

# ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА



## 4 Квантовая механика

### 4.1 Фотоэлектрический эффект 1899

Под воздействием фотонов металл может испускать электроны.

Выбивание светом электронов с поверхности токопроводящих материалов - явление, широко используемое сегодня в повседневной жизни. Например, некоторые системы сигнализации работают за счет передачи видимых или инфракрасных световых лучей на фотоэлектрический элемент, из которого выбиваются электроны, обеспечивающие электропроводность цепи, в которую он включен. Если на пути светового луча появляется препятствие, свет на датчик поступать перестает, поток электронов прекращается, цепь разрывается — и срабатывает электронная сигнализация.

Это явление, получившее название фотоэффекта, было открыто в конце XIX столетия и сразу поставило целый ряд фундаментальных вопросов, поскольку ничего из того, что было известно ученым о строении металлов или природе света, фотоэффекта не объясняло. Нельзя сказать, что классическая теория запрещала бы свету выбивать электроны из металла. Электромагнитные волны, по идее, могли «вымывать» электроны из металла подобно тому, как морские волны выносят на поверхность и постепенно прибывают к берегу легкие пробковые крошки. Однако проблема состояла в том, что столь простым объяснением в случае фотоэффекта ограничиться было невозможно. Во-первых, электроны появлялись практически мгновенно после начала облучения. Во-вторых, фотоэффект возникал даже под воздействием самых слабых световых лучей, причем по мере повышения интенсивности облучения энергия высвобождаемых электронов не изменялась. И то, и другое вступало в явное противоречие с классической картиной взаимодействия света с электронами.

Проблему в конце концов удалось решить в начале XX века Альберту Эйнштейну, причем сделанные им выводы дали мощный толчок развитию квантовой механики. Незадолго до этого Макс Планк показал, что излучение черного тела можно адекватно описать, приняв за допущение, что атомы излучают и поглощают свет фиксированными энергетическими порциями - квантами. Он полагал, что этот феномен каким-то образом обусловлен внутренним строением атомов, но отнюдь не природой света. Однако Эйнштейн воспринял идею Планка гораздо серьезнее и постулировал, что сам свет распространяется дискретными пучками энергии, которые он назвал фотонами. Иногда фотоны ведут себя подобно частицам, иногда - подобно волнам. В частности, при взаимодействии с электроном фотон может вести себя как частица, и буквально выбивать электрон из атома (это соударение фотона с атомом можно уподобить столкновению двух бильярдных шаров). Причем для выбивания электрона при таком соударении достаточно единственного фотона. Далее, повышение интенсивности света приводит к увеличению числа фотонов (и, следовательно, числа выбитых электронов), но не энергии отдельно взятого фотона. Следовательно, и энергия, и скорость отдельно

взятого выбитого фотоэлектрона не зависят от интенсивности света — но только от его частоты.

Рассуждая таким образом, Эйнштейн вывел следующее простое уравнение для описание энергии фотоэлектронов:

$$E = h\nu - A,$$

где  $\nu$  — частота падающего света,  $h$  — постоянная Планка, а  $A$  — так называемая «работа выхода», то есть минимальная энергия, необходимая для того, чтобы выбить электрон из атома металла.

## 4.2 Постоянная Планка 1900

Постоянная Планка определяет границу между макромиром, где действуют законы механики Ньютона, и микромиром, где действуют законы квантовой механики.

Макс Планк — один из основоположников квантовой механики — пришел к идеям квантования энергии, пытаясь теоретически объяснить процесс взаимодействия между недавно открытыми электромагнитными волнами и атомами и, тем самым, разрешить проблему излучения черного тела. Он понял, что для объяснения наблюдаемого спектра излучения атомов нужно принять за данность, что атомы излучают и поглощают энергию порциями (которые ученый назвал квантами) и лишь на отдельных волновых частотах. Энергия, переносимая одним квантом, равна:

$$E = h\nu,$$

где  $\nu$  — частота излучения, а  $h$  — элементарный квант действия, представляющий собой новую универсальную константу, получившую вскоре название постоянная Планка. Планк же первым и рассчитал ее значение на основе экспериментальных данных  $h = 6,548 \cdot 10^{-34}$  Дж·с (в системе СИ); по современным данным  $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$  Дж·с. Соответственно, любой атом может излучать широкий спектр связанных между собой дискретных частот, который зависит от орбит электронов в составе атома. Вскоре Нильс Бор создаст стройную, хотя и упрощенную модель атома Бора, согласующуюся с распределением Планка.

Опубликовав свои результаты в конце 1900 года, сам Планк сначала не верил в то, что кванты — физическая реальность, а не удобная математическая модель. Однако, когда пять лет спустя Альберт Эйнштейн опубликовал статью, объясняющую фотоэлектрический эффект на основе квантования энергии излучения, в научных кругах формулу Планка стали воспринимать уже не как теоретическую игру, а как описание реального физического явления на субатомном уровне, доказывающее квантовую природу энергии.

Постоянная Планка фигурирует во всех уравнениях и формулах квантовой механики. Она, в частности, определяет масштабы, начиная с которых вступает в силу принцип неопределенности

Гейзенберга. Грубо говоря, постоянная Планка указывает нам нижний предел пространственных величин, после которого нельзя не принимать во внимание квантовые эффекты. Для песчинок, скажем, неопределенность произведения их линейного размера на скорость настолько незначительна, что ею можно пренебречь. Иными словами, постоянная Планка проводит границу между макромиром, где действуют законы механики Ньютона, и микромиром, где вступают в силу законы квантовой механики. Будучи получена всего лишь для теоретического описания единичного физического явления, постоянная Планка вскоре стала одной из фундаментальных констант теоретической физики, определяемых самой природой мироздания.

### 4.3 Атом Бора 1913

Электроны в атоме могут находиться только на разрешенных орбитах.

Когда Джон Дальтон впервые в истории современной науки предложил атомную теорию строения вещества, атомы представлялись ему неделимыми, наподобие микроскопических бильярдных шаров. Однако на протяжении всего XIX столетия становилось всё очевиднее, что такая модель неприемлема. Поворотной точкой стало открытие электрона Дж. Дж. Томсоном в 1897 году, из которого следовало, что атом состоит из отдельных частиц — прямое свидетельство против его неделимости. Последним гвоздем в крышку гроба неделимого атома стало открытие в 1911 году атомного ядра. После этих открытий стало ясно, что атом не просто делим, но что он еще и обладает дискретной структурой: состоит из массивного, положительно заряженного центрального ядра и движущихся по орбитам вокруг него легких, отрицательно заряженных электронов.

Но с этой простой планетарной моделью атома тут же возникли проблемы. Прежде всего, согласно физическим законам того времени, такой атом не мог бы просуществовать дольше доли мгновения — на наше счастье, мы имеем все основания утверждать, что этот факт опытом не подтверждается. Аргументация была такова: в соответствии с законами механики Ньютона, электрон, находящийся на орбите, движется с ускорением. Следовательно, согласно уравнениям Максвелла, он должен излучать электромагнитные волны и, как следствие, терять энергию и вскоре сойти с орбиты и упасть на ядро.

