

## О ВОЗМОЖНОЙ НЕТОЖДЕСТВЕННОСТИ МИКРОЧАСТИЦ И ВОЛН ДЕ БРОЙЛЯ В КВАНТОВОЙ ТЕОРИИ

**Р.В. Филиппов**

The completeness of quantum theory can be achieved by introducing of DeBroglie waves and particles nonidentity principle. According to the principle particles are not identical in their free motion to corresponding DeBroglie waves, and can be experimentally separated from them. On the other hand existence of isolated DeBroglie wave is predicted, and its experimental detection is discussed. Different aspects of modeling experiments of separation procedure are analyzed.

### 1. Введение

Хотя в своей работе «Квантовая механика и физическая реальность» [1] и последующих Нильс Бор дал объективную оценку конкретным физическим модельным утверждениям Эйнштейна, Подольского, Розена, и если говорить об обсуждении эксперимента ЭПР, то степень объективности Бора была существенно более высока, однако главный вопрос, стоящий в заголовке его последующей статьи, остается. «Можно ли считать квантовомеханическое описание физической реальности полным?» [2] Можно несколько конкретизировать вопрос. Является ли современная нерелятивистская квантовая механика законченной теорией для круга атомных явлений, т.е. без перехода в область глубокого микромира?

### 2. Некоторые стороны истории представлений квантовой теории

В самом начале своей первой из основополагающих работ Эрвин Шрёдингер писал [3]:

«В этом сообщении я собираюсь показать на простейшем примере нерелятивистского свободного атома водорода, что обычные правила квантования могут быть заменены другими положениями, в которых уже не вводится каких-либо «целых чисел». Целочисленность получается при этом единственным образом сама по себе подобно тому, как сама по себе получается целочисленность числа

---

© 2002 Р.В. Филиппов

E-mail: filippov\_romanv@mail.ru

Казахский национальный университет им. аль-Фараби

узлов при рассмотрении колеблющейся струны. Это новое представление может быть обобщено, и я думаю, что оно тесно связано с истинной природой квантования».

Глубину идей Э.Шрёдингера трудно переоценить; сейчас, однако, квантовая теория все в большей степени отходит от того метода рассмотрения, который можно было бы назвать представлением де Бройля-Шредингера, т.е. программой построения волновой механики.

Это представление в известной степени противостоит двум другим основополагающим представлениям познания квантового мира, которые удобно было бы назвать как представление Планка-Эйнштейна и представление Гейзенберга-Бора. В данном случае речь идет скорее не об интерпретациях квантовой механики [4], а о наиболее эффективных методах дальнейшего развития теории. При этом важно выделить, какая теоретическая конструкция признается наиболее надежной и исходной для последующего анализа.

Для представления Планка-Эйнштейна акцентированной чертой мировоззрения является определяющая роль квантов различных полей либо отдельных элементарных частиц во всем спектре явлений микромира. Сейчас это направление почти безраздельно властвует в квантовой теории поля, объединившись с представлением Гейзенберга-Бора. Для представления Гейзенберга-Бора характерным является акцент на абстрактном восприятии волновой функции, отказ от ее прямой физической интерпретации, вместе с тем, поскольку за основной элемент физической реальности берется волновая функция, психологически роль квантов полей является сильно преуменьшенной по сравнению с представлением Планка-Эйнштейна.

Представление Планка-Эйнштейна занимает в определенном смысле промежуточное положение между другими двумя представлениями [5–7], поскольку оно не является непрерывным последовательным детерминизмом Шредингера-де Бройля (из-за того, что в основу теории положены частицы, дискретные объекты, а не волновая функция), но и отрицает чисто абстрактное исключительно вероятностное описание физической реальности, тяготея к детерминизму.

