

## Поможет ли дискретное движение понять квантовые парадоксы?

В.Л. Янчилин

(Получена 17 сентября 2004; опубликована 23 сентября 2004)

Первая часть статьи целиком посвящена описанию наиболее ярких квантово-механических парадоксов, а также качественному анализу основных понятий, лежащих в фундаменте квантовой механики. Её цель – наглядно показать принципиальное отличие физики микромира от привычной для нас физики макромира. Во второй части статьи для объяснения квантовых явлений вводится принципиально новое понятие – *дискретное движение*. По мнению автора, дискретное движение – это ключ к пониманию квантового мира. При написании статьи был использован материал книг [1,2].

### Часть 1. Парадоксы квантового мира

#### § 1. История квантовой механики

В 1900 году Макс Планк, исследуя различные эмпирические формулы для излучения, смог интуитивно угадать закон излучения абсолютно чёрного тела. Для того чтобы как-то теоретически обосновать этот закон, Планк предположил, что энергия излучается квантами (порциями). При этом энергия каждого кванта равна:  $\varepsilon = h\nu$ , где  $\nu$  – частота излучения, а  $h \approx 6,63 \cdot 10^{-34}$  Дж·с – новая постоянная величина, имеющая размерность действия и названная впоследствии постоянной Планка. В связи с этим 1900 год считается годом рождения квантовой механики. В настоящее время выражение для энергии фотона обычно пишется в виде:  $\varepsilon = \hbar\omega$ , где  $\omega$  – так называемая циклическая частота, она равна  $\omega = 2\pi\nu$ , а величина  $\hbar = h/2\pi$  – также называется постоянной Планка.

Следующий шаг в развитии квантовой механики был сделан в 1905 году Альбертом Эйнштейном. Изучая закон излучения Планка, Эйнштейн пришёл к выводу, что электромагнитное излучение не только излучается квантами, но также переносится и поглощается квантами. Иначе говоря, свет представляет собой поток частиц – фотонов. Используя это предположение, Эйнштейн смог очень просто объяснить и количественно описать такое необычное для того времени явление как фотоэффект. Суть фотоэффекта состоит в том, что свет, падающий на какой-либо металл, выбивает электроны из его поверхности. Этот эффект был случайно открыт Герцем в 1887 году, когда он исследовал электромагнитные волны, предсказанные теорией Максвелла. Как показали эксперименты, кинетическая энергия выбитых электронов не зависит от интенсивности падающего на металл излучения, но возрастает с увеличением частоты излучения. Это свойство фотоэффекта не объяснимо в рамках классической электродинамики, но оно легко объяснимо, если предположить, что свет представляет собой поток частиц. Вот уравнение, которое было предложено Эйнштейном для объяснения фотоэффекта:

$$K = \hbar\omega - W, \quad (1)$$

Здесь  $\hbar\omega$  – энергия падающего на металл фотона,  $K$  – кинетическая энергия выбитого электрона, а  $W$  – работа выхода, то есть минимальная энергия, необходимая для выбивания электрона за пределы поверхности металла (она зависит от типа металла и состояния его поверхности).

Можно отметить, что ещё Исаак Ньютон считал, что свет представляет собой поток частиц. Из-за авторитета Ньютона это предположение довольно долго существовало в физике. Но в девятнадцатом веке было экспериментально установлено, что свет имеет волновую природу. Кроме того, из полученных Максвеллом электродинамических уравнений следовало, что колебания электромагнитного поля должны распространяться в пустоте со скоростью света. И вскоре электромагнитные волны были экспериментально обнаружены Герцем. Поэтому в начале двадцатого века никто из учёных не сомневался в том, что свет имеет волновую природу. И никто, даже Планк, не принял всерьёз гипотезу Эйнштейна о том, что свет состоит из частиц. Отрицательное отношение физиков изменилось лишь в 1922 году, после открытия эффекта Комптона (изменения длины волны рентгеновских лучей, обусловленное упругим рассеянием фотонов на электронах).

В 1909 году Эрнст Резерфорд провёл ряд опытов по рассеянию  $\alpha$ -частиц очень тонкой золотой фольгой. Эти знаменитые эксперименты дали основание Резерфорду высказать следующее предположение об устройстве атома. Атом состоит из очень маленького положительно заряженного ядра (примерно  $10^{-14}$  м), в котором сосредоточена практически вся масса атома, и это ядро окружено облаком из отрицательно заряженных электронов (примерно  $10^{-10}$  м). Открытие Резерфорда поставило перед физиками новую проблему: почему атомы стабильны? Дело в том, что с точки зрения классической электродинамики электроны, вращаясь вокруг ядра, должны были бы непрерывно излучать электромагнитные волны.

Излучая, электроны теряли бы свою энергию, что должно было бы привести, в конце концов, к их падению на ядро. Таким образом, согласно классической электродинамике, атом был бы неустойчивым, что ни в какой степени не соответствует действительности [3, с.13].

В 1913 году Нильс Бор для объяснения феномена устойчивости атомов предложил модель атома, основанную на следующих постулатах.

1) Электрон движется вокруг ядра по круговой орбите под действием кулоновской силы и в соответствии с законами Ньютона.

2) Электрон может двигаться только по такой орбите, на которой момент импульса электрона  $L$  равен целому числу, умноженному на постоянную Планка:

$$L = mVr = n\hbar, \quad n = 1, 2, 3, 4 \dots \quad (2)$$

Здесь  $m$  – масса электрона,  $V$  – скорость с которой он движется по орбите, а  $r$  – радиус орбиты.

3) Двигаясь по такой орбите, электрон *не излучает*.

4) При переходе электрона с орбиты с порядковым номером  $k$  на орбиту с номером  $\ell$  ( $k > \ell$ ) излучается фотон с частотой  $\omega$ :

$$\omega = \frac{E_k - E_\ell}{\hbar} \quad (3)$$

Здесь  $E_k$  – энергия электрона на орбите  $k$ , а  $E_\ell$  – его энергия на орбите  $\ell$ .

Модель атома, предложенная Бором, хорошо объясняла свойства и спектр атома водорода, а также водородоподобных атомов (то есть атомов, у которых на внешней электронной оболочке находится только один электрон). Но постулаты, лежащие в основе этой модели, не имели никакого теоретического обоснования, и, кроме того, противоречили законам классической электродинамики. Поэтому большинство физиков отнеслось к новой модели скептически.

Следующий важный шаг в становлении квантовой механики был сделан в 1923 году Луи де Бройлем. Исходя из того, что световые волны имеют корпускулярную природу, а также предполагая симметрию в природе, он предположил, что и частицы,

например электрон, должны проявлять волновые свойства. Например, фотон обладает энергией  $\varepsilon = \hbar\omega$  и импульсом  $p = \varepsilon/c = \hbar\omega/c$ . С другой стороны, с фотоном связан некоторый волновой процесс с длиной волны  $\lambda$ , равной  $\lambda = c/v = 2\pi c/\omega = 2\pi\hbar/p$ . Поэтому Луи де Бройль предположил, что не только с фотоном, но и с любой частицей, имеющей импульс  $p$ , связан некоторый волновой процесс с длиной волны  $\lambda$ . При этом:

$$\lambda = \frac{2\pi\hbar}{p} \quad (4)$$

И уже через два года гипотеза де Бройля была экспериментально подтверждена в опытах по дифракции электронов. Исходя из того, что электрон обладает волновыми свойствами, де Бройль очень просто объяснил существование стационарных орбит в боровской модели атома. Стационарная орбита – это такая орбита, на которой укладывается целое число волн. То есть электрон, вращаясь вокруг ядра, образует как бы стоячую волну. Гипотеза де Бройля, устанавливающая связь между частицами и волновыми процессами, поражала своей простотой и новизной подхода к решению противоречия волна-частица. Эта идея была настолько нова, что, несмотря на экспериментальное подтверждение, которое последовало очень быстро, потребовалось определённое время, чтобы она получила всеобщее признание среди физиков.

Основываясь на идеях де Бройля, в 1926 году Эрвин Шрёдингер написал своё знаменитое волновое уравнение, описывающее движение частицы в поле  $U(x,y,z)$ :

$$i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \left( \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} \right) + U(x,y,z) \Psi \quad (5)$$

Здесь  $m$  – масса частицы,  $i$  – мнимая единица, а  $\Psi(x,y,z,t)$  – шрёдингеровская волновая комплексная функция (амплитуда волны де Бройля). Вероятность обнаружить частицу в малой части объёма  $dV = dxdydz$  в момент времени  $t$  равна  $dW = |\Psi(x,y,z,t)|^2 dxdydz$ . То есть плотность вероятности пропорциональна квадрату модуля волновой функции. При этом:  $\iiint |\Psi(x,y,z,t)|^2 dxdydz = 1$ . Можно отметить, что вероятность обнаружить частицу в какой-нибудь данной точке пространства всегда равна нулю, потому что объём точки равен нулю. Поэтому имеет смысл говорить только о *плотности вероятности* нахождения частицы в данной точке.

Если  $\Psi$ -функция известна в начальный момент времени, то из уравнения Шрёдингера можно найти  $\Psi$ -функцию в последующие моменты времени. И в принципе это уравнение способно объяснить все атомные явления, кроме тех, которые связаны с магнетизмом и теорией относительности. Оно может быть применимо и для системы, состоящей из многих частиц. Волновую  $\Psi$ -функцию, которая отлична от нуля только в некоторой небольшой области пространства, иногда называют волновым пакетом.

Наконец, в 1927 году Вернер Гейзенберг, пытаясь устранить противоречие “волна-частица”, сформулировал принцип неопределённости (соотношение неопределённостей). Этот принцип выражает фундаментальный предел возможности одновременного измерения положения частицы и её импульса:

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \hbar/2. \quad (6)$$

Здесь  $\Delta x$  – неопределённость в положении частицы, а  $\Delta p_x$  – неопределённость в проекции её импульса вдоль оси  $x$ . Не сразу стало ясно, что именно выражает это соотношение. Только ли принципиальную невозможность получить более полное знание о движении

частицы или же *объективную неопределённость* в её движении. Аналогично соотношению (6) Гейзенберг установил соотношение для неопределённости в измерении энергии частицы  $\Delta E$  и промежутка времени  $\Delta t$ , в течение которого производится данное измерение:

$$\Delta t \cdot \Delta E \geq \hbar/2 \quad (7)$$

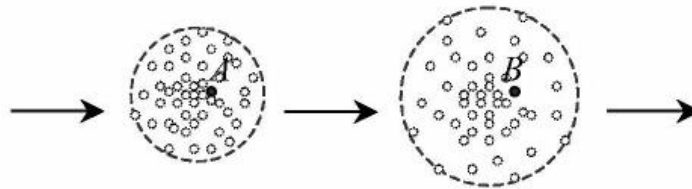
## § 2. Волновая $\Psi$ -функция

В основе механики Ньютона лежит представление о теле как о материальной точке (в том случае, когда размерами тела можно пренебречь), которая движется в пространстве по вполне определённой траектории – математической линии (то есть бесконечно тонкой линии). А законы Ньютона позволяют написать уравнение траектории. Если размерами тела пренебречь нельзя, то можно рассматривать центр масс тела, который в каждый момент времени находится в определённой точке пространства. И движение центра масс происходит по непрерывной траектории в соответствии с законами Ньютона. Механика Ньютона вполне наглядна и в этом смысле проста для понимания. А с точки зрения квантовой механики движение электрона (или другой частицы) нельзя рассматривать как движение по какой-либо траектории. С точки зрения квантовой механики движение электрона может быть полностью описано с помощью волновой  $\Psi$ -функции.