Разрешить эту проблему и направить физиков по верному пути понимания атомной структуры удалось молодому датскому теоретику Нильсу Бору, недавно прибывшему на стажировку в Англию после защиты докторской диссертации у себя на родине. За отправную точку Бор принял новые постулаты квантовой механики, согласно которым на субатомном уровне энергия испускается исключительно порциями, которые получили название «кванты». Немецкий физик Макс Планк воспользовался положением о том, что атомы излучают свет отдельными частицами (позже Альберт

Эйнштейн назвал их «фотонами»), для разрешения застарелой проблемы излучения черного тела. Используя концепцию фотонов, Альберт Эйнштейн теоретически объяснил фотоэлектрический эффект. За свои работы и Планк, и Эйнштейн получили по Нобелевской премии.

Бор развил квантовую теорию еще на шаг и применил ее к состоянию электронов на атомных орбитах. Говоря научным языком, он предположил, что угловой момент электрона квантуется. Далее он показал, что в этом случае электрон не может находиться на произвольном удалении от атомного ядра, а может быть лишь на ряде фиксированных орбит, получивших название «разрешенные орбиты». Электроны, находящиеся на таких орбитах, не могут излучать электромагнитные волны произвольной интенсивности и частоты, иначе им, скорее всего, пришлось бы перейти на более низкую, неразрешенную орбиту. Поэтому они и удерживаются на своей более высокой орбите, подобно самолету в аэропорту отправления, когда аэропорт назначения закрыт по причине нелетной погоды.

Однако электроны могут переходить на другую разрешенную орбиту. Как и большинство явлений в мире квантовой механики, этот процесс не так просто представить наглядно. Электрон просто исчезает с одной орбиты и материализуется на другой, не пересекая пространства между ними. Этот эффект называли «квантовым прыжком», или «квантовым скачком». Если электрон перескакивает на более низкую орбиту, он теряет энергию и, соответственно, испускает квант света — фотон фиксированной энергии с фиксированной длиной волны. На глаз мы различаем фотоны разных энергий по цвету — раскаленная на огне медная проволока светится синим, а натриевая лампа уличного освещения — желтым. Для перехода на более высокую орбиту электрон должен, соответственно, поглотить фотон.

В картине атома по Бору, таким образом, электроны переходят вниз и вверх по орбитам дискретными скачками — с одной разрешенной орбиты на другую, подобно тому, как мы поднимаемся и спускаемся по ступеням лестницы. Каждый скачок обязательно сопровождается испусканием или поглощением кванта энергии электромагнитного излучения, который мы называем фотоном.

Со временем интуитивная гипотеза Бора уступила место строгой систематической формулировке в рамках законов квантовой механики и, в частности, концепции двойственной природы элементарных частиц — корпускулярно-волновой. Сегодня электроны представляются нам не микроскопическими планетами, обращающимися вокруг атомного ядра, а волнами вероятности, плещущимися внутри своих орбит - подобно приливам и отливам в тороидальном бассейне - и подчиняющимся уравнению Шрёдингера. Современные физики, как само собой разумеющееся, рассчитывают характеристики этих волн для самых сложных по структуре атомов и используют их для объяснения свойств и поведения этих атомов. Однако основополагающую картину всей современной квантовой механики нарисовал в своем великом прозрении Нильс Бор - в далеком теперь 1913 году.

## 4.4 Соотношение де Бройля 1924

Длина волны квантовой частицы обратно пропорциональна ее импульсу.

Один из фактов субатомного мира заключается в том, что его объекты — такие как электроны или фотоны - совсем не похожи на привычные объекты макромира. Они ведут себя и не как частицы, и не как волны, а как совершенно особые образования, проявляющие и волновые, и корпускулярные свойства в зависимости от обстоятельств. Одно дело - это заявить, и совсем другое - связать воедино волновые и корпускулярные аспекты поведения квантовых частиц, описав их точным уравнением. Именно это и было сделано в соотношении де Бройля.

Луи де Бройль опубликовал выведенное им соотношение в качестве составной части своей докторской диссертации в 1924 году. Казавшееся сначала сумасшедшей идеей, соотношение де Бройля в корне перевернуло представления физиков-теоретиков о микромире и сыграло важнейшую роль в становлении квантовой механики. В дальнейшем карьера де Бройля сложилась весьма прозаично: до выхода на пенсию он работал профессором физики в Париже и никогда более не поднимался до головокружительных высот революционных прозрений.

Теперь кратко опишем физический смысл соотношения де Бройля: одна из физических характеристик любой частицы — ее скорость. При этом физики по ряду теоретических и практических соображений предпочитают говорить не о скорости частицы как таковой, а о ее импульсе (или количестве движения), который равен произведению скорости частицы на ее массу. Волна описывается совсем другими фундаментальными характеристиками - длиной (расстоянием между двумя соседними пиками амплитуды одного знака) или частотой (величина, обратно пропорциональная длине волны, то есть число пиков, проходящих через фиксированную точку за единицу времени). Де Бройлю же удалось сформулировать соотношение, связывающее импульс квантовой частицы  $p$  с длиной волны  $\lambda$ , которая ее описывает:

$$p = \frac{h}{\lambda},$$

где  $h$  — постоянная Планка.

Это соотношение гласит буквально следующее: при желании можно рассматривать квантовый объект как частицу, обладающую количеством движения  $p$ ; с другой стороны, ее можно рассматривать и как волну, длина которой равна  $\lambda$  и определяется предложенным уравнением. Иными словами, волновые и корпускулярные свойства квантовой частицы фундаментальным образом взаимосвязаны.

Соотношение де Бройля позволило объяснить одну из величайших загадок зарождающейся квантовой механики. Когда Нильс Бор предложил свою модель атома, она включала концепцию разрешенных орбит электронов вокруг ядра, по которым они могли сколь угодно долго вращаться без потери энергии. С помощью соотношения де Бройля мы можем проиллюстрировать это понятие.

Если считать электрон частицей, то, чтобы электрон оставался на своей орбите, у него должна быть одна и та же скорость (или, вернее, импульс) на любом расстоянии от ядра.

Если же считать электрон волной, то, чтобы он вписался в орбиту заданного радиуса, надо, чтобы длина окружности этой орбиты была равна целому числу длины его волны. Иными словами, окружность орбиты электрона может равняться только одной, двум, трем (и так далее) длинам его волн. В случае нецелого числа длин волны электрон просто не попадет на нужную орбиту.

Главный же физический смысл соотношения де Бройля в том, что мы всегда можем определить разрешенные импульсы (в корпускулярном представлении) или длины волн (в волновом представлении) электронов на орбитах. Для большинства орбит, однако, соотношение де Бройля показывает, что электрон (рассматриваемый как частица) с конкретным импульсом не может иметь соответствующую длину волны (в волновом представлении) такую, что он впишется в эту орбиту. И наоборот, электрон, рассматриваемый как волна определенной длины, далеко не всегда будет иметь соответствующий импульс, который позволит электрону оставаться на орбите (в корпускулярном представлении). Иными словами, для большинства орбит с конкретным радиусом либо волновое, либо корпускулярное описание покажет, что электрон не может находиться на этом расстоянии от ядра.

Однако существует небольшое количество орбит, на которых волновое и корпускулярное представление об электроне совпадают. Для этих орбит импульс, необходимый для того, чтобы электрон продолжал движение по орбите (корпускулярное описание), в точности соответствует длине волны, необходимой, чтобы электрон вписался в окружность (волновое описание). Именно эти орбиты и оказываются разрешенными в модели атома Бора, поскольку только на них корпускулярные и волновые свойства электронов не вступают в противоречие.

