамбля микробиъектов. С такой позиции соотношение неопределенностей выглядит «почти» как соотношение между неизбежными среднеквадратичными отклонениями параметров индивидуальных микробиъектов от среднего значения этих параметров в ансамбле тождественных микробиъектов.

Сделанная в предыдущей фразе оговорка «почти» — неизбежна, так как статистика микрочастиц существенно отлична от обычной классической статистики. Так, не следует думать, что квантовая механика, анализируя состояния движения ансамбля микробиъектов, устанавливает соотношения только для среднестатистических величин. Плотность распределения электронного облака допустимо рассматривать как среднестатистическую величину, но значения энергии и ряда других величин определяются квантовой механикой как совершенно точные и для всех микробиъектов ансамбля одинаковые величины, составляющие дискретные ряды соответственно различным квантовым состояниям микробиъекта. Если бы это было не так, то квантовая механика оказалась бы в противоречии с фактами, так как высокая точность современной измерительной аппаратуры позволяет с уверенностью утверждать, что *никакого статистического разброса энергетических уровней микробиъектов, находящихся в одинаковых квантовых состояниях, не существует*.

Но если представлять себе, что электрон в атоме находится ближе, то дальше от ядра (в среднем — как распределена плотность электронного облака), то невозможно объяснить, почему энергия для всех этих положений электрона одинакова. Подброшенный вверх камень не может подняться выше точки, где его кинетическая энергия становится равной нулю. Аналогично и электронное облако, казалось бы, должно обрываться на некотором предельном расстоянии от ядра, которое определяется энергией уровня. Но даже для низшего энергетического состояния атома такого обрыва плотности электронного облака нет, и поэтому получается, что при некоторых положениях электрона, когда он чрезмерно удаляется от

ядра, его кинетическая энергия должна сделаться отрицательной, а этого не может быть.

Это противоречие снимается, если признать, что к *микрочастицам неприменимо понятие об их движении по траектории* и что сама природа микрочастиц (а не отклонения от средних значений) не позволяет одновременно указать положение частицы в пространстве и ее скорость.

На то, что волновые свойства микрочастиц порождаются не их принадлежностью к ансамблю тождественных частиц, а индивидуально присущи каждой частице, указывают и другие соображения. Например, представим себе, что поток электронов (или других частиц), движущихся с одинаковой скоростью, проходит через две узкие щели и создает на экране, который поставлен за этими щелями, дифракционную картину. Если бы индивидуально каждой частице, взятой в отдельности, волновые свойства не были присущи, то, поскольку каждая частица проходит через одну из щелей, дифракционная картина от двух щелей представляла бы собой просто сумму (наложение одна на другую) картин дифракции, создаваемых каждой щелью в отдельности, что, однако, не соответствует действительности.

Трактовка основ квантовой механики, развитая Бором, в некоторой мере отличается от защищаемой Гейзенбергом (хотя в их взглядах много общего, и поэтому их подход часто объединяют, называя «копенгагенской интерпретацией квантовой механики»).

Гейзенберг, создавший значительную часть математического аппарата квантовой механики и первый установивший соотношение неопределенностей, считает, что ключом к наиболее глубокому пониманию квантовой механики является выдвинутое им *начало принципиальной наблюдаемости*. Гейзенберг считает главным (с физико-философской точки зрения) то, что квантовая механика не оперирует «принципиально ненаблюдаемыми» величинами (в частности, такими, как траектория микрочастицы и одновременное значение координат и импульса частицы).

Бор, который в прошлые годы имел успех как раз на этом запретном, по мнению Гейзенберга, пути, в обосновании квантовой механики придает особое значение тому, что квантовая механика правильно учитывает *взаимодействие между микро- и макротелами* — между наблюдаемой частицей и приборами. Всякое измерение заключает в себе взаимодействие наблюдаемого объекта и прибора и вызывает изменение их состояния. Например, для определения локализации частицы можно было бы ее осветить, но минимальная порция света — фотон — неизбежно сообщит частице дополнительный импульс; при любом измерении импульса частицы, например путем наблюдения ее удара о другую частицу, неизбежно произойдет вызванное этим актом изменение координат частицы. Анализ этих взаимодействий всегда приводит к подтверждению соотношения неопределенностей. В связи с этим Бор считает, что основой широкого, философского понимания квантовой механики является предложенный им *принцип дополнителности*. Согласно этому принципу реально осуществимы только два класса измерительных операций: первый класс позволяет определять импульсно-энергетические соотношения, второй — пространственно-временные; одновременно измерительные операции обоих классов не могут быть произведены, они исключают одна другую и поэтому для полного измерения служат необходимым взаимным дополнением.