Давайте разберём этот вопрос на конкретном примере. Предположим, электрон движется в пространстве и проходит сначала точку  $A$ , а затем точку  $B$  (см. рис. 1). Это означает, что до какого-то момента времени вероятность обнаружить электрон в окрестности точки  $A$  была равна нулю. Затем, начиная с некоторого момента времени, вероятность обнаружить электрон в окрестности точки  $A$  стала отлична от нуля, и в течение некоторого промежутка времени она возрастала до максимума. А затем, в течение некоторого времени, вероятность обнаружить электрон в окрестности точки  $A$  опять уменьшилась до нуля. Общее время  $\Delta t_A$  прохождения электроном точки  $A$  можно оценить так:

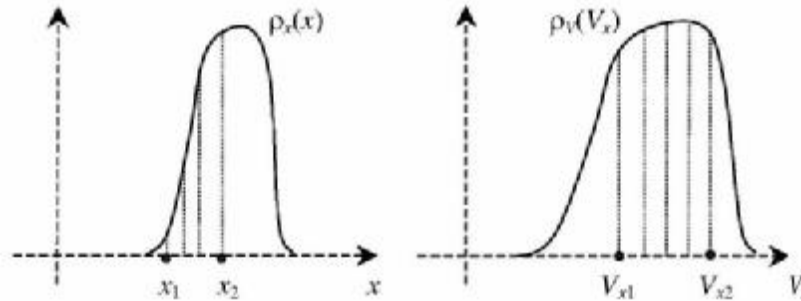
$$\Delta t_A \approx \frac{\Delta x_A}{V_x} \quad (8)$$

здесь  $\Delta x_A$  – размер области, в которой  $\Psi$ -функция, описывающая движение электрона, отлична от нуля (в то время, когда электрон проходит т.  $A$ );  $\langle V_x \rangle$  – средняя скорость электрона вдоль оси  $x$  (вдоль направления движения), она остаётся неизменной при движении электрона.



**Рис. 1.** Движение электрона можно схематично изобразить в виде движения облака (размеры облака определяются объёмом пространства, в котором волновая  $\Psi$ -функция отлична от нуля), состоящего из виртуальных электронов. И с точки зрения квантовой механики невозможно определить, в какой момент времени электрон прошёл точку  $A$ . Можно только рассчитать интервал времени  $\Delta t_A$ , в течение которого существует вероятность обнаружить электрон в окрестности точки  $A$ . Пока облако движется из точки  $A$  в точку  $B$ , его размеры увеличиваются, происходит так называемое расплывание волнового пакета.

Аналогичным образом электрон проходит точку  $B$ . При этом, пока электрон движется из точки  $A$  в точку  $B$ , размеры области, в которой  $\Psi$ -функция отлична от нуля, увеличиваются, происходит так называемое расплывание волнового пакета. Расплывание волнового пакета происходит потому, что электрон (или любая другая частица) не только не имеет точной координаты своего местоположения в пространстве, но он также не имеет и определённой скорости движения. И в каждый момент времени электрон обладает непрерывным спектром скоростей в некотором интервале (см. рис. 2).



**Рис. 2.** В каждый момент времени электрон не имеет ни точной координаты своего местоположения, ни точно определённой скорости движения. Он как бы “размазан” и в обычном пространстве (слева), и в пространстве скоростей (справа).

Вероятность обнаружить электрон в промежутке между точками  $x_1$  и  $x_2$  равна:

$$W(x_1, x_2) = \int_{x_1}^{x_2} \rho_x(x) dx.$$

А вероятность  $W(V_{x1}, V_{x2})$  того, что электрон будет иметь скорость в интервале скоростей  $(V_{x1}, V_{x2})$  равна:

$$W(V_{x1}, V_{x2}) = \int_{V_{x1}}^{V_{x2}} \rho_v(V_x) dV_x.$$

Зная волновую  $\Psi$ -функцию, описывающую движение электрона, всегда можно рассчитать не только распределение  $\rho_x(x)$ , но и распределение  $\rho_v(V_x)$ . То есть можно рассчитать распределение плотности вероятности местонахождения электрона и в обычном пространстве, и в пространстве скоростей. Вообще говоря, в квантовой механике принято говорить о распределении плотности вероятности местонахождения электрона в фазовом пространстве – пространстве координат и импульсов  $(x, y, z, p_x, p_y, p_z)$ . Ширина распределения  $\rho_x(x)$  и ширина распределения  $\rho_v(V_x)$  связаны между собой через соотношение неопределённостей Гейзенберга.

Электрон может получить более точную координату своего местоположения только в результате взаимодействия с классическим прибором (объектом, неопределённость в местоположении которого достаточно мала). При этом размеры виртуального облака уменьшаются практически до нуля, происходит так называемая редукция волновой функции.

### § 3. Две интерпретации квантовой механики

Сразу же с момента завершения создания квантовой механики в научном мире разгорелись ожесточённые споры по поводу её интерпретации: Что в действительности описывает волновая  $\Psi$ -функция? То ли объективную неопределённость в движении электрона (или другой частицы), то ли она отражает лишь наше незнание истинной траектории движения электрона? В результате возникли две различные точки зрения на волновую функцию.

1) *Статистическая интерпретация*. В каждый момент времени электрон (или другая частица) находится в определённом месте пространства. Волновая же функция описывает только возможную вероятность его нахождения в том или ином месте и не даёт знания о реальном местоположении электрона. И в этом смысле квантовая механика не полна.

2) *Копенгагенская интерпретация*. В каждый момент времени электрон не имеет определённого местоположения. Он *действительно* находится с различной плотностью вероятности (а именно,  $|\Psi|^2$ ) в разных точках некоторой области. То есть волновая функция даёт полное описание движения даже одного электрона.

Принципиальное различие этих интерпретаций было сформулировано Эйнштейном на пятом Сольвеевском конгрессе. Уже тогда он высказывал возражения против второй точки зрения [4].

С точки зрения статистической интерпретации движение электрона не отличается принципиально от движения, скажем камня. Просто квантовая механика ещё не достаточно развита (не полна), чтобы рассчитать его движение. Поэтому квантовая механика применима лишь как статистическое описание движения большого количества электронов. А неопределённость местоположения электрона (а значит и его волновые свойства) есть просто результат *нашего незнания* его истинного местоположения. Например, виртуальное облако распределения плотности вероятности местонахождения электрона (рис. 1) в действительности не существует. Такая точка зрения проста и наглядна, так как она основана на идеях классической физики. Но с этой точки зрения совершенно не объяснимо, почему электрон в атоме не падает на ядро. Неужели наше незнание местонахождения электрона в атоме удерживает его от падения? А как быть с экспериментальным фактом дифракции электронов? И что такое фотон: это частица или волна?

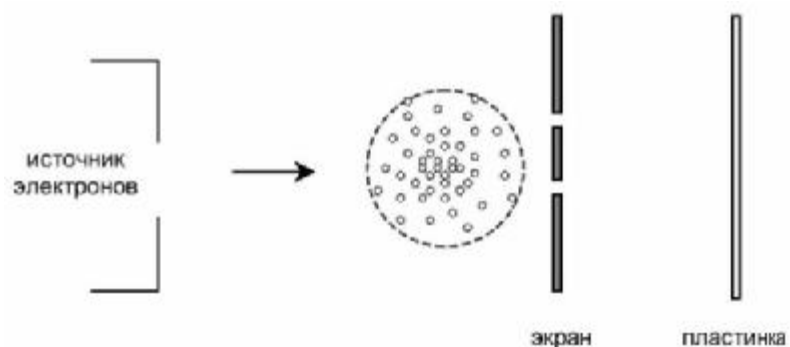
С точки зрения копенгагенской интерпретации перечисленные выше вопросы легко объяснимы. Но существуют другие вопросы, на которые нет ответа в рамках этой интерпретации. Напомним ещё раз, что с точки зрения копенгагенской интерпретации волновая  $\Psi$ -функция *полностью и однозначно* описывает *реальное* движение электрона. А это в свою очередь означает, что неделимый электрон может находиться одновременно в разных точках пространства. Это также означает, что неделимый электрон может двигаться с различными скоростями одновременно. А ведь в системе отсчёта, которая движется со скоростью, равной средней скорости движения электрона, электрон уже будет двигаться одновременно во все стороны. Можно представить себе замешательство физиков, когда им была предложена такая теория.

Теперь настало самое время напомнить о том, что физика – это наука экспериментальная, и наше непонимание какого-либо физического явления не может считаться достаточным основанием для отрицания этого явления. И для того чтобы ответить на вопрос об истинности той или иной интерпретации в данном случае, необходимо провести следующий эксперимент. Перед движущимся облаком виртуальных электронов нужно поставить экран с двумя отверстиями, а за экраном поставить пластинку, поглощающую электроны (см. рис. 3).

Если верна статистическая интерпретация, то никакого облака виртуальных электронов в действительности не существует. А существует только один электрон, который находится в определённом месте этого облака (нам не известном) и который пройдёт только через одно отверстие на экране, после чего попадёт на пластинку. Проводя такой опыт многократно (при этом каждый новый электрон, вылетающий из источника, будет с равной вероятностью проходить либо через первое отверстие, либо через второе),

мы получим на пластинке некоторое случайное распределение попавших на неё электронов.

А теперь посмотрим, какой следует ожидать результат данного эксперимента в том случае, если верна копенгагенская интерпретация. В этом случае каждый электрон, вылетающий из источника, будет подходить к экрану в виде реально существующего виртуального облака электронов. И, находясь одновременно во всех точках данного облака, каждый электрон будет одновременно проходить через оба отверстия. Таким образом, какая-то часть виртуального облака будет проходить через первое отверстие, и какая-то часть – через второе. (Пока оставим в стороне вопрос о том, какой механизм позволит неделимому электрону пройти одновременно через два отверстия).



**Рис. 3.** Из источника по одному вылетают электроны и в виде виртуального облака проходят через два отверстия на экране. После чего попадают на пластинку – детектор. Механизм прохождения облаком двух отверстий зависит от истинности одной из двух интерпретаций квантовой механики. Если верна статистическая интерпретация, то каждый электрон будет проходить только через одно отверстие, в результате чего на пластинке будет некоторое случайное распределение попавших на неё электронов. Но если верна копенгагенская интерпретация, то каждый электрон в виде виртуального облака будет проходить сразу через оба отверстия. И в результате этого на пластинке может появиться интерференционная картина.

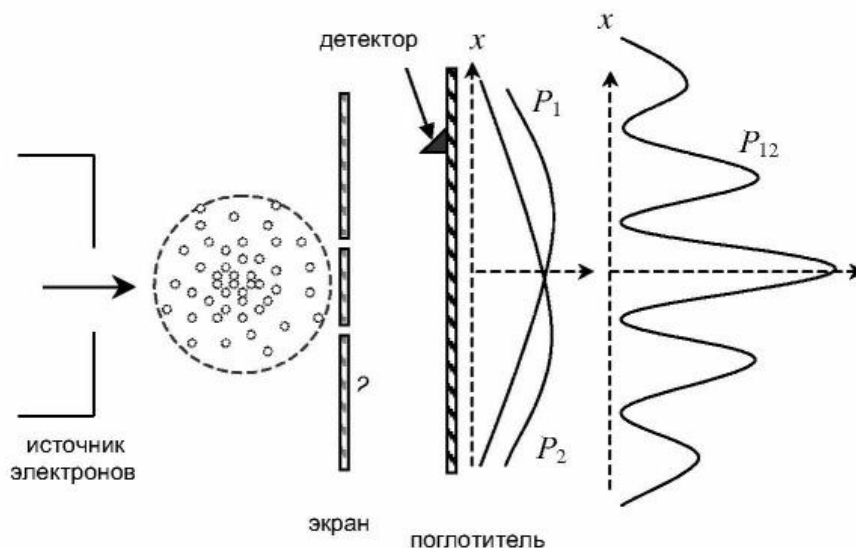
И при определённых условиях проведения эксперимента может произойти интерференция между тем, что прошло через первое отверстие и тем, что прошло через второе. Повторяя данный опыт многократно, можно будет получить на пластинке интерференционную картину. Интерференционную картину ни с чем не спутаешь, так как это очень специфичная картина, в которой минимумы и максимумы резко сменяют друг друга. Итак, чтобы выяснить, какая из двух интерпретаций истинна, необходимо провести данный эксперимент.