Есть еще одна интерпретация этого принципа — философская: модель атома Бора допускает только такие состояния и орбиты электронов, при которых не важно, какую из двух ментальных категорий человек применяет для их описания. То есть, иными словами, реальный микромир устроен так, что ему нет дела до того, в каких категориях мы пытаемся его осмыслить!

## 4.5 Квантовая механика 1925

На субатомном уровне частицы описываются волновыми функциями.

Слово «квант» происходит от латинского quantum («сколько, как много») и английского quantum («количество, порция, квант»). «Механикой» издавна принято называть науку о движении материи. Соответственно, термин «квантовая механика» означает науку о движении материи порциями (или науку о движении квантующейся материи). Термин «квант» ввел в обиход немецкий физик Макс

Планк для описания взаимодействия света с атомами.

Квантовая механика часто противоречит нашим понятиям о здравом смысле. А всё потому, что здравый смысл подсказывает нам вещи, которые берутся из повседневного опыта, а в своем повседневном опыте нам приходится иметь дело только с крупными объектами и явлениями макромира, а на атомарном и субатомном уровне материальные частицы ведут себя совсем иначе. Принцип неопределенности Гейзенберга как раз и очерчивает смысл этих различий. В макромире мы можем достоверно и однозначно определить местонахождение (пространственные координаты) любого объекта (например, этой книги). Не важно, используем ли мы линейку, радар, сонар, фотометрию или любой другой метод измерения, результаты замеров будут объективными и не зависящими от положения книги (конечно, при условии аккуратности в процессе замера). То есть некоторая неопределенность и неточность возможны - но лишь в силу ограниченных возможностей измерительных приборов и погрешностей наблюдения. Чтобы получить более точные и достоверные результаты, нам достаточно взять более точный измерительный прибор и постараться воспользоваться им без ошибок.

Теперь если вместо координат книги нам нужно измерить координаты микрочастицы, например электрона, то мы уже не можем пренебречь взаимодействиями между измерительным прибором и объектом измерения. Сила воздействия линейки или другого измерительного прибора на книгу пренебрежимо мала и не сказывается на результатах измерений, но чтобы измерить пространственные координаты электрона, нам нужно запустить в его направлении фотон, другой электрон или другую элементарную частицу сопоставимых с измеряемым электроном энергий и замерить ее отклонение. Но при этом сам электрон, являющийся объектом измерения, в результате взаимодействия с этой частицей изменит свое положение в пространстве. Таким образом, сам акт замера приводит к изменению положения измеряемого объекта, и неточность измерения обуславливается самим фактом проведения измерения, а не степенью точности используемого измерительного прибора. Вот с какой ситуацией мы вынуждены мириться в микромире. Измерение невозможно без взаимодействия, а взаимодействие - без воздействия на измеряемый объект и, как следствие, искажения результатов измерения.

О результатах этого взаимодействия можно утверждать лишь одно:

$$\Delta x \cdot \Delta v > \frac{h}{m},$$

где  $\Delta x$  и  $\Delta v$  — неопределенность пространственного положения и скорости частицы соответственно,  $m$  — масса частицы.

Соответственно, неопределенность возникает при определении пространственных координат не только электрона, но и любой субатомной частицы, да и не только координат, но и других свойств

частиц — таких как скорость. Аналогичным образом определяется и погрешность измерения любой такой пары взаимно увязанных характеристик частиц (пример другой пары — энергия, излучаемая электроном, и отрезок времени, за который она испускается). То есть если нам, например, удалось с высокой точностью измерили пространственное положение электрона, значит мы в этот же момент времени имеем лишь самое смутное представление о его скорости, и наоборот. Естественно, при реальных измерениях до этих двух крайностей не доходит, и ситуация всегда находится где-то посередине. То есть если нам удалось, например, измерить положение электрона с точностью до  $10^{-6}$  м, значит мы одновременно можем измерить его скорость, в лучшем случае, с точностью до 650 м/с.

Из-за принципа неопределенности описание объектов квантового микромира носит иной характер, нежели привычное описание объектов ньютоновского макромира. Вместо пространственных координат и скорости, которыми мы привыкли описывать механическое движение, например шара по бильярдному столу, в квантовой механике объекты описываются так называемой волновой функцией. Гребень «волны» соответствует максимальной вероятности нахождения частицы в пространстве в момент измерения. Движение такой волны описывается уравнением Шрёдингера, которое и говорит нам о том, как изменяется со временем состояние квантовой системы.

Картина квантовых событий в микромире, рисуемая уравнением Шрёдингера, такова, что частицы уподобляются отдельным приливным волнам, распространяющимся по поверхности океана пространства. Со временем гребень волны (соответствующий пику вероятности нахождения частицы, например электрона, в пространстве) перемещается в пространстве в соответствии с волновой функцией, являющейся решением этого дифференциального уравнения. Соответственно, то, что нам традиционно представляется частицей, на квантовом уровне проявляет ряд характеристик, свойственных волнам.

Согласование волновых и корпускулярных свойств объектов микромира стало возможным после того, как физики условились считать объекты квантового мира не частицами и не волнами, а чем-то промежуточным и обладающим как волновыми, так и корпускулярными свойствами; в ньютоновской механике аналогов таким объектам нет. Хотя и при таком решении парадоксов в квантовой механике всё равно хватает, лучшей модели для описания процессов, происходящих в микромире, никто до сих пор не предложил.

## 4.6 Принцип соответствия 1923

При предельных значениях квантовых чисел результаты квантовой механики совпадают с результатами классической механики.

В мире квантовой механики, где всё определяют принцип неопределенности Гейзенберга и урав-

нение Шрёдингера, картина происходящего кардинально отличается от привычного нам мира классической механики, где действуют законы движения Ньютона. Однако же наш макроскопический мир соткан из микроскопических атомов, и законы макро- и микромира не могут не быть увязаны между собой. Впервые принцип соответствия законов микро- и макромира был озвучен датским физиком-теоретиком Нильсом Бором, и за иллюстрацией для лучшего понимания этого принципа лучше всего обратиться к упрощенной модели атома, которую также впервые представил миру этот же ученый.

В атоме Бора электроны могут находиться только на «разрешенных» орбитах. Орбиты выстраиваются по главным квантовым числам. Ближайшая к ядру орбита имеет главное квантовое число, равное 1, следующая — 2 и т. д. Чем выше квантовое число электронной орбиты, тем дальше она удалена от ядра. По контрасту — в классическом ядре, предсказываемом ньютоновской механикой, электроны могут обращаться вокруг ядра по произвольным орбитам, находящимся от ядра на любом удалении (это, собственно, и могло бы происходить, не принимая мы во внимание квантовые эффекты).