Исходя из приведенного утверждения, Бор строит особую философскую концепцию дополнителности (распространяя ее из области физики на биологические, психологические и даже социальные явления) и выдвигает эту концепцию в качестве замены принципа причинности.

Если считать, что детальная картина микропроцессов, обуславливающих то или иное состояние микросистемы, не только не известна нам, но «не имеет физического смысла», то для круга задач, где производится определение вероятности состояния, обычное примитивное представление о причинности становится неприменимым. При одной и той же сообщенной энергии может осуществляться несколько состояний микросистемы; что является их причиной, квантовая механика не рассматривает. В формулировке Гейзенберга это выглядит радикальнее: «Фор-

мальные методы квантовой механики не допускают никакой пространственно-временной причинной связи явлений».

При недостаточной ясности некоторых чисто физических сторон вопроса расширенная постановка философских проблем о границах познания, о причинности и т. п. привела к определенному течению идеализма в физике <sup>1)</sup>).

Для копенгагенской школы характерно абсолютизирование квантовой механики как достигнутой нами вершины возможного познания микромира. Физики, полностью разделяющие взгляды Бора и Гейзенберга, но вместе с тем не желающие порывать с материалистическим мировоззрением, нередко придерживаются тезиса: «Верная теория материи всегда материалистична». Нетрудно, однако, понять обманчивость этого тезиса. Во-первых, дискуссии подлежит не сама теория в смысле системы уравнений и методов, высоко совершенных по их непревзойденной и никогда раньше не достигавшейся точности; разногласия касаются физико-философского обоснования теории и некоторых философских выводов из нее. Во-вторых, что касается самой теории, то, сколь бы совершенной она ни казалась современникам, приходит время, когда обнаруживается, что она не вполне верна, и на смену ей приходит другая теория, более верная.

Академик С. И. Вавилов в 1949 г. писал: «...Статистическое знание никогда не есть полное знание. Между тем современная квантовая механика, вернее физики, ею занимающиеся, догматически утверждают, что указанное статистическое знание составляет «потолок»... В квантовой задаче мы до сих пор не знаем, какому свойству следует приписать беспорядочный характер наблюдаемых явлений, точно так же как во времена открытия броуновского движения ботаником Броуном никто не знал, от чего зависит хаотический беспорядок движения частиц, взвешенных в жидкости».

Против «копенгагенской интерпретации» квантовой механики выступали многие физики: Эйнштейн, Шредингер, де Бройль, Ланжевен, Яноши и др.

Д. Бом (1952 г.) сделал попытку обоснования квантовой механики как статистической теории с характерной для статистики неполнотой знания, протекающей, по мнению Бомы, вследствие влияния на микрочастицы «скрытых параметров» их взаимодействия с физической основой вакуума. Близкие к этому соображения высказал И. Феньеш (1952 г.) и Ф. Бопп (1953 г.).

---

<sup>1)</sup> Имеется немало физиков, которые, следуя в основном идеям копенгагенской школы, предприняли поход против материализма. Так, например, Иордан, Комптон, Стромберг и др. опубликовали книги, предназначенные для широкого круга читателей и содержащие квантовомеханическое «обоснование» чисто теологических воззрений. Иордан доказывает наличие, по сути дела, «свободы воли» у электрона и других частиц. Комптон устанавливает существование «разума в мире природы». Стромберг утверждает, что «доказано существование мировой души». Известный физик Уайтеккер в книге, опубликованной в 1946 г., пишет: «Глубокое понимание природы, материальной вселенной, достигнутое в результате научных открытий, обнаружило новые перспективы и возможности для проповеди веры в бога».