#### § 4. Прохождение электрона через два отверстия

Когда было экспериментально обнаружено, что электрон обладает волновыми свойствами, то естественно возник следующий вопрос. *Каждый отдельный электрон обладает волновыми свойствами или волновые свойства – это есть результат взаимодействия огромного числа электронов?* Если квантовая механика – это полная теория, то каждый электрон *действительно имеет неопределённость* в своём движении и, как результат, обладает волновыми свойствами. А если верна статистическая интерпретация, то каждый электрон движется по вполне определённой траектории и, следовательно, не может обладать волновыми свойствами.

Для того чтобы выяснить этот вопрос, был проведён ряд экспериментов, в которых использовались очень слабые источники электронов. Электроны вылетали из источника так редко, что в любой момент времени в приборе мог находиться только один электрон. И сейчас мы обсудим результаты одного из таких экспериментов. Это, уже ставший классическим, эксперимент, в котором электрон проходит через два отверстия (см. рис.4).

Из источника в заданном направлении **по одному** вылетают электроны. В виде виртуального облака они пролетают через два близкорасположенных на экране отверстия. За экраном находится детектор электронов. В эксперименте определяется вероятность  $P_1$  попадания электрона на детектор при его прохождении через первое отверстие (второе отверстие при этом закрыто). Для этого из источника испускается некоторое количество электронов. Число зарегистрированных на детекторе электронов делится на общее число вылетевших электронов (это и есть  $P_1$ ). Аналогично определяется вероятность  $P_2$  попадания электрона на детектор при его прохождении через второе отверстие (первое отверстие при этом закрыто). Затем определяется вероятность  $P_{12}$  попадания электрона на детектор, когда открыты оба отверстия. Местоположение детектора можно изменять и вновь определять  $P_1, P_2, P_{12}$ .



**Рис. 4.** Источник электронов состоит из вольфрамовой проволоочки, нагреваемой током и помещённой в металлическую коробку с отверстием. Если на проволочку подано отрицательное напряжение, а на коробку – положительное, то электроны, испущенные проволочкой, будут разгоняться стенками коробки, и некоторые из них проскочат сквозь отверстие. Перед источником стоит металлическая пластинка с двумя отверстиями – экран. За ней стоит другая пластинка – поглотитель. По ней может двигаться детектор – электронный умножитель, к которому присоединён динамик. При попадании электрона в детектор из динамика доносится "щелчок" [5].

Как видно из рисунка, кривая  $P_{12}$  явно не совпадает с суммой  $P_1+P_2$ . Это означает, что происходит интерференция электрона с самим собой. С одной стороны, электрон является неделимой частицей. Но с другой стороны, интерференция возможна только в том случае, если электрон проходит сразу через два отверстия. Если бы каждый электрон проходил только через одно отверстие, то всегда выполнялось бы равенство  $P_{12} = P_1 + P_2$ .

Кроме того, есть такие точки на поглотителе, соответствующие минимумам кривой  $P_{12}$ , в которые попадает очень мало электронов, когда открыты оба отверстия. А когда одно отверстие закрыто, то их попадает гораздо больше. Получается, что, открыв второе



отверстие, вы тем самым уменьшаете число электронов, проходящих через первое. Как это можно объяснить? А вот середина кривой  $P_{12}$  значительно превышает сумму  $P_1 + P_2$ . Это означает, что, открыв второе отверстие, вы тем самым *увеличиваете число электронов, проходящих через первое отверстие* и попадающих в середину кривой  $P_{12}$ .

Зависимость, связывающая кривую  $P_{12}$  с кривыми  $P_1$  и  $P_2$ , очень проста. Пусть  $\Psi_1$  – это амплитуда вероятности того, что электрон пройдет сквозь отверстие 1 и попадет в точку  $x$  на поглотителе. А  $\Psi_2$  – амплитуда вероятности того, что электрон пройдет сквозь отверстие 2 и также попадет в точку  $x$ . Поэтому  $P_1 = |\Psi_1|^2$ , а  $P_2 = |\Psi_2|^2$ . Амплитуда же вероятности того, что электрон пройдет через оба отверстия и попадет в точку  $x$  равна  $\Psi_1 + \Psi_2$ , и поэтому:

$$P_{12} = |\Psi_1 + \Psi_2|^2 \neq P_1 + P_2$$

Если же мы всё-таки попытаемся определить, через какое именно отверстие прошёл электрон (например, с помощью источника высокоэнергетичных фотонов, расположенного сразу за экраном), то обнаружим, что электрон проходит только через одно отверстие. При этом интерференция не наблюдается.

Приведённый эксперимент в деталях описал Ричард Фейнман в своих лекциях по физике. Вот его комментарий к нему [5,с.218]:

Предположим, что внутри электрона есть механизм какого-то рода, определяющий, куда электрон собирается попасть. Тогда эта машина должна определить *также*, через какое отверстие он намерен проследовать. Но не забывайте, что вся эта внутриэлектронная механика не должна зависеть от того, что делаем *мы*, и, в частности, от того, открыли мы данное отверстие или нет. Значит, если электрон, отправляясь в путь, уже прикинул, сквозь какую дырку он протиснется и где он приземлится, то для электронов, облюбовавших отверстие 1, мы получим распределение  $P_1$ , а для остальных – распределение  $P_2$ . А тогда для тех электронов, которые прошли через оба отверстия, с *необходимостью* распределение окажется суммой  $P_1 + P_2$ . Не видно способа обойти этот вывод. Но мы экспериментально доказали, что он неверен. Никто ещё не нашёл отгадки этой головоломки. Стало быть, в настоящее время приходится ограничиваться расчётом вероятностей. Мы говорим “в настоящее время”, но мы очень серьёзно подозреваем, что всё это – уже навсегда, и разгрызть этот орешек человеку не по зубам, ибо *такова природа вещей*.

И в другом месте [5,с.215]:

Вот как мы обязаны рассуждать, чтобы не делать ошибочных предсказаний. Если вы следите за отверстиями, а точнее, если у вас есть прибор, способный узнавать, сквозь какое отверстие из двух прошёл электрон, то вы можете говорить, что он прошёл сквозь отверстие 1 (или 2). Но если вы не пытались узнать, где прошёл электрон, если в опыте не было ничего возмущающего электроны, то вы не смеете думать, что электрон прошёл либо сквозь отверстие 1, либо сквозь отверстие 2. Если вы всё же начнёте так думать и затем делать различные выводы, то, несомненно, натворите ошибок в анализе.

Одними из первых аналогичный эксперимент провели в 1949 году Л. Биберман, Н. Сушкин и В. Фабрикант (описание этого эксперимента смотри, например, в [6]). Они использовали настолько слабый источник электронов, что среднее время между вылетом двух электронов составляло 0,24 миллисекунды. При этом электроны разгонялись до очень высоких энергий (72000 электрон-вольт) и проходили весь прибор от источника (катода) до пластинки за 8,5 наносекунды. То есть время прохождения электроном прибора было в 30 тысяч раз меньше, чем интервал времени между вылетами двух электронов. Таким образом, электроны по одному проходили через кристалл, который использовался вместо дифракционной решётки, и попадали в какую-то точку на пластинке. Однако, со временем на пластинке появлялась типичная дифракционная картина. После этого авторы эксперимента увеличили интенсивность источника в 10

миллионов раз, но всё равно получили на пластинке *точно такую же* дифракционную картинку.

Таким образом, проведённые над электронами эксперименты показывали, что электрон действительно существует в виде виртуального облака (см. рис. 1), и, проходя через экран с двумя отверстиями (или через кристалл), он взаимодействует сам с собой. Такого взаимодействия не было бы, если бы виртуальное облако (или волновая  $\Psi$ -функция, описывающая его движение) лишь отражало наше незнание истинного местоположения электрона. Следовательно, статистическая интерпретация не верна.

## § 5. Эксперимент Эйнштейна–Подольского–Розена

В 1935 году Эйнштейн (совместно с Розеном и Подольским) опубликовал статью под названием “Можно ли считать, что квантово-механическое описание физической реальности является полным?” [7]. В этой статье он рассмотрел следующий мысленный эксперимент. Допустим, что некоторая система, состоящая из двух частей  $A$  и  $B$  и описываемая волновой  $\Psi$ -функцией, самопроизвольно распадается. Например, два протона, находящиеся во взаимодействии друг с другом, разлетаются в разные стороны. Через некоторое время расстояние между ними станет настолько большим, что их взаимодействием можно будет пренебречь. Квантовая механика не может точно предсказать, в каких направлениях разлетятся протоны. Она позволяет только рассчитать вероятность того или иного направления. Однако если нам удастся обнаружить один протон, движущимся, например, в северном направлении, то отсюда следует, на основании закона сохранения импульса, что второй протон движется в южном направлении. Исходя из этого, можно сделать два различных предположения.

1. Первое предположение, сделанное с точки зрения статистической интерпретации и основанное на “здравом смысле”. *Второй протон сразу же после взаимодействия двигался в южном направлении, и мы узнали об этом, когда обнаружили первый протон.*

2. Второе предположение, сделанное с точки зрения копенгагенской интерпретации и основанное на том, что  $\Psi$ -функция даёт полное описание движения. *Измерение состояния первого протона мгновенно изменило  $\Psi$ -функцию, а значит, и состояние второго протона. То есть второй протон стал двигаться в южном направлении только после того, как мы “поймали” первый.*

Таким образом, квантовая механика предсказывает возможность *мгновенного действия на расстоянии*.

Эйнштейн отрицал возможность мгновенного действия на расстоянии и поэтому отверг второе предположение. Он сделал вывод, что второй протон сразу же после взаимодействия летел в южном направлении. А так как квантовая механика не могла предсказать этого заранее, то, следовательно, она является лишь вероятностным (статистическим) описанием движения и не даёт полного представления о реальности. Говоря другими словами, копенгагенская интерпретация не верна.

Учитывая важность этого вывода, а также то, что он расколол физиков на два лагеря (сторонников и противников копенгагенской интерпретации), давайте внимательно разберём мысленный эксперимент Эйнштейна на простой схеме, изображённой на рисунке 5. Два протона, находившиеся во взаимодействии друг с другом (точка  $C$ ), разлетаются в разные стороны. Предположим, что каждый протон может двигаться либо в направлении  $A$  и при этом попасть в один из трёх секторов  $A_1, A_2, A_3$ , либо в направлении  $B$  и при этом попасть в один из трёх секторов  $B_1, B_2, B_3$ . Вероятность того, что какой-нибудь из двух протонов попадёт в какой-либо из секторов  $A_1, A_2, A_3$  равна соответственно

$|\Psi(A_1)|^2, |\Psi(A_2)|^2, |\Psi(A_3)|^2$ . Вероятность того, что протон попадёт в какой-либо из секторов  $B_1, B_2, B_3$ , соответственно, равна  $|\Psi(B_1)|^2, |\Psi(B_2)|^2, |\Psi(B_3)|^2$ . Предположим для простоты, что все эти вероятности равны друг другу и равны  $1/3$ :

$$|\Psi(A_1)|^2 = |\Psi(A_2)|^2 = |\Psi(A_3)|^2 = |\Psi(B_1)|^2 = |\Psi(B_2)|^2 = |\Psi(B_3)|^2 = 1/3$$

Предположим, что скорость протонов такая, что до секторов  $A$  протон будет лететь 10 секунд, а до секторов  $B$  – 11 секунд. Пусть с момента взаимодействия протонов прошло 9 секунд. Основываясь на квантовой механике, мы не можем рассчитать, в каких секторах будут зарегистрированы протоны. И в связи с этим существует две точки зрения.