Теперь, хотя физический радиус орбит и увеличивается неуклонно по мере возрастания главного квантового числа, кинетическая энергия электронов на этих орбитах увеличивается отнюдь не пропорционально расширению орбит, а снижающимися темпами, причем имеется верхний предел энергии удержания электронов на орбите вокруг ядра, который принято называть энергией срыва или энергией ионизации. Разогнавшись до такой энергии, электрон, теоретически, оказывается на орбите бесконечного радиуса, то есть, иными словами, превращается в свободный электрон и высвобождается из ионизированного атома. Между этим крайним пределом энергии высвобождения электрона и другим крайним пределом энергии нахождения электрона на первой к ядру орбите имеется счетный (но бесконечный) ряд допустимых дискретных энергетических состояний, в которых может находиться удерживаемый ядром электрон, причем, согласно законам квантовой механики, на достаточно удаленных от ядра расстояниях допустимые орбиты электронов начинают накладываться одна на другую. Происходит это в силу того, что допустимая энергия электрона на определенной орбите (и радиус этой орбиты, как следствие) определяется не точным квантовым числом, а, в соответствии с принципом неопределенности Гейзенберга, размыто - то есть, мы имеем лишь распределение вероятностей нахождения электрона на одной из соседних орбит. Здесь и начинается «стирание различий» между квантовомеханической моделью атома, где электрон может находиться лишь в фиксированных энергетических состояниях, поглощать и испускать энергию фиксированными порциями (квантами) и, соответственно, обитать на строго определенных орбитах, и классической моделью атома, где электрон обладает произвольной энергией и движется по произвольным орбитам. Иными словами, на больших удалениях от ядра атом начинает представлять собой классическую си-

стему, подчиняющуюся законам механики Ньютона. Это, пожалуй, самый иллюстративный пример принципа соответствия в действии.

Принцип соответствия вступает в силу на нечеткой границе между квантовой и классической механикой и еще раз демонстрирует нам, что в природе нет явных границ между явлениями, как нет и четкого разграничения между теоретическими описаниями природных явлений. И еще он демонстрирует нам то, о чем уже говорилось во Введении относительно тенденций развития теоретической науки. Квантовая механика, например, отнюдь не отменяет и не подменяет собой классическую механику Ньютона, а лишь представляет собой предельный случай при переходе явлений в масштабы микромира. Вообще, естественнонаучные теории вырастают одна из другой по мере расширения наших ранее накопленных знаний подобно новым свежим побегам на древе познания окружающего мира.

#### 4.7 Принцип неопределенности Гейзенберга 1927

Невозможно одновременно с точностью определить координаты и скорость квантовой частицы.

В обыденной жизни нас окружают материальные объекты, размеры которых сопоставимы с нами: машины, дома, песчинки и т. д. Наши интуитивные представления об устройстве мира формируются в результате повседневного наблюдения за поведением таких объектов. Поскольку все мы имеем за плечами прожитую жизнь, накопленный за ее годы опыт подсказывает нам, что раз всё наблюдаемое нами раз за разом ведет себя определенным образом, значит и во всей Вселенной, во всех масштабах материальные объекты должны вести себя аналогичным образом. И когда выясняется, что где-то что-то не подчиняется привычным правилам и противоречит нашим интуитивным понятиям о мире, нас это не просто удивляет, а шокирует.

В первой четверти XX века именно такова была реакция физиков, когда они стали исследовать поведение материи на атомном и субатомном уровнях. Появление и бурное развитие квантовой механики открыло перед нами целый мир, системное устройство которого попросту не укладывается в рамки здравого смысла и полностью противоречит нашим интуитивным представлениям. Но нужно помнить, что наша интуиция основана на опыте поведения обычных предметов соизмеримых с нами масштабов, а квантовая механика описывает вещи, которые происходят на микроскопическом и невидимом для нас уровне, - ни один человек никогда напрямую с ними не сталкивался. Если забыть об этом, мы неизбежно придем в состояние полного замешательства и недоумения.

Принцип Гейзенберга вообще играет в квантовой механике ключевую роль хотя бы потому, что достаточно наглядно объясняет, как и почему микромир отличается от знакомого нам материального мира. Чтобы понять этот принцип, задумайтесь для начала о том, что значит «измерить» какую

бы то ни было величину. Чтобы отыскать, например, эту книгу, вы, войдя в комнату, окидываете ее взглядом, пока он не остановится на ней. На языке физики это означает, что вы провели визуальное измерение (нашли взглядом книгу) и получили результат - зафиксировали ее пространственные координаты (определили местоположение книги в комнате). На самом деле процесс измерения происходит гораздо сложнее: источник света (Солнце или лампа, например) испускает лучи, которые, пройдя некий путь в пространстве, взаимодействуют с книгой, отражаются от ее поверхности, после чего часть из них доходит до ваших глаз, проходя через хрусталик, фокусируется, попадает на сетчатку - и вы видите образ книги и определяете ее положение в пространстве. Ключ к измерению здесь - взаимодействие между светом и книгой. Так и при любом измерении, представьте себе, инструмент измерения (в данном случае, это свет) вступает во взаимодействие с объектом измерения (в данном случае, это книга).

В классической физике, построенной на ньютоновских принципах и применимой к объектам нашего обычного мира, мы привыкли игнорировать тот факт, что инструмент измерения, вступая во взаимодействие с объектом измерения, воздействует на него и изменяет его свойства, включая, собственно, измеряемые величины. Включая свет в комнате, чтобы найти книгу, вы даже не задумываетесь о том, что под воздействием возникшего давления световых лучей книга может сдвинуться со своего места, и вы узнаете ее искаженные под влиянием включенного вами света пространственные координаты. Интуиция подсказывает нам (и, в данном случае, совершенно правильно), что акт измерения не влияет на измеряемые свойства объекта измерения. А теперь задумайтесь о процессах, происходящих на субатомном уровне. Допустим, мне нужно зафиксировать пространственное местонахождение электрона. Мне по-прежнему нужен измерительный инструмент, который вступит во взаимодействие с электроном и возвратит моим детекторам сигнал с информацией о его местопребывании. И тут же возникает сложность: иных инструментов взаимодействия с электроном для определения его положения в пространстве, кроме других элементарных частиц, у меня нет. И, если предположение о том, что свет, вступая во взаимодействие с книгой, на ее пространственных координатах не сказывается, относительно взаимодействия измеряемого электрона с другим электроном или фотонами такого сказать нельзя.

В начале 1920-х годов, когда произошел бурный всплеск творческой мысли, приведший к созданию квантовой механики, эту проблему первым осознал молодой немецкий физик-теоретик Вернер Гейзенберг. Начав со сложных математических формул, описывающих мир на субатомном уровне, он постепенно пришел к удивительной по простоте формуле, дающей общее описание эффекта воздействия инструментов измерения на измеряемые объекты микромира, о котором мы только что говорили. В результате им был сформулирован принцип неопределенности, названный соотношении-

ем неопределенностей Гейзенберга:

$$\Delta x \cdot \Delta v > \frac{h}{m},$$

— неопределенность пространственного положения и скорости частицы соответственно,  $m$  — масса частицы. где  $\Delta x$  — неопределенность (погрешность измерения) пространственной координаты микрочастицы,  $\Delta v$  — неопределенность скорости частицы.