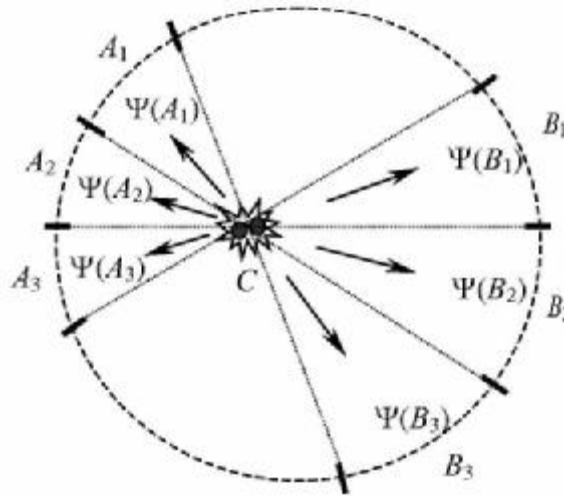


Рис. 5.

1. С точки зрения статистической интерпретации мы не можем это сделать потому, что квантовая механика – это неполная теория. Но в действительности каждый протон после распада уже движется в определённом направлении.

2. С точки зрения копенгагенской интерпретации мы не можем рассчитать, в каком направлении движутся протоны потому, что сами протоны ещё не выбрали направление своего движения. Каждый протон движется в виде волнового пакета – облака виртуальных протонов – и может оказаться в любом из секторов, то есть “протон ещё не сделал свой выбор”.

Когда проходит десятая секунда, волновой пакет, двигающийся в направлении  $A$ , достигает секторов  $A_1, A_2, A_3$  и взаимодействует с ними. В этот момент происходит редукция волновой  $\Psi$ -функции, то есть схлопывание волнового пакета, и мы регистрируем протон в одном из трёх секторов. Пусть это будет сектор  $A_1$ . Теперь, основываясь на законе сохранения импульса, мы можем сделать вывод, что второй протон летит в сектор  $B_3$ . И действительно, через одну секунду мы его там регистрируем.

Итак, в тот момент времени, когда мы зарегистрировали протон в секторе  $A_1$ , вероятность обнаружить второй протон в секторах  $B_1, B_2, B_3$  изменилась скачком. А именно, до этого момента было:

$$|\Psi(A_1)|^2 = |\Psi(A_2)|^2 = |\Psi(A_3)|^2 = |\Psi(B_1)|^2 = |\Psi(B_2)|^2 = |\Psi(B_3)|^2 = 1/3.$$

А после регистрации первого протона в секторе  $A_1$  стало:

$$|\Psi(A_2)|^2 = |\Psi(A_3)|^2 = |\Psi(B_1)|^2 = |\Psi(B_2)|^2 = 0$$

$$|\Psi(A_1)|^2 = |\Psi(B_3)|^2 = 1$$

Получается, что когда первый протон был зарегистрирован в секторе  $A_1$ , произошла редукция (мгновенное и скачкообразное изменение) волновой функции второго протона. И начиная с этого момента, мы знаем, что второй протон движется к сектору  $B_3$ .

Теперь простой вопрос. Мог ли факт регистрации первого протона в секторе  $A_1$  повлиять на движение второго протона?

Очевидно, нет. Ведь расстояние между первым и вторым протоном в принципе может быть сколь угодно большим. Например, несколько световых лет.

Таким образом, регистрация первого протона не могла повлиять на движение второго протона. Но, тем не менее, волновая функция второго протона изменилась сразу же после регистрации первого протона. И это означает, что волновая функция описывает не реальное движение второго протона (которое, очевидно, не могло измениться из-за того, что мы обнаружили первый протон), но лишь отражает наше незнание истинной траектории его движения. Следовательно, копенгагенская интерпретация не верна, а квантовая механика не полна.

### § 6. Действие призраков

Когда Эйнштейн (совместно с Розеном и Подольским) предложил свой знаменитый мысленный эксперимент с двумя протонами, разлетающимися в разные стороны, он смог просто и ясно доказать следующее. Либо квантовая механика неполна, либо существует мгновенное действие на расстоянии – нелокальность. Измерив местоположение одного протона, мы мгновенно узнаем местоположение второго, даже если он при этом улетел на другой конец Вселенной. Эйнштейн утверждал, что такое “действие призраков на расстоянии” невозможно совместить ни с какой мысленной реальностью. И именно поэтому он сделал вывод, что протоны сразу же после взаимодействия двигались в определённых направлениях. А так как квантовая механика не могла предсказать этого заранее, то, следовательно, она является не полной теорией, а лишь статистическим описанием микромира. Одним словом существуют скрытые параметры, которые определяют движение элементарных частиц и которые не учитываются в квантовой механике.

Даже в наше время некоторые учёные, также как и Эйнштейн, придерживаются статистической интерпретации квантовой механики и отвергают копенгагенскую. Они предполагают, что частица движется по определённой траектории, но её движение зависит от каких-то пока неизвестных скрытых параметров. Они надеются ввести в квантовую механику эти дополнительные параметры, чтобы можно было однозначно предсказать движение частицы. С этой точки зрения объективной неопределённости и случайности не существует. Просто нам пока неизвестны значения скрытых параметров. Предполагается, что новая теория будет иметь локальный характер, в отличие от квантовой механики. Как уже отмечалось, квантовая механика считается нелокальной теорией, потому что в ней измерения, сделанные над одной частью системы, могут мгновенно изменить состояние другой части системы.

В 1964 году Дж. Белл доказал одно неравенство (названное впоследствии неравенством Белла), из которого следовало, что предсказания возможных локальных теорий со скрытыми параметрами будут существенно отличаться от предсказаний квантовой механики. И в принципе можно экспериментально определить, какая из теорий верна – квантовая механика или локальные теории со скрытыми параметрами. Нужно отметить, что Белл не принимал копенгагенскую интерпретацию, так как считал её абсурдной. В то время когда Белл доказал своё неравенство, существующая экспериментальная техника ещё не позволяла его проверить. Но Белл надеялся, что

будущие эксперименты смогут опровергнуть копенгагенскую интерпретацию, так как он так же, как и Эйнштейн, не верил в “действие призраков”.

Вдохновлённые идеями Белла, А. Аспект, Ж. Далибар и Ж. Роже из Оптического института Парижского Университета в 1982 году осуществили эксперимент, аналогичный мысленному эксперименту Эйнштейна-Подольского-Розена. Только вместо двух протонов в эксперименте использовались пары фотонов, испускаемых из одного источника в разных направлениях и находящихся в едином квантовом состоянии (их движение описывалось общей волновой  $\Psi$ -функцией). Вместо импульсов и местоположения у фотонов измеряли поляризацию. Измеренная независимо поляризация отдельных групп фотонов, на первый взгляд, менялась случайным образом. Но когда сравнили результаты двух серий экспериментов, то между ними обнаружили очень сильную корреляцию, гораздо более сильную, чем можно было бы объяснить любой локальной реалистической теорией со скрытыми параметрами. Действие призраков на расстоянии, в которое никак не хотел верить Эйнштейн, оказалось реальным.

Таким образом, вопреки замыслу авторов, эксперимент подтвердил одно из самых странных свойств квантового мира – нелокальность. Вот как комментировали результат этого эксперимента в третьем номере журнала “В мире науки” за 1988 год [8]:

Полученные результаты отчётливее, чем когда-либо показывают, что мы живём в странном “квантовом мире”, не поддающемся интерпретации на основе очевидного здравого смысла. Вот несколько новых необычных выводов, справедливость которых мы вынуждены признать. Во-первых, два объекта, разделённые многометровым расстоянием и никак между собой не связанные, тем не менее “чувствуют” присутствие друг друга. Их поведение поразительным образом скоррелировано, так что измерения, выполненные над одним из них, мгновенно влияют на результаты измерений, выполняемых над другим. Этот вывод невозможно объяснить с точки зрения классической науки, но он полностью согласуется с квантовой механикой. Во-вторых, фотон – квант электромагнитного излучения – может вести себя и как частица, и как волна. В таком неопределённом состоянии он существует до тех пор, пока над ним не проведут какого-то физического измерения.

Необходимо отметить, что в настоящее время нелокальный характер квантовых процессов – это многократно проверенный экспериментальный факт. Например, группой Гизина (N. Gisin) в Женеве был проведён корреляционный опыт, в котором квантовые объекты, описываемые общей волновой  $\Psi$ -функцией, были разделены расстоянием в 10 км! И, тем не менее, измерения, произведённые над одним квантовым объектом, мгновенно изменяли состояние другого квантового объекта. В июньском номере журнала “Успехи физических наук” за 2000 год была напечатана обзорная статья на эту тему: “Квантовая механика: новые эксперименты, новые приложения и новые формулировки старых вопросов”. Вот выдержка из неё [9]:

... измерение, проведённое над одной из частиц, определяет результат измерения над второй частицей, которое проводится в тот же момент времени в другой точке пространства. Два события (измерение первой частицы и измерение второй частицы) могут быть разделены пространственно-подобным интервалом и, тем не менее, одно из них предопределяет второе.

## § 7. Виртуальные фотоны

Сейчас мы рассмотрим эксперимент, раскрывающий в полной мере всю необычность поведения квантовых объектов. Описание подобных (а также более экзотических) экспериментов, как реальных, так и мысленных, приводится в статье “Квантовая философия”, опубликованной в журнале “В мире науки” за 1992 год, в № 9,10 [10]. Данные опыты были проведены с фотонами, но и электроны ведут себя в точности подобно свету. Квантовое поведение всех атомных объектов (электронов,

протонов, нейтронов, фотонов и т. д.) одинаково: всех их можно условно назвать “частицами-волнами”.

Вот описание эксперимента (см. рис. 6). Луч лазера направляется на светоделитель – зеркало, покрытое слоем серебра такой толщины, чтобы половина падающих на него фотонов отражалась, а другая половина проходила сквозь зеркало. После расщепления на светоделителе оба луча с помощью системы зеркал направляются к детектору и соединяются на нём.

В данном эксперименте для каждого фотона существует всего три возможности. Во-первых, отразиться от светоделителя и попасть через систему зеркал на детектор. Во-вторых, пройти светоделитель насквозь и также попасть на детектор, но пройдя уже другой путь. И, наконец, в-третьих, проявив свою волновую природу, расщепиться на светоделителе на две волны и попасть на детектор сразу по обоим путям.

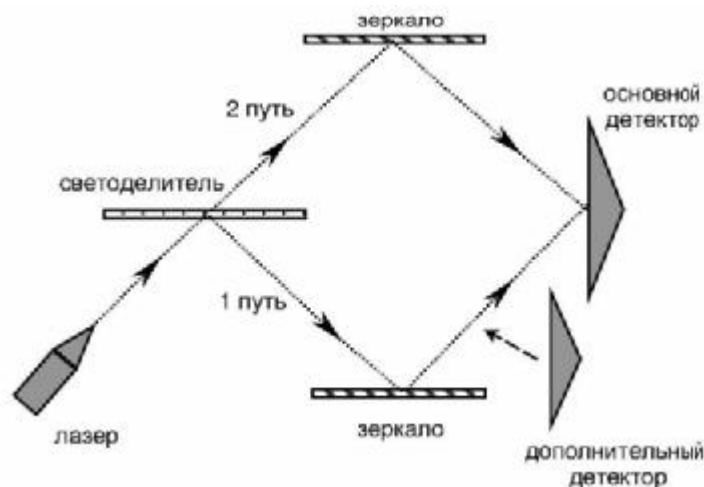


Рис. 6.

Если ничто не мешало идти фотону по обоим путям, то он вёл себя как волна и расщеплялся на светоделителе на две волны, которые интерферировали друг с другом на детекторе. Но если один путь был перекрыт (его перекрывали дополнительным детектором), то каждый фотон вёл себя как частица и летел только по одному пути, попадая либо на основной, либо на дополнительный детектор.

С одной стороны, каждый фотон попадал на детектор, принося определённую энергию (всегда одну и ту же), то есть вёл себя как частица. Но с другой стороны, если оба пути были открыты, то фотон, расщепившись на две волны, шёл сразу по обоим путям (однозначно такой вывод можно сделать, наблюдая интерференцию на детекторе), то есть вёл себя как волна.

Поэтому экспериментаторы решили “обхитрить” фотон, время от времени перекрывая один из путей *уже после того, как фотон прошёл через светоделитель, но прежде, чем он достиг детектора*. Таким образом экспериментаторы надеялись выяснить, движется ли фотон подобно частице по одному пути, или же подобно волне – сразу по двум. Тем не менее, фотон вёл себя как частица в том случае, если один путь был перекрыт, и как волна (шёл сразу по обоим путям), если оба пути были открыты. Казалось, что фотон “предчувствовал”, как поступят экспериментаторы, и не позволял себя “обхитрить”.

А что если сделать интерферометр размером с Солнечную систему (в статье предлагается ещё более грандиозный эксперимент)? Скажем, лазер и светоделитель установить на Юпитере, а детектор – на Земле. При этом сделать так, чтобы один луч шёл на Землю через систему зеркал на Марсе, а другой – через систему зеркал на Венере.

Предположим теперь, что пучок фотонов уже прошёл через светоделитель и летит к Земле, а экспериментатор всё ещё думает: наблюдать ли интерференцию на детекторе или перекрыть один из путей дополнительным детектором? Но ведь каждый фотон находится уже достаточно далеко от светоделителя. Он либо как частица уже летит только по одному пути, либо как волна – сразу по двум. А из уравнений квантовой механики следует, что если экспериментатор оставит оба пути открытыми, то окажется, что каждый фотон пролетел сразу по двум путям, и на детекторе произойдёт интерференция. А если же экспериментатор перекроет один путь, то окажется, что каждый фотон пролетел, подобно частице, только по одному пути. Получается, что действия экспериментатора, выполненные “сейчас”, способны повлиять на “выбор” фотона, который уже произошёл в достаточно далёком прошлом.

Вот что написано в статье о таком странном поведении квантовых объектов [10]:

Вплоть до настоящего времени эксперименты подтверждают худшие опасения Эйнштейна. Фотоны, нейтроны, и даже целые атомы иногда ведут себя как волны, а иногда – как частицы, однако в действительности они не имеют никакой определённой формы до тех пор, пока их не подвергают измерениям... Измерение одного квантового объекта может мгновенно повлиять на другой, расположенный далеко от него. Такое странное поведение может встречаться не только в микромире, но и у достаточно больших объектов, видимых невооружённым глазом. Эти открытия стимулировали возрождение интереса к определённой трактовке (интерпретации) квантовой механики, где делаются попытки ввести её в разумные рамки. Но существующие в настоящее время интерпретации выглядят какими угодно, только не разумными. В некоторых из них предлагается концепция “множественности миров”, в других требуется поверить в логику, допускающую, чтобы два противоположных по смыслу утверждения были истинны.

Нужно отметить, что из уравнений квантовой механики действительно вытекает “шизофренический” (термин из статьи) характер квантовых процессов. И в этом смысле квантовая механика является вполне законченной теорией, в полной мере описывающей всю необычность поведения квантовых объектов. Тем не менее, вопрос о физическом смысле квантовых явлений и о причинах странного поведения квантовых объектов до сих пор остаётся открытым. Остаётся также открытым вопрос о том, что *физически* представляет собой квантовый объект до тех пор, пока над ним не произведено измерение (наблюдение).

## **§ 8. Квантовая механика и здравый смысл**

Чтобы лучше разобраться в особенностях квантовой механики, следует выяснить, чем именно квантовая механика отличается от классической и что в ней наиболее противоречит здравому смыслу.

### **Закономерность и случайность: вероятностный характер квантово-механических законов**

Существенной особенностью квантовой механики является вероятностный характер процессов, происходящих в микромире. Полностью зная начальное состояние какой-либо системы, мы не сможем точно предсказать её дальнейшее поведение. И дело здесь не в том, что наши знания о данной системе неполны. *Вероятностный характер является объективной чертой квантовых процессов.*

А с точки зрения классической механики в мире царит жёсткая причинно-следственная связь событий. Значения координат и скоростей полностью определяют состояние классической системы и позволяют, в принципе, предсказать дальнейшее её движение. То, что происходило в прошлом, однозначно определило настоящее. А настоящее, в свою очередь, полностью определяет будущее. Такой взгляд на природу наиболее ярко выразил Лаплас: “Дайте мне начальные условия, и я рассчитаю всю

Вселенную”. Получается, например, что распределение частиц в газопылевой туманности (из которой образовалась Солнечная система) полностью предопределило всю дальнейшую историю развития Солнечной системы, в том числе и историю развития человечества. То, что происходит сейчас в мире, оказывается, было однозначно предопределено в далёком прошлом. Трудно придумать что-либо более абсурдное и противоречащее здравому смыслу.

Поэтому в этом вопросе (случайность и закономерность) как раз классическая механика и противоречит здравому смыслу. И наоборот, квантовая механика является более полной теорией, описывающей наш мир, так как она отражает не только закономерность, но и случайность, которая также наблюдается в физических процессах.

#### **Определённость и неопределённость**

В отличие от классической механики в квантовой механике отсутствует такое понятие, как траектория движения частицы. В данный момент времени квантовый объект (например, электрон) находится с различной плотностью вероятности в разных точках некоторой области. В классической механике предполагается, что центр масс некоторого тела в данный момент времени находится в определённой точке пространства. И движение центра масс происходит по непрерывной линии – траектории. Однако математическое понятие точки не имеет непосредственного физического смысла. Поэтому предположение о существовании траектории (непрерывной математической линии) движения не следует из экспериментальных данных, а является лишь удобной математической абстракцией. Подробно эту тему обсуждает Макс Борн в статье “Непрерывность, детерминизм, реальность” [11].

#### **Корпускулярно-волновой дуализм**

В основе квантовой механики лежит предположение о двойственной корпускулярно-волновой природе вещества и поля. *Электромагнитное поле излучается и поглощается порциями (фотонами)*, то есть проявляет свойства частиц. С другой стороны, частицы обладают волновыми свойствами. *Скажем, электрон (или фотон) является неделимой частицей, но он может пройти одновременно через два отверстия.* Подробно эта тема обсуждается, например, в «Берклеевском курсе физики», том 4, Квантовая физика, пункты: “Можно ли расщепить фотон?” и “Можно ли расщепить волны материи?” [12]. Корпускулярно-волновой дуализм является наиболее парадоксальной чертой квантовой механики. Однако эта черта лишь отражает парадоксальное поведение квантовых объектов.

#### **Нелокальность квантовой механики**

Из уравнений квантовой механики следует, что измерения, проделанные над одной частью системы (описываемой общей волновой функцией), **мгновенно влияют** на результаты измерений, проделанных над другой частью. Вот, например, что написано об этом в Физической энциклопедии [13, т.4; с.550]: “поставленные в ряде лабораторий мира эксперименты подтвердили предсказания квантовой механики о существовании более сильных корреляций между частицами, чем предсказывают любые локальные теории со скрытыми параметрами. Согласно этим теориям, результаты эксперимента, проведённого над одной из частиц, определяются только этим экспериментом и не зависят от результатов эксперимента, который может проводиться над другой частицей, не связанной с первой силовыми взаимодействиями”.

Может показаться, что мгновенное действие на расстоянии противоречит теории относительности. Однако из-за вероятностного характера волновой функции



противоречия здесь нет. Подробнее этот вопрос будет рассмотрен далее. Тем не менее, остаётся неясным, каким образом *физически* осуществляется механизм “дальнодействия”.

В целом же следует отметить, что отсутствие наглядного описания квантовых процессов делает квантовую механику чрезвычайно трудной для понимания. Вот, к примеру, что писал об этом Ричард Фейнман [14;с.117]:

Было время, когда газеты писали, что теорию относительности понимают только двенадцать человек. Мне лично не верится, что это правда. Возможно, было время, когда её понимал всего один человек, так как только он разобрался в том, что происходит, и не написал ещё об этом статьи. После же того, как учёные прочли эту статью, многие так или иначе поняли теорию относительности, и, я думаю, их было больше двенадцати. Но, мне кажется, я смело могу сказать, что квантовой механики никто не понимает.

Поэтому хотелось бы дополнить копенгагенскую интерпретацию понятной и наглядной иллюстрацией. А также предложить модель движения квантового объекта, объясняющую, с одной стороны, *как неделимый электрон может пройти одновременно через два отверстия*, а с другой стороны, *как физически осуществляется дальнодействие*.

## Часть 2. Новая Интерпретация Квантовой Механики

Проблема интерпретации квантовой механики состоит в том, чтобы придумать такую модель квантового объекта, которая позволила бы непротиворечиво описать его поведение. Основная трудность здесь в том, чтобы непротиворечиво объяснить корпускулярно-волновой дуализм, так как, на первый взгляд, кажется очевидным, что свойство быть неделимой частицей противоречит свойству быть волной.

Однако, тот экспериментальный факт, что квантовый объект ведёт себя и как частица, и как волна означает, что *в действительности* свойство быть частицей не противоречит свойству быть волной. И получается, что эти свойства противоречат друг другу только в нашем сознании! То есть в нашем сознании есть какая-то «лишняя» идея, которая мешает нам понять поведение квантового объекта.

Что же это за идея?

Это идея непрерывного движения. Как будет показано далее, отказавшись от понятия непрерывного движения (применимого только в классической физике) можно будет непротиворечиво описать парадоксы квантового мира.

### § 9. Дискретное движение

В современной физике существует всего два рода объектов. Это частицы и поля. Соответственно, существует и два типа движений. Это, во-первых, движение материальной точки вдоль непрерывной линии в пространстве. И, во-вторых, движение волны. С одной стороны, электрон (или другой квантовый объект) является не волной, а частицей, более того, неделимой частицей. Но, с другой стороны, при определённых условиях электрон ведёт себя как волна и может одновременно пройти через два отверстия. Очевидно, что электрон не движется в пространстве по непрерывной линии. Как же он движется?

В новой интерпретации квантовой механики, которая будет последовательно изложена в этой главе, предлагается *принципиально новый* тип движения, который позволит наглядно объяснить *все* квантово-механические парадоксы, в том числе и нелокальность квантовой механики. Это *дискретное движение*. Рассмотрим электрон,

который движется в виде виртуального облака (см. рис. 1). Как уже отмечалось, объём облака – это объём той области пространства, в котором волновая  $\Psi$ -функция отлична от нуля.

*И мы предполагаем, что внутри этого облака электрон движется дискретно, а именно: в момент времени  $t$  электрон находится в некоторой точке облака, затем он исчезает из этой точки и через бесконечно малое время  $dt$  появляется в другой, совершенно произвольной точке, также находящейся внутри этого облака.*

Итак, электрон исчезает из одной точки облака и через бесконечно малое время появляется в другой точке облака. Таким образом, за любой, сколь угодно малый, но конечный промежуток времени (скажем, за время  $\Delta t < 10^{-23}$  с – время, за которое свет проходит расстояние, равное ядру атома) электрон успевает исчезнуть и появиться во всех точках виртуального облака. Более того, в каждой точке данного облака он успевает появиться и исчезнуть бесконечное число раз, имея каждый раз при этом разный импульс (частота появления электрона в данной точке облака пропорциональна величине  $|\Psi|^2$ ). Поэтому в каждый, сколь угодно малый, но конечный промежуток времени электрон находится сразу во всех точках некоторой области фазового пространства – пространства  $(x, y, z, p_x, p_y, p_z)$ .