Термин «неопределенность пространственной координаты» как раз и означает, что мы не знаем точного местоположения частицы. Например, если вы используете глобальную систему рекогносцировки GPS, чтобы определить местоположение этой книги, система вычислит их с точностью до 2-3 метров. (GPS, Global Positioning System - навигационная система, в которой задействованы 24 искусственных спутника Земли. Если у вас, например, на автомобиле установлен приемник GPS, то, принимая сигналы от этих спутников и сопоставляя время их задержки, система определяет ваши географические координаты на Земле с точностью до угловой секунды.) Однако, с точки зрения измерения, проведенного инструментом GPS, книга может с некоторой вероятностью находиться где угодно в пределах указанных системой нескольких квадратных метров. В таком случае мы и говорим о неопределенности пространственных координат объекта (в данном примере, книги). Ситуацию можно улучшить, если взять вместо GPS рулетку - в этом случае мы сможем утверждать, что книга находится, например, в 4 м 11 см от одной стены и в 1 м 44 см от другой. Но и здесь мы ограничены в точности измерения минимальным делением шкалы рулетки (пусть это будет даже миллиметр) и погрешностями измерения и самого прибора, - и в самом лучшем случае нам удастся определить пространственное положение объекта с точностью до минимального деления шкалы. Чем более точный прибор мы будем использовать, тем точнее будут полученные нами результаты, тем ниже будет погрешность измерения и тем меньше будет неопределенность. В принципе, в нашем обыденном мире свести неопределенность к нулю и определить точные координаты книги можно.

И тут мы подходим к самому принципиальному отличию микромира от нашего повседневного физического мира. В обычном мире, измеряя положение и скорость тела в пространстве, мы на него практически не воздействуем. Таким образом, в идеале мы можем одновременно измерить и скорость, и координаты объекта абсолютно точно (иными словами, с нулевой неопределенностью).

В мире квантовых явлений, однако, любое измерение воздействует на систему. Сам факт проведения нами измерения, например, местоположения частицы, приводит к изменению ее скорости, причем непредсказуемому (и наоборот). Вот почему в правой части соотношения Гейзенберга стоит не нулевая, а положительная величина. Чем меньше неопределенность в отношении одной переменной (например,  $\Delta x$ ), тем более неопределенной становится другая переменная ( $\Delta v$ ), поскольку произведение двух погрешностей в левой части соотношения не может быть меньше константы в правой его части. На самом деле, если нам удастся с нулевой погрешностью (абсолютно точно) определить

одну из измеряемых величин, неопределенность другой величины будет равняться бесконечности, и о ней мы не будем знать вообще ничего. Иными словами, если бы нам удалось абсолютно точно установить координаты квантовой частицы, о ее скорости мы не имели бы ни малейшего представления; если бы нам удалось точно зафиксировать скорость частицы, мы бы понятия не имели, где она находится. На практике, конечно, физикам-экспериментаторам всегда приходится искать какой-то компромисс между двумя этими крайностями и подбирать методы измерения, позволяющие с разумной погрешностью судить и о скорости, и о пространственном положении частиц.

На самом деле, принцип неопределенности связывает не только пространственные координаты и скорость - на этом примере он просто проявляется нагляднее всего; в равной мере неопределенность связывает и другие пары взаимно увязанных характеристик микрочастиц. Путем аналогичных рассуждений мы приходим к выводу о невозможности безошибочно измерить энергию квантовой системы и определить момент времени, в который она обладает этой энергией. То есть, если мы проводим измерение состояния квантовой системы на предмет определения ее энергии, это измерение займет некоторый отрезок времени — назовем его  $\Delta t$ . За этот промежуток времени энергия системы случайным образом меняется — происходят ее флуктуация, — и выявить ее мы не можем. Обозначим погрешность измерения энергии  $\Delta E$ . Путем рассуждений, аналогичных вышеприведенным, мы придем к аналогичному соотношению для  $\Delta E$  и неопределенности времени, которым квантовая частица этой энергией обладала:

$$\Delta E \cdot \Delta t > h.$$

Относительно принципа неопределенности нужно сделать еще два важных замечания:

- он не подразумевает, что какую-либо одну из двух характеристик частицы - пространственное местоположение или скорость — нельзя измерить сколь угодно точно;
- принцип неопределенности действует объективно и не зависит от присутствия разумного субъекта, проводящего измерения.

Иногда вам могут встретиться утверждения, будто принцип неопределенности подразумевает, что у квантовых частиц отсутствуют определенные пространственные координаты и скорости, или что эти величины абсолютно непознаваемы. Как мы только что видели, принцип неопределенности не мешает нам с любой желаемой точностью измерить каждую из этих величин. Он утверждает лишь, что мы не в состоянии достоверно узнать и то, и другое одновременно. И, как и во многом другом, мы вынуждены идти на компромисс. Опять же, писатели-антропософы из числа сторонников концепции «Новой эры» иногда утверждают, что, якобы, поскольку измерения подразумевают присутствие разумного наблюдателя, то, значит, на некоем фундаментальном уровне человеческое сознание связано с Вселенским разумом, и именно эта связь обуславливает принцип неопределенности.

Повторим по этому поводу еще раз: ключевым в соотношении Гейзенберга является взаимодействие между частицей-объектом измерения и инструментом измерения, влияющим на его результаты. А тот факт, что при этом присутствует разумный наблюдатель в лице ученого, отношения к делу не имеет; инструмент измерения в любом случае влияет на его результаты, присутствует при этом разумное существо или нет.

## 4.8 Принцип дополнительности 1927

Объекты микромира описываются и как частицы, и как волны, и одно описание дополняет другое.

В повседневной жизни имеется два способа переноса энергии в пространстве - посредством частиц или волн. Чтобы, скажем, скинуть со стола костяшку домино, балансирующую на его краю, можно придать ей необходимую энергию двумя способами. Во-первых, можно бросить в нее другую костяшку домино (то есть передать точечный импульс с помощью частицы). Во-вторых, можно построить в ряд стоящие костяшки домино, по цепочке ведущие к той, что стоит на краю стола, и уронить первую на вторую: в этом случае импульс передастся по цепочке — вторая костяшка завалит третью, третья четвертую и так далее. Это - волновой принцип передачи энергии. В обыденной жизни между двумя механизмами передачи энергии видимых противоречий не наблюдается. Так, баскетбольный мяч — это частица, а звук — это волна, и всё ясно.

Однако в квантовой механике всё обстоит отнюдь не так просто. Даже из простейших опытов с квантовыми объектами очень скоро становится понятно, что в микромире привычные нам принципы и законы макромира не действуют. Свет, который мы привыкли считать волной, порой ведет себя так, будто состоит из потока частиц (фотонов), а элементарные частицы, такие как электрон или даже массивный протон, нередко проявляют свойства волны.

Теперь давайте проведем несложный эксперимент для иллюстрации вышесказанного. Предположим, у нас есть замкнутая камера с двумя тонкими горизонтальными прорезями - одна выше средней линии, другая ниже. Теперь представим, что на эти прорези направлен параллельный пучок световых лучей. Естественно предположить, что частицы света будут проходить через оба отверстия прямо, и на задней стенке камеры (на экране) будут наблюдаться две отчетливые световые полосы напротив каждой из прорезей, а посередине между ними свет попадать не должен.

Однако на практике мы наблюдаем совершенно иную картину. Согласно принципу Гюйгенса, каждая из прорезей играет роль независимого источника вторичных световых волн, и на экране на средней линии между двумя прорезями мы, напротив, должны наблюдать максимум амплитуды их колебаний. В частности, звуковые волны, исходящие из двух стереодинамиков, как раз и дают пик громкости на линии равного удаления между ними. То же самое касается и двух равноудаленных

источников световых волн, проецируемых на экран. Иными словами, пик амплитуды волны приходится как раз на ту пространственную зону, куда, согласно корпускулярной теории, должно попадать минимальное число частиц.

Если направить на подобную камеру пучок электронов, на экране будут отчетливо прослеживаться свойственные волнам полосы пиков и спадов интенсивности излучения, то есть электрон будет вести себя как волна. С другой стороны, если «выстреливать» электроны по одному, каждый из них будет оставлять четкий след на экране - то есть вести себя как частица. Самое интересное, что то же самое будет, если вместо пучка электронов вы возьмете пучок фотонов: в пучке они будут вести себя как волны, а по отдельности — как частицы.

Подытожим сказанное. Если фотоны или электроны направлять в такую камеру по одному, они ведут себя как частицы; однако если собрать достаточную статистику таких одиночных экспериментов, то выяснится, что по совокупности эти же электроны или фотоны распределятся на задней стенке камеры так, что на ней будет наблюдаться знакомая картина чередующихся пиков и спадов интенсивности, свидетельствующая об их волновой природе. Иными словами, в микромире объекты, которые ведут себя как частицы, при этом как бы «помнят» о своей волновой природе, и наоборот. Это странное свойство объектов микромира получило название квантово-волнового дуализма. Проводилось множество экспериментов с целью «разоблачить истинную природу» квантовых частиц: использовались различные экспериментальные методики и установки, включая такие, которые позволили бы на полпути к приемнику выявить волновые свойства отдельной частицы или, напротив, определить волновые свойства светового пучка через характеристики отдельных квантов. Всё тщетно. Судя по всему, квантово-волновой дуализм объективно присущ квантовым частицам.

Принцип дополнительности - простая констатация этого факта. Согласно этому принципу, если мы измеряем свойства квантового объекта как частицы, мы видим, что он ведет себя как частица. Если же мы измеряем его волновые свойства, для нас он ведет себя как волна. Оба представления отнюдь не противоречат друг другу - они именно дополняют одно другое, что и отражено в названии принципа.

Философия науки выиграла от такого корпускулярно-волнового дуализма несопоставимо больше, чем было бы возможно при его отсутствии и строгом разграничении явлений на корпускулярные и волновые. Сегодня совершенно очевидно, что объекты микромира ведут себя принципиально иным образом, нежели объекты привычного нам макромира. Но почему? На каких скрижалях это записано? И, подобно тому как средневековые натурфилософы мучительно пытались понять, является ли полет стрелы «свободным» или «вынужденным», так и современные философы бьются над разрешением квантово-волнового дуализма. На самом же деле и электроны, и фотоны представляют собой не волны и не частицы, а нечто совершенно особенное по своей внутренней природе - и потому не под-

дающееся описанию в терминах нашего повседневного опыта. Если же и дальше пытаться втиснуть их поведение в рамки знакомых нам парадигм, неизбежны всё новые парадоксы. Так что главный вывод здесь состоит в том, что наблюдаемый нами дуализм порожден не присущими квантовым объектам свойствами, а несовершенством категорий, которыми мы мыслим.

## 4.9 Уравнение Шрёдингера 1926

Дуальная корпускулярно-волновая природа квантовых частиц описывается дифференциальным уравнением.

Согласно фольклору, столь распространенному среди физиков, случилось это так: в 1926 году физик-теоретик по имени Эрвин Шрёдингер выступал на научном семинаре в Цюрихском университете. Он рассказывал о странных новых идеях, витающих в воздухе, о том, что объекты микромира часто ведут себя скорее как волны, нежели как частицы. Тут слова попросил пожилой преподаватель и сказал: «Шрёдингер, вы что, не видите, что всё это чушь? Или мы тут все не знаем, что волны - они на то и волны, чтобы описываться волновыми уравнениями?» Шрёдингер воспринял это как личную обиду и задался целью разработать волновое уравнение для описания частиц в рамках квантовой механики - и с блеском справился с этой задачей.

Тут необходимо сделать пояснение. В нашем обыденном мире энергия переносится двумя способами: материей при движении с места на место (например, едущим локомотивом или ветром) - в такой передаче энергии участвуют частицы - или волнами (например, радиоволнами, которые передаются мощными передатчиками и ловятся антеннами наших телевизоров). То есть в макром мире, где живём мы с вами, все носители энергии строго подразделяются на два типа — корпускулярные (состоящие из материальных частиц) или волновые. При этом любая волна описывается особым типом уравнений - волновыми уравнениями. Все без исключения волны - волны океана, сейсмические волны горных пород, радиоволны из далеких галактик — описываются однотипными волновыми уравнениями. Это пояснение нужно для того, чтобы было понятно, что если мы хотим представить явления субатомного мира в терминах волн распределения вероятности, эти волны также должны описываться соответствующим волновым уравнением.

Шрёдингер применил к понятию волн вероятности классическое дифференциальное уравнение волновой функции и получил знаменитое уравнение, носящее его имя. Подобно тому как обычное уравнение волновой функции описывает распространение, например, ряби по поверхности воды, уравнение Шрёдингера описывает распространение волны вероятности нахождения частицы в заданной точке пространства. Пики этой волны (точки максимальной вероятности) показывают, в каком месте пространства скорее всего окажется частица. Хотя уравнение Шрёдингера относится

к области высшей математики, оно настолько важно для понимания современной физики, что я его все-таки здесь приведу — в самой простой форме (так называемое «одномерное стационарное уравнение Шрёдингера»). Вышеупомянутая волновая функция распределения вероятности, обозначаемая греческой буквой  $\Psi$ , является решением следующего дифференциального уравнения (ничего страшного, если оно вам не понятно; главное - примите на веру, что это уравнение свидетельствует о том, что вероятность ведёт себя как волна):

$$\frac{d^2\Psi}{dx^2} + \frac{8\pi^2m}{h^2}(E - U)\Psi = 0$$

где  $x$  — расстояние,  $h$  — постоянная Планка, а  $m$ ,  $E$  и  $U$  — соответственно масса, полная энергия и потенциальная энергия частицы.

Картина квантовых событий, которую дает нам уравнение Шрёдингера, заключается в том, что электроны и другие элементарные частицы ведут себя подобно волнам на поверхности океана. С течением времени пик волны (соответствующий месту, в котором скорее всего будет находиться электрон) смещается в пространстве в соответствии с описывающим эту волну уравнением. То есть то, что мы традиционно считали частицей, в квантовом мире ведёт себя во многом подобно волне.

Когда Шрёдингер впервые опубликовал свои результаты, в мире теоретической физики разразилась буря в стакане воды. Дело в том, что практически в то же время появилась работа современника Шрёдингера - Вернера Гейзенберга, в которой автор выдвинул концепцию «матричной механики», где те же задачи квантовой механики решались в другой, более сложной с математической точки зрения матричной форме. Переполох был вызван тем, что ученые попросту испугались, не противоречат ли друг другу два в равной мере убедительных подхода к описанию микромира. Волнения были напрасны. Сам Шрёдингер в том же году доказал полную эквивалентность двух теорий - то есть из волнового уравнения следует матричное, и наоборот; результаты же получаются идентичными. Сегодня используется в основном версия Шрёдингера (иногда его теорию называют «волновой механикой»), так как его уравнение менее громоздкое и его легче преподавать.