И если, например, нам удастся “поймать” электрон в какой-нибудь точке облака, то он будет иметь при этом различные значения импульса. И наоборот, в любой, сколь угодно малый, но конечный промежуток времени определённому значению импульса электрона соответствует бесконечное множество его местоположений внутри данного облака. Иначе говоря, для любого момента времени  $t_0$  не существует ни предела  $\lim_{t \rightarrow t_0} \vec{r}(t)$  при  $t \rightarrow t_0$ , ни предела  $\lim_{t \rightarrow t_0} \vec{p}(t)$  при  $t \rightarrow t_0$ . То есть движение электрона внутри виртуального облака по своей сути является движением разрывным в каждой точке.

Конечно, можно задать множество вопросов по поводу обоснованности введения в физику понятия дискретного движения. Но ведь в своё время также можно было задать множество вопросов по поводу обоснованности введения в физику понятия непрерывного движения. Единственным обоснованием для введения в физику понятия непрерывного движения является то, что, используя это понятие, можно описать огромное количество различных физических процессов.

При помощи понятия непрерывного движения невозможно описать только процессы, происходящие в микромире. Поэтому, если нам удастся описать происходящие в микромире процессы, используя понятие дискретного движения, то это и будет достаточным основанием для введения в физику такого понятия.

## **§ 10. Новая модель электрона**

Для того чтобы локализовать электрон в какой-либо определённой точке, нужно совершить над ним бесконечно большую работу, так как энергия электромагнитного поля, создаваемая точечным зарядом, равна бесконечности. Но совершённая работа всегда конечна. Поэтому всегда существует остаточная неопределённость в местоположении электрона. Это означает, что в данный, сколь угодно малый промежуток времени электрон находится с различной плотностью вероятности сразу во всех точках некоторой области пространства (виртуального облака).

Чтобы определить местоположение электрона более точно, можно выстрелить по облаку, в котором дискретно движется электрон, высокоэнергетичным фотоном или какой-нибудь другой частицей, имеющей достаточно малую длину волны. При этом существует вероятность взаимодействия электрона с пролетающим фотоном. В тот момент, когда произойдет это взаимодействие, вероятность нахождения электрона в какой-либо другой точке виртуального облака, в котором он только что двигался дискретно, станет равной нулю. А для того чтобы вероятность его нахождения в какой-либо другой точке снова стала отлична от нуля, требуется время, так как скорость перемещения электрона ограничена скоростью света.

Таким образом, электрон получает точную координату своего местоположения (правильней говорить – более определённую координату, так как длина волны фотона всегда отлична от нуля) только в процессе взаимодействия с объектом, имеющим достаточно малую длину волны, а, значит, и достаточно большую энергию.

Нужно отметить, что неопределённость в местоположении электрона внутри виртуального облака приводит к неопределённости в силе электромагнитного взаимодействия электрона со своим полем. А неопределённость электромагнитной силы, с которой электрон взаимодействует со своим полем, приводит к неопределённости в импульсе электрона. Но, с другой стороны, чем больше область, в которой размазан электрон, тем слабее электромагнитное поле, создаваемое им, и, значит, тем слабее сила, с которой электрон взаимодействует со своим полем. Это в свою очередь приводит к уменьшению неопределённости в импульсе электрона. Получается, что неопределённость в импульсе электрона обратно пропорциональна неопределённости в его местоположении.

Необходимо подчеркнуть, что неопределённость в движении и местоположении электрона существует независимо от процесса измерения состояния электрона. С другой стороны, процесс измерения состояния электрона всегда изменяет его состояние, так как происходит обмен энергией между электроном и прибором.

В классической электродинамике не существует удовлетворительной модели электрона. Например, известно, что при ускорении заряд излучает электромагнитные волны и теряет при этом энергию. Поэтому ускорение заряда требует большей силы, чем ускорение нейтрального объекта той же массы. Это означает, что часть массы электрона имеет электромагнитное происхождение, вызванное взаимодействием электрона со своим полем. Но если электрон взаимодействует со своим полем, то непонятно, какие силы удерживают его от разрыва. Такие силы неизвестны.

Поэтому в классической электродинамике электрон считается точечным. А полная энергия электромагнитного поля, создаваемого точечным зарядом, равна бесконечности. Поэтому, согласно классической электродинамике, электрон должен обладать также и бесконечной массой. Физическая бессмысленность этого результата показывает, что классическая электродинамика, как логически замкнутая теория, становится внутренне противоречивой при переходе к достаточно малым расстояниям [3;с.126].

В квантовой электродинамике электрон также считается точечным. Вот что написано об этом в 5-м томе Физической Энциклопедии:

Один из важных выводов, вытекающий из проверок квантовой электродинамики, связан с размерами электрона. Квантовая электродинамика предполагает электрон точечным. Ни в одном эффекте расхождения с этим допущением обнаружено не было. Физически это означает, что размеры электрона меньше  $10^{-16}$  см [13;т.5,с.545].

Однако, несмотря на то, что квантовая электродинамика существенно отличается от классической, в ней также существует проблема бесконечной собственной энергии точечного заряда. Таким образом, проблема остаётся нерешённой. Подробно эту тему обсуждает Ричард Фейнман в своих лекциях по физике [15].

Для объяснения парадоксальности квантовых процессов мы ввели новое понятие – дискретное движение. Предлагается считать электрон дискретно движущейся точкой и поэтому находящейся в данный, сколь угодно малый, но конечный промежуток времени в определённой области фазового пространства. Квадрат же модуля волновой  $\Psi$ -функции показывает плотность вероятности обнаружить электрон в какой-либо точке обычного пространства. Получается, что точечный электрон находится одновременно во всех точках некоторой области пространства (виртуального облака) и при этом в каждой точке имеет различные значения скорости. Распределение этих скоростей во всей области и определяет движение (в общем случае, перемещение и расплывание) данного облака.

В каждый физический момент времени (под физическим моментом времени мы будем подразумевать достаточно малый промежуток времени, например,  $\Delta t < 10^{-23}$  с – время, за которое свет проходит расстояние, равное атомному ядру) дискретное движение электрона характеризуется определённым непрерывным набором координат и импульсов. С этой точки зрения, очевидно, что волновая  $\Psi$ -функция даёт полное описание движения электрона или любого другого квантового объекта. А уравнение Шрёдингера однозначно определяет изменение  $\Psi$ -функции во времени и поэтому даёт полное представление о движении. Случайный характер квантовых процессов проявляется только при взаимодействии, когда, в зависимости от конкретных условий, квантовый объект приобретает более определённое значение местоположения или импульса. *Этот процесс имеет принципиально вероятностный характер.* Он будет рассмотрен в следующем параграфе.

Таким образом, электрон является точечным и взаимодействует со своим полем. Но электромагнитное поле, создаваемое дискретно движущимся точечным электроном, соответствует полю, создаваемому распределённым в конечной области пространства зарядом. И полная энергия такого электромагнитного поля конечна. Поэтому отпадает проблема бесконечно большой энергии точечного электрона.

## § 11. Редукция волновой $\Psi$ -функции

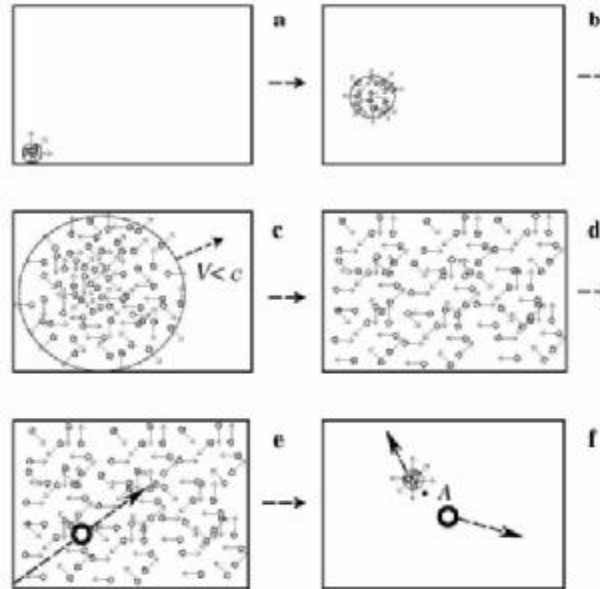
Чтобы наглядно представить себе поведение квантовых объектов, рассмотрим детально, каким образом происходит процесс редукции волновой  $\Psi$ -функции. Именно этот процесс и является ключом к пониманию такого квантового парадокса, как “действие на расстоянии”, или нелокальность квантовой механики. Для удобства описания предположим, что область, в которой электрон (или другой квантовый объект) совершает дискретное движение, достаточно большая, например комната. Закон сохранения энергии не позволяет электрону иметь определённое местоположение, так как в этом случае энергия электромагнитного поля, создаваемого им, будет очень высока. В данном же случае, какой, сколь угодно малый, промежуток времени мы бы ни взяли, электрон успеет исчезнуть и появиться во всех точках комнаты.

Может возникнуть вопрос: а не противоречит ли движение электрона теории относительности? Нет, не противоречит, так как ни масса, ни заряд, ни энергия не перемещаются со скоростью, превышающей скорость света. Также невозможно, используя неопределённость в местоположении электрона, передать сигнал

(информацию) быстрее скорости света. Далее мы разберём этот вопрос. Нужно отметить, что теория относительности накладывает ограничение только на классическую скорость движения физических объектов. А дискретное (хаотическое) движение электрона не приводит к бесконечной скорости в классическом смысле, так как проявляется только в *неопределённости* его движения.

Предположим, мы всё же решили узнать, где находится электрон. И для этого в комнату выпустили фотон. Пусть для наглядности фотон будет иметь размер (то есть длину волны), примерно, футбольного мяча. Этот футбольный мяч пролетает через комнату, и существует вероятность его взаимодействия с электроном. Пусть в промежуток времени  $[t_0; t_0 + \Delta t]$  произошло это взаимодействие. То есть в этот промежуток времени электрон и фотон оказались в одном и том же месте комнаты (с точностью до размера футбольного мяча). Необходимо отметить, что электрон не находился в этом месте перед самым взаимодействием. Перед самым взаимодействием он находился сразу во всех точках комнаты. Так вот, в промежуток времени  $[t_0; t_0 + \Delta t]$  нам удалось электрон “поймать”. Мы как бы спровоцировали его на мгновение принять определённое местоположение. Только во время взаимодействия у электрона появляется более точное местоположение. При этом область его локализации практически мгновенно уменьшается от размеров комнаты до размеров футбольного мяча. Происходит так называемая редукция волновой функции.

Следует отметить, что уменьшение области локализации электрона вызывает возрастание величины электромагнитного поля, создаваемого им. Это, в свою очередь, приводит к увеличению неопределённости в импульсе электрона.



**Рис. 7.** Редукция (коллапс) волновой  $\Psi$ -функции.

Размеры электрона меньше чем  $10^{-16}$  см [13]. Если бы электрон был локализован в области с размером  $r \approx 10^{-16}$  см, то энергия  $\epsilon_e$  электромагнитного поля, создаваемого им, была бы примерно в тысячу раз (!) больше, чем энергия покоя электрона:  $\epsilon_e \approx e^2/r \approx 1000 m_e c^2$ . Электрон не обладает такой энергией и, следовательно, не может иметь точного местоположения в пространстве. Поэтому он вынужден двигаться дискретно (хаотически) в некоторой области пространства (внутри электронного облака – облака виртуальных электронов, рис. 7,а). Это облако

движется внутри комнаты, постоянно увеличиваясь в размерах, и как результат, занимает объём всей комнаты (расплывание волнового пакета, рис. 7,a-d).

Затем в комнату влетает фотон (рис. 7,e). В точке  $A$  происходит взаимодействие между фотоном и электроном и, как результат, редукция волновой  $\Psi$ -функции (мгновенное уменьшение размеров электронного облака, рис. 7,f). Энергия фотона и направление его движения изменяются, а электрон получает более точное местоположение.