Однако представить себе и принять, что нечто вроде электрона ведёт себя как волна, не так-то просто. В повседневной жизни мы сталкиваемся либо с частицей, либо с волной. Мяч - это частица, звук - это волна, и всё тут. В мире квантовой механики всё не так однозначно. На самом деле — и эксперименты это вскоре показали - в квантовом мире сущности отличаются от привычных нам объектов и обладают другими свойствами. Свет, который мы привыкли считать волной, иногда ведёт себя как частица (которая называется фотон), а частицы вроде электрона и протона могут вести себя как волны.

Эту проблему обычно называют двойственной или дуальной корпускулярно-волновой природой квантовых частиц, причем свойственна она, судя по всему, всем объектам субатомного мира. Мы

должны понять, что в микромире наши обыденные интуитивные представления о том, какие формы может принимать материя и как она себя может вести, просто неприменимы. Сам факт, что мы используем волновое уравнение для описания движения того, что привыкли считать частицами, — яркое тому доказательство. В этом нет особого противоречия. Ведь у нас нет никаких веских оснований полагать, будто то, что мы наблюдаем в макромире, должно с точностью воспроизводиться на уровне микромира. И тем не менее дуальная природа элементарных частиц остается одним из самых непонятных и тревожащих аспектов квантовой механики для многих людей, и не будет преувеличением сказать, что все беды начались с Эрвина Шрёдингера.

## 4.10 Опыт Дэвиссона-Джермера 1927

Электрон может проявлять свойства не только частицы, но и волны.

Согласно принципу дополнительности частицы в рамках квантовой механики могут проявлять волновые свойства, а волны — корпускулярные. Электрон, например, традиционно представляли себе в виде отрицательно заряженного миниатюрного шарика, однако в 1924 году Луи де Бройль показал, что любую частицу, обладающую импульсом  $p$  можно представить в виде волны, длина которой равна:

$$\lambda = \frac{h}{p}.$$

Естественно, ученые сразу же стали проверять эту гипотезу, и самым естественным методом проверки оказались попытки обнаружить волновую дифракцию электронов. Однако успехом эти попытки увенчались лишь в 1927 году благодаря классическим опытам, поставленным американцами Клинтоном Дэвиссоном и Лестером Джермером и, независимо от них, англичанином Джорджем Томсоном.

Американские экспериментаторы в качестве источника свободных электронов использовали раскаленную нить, помещенную в вакуумную камеру. Полученный направленный пучок быстрых электронов они рассеивали на кристалле. В итоге им удалось обнаружить интерференционные пики интенсивности рассеянных электронов, первый из которых приходился на угол рассеяния около  $65^\circ$ .

То есть, фактически, они воспроизвели эксперимент по рассеянию рентгеновских лучей (приведший к открытию их дифракции на кристаллах и выводу закона Брэгга), используя вместо рентгеновского луча сфокусированный поток электронов. По сути, каждый атом кристалла, согласно принципу Гюйгенса, является источником вторичных волн, и они взаимно усиливаются в результате интерференции между ними при рассеянии под определенными углами, когда фазы интерферирующих вторичных волн совпадают. И Дэвиссону с Джермером удалось найти такой угол максимума числа рассеянных электронов. Рассчитав по этому углу и импульсу электронов длину волны, ученые

выяснили, что она в точности совпадает с длиной волны, предсказываемой соотношением де Бройля. Так была доказана гипотеза о наличии у элементарных частиц волновых свойств.

#### 4.11 Квантовый туннельный эффект 1924

Имеется вероятность, что квантовая частица проникнет за барьер, который непреодолим для классической элементарной частицы.

Представьте шарик, катающийся внутри сферической ямки, вырытой в земле. В любой момент времени энергия шарика распределена между его кинетической энергией и потенциальной энергией силы тяжести в пропорции, зависящей от того, насколько высоко шарик находится относительно дна ямки (согласно первому началу термодинамики). При достижении шариком борта ямки возможны два варианта развития событий. Если его совокупная энергия превышает потенциальную энергию гравитационного поля, определяемую высотой точки нахождения шарика, он выпрыгнет из ямки. Если же совокупная энергия шарика меньше потенциальной энергии силы тяжести на уровне борта лунки, шарик покатится вниз, обратно в ямку, в сторону противоположного борта; в тот момент, когда потенциальная энергия будет равна совокупной энергии шарика, он остановится и покатится назад. Во втором случае шарик никогда не выкатится из ямки, если не придать ему дополнительную кинетическую энергию - например, подтолкнув. Согласно законам механики Ньютона, шарик никогда не покинет ямку без придания ему дополнительного импульса, если у него недостаточно собственной энергии для того, чтобы выкатиться за борт.

А теперь представьте, что борта ямы возвышаются над поверхностью земли (наподобие лунных кратеров). Если шарик у удастся перевалить за приподнятый борт такой ямы, он покатится дальше. Важно помнить, что в ньютоновском мире шарика и ямки сам факт, что, перевалив за борт ямки, шарик покатится дальше, не имеет смысла, если у шарика недостаточно кинетической энергии для достижения верхнего края. Если он не достигнет края, он из ямы просто не выберется и, соответственно, ни при каких условиях, ни с какой скоростью и никуда не покатится дальше, на какой бы высоте над поверхностью снаружи ни находился край борта.

В мире квантовой механики дело обстоит иначе. Представим себе, что в чем-то вроде такой ямы находится квантовая частица. В этом случае речь идет уже не о реальной физической яме, а об условной ситуации, когда частице требуется определенный запас энергии, необходимый для преодоления барьера, мешающего ей вырваться наружу из того, что физики условились называть «потенциальной ямой». У этой ямы есть и энергетический аналог борта - так называемый «потенциальный барьер». Так вот, если снаружи от потенциального барьера уровень напряженности энергетического поля ниже, чем энергия, которой обладает частица, у нее имеется шанс оказаться «за бортом», даже если

реальной кинетической энергии этой частицы недостаточно, чтобы «перевалить» через край борта в ньютоновском понимании. Этот механизм прохождения частицы через потенциальный барьер и назвали квантовым туннельным эффектом.

Работает он так: в квантовой механике частица описывается через волновую функцию, которая связана с вероятностью местонахождения частицы в данном месте в данный момент времени. Если частица сталкивается с потенциальным барьером, уравнение Шрёдингера позволяет рассчитать вероятность проникновения частицы через него, поскольку волновая функция не просто энергетически поглощается барьером, но очень быстро гасится - по экспоненте. Иными словами, потенциальный барьер в мире квантовой механики размыт. Он, конечно, препятствует движению частицы, но не является твердой, непроницаемой границей, как это имеет место в классической механике Ньютона.

Если барьер достаточно низок или если суммарная энергия частицы близка к пороговой, волновая функция, хотя и убывает стремительно при приближении частицы к краю барьера, оставляет ей шанс преодолеть его. То есть имеется определенная вероятность, что частица будет обнаружена по другую сторону потенциального барьера — в мире механики Ньютона это было бы невозможно. А раз уж частица перевалила через край барьера (пусть он имеет форму лунного кратера), она свободно покатится вниз по его внешнему склону прочь от ямы, из которой выбралась.

Квантовый туннельный переход можно рассматривать как своего рода «утечку» или «просачивание» частицы через потенциальный барьер, после чего частица движется прочь от барьера. В природе достаточно примеров такого рода явлений, равно как и в современных технологиях. Возьмем типичный радиоактивный распад: тяжелое ядро излучает альфа-частицу, состоящую из двух протонов и двух нейтронов. С одной стороны, можно представить себе этот процесс таким образом, что тяжелое ядро удерживает внутри себя альфа-частицу посредством сил внутриядерной связи, подобно тому как шарик удерживался в ямке в нашем примере. Однако даже если у альфа-частицы недостаточно свободной энергии для преодоления барьера внутриядерных связей, всё равно имеется вероятность ее отрыва от ядра. И, наблюдая спонтанное альфа-излучение, мы получаем экспериментальное подтверждение реальности туннельного эффекта.

Другой важный пример туннельного эффекта - процесс термоядерного синтеза, питающий энергией звезды. Один из этапов термоядерного синтеза — столкновение двух ядер дейтерия (по одному протону и одному нейтрону в каждом), в результате чего образуется ядро гелия-3 (два протона и один нейтрон) и испускается один нейтрон. Согласно закону Кулона, между двумя частицами с одинаковым зарядом (в данном случае протонами, входящими в состав ядер дейтерия) действует мощнейшая сила взаимного отталкивания - то есть налицо мощнейший потенциальный барьер. В мире по Ньютону ядра дейтерия попросту не могли бы сблизиться на достаточное расстояние и синтезировать ядро гелия. Однако в недрах звезд температура и давление столь высоки, что энергия

ядер приближается к порогу их синтеза (в нашем смысле, ядра находятся почти на краю барьера), в результате чего начинает действовать туннельный эффект, происходит термоядерный синтез - и звезды светят.

Наконец, туннельный эффект уже на практике применяется в технологии электронных микроскопов. Действие этого инструмента основано на том, что металлическое острие щупа приближается к исследуемой поверхности на сверхмалое расстояние. При этом потенциальный барьер не дает электронам из атомов металла перетечь на исследуемую поверхность. При перемещении щупа на предельно близком расстоянии вдоль исследуемой поверхности он как бы перебирает атом за атомом. Когда щуп оказывается в непосредственной близости от атомов, барьер ниже, чем когда щуп проходит в промежутках между ними. Соответственно, когда прибор «нащупывает» атом, ток возрастает за счет усиления утечки электронов в результате туннельного эффекта, а в промежутках между атомами ток падает. Это позволяет подробнее исследовать атомные структуры поверхностей, буквально «картографируя» их. Кстати, электронные микроскопы как раз и дают окончательное подтверждение атомарной теории строения материи.

#### 4.12 Постулаты квантовой механики и ее математический аппарат

Классическая механика и электродинамика при попытке применить их объяснению атомных явлений приводили к результатам, находящимся в резком противоречии с экспериментом. Наиболее яркий тому пример - попытка применения классической электродинамики к модели атома, в которой электроны движутся вокруг ядра по классическим орбитам. При таком движении, как и при всяком движении зарядов с ускорением, электроны должны были бы непрерывно излучать энергию в виде электромагнитных волн и, в конце концов, — неизбежно упасть на положительно заряженное ядро. Таким образом — с точки зрения классической электродинамики - атом неустойчив. Как мы видим — этот тезис не соответствует действительности. Такое глубокое противоречие теории с экспериментом свидетельствует о том, что описание микрообъектов требует фундаментального изменения в основных классических представлениях и законах.

Из целого ряда экспериментальных данных (таких, как дифракция электронов) следует, что механика, которой подчиняются атомные явления - квантовая механика - должна быть основана на представлениях о движении, принципиально отличных от представлений классической механики. В квантовой механике не существует понятия траектории частиц, а, следовательно - и других динамических характеристик. ЭТОТ ТЕЗИС СФОРМУЛИРОВАН В ПРИНЦИПЕ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ГЕЙЗЕНБЕРГА: **Нельзя со сколь угодно точностью одновременно измерить координату и импульс микрообъекта**

Известно, что полное описание состояния классической физической системы осуществляется за-

данием в начальный момент времени всех ее координат и скоростей. По этим данным уравнения движения полностью определяют поведение системы во времени. В квантовой механике, поскольку координаты и соответствующие им скорости не существуют одновременно, описание осуществляется меньшим числом величин, т.е. является менее подробным. Именно поэтому квантовая механика не может делать строго определенных предсказаний относительно будущего поведения микрообъекта, и ее задача состоит лишь в определении вероятности получения того или иного результата при измерении.

Естественно, что столь радикальное изменение физических представлений о движении требует и столь же радикального изменения математического аппарата. Основы этого были сформулированы как постулаты квантовой механики:

**Постулат №1.** Состояние частицы (или системы частиц) задано, если известна волновая функция  $\Psi(q)$ .

В квантовой механике состояние всей системы может быть описано функцией координат  $\Psi(q)$ , квадрат модуля которой определяет распределение вероятностей значений координат  $|\Psi(q)|^2 dq$  — есть вероятность того, что произведенное над системой измерение обнаружит значение координат в элементе объема  $dq$ . Функцию  $\Psi(q)$  называют волновой функцией системы. Волновая функция обязана удовлетворять ряду требований:

- Она должна быть непрерывной.
- Она должна быть однозначной.
- Она должна быть интегрируема с квадратом, т.е. интеграл  $\int |\Psi(q)|^2 dq$  должен существовать.
- Она должна быть нормированной, т.е. этот интеграл должен быть равен 1.

Физический смысл последнего утверждения довольно прост и прозрачен: сумма вероятностей всех возможных значений координат равна единице, так как обнаружение объекта в любой точке пространства — есть событие достоверное.

Следует также отметить, что волновая функция системы может быть комплексной, и она определена лишь с точностью до фазового множителя  $\exp(i\alpha)$ , где  $\alpha$  — вещественное число. Эта неопределенность не может быть устранена, однако она несущественна и не отражается на физических результатах.

**Постулат №2.** Волновые функции подчиняются принципу суперпозиции: если в состоянии с волновой функцией  $\Psi_1(q)$  некоторое измерение приводит к результату  $X_1$ , а в состоянии  $\Psi_2(q)$  — к результату  $X_2$ , то всякая функция вида  $\Psi = C_1\Psi_1(q) + C_2\Psi_2(q)$  описывает такое состояние, в котором измерение дает либо результат  $X_1$ , либо  $X_2$ .

**Постулат №3.** Всякой физической величине  $L$  в квантовой механике сопоставлен линейный самосопряженный оператор. Единственно возможными величинами, которые может иметь эта физическая величина, являются собственные значения  $l$  операторного уравнения  $L\Psi = l\Psi$ .

**Постулат №4.** Возможная волновая функция состояния системы  $\Psi$  получается при решении дифференциального уравнения  $ih\frac{d\Psi}{dt} = H\Psi$ , где  $H$  — оператор Гамильтона, а уравнение называется уравнением Шредингера.

**Постулат №5.** Если произвести многократные измерения какой-либо динамической переменной  $l$  системы, находящейся в состоянии  $\Psi$ , то на основании результатов этих измерений можно определить ее среднюю величину. Эта средняя величина вычисляется по формуле  $l = \frac{\int \Psi^* L \Psi dq}{\int \Psi^* \Psi dq}$ .