Говоря о редукции волновой функции, мы использовали термин “мгновенно”. Но ведь абсолютно мгновенно ничего не происходит. Всегда всё происходит в какой-то отличный от нуля промежуток времени. В данном же случае нас интересует следующее: если взаимодействие произойдёт достаточно быстро, может ли скорость редукции (схлопывания) волнового пакета быть больше скорости света? Скажем, размеры комнаты  $L$ , время взаимодействия  $\Delta t$  (в принципе, это время можно сколь угодно уменьшать). Возможно ли  $L/\Delta t \gg c$ ? Да, возможно. *Скорость редукции (схлопывания) волновой  $\Psi$ -функции (волнового пакета) может быть сколь угодно больше скорости света.* Противоречит ли это теории относительности? Нет, не противоречит, потому что в данном случае ни энергия, ни заряд, ни масса не перемещаются быстрее света. Более того, необходимо отметить, что если бы редукция волновой  $\Psi$ -функции происходила со скоростью меньшей, чем скорость света, то именно тогда возникли бы противоречия с теорией относительности.

Действительно, пусть произошло взаимодействие электрона с фотоном. Если бы в этот промежуток времени существовала отличная от нуля вероятность нахождения его в какой-либо другой точке комнаты, значит, в принципе, существовала бы возможность там обнаружить электрон. Но электрон как целое не может перемещаться в пространстве быстрее света. Поэтому, если время взаимодействия  $\Delta t$ , то вероятность нахождения электрона на расстоянии большем, чем  $r = c\Delta t$  от места взаимодействия (от точки  $A$ ; рис. 7,f), равна нулю.

## § 12. Расщепление волнового пакета

Давайте ещё раз рассмотрим электрон, который совершает дискретное (хаотическое) движение в ограниченной области пространства, например в комнате. В каждый, сколь угодно малый, но конечный, промежуток времени электрон успевает побывать (исчезнуть и появиться) во всех точках комнаты.

Теперь предположим, что мы разделили комнату пополам непроницаемой для электрона перегородкой (перегородка так же, как и стены комнаты, не взаимодействует с электроном, рис. 8,a). Что в этом случае изменится в движении электрона? Ничто не изменится. Перегородка не будет мешать электрону двигаться по всей комнате, так как электрон движется не по непрерывной траектории, а дискретно: исчезает из одной точки и появляется в другой. Область же, в которой электрон совершает дискретное (хаотическое) движение, может перемещаться и расплываться в пространстве только непрерывно, так как скорость её перемещения и расплывания ограничена скоростью света.

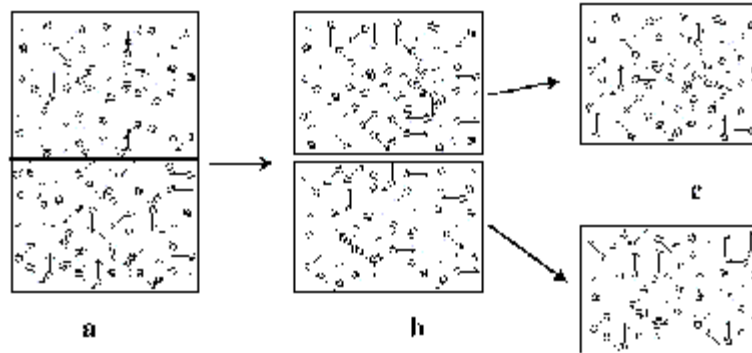
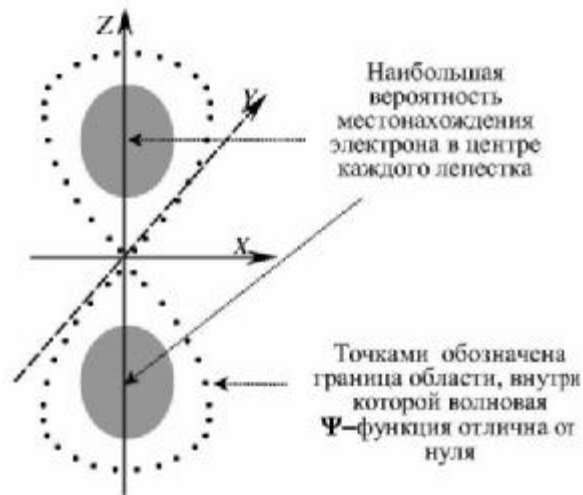


Рис. 8.

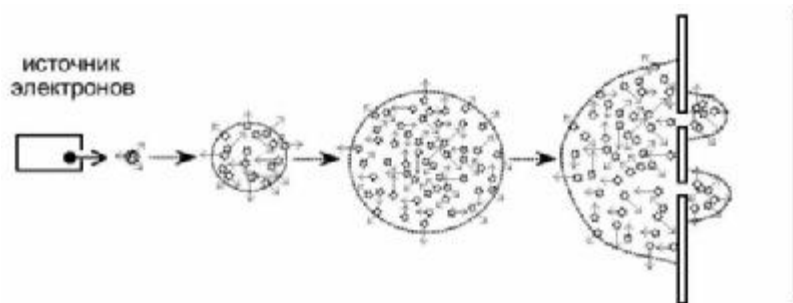
Итак, у нас получились две изолированные друг от друга комнаты, внутри которых движется дискретно (хаотически) только *один электрон*. И если мы начнём отодвигать друг от друга эти комнаты, то электрон будет продолжать двигаться хаотически, находясь по-прежнему в обеих комнатах (рис. 8, b). Расстояние между комнатами можно сделать сколь угодно большим – электрон будет продолжать двигаться одновременно в двух комнатах (рис. 8, c). Примером такого дискретного движения в двух изолированных друг от друга областях может служить движение электрона в атоме (см. рис. 9).



**Рис. 9.** Схематичное изображение распределения плотности вероятности местонахождения электрона в атоме для  $2p$ -состояния. На рисунке изображён разрез в плоскости  $XZ$ . Распределение плотности вероятности симметрично относительно оси  $Z$ , поэтому точно такой же график распределения будет и в плоскости  $YZ$ . Наибольшая вероятность местонахождения электрона – в центре каждого “лепестка”, а в плоскости  $XU$  она равна нулю. С точки зрения классического (непрерывного) движения невозможно объяснить, каким образом электрон может находиться в обоих лепестках, не пересекая при этом плоскость  $XU$ .

Таким образом, если волновой пакет (виртуальное облако), в котором электрон совершает хаотическое (дискретное) движение, имеет возможность расщепиться на две половины, то он, расщепившись на два волновых пакета, может двигаться в различных направлениях. Электрон, совершая хаотическое движение в этих пакетах, также будет двигаться одновременно в различных направлениях. Например, он сможет пройти через два отверстия одновременно (см. рис. 10). Если при дальнейшем движении эти волновые пакеты соединятся на детекторе, то произойдёт их интерференция. Хотя электрон при

этом только один. Движение любого другого квантового объекта (например, фотона) будет происходить аналогично.



**Рис. 10.** Электрон в виде виртуального облака вылетает из источника и движется к экрану с двумя отверстиями. При этом виртуальное облако непрерывно увеличивается в размерах. Когда облако долетает до экрана, то какая-то его часть проходит через одно отверстие, какая-то – через другое, а какая-то часть отражается от экрана и движется в обратную сторону.

Рассмотрим теперь “парадоксальное” поведение фотонов в эксперименте, описанном в § 7. С точки зрения дискретного движения такому поведению фотонов можно дать следующее объяснение. В данном эксперименте *каждый фотон, расщепившись на светоделителе, движется по различным путям* (в виде двух волновых пакетов) к детектору. И на детекторе эти волновые пакеты интерферируют между собой. Предположим, экспериментатор перекроет один из двух путей (по которым движется расщеплённый волновой пакет) дополнительным детектором, то есть прибором, который взаимодействует с фотоном. В данном случае для фотона будут две возможности. Во-первых, существует вероятность, что произойдёт взаимодействие фотона с дополнительным детектором. В результате этого взаимодействия фотон получит определённое местоположение и, таким образом, потеряет возможность двигаться по другому пути. Во-вторых, существует вероятность, что взаимодействие не произойдёт, и в этом случае фотон, потеряв возможность двигаться по первому пути, будет двигаться только по второму. Получается, что, перекрыв путь одному волновому пакету (при этом взаимодействие с дополнительным детектором может либо произойти, либо нет), экспериментатор *мгновенно изменяет* волновую функцию другого волнового пакета.

Возникает вопрос: а не противоречит ли такое “мгновенное действие на расстоянии” (нелокальность квантовой механики) теории относительности, запрещающей передачу сигнала быстрее света? Возможность такой “мгновенной” передачи сигнала, используя нелокальность квантовой механики, мы рассмотрим в следующем параграфе.

### § 13. Сверхсветовой телеграф

Сейчас мы рассмотрим гипотетический случай, в котором, однако, нет ничего принципиально невозможного. Два экспериментатора (условно назовём их “землянин” и “марсианин”), желая использовать нелокальность квантовой механики для мгновенной передачи сигналов, решили осуществить следующий опыт. На Юпитере они установили лазер и светоделитель, а на Земле и на Марсе – по лаборатории. Светоделитель расщепляет волновой пакет (в котором дискретно движется фотон) на две неравные части. И скажем, вероятность обнаружить фотон в волновом пакете на Земле равна 60%, а на Марсе – 40%. Принципиальная идея эксперимента проста. Из лазера на Юпитере в известное для обоих экспериментаторов время вылетает один фотон, затем он попадает на светоделитель и, расщепившись на два волновых пакета, движется одновременно к Земле и Марсу. Причём, в лабораторию на Земле волновой пакет должен прилететь на одну



секунду раньше, чем в лабораторию на Марсе. Время ожидаемого прибытия волнового пакета известно с высокой степенью точности.

Итак, фотон, дискретно двигаясь в двух волновых пакетах, движется одновременно к Земле и Марсу. Перед тем как волновой пакет достигнет Земли, землянин перекроет детектором ему путь. Здесь возможны два варианта. Во-первых, произойдёт взаимодействие фотона с земным детектором (вероятность такого процесса – 60%), тогда вероятность обнаружить фотон в марсианском волновом пакете сразу упадёт до нуля. Во-вторых, взаимодействие *не произойдёт* (вероятность такого процесса – 40%). Тогда вероятность обнаружить фотон в марсианском волновом пакете сразу возрастёт до 100%. И в любом случае состояние волновой функции марсианского волнового пакета изменится.

*Таким образом, перекрывая путь волновому пакету на Земле, землянин мгновенно изменяет состояние волнового пакета на Марсе.* И если марсианин сможет как-то обнаружить это изменение, то это означает, что в принципе возможна мгновенная передача сигнала.

Например, если землянин не перекрывает путь своему волновому пакету (тем самым он не изменяет состояние марсианского), то это означает “ноль”. А если землянин перекрывает волновому пакету путь (тем самым мгновенно изменяя состояние марсианского пакета), то это означает “единицу”. Задача марсианина состоит в том, чтобы по состоянию своего волнового пакета определить, перекрыл или нет землянин путь своему волновому пакету. И в результате узнать, какую информацию (“единицу” или “ноль”) землянин хотел ему передать. Назначение данного эксперимента как раз и заключается в том, чтобы выяснить, возможна или нет передача сигнала таким способом.

Итак, эксперимент начался. Марсианин знает время, ожидаемого прибытия волновых пакетов на Землю и Марс. Он знает, что шансов “поймать” фотон у его коллеги на Земле – 60%. Но он заранее не знает, как поступит землянин (перекроет или нет путь волновому пакету). И в ожидаемое время марсианин перекрывает путь своему волновому пакету и хочет извлечь по результатам этого процесса какую-либо информацию.

Если марсианин не поймает фотон, то он сможет сделать два вывода. Во-первых, его земной коллега перекрыл путь волновому пакету и поймал фотон. А во-вторых, его коллега не перекрыл путь волновому пакету, но марсианин всё равно не поймал фотон (ведь в этом случае вероятность поймать фотон – 40%), и сейчас фотон, возможно, продолжает лететь дальше по курсу Юпитер-Земля. Если же марсианин поймает фотон, то он сможет сделать однозначный вывод о том, что землянин фотон не поймал. Но он никак не сможет узнать, перекрывал ли его коллега путь волновому пакету или нет. А ведь ему нужно узнать именно это. Таким образом, марсианин всё-таки не получит никакой информации.

Поразмыслив над неудачей эксперимента, можно предположить следующее. Перекрывая путь одному волновому пакету, мы мгновенно изменяем волновую  $\Psi$ -функцию второго волнового пакета. Однако из-за вероятностного характера волновой  $\Psi$ -функции это изменение трудно обнаружить. Поэтому мы несколько усложним эксперимент. Пусть теперь каждую секунду от светоделиителя на Юпитере вылетает расщепившийся фотон. С точностью до долей секунды известно время прибытия каждого волнового пакета в каждую лабораторию (на Земле и на Марсе). И теперь землянин попытается передать марсианину один бит информации, уже используя какой-нибудь сложный код (разумеется, известный его коллеге). Например, сначала он перекрывает путь первым десяти волновым пакетам. Затем открывает путь следующим двадцати. Затем снова перекрывает путь следующим десяти и т. д. Такая сложная комбинация, например,

будет означать “единицу”. Своими действиями землянин в течение минуты изменяет состояние большого числа марсианских волновых пакетов. Может, в этом случае марсианин что-нибудь заметит? Если он заметит хоть что-нибудь, значит, существует реальная возможность передать информацию быстрее света.

Между результатами действий землянина и марсианина будет чёткая связь (корреляция). Если землянин поймает фотон, то его коллега однозначно фотон не поймает. А если землянин *будет ловить* и не поймает фотон, то его коллега однозначно фотон поймает. Однако марсианин всё равно не получит никакой информации. Действительно, землянин поймает ровно 60% от всех фотонов, которые он попытается поймать. *Но независимо от действий землянина, марсианин в любом случае поймает ровно 40% от всех фотонов, которые он попытается поймать.* То есть он поймает столько же фотонов, сколько бы он поймал, если бы землянин просто сидел, сложа руки (перекрыв или не перекрыв при этом путь волновым пакетам).

Так как землянин *не может управлять* результатами своих измерений, то он, следовательно, и не может послать никакой информации марсианину.

Таким образом, несмотря на существующую связь (корреляцию) между результатами наблюдений экспериментаторов, каждый из них будет наблюдать совершенно случайный (землянин – с вероятностью 60%, а марсианин – с вероятностью 40%) процесс взаимодействия волнового пакета с детектором. Никакой передачи информации здесь не будет.

Итак, дальное действие существует, но оно, с точки зрения удалённого наблюдателя, принципиально не наблюдаемо. Поэтому дискретное движение квантового объекта внутри волновых пакетов не противоречит теории относительности, запрещающей передачу сигналов быстрее света.

#### **§ 14. Нелокальность квантовой механики**

Рассмотрим с новой точки зрения парадокс Эйнштейна–Подольского–Розена. Система, состоящая из двух квантовых объектов  $A$  и  $B$  и описываемая единой волновой  $\Psi_{AB}$ -функцией, самопроизвольно распадается. И квантовые объекты разлетаются в противоположные стороны. В этом случае каждый квантовый объект будет двигаться дискретно, *удаляясь одновременно во все стороны от места распада.* Согласно законам сохранения энергии, импульса и момента импульса дискретное движение одного квантового объекта будет взаимосвязано (скоррелировано) с дискретным движением другого. Можно отметить, что эта взаимосвязь есть также следствие того, что и система  $AB$  перед распадом двигалась дискретно.

Корреляция между данными объектами будет существовать сколь угодно долго, пока не произойдёт взаимодействие и как следствие этого – редукция волновой функции  $\Psi_{AB}$ . При этом осуществится какое-нибудь состояние, описываемое общей волновой  $\Psi_{AB}$ -функцией. Только в этом случае квантовые объекты  $A$  и  $B$  станут действительно не зависимыми. Таким образом, производя измерение над одним квантовым объектом (в действительности, мы производим измерение над всей системой, так как объекты не разъединены), мы мгновенно изменяем состояние другого квантового объекта. Из-за того, что процесс измерения состояния квантового объекта имеет принципиально вероятностный характер, такое “действие на расстоянии” с точки зрения удалённого наблюдателя в принципе не наблюдаемо. Тем не менее, между результатами измерений двух разных наблюдателей будет существовать определённая корреляция.

## § 15. Заключение

Для того чтобы наглядно представить поведение квантовых объектов, мы рассмотрели принципиально новый тип движения – дискретное движение. Электрон (или любая другая частица) движется дискретно – исчезает из одной точки и появляется в другой точке виртуального облака (объёме пространства, в котором волновая функция отлична от нуля). Это означает, что квантовый объект (фотон, электрон, протон и т. д.) в каждый момент времени не имеет точного местоположения, а находится с различной плотностью вероятности (а именно  $|\Psi|^2$ ) в некоторой области пространства – внутри виртуального облака. Таким образом, квантовый объект является *дискретно движущейся частицей*.

Скорость перемещения и скорость расплывания виртуального облака полностью определяется распределением скоростей частицы внутри облака. Эти скорости ограничены скоростью света, и поэтому движение виртуального облака – это непрерывное движение. В общем случае виртуальное облако может расщепиться (разделиться) на множество частей (волновых пакетов). Образовавшиеся волновые пакеты могут двигаться в различных направлениях сколь угодно долго. При этом квантовый объект будет совершать дискретное движение: за сколь угодно малый, но конечный, промежуток времени он успеет появиться и исчезнуть во всех точках, находящихся внутри этих волновых пакетов.

Иначе говоря, *один* квантовый объект (например, электрон или фотон) *может двигаться одновременно в нескольких различных направлениях*. То есть волновой пакет, в котором дискретно движется квантовый объект, ведёт себя как волна.

Таким образом, в новой модели движения предлагается рассматривать движение квантового объекта *как комбинацию двух движений*: непрерывного движения волновых пакетов и *дискретного* движения квантового объекта внутри этих волновых пакетов. И в результате, использование дискретного движения позволяет снять противоречие между волновыми и корпускулярными свойствами квантового объекта.

Давайте рассмотрим движение квантового объекта – пусть это будет электрон – на примере, изображённом на рисунке 11. Электрон в виде электронного облака (облака виртуальных электронов) налетает на препятствие и, разделившись на два облака, обходит препятствие с двух сторон. Получившиеся облака – волновые пакеты – также разделяются на части и, в результате, движутся в различных направлениях.

При взаимодействии облака с классическим объектом возможны два варианта.

Вариант 1. Электрон не будет обнаружен, а облако схлопнется – мгновенно исчезнет. При этом вероятность обнаружить электрон в других облаках возрастёт скачком.

Вариант 2. Электрон будет обнаружен, и при этом произойдёт схлопывание всех облаков – коллапс волновой  $\Psi$ -функции. Очевидно, что процесс, обратный процессу редукции (коллапса), физически невозможен. Следствием этого является необратимость времени на квантовом уровне.

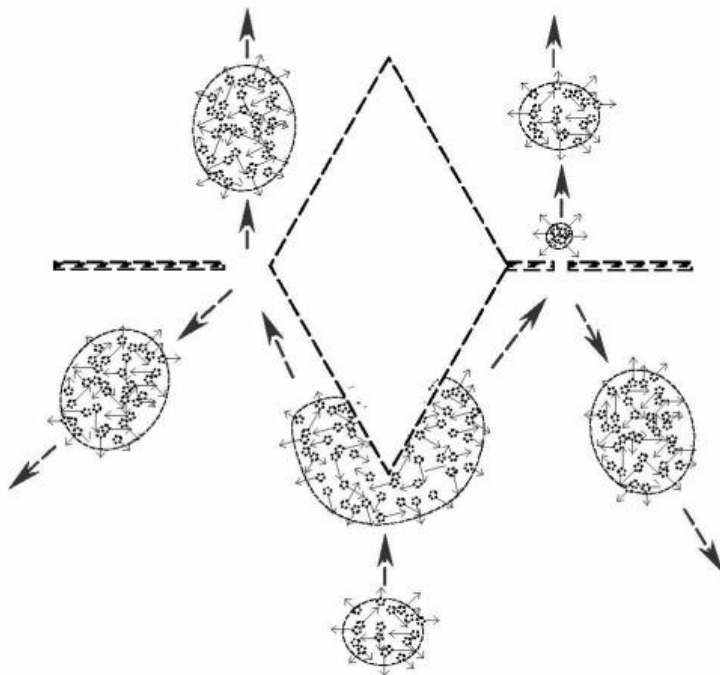
Итак, модель дискретного движения позволяет объяснить, во-первых, как неделимый электрон ухитряется пройти через два отверстия одновременно.

Во-вторых, *как физически осуществляется механизм дальнего действия* (нелокальность квантовой механики).

В-третьих, *что в действительности описывает волновая  $\Psi$ -функция, и как происходит процесс её редукции*.

В-четвертых, *почему* квантовый объект ведёт себя то как частица, а то как волна (корпускулярно-волновой дуализм).

А главное то, что модель дискретного движения даёт наглядное и простое представление о квантовых процессах, происходящих в микромире, и позволяет качественно предсказать, как будет протекать тот или иной процесс.



**Рис. 11.** Электрон в виде виртуального облака (волнового пакета) налетает на препятствие и, разделившись на два облака, обходит препятствие с двух сторон. Затем эти облака частично проходят через отверстия, а частично отражаются от них (чем шире отверстие, тем большая часть облака проходит через него). В результате один электрон может образовать весьма сложную картину движения, состоящую из множества облаков. Движение этих облаков полностью определяется волновым уравнением Шрёдингера, и поэтому этот процесс абсолютно детерминирован во времени. Случайный характер квантовых процессов проявляется только в момент редукции. При этом происходит **мгновенное и скачкообразное изменение** квантового состояния (знаменитый квантовый скачок). Этот процесс **не описывается** волновым уравнением Шрёдингера.

## Литература

1. Янчилин В. “Неопределённость, Гравитация, Космос”. Москва: Едиториал УРСС, 2003
2. Янчилин В. “Логика квантового мира и возникновение Жизни на Земле”, Москва: Новый центр, 2004
3. Ландау Л., Лифшиц Е. “Теория поля”, Москва: Наука, 1988
4. Эйнштейн А. “Замечание о квантовой теории”(Собрание научных трудов, том 3, Москва: Наука, 1966)
5. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. “Фейнмановские лекции по физике”, Москва: Мир, 1977, том 1, вып. 3,4
6. Марков М. “О трёх интерпретациях квантовой механики” (Избранные труды, том 1. Москва: Наука, 2000)

7. Эйнштейн А. “Можно ли считать квантовомеханическое описание физической реальности полным?” (Собрание научных трудов, том 3, Москва: Наука, 1966)
8. Шимони А. “Реальность квантового мира” (В мире науки №3, 1988)
9. Менский М. “Квантовая механика: новые эксперименты, новые приложения и новые формулировки старых вопросов”, УФН, т.170, 2000, № 6, с.634
10. Хорган Дж. “Квантовая философия” (В мире науки №9-10, 1992)
11. Борн М. “Непрерывность, детерминизм, реальность” (Размышления и воспоминания физика. М.: Мир, 1977)
12. Вихман Э. “Берклевский курс физики” т.4, Квантовая физика. М.: Наука, 1977
13. Физическая Энциклопедия в 5-и томах. М. 1988-1998
14. Фейнман Р. Характер физических законов. М.: Наука, 1987
15. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. “Фейнмановские лекции по физике”, Москва: Мир, 1977, том 2, гл. 28