В этом смысле характерна позиция Эйнштейна, на одном из Солвеевских конгрессов де Бройль выступил с явной оппозицией существующей вероятностной трактовке квантовой теории, поддерживаемой большинством крупных физиков-теоретиков. Хотя Эйнштейн отнесся с определенной симпатией к теории де Бройля, он встал на подчеркнуто нейтральную позицию, не принимая, с одной стороны, чисто вероятностную трактовку теории, а с другой, по-видимому, не принимая первичность физически непрерывной волновой функции в квантовой теории над частицами. Таким образом, различие трех физических мировоззрений проявилось достаточно отчетливо.

С формально математической точки зрения провести разграничение мировоззрений Планка-Эйнштейна и Гейзенберга-Бора в квантовой теории очень сложно, поскольку и представление о квантах, и представление о вероятностной интерпретации волновой функции лежат в самой основе современной теории. Практически попытка удаления одной из указанных компонент приведет к полному распаду всей теории, которая во многих местах надежно подтверждена

экспериментально.

То, что обычно говорят о Шредингеровской интерпретации квантовой механики, несколько отделяя при этом вклад де Бройля, не совсем верно, поскольку с точки зрения метода де Бройль и Шредингер шли в одном направлении. Характерно, что Э.Шредингер называл свою механику не только волновой, но и «физической», в отличие от абстрактной квантовой механики Гейзенберга [8]. Сам Э. Шредингер писал о роли де Бройля следующее:

«Моя теория была стимулирована работой де Бройля и короткими, но в высшей степени прозорливыми замечаниями Эйнштейна. Какой-либо генетической взаимосвязи с Гейзенбергом я абсолютно не осознавал. Конечно, я знал о его теории, однако меня отпугивали, если не сказать отталкивали, казавшиеся мне очень трудными методы трансцендентной алгебры и отсутствие наглядности».

Таким образом, видно, что определяющую роль для подхода Э. Шредингера сыграла теория де Бройля, что и доказывает историческую общность их картины квантового мира. Правильно, следовательно, говорить об интерпретации квантовой теории де Бройля-Э. Шредингера. Настоящая работа содержит попытку дальнейшего развития данного направления.

Что является характерным для представления де Бройля-Шрёдингера? Как отчетливо видно из первой приведённой цитаты, характерным является отказ от утверждения о фундаментальной дискретности микромира. Соответственно определена тенденция вложить конкретный физический смысл в волновую функцию. Вместе с тем целью настоящей работы является показать, что подходу де Бройля-Шрёдингера можно придать более общую форму, чем это было на начальном этапе формирования квантовой теории.

Если вернуться к работам де Бройля и Шрёдингера, то можно отметить следующее. Де Бройль в основу рассмотрения клал волновую функцию, и для него она была истоком формирования теории [9]. Если же взять подход Э. Шрёдингера, то есть одна немаловажная деталь, которая отличает характер его работ от работ де Бройля. Шрёдингер проводит аналогию с классической механикой, рассматривая колебания струны. Струна же является структурой, вообще говоря, не обязательно волновой. Струна может находиться в покое, в состоянии и тем не менее существовать как статический физический объект. К примеру, стоячая волна все-таки объект динамический: ее некоторые части существенно находятся в движении; любая волна не может существовать принципиально как объект статический. По этой причине струнное подобие и волновое подобие в квантовой теории совсем не одно и то же.

Что является общей и наиболее существенной частью для указанных подходов? Общим является присутствие непрерывных физических функций. По этой причине рационально положить в основу рассмотрения некоторые непрерывные функции, не оговаривая первоначально их конкретной природы и не приписывая им волновых свойств (!).

### 3. Аналогии с классической механикой

При традиционном построении квантовой механики ее экспериментальной основой являются эксперименты с прохождением элементарных частиц через экран со щелями [10–14]. Сами традиционные эксперименты сравнительно хорошо изучены, однако их физическое понимание остается сравнительно туманным. Так, в самых простых случаях приходится пользоваться чисто абстрактными аналогиями, даже отдаленно не напоминающими классическую механику.

Характерный пример. Свободное равномерное медленное движение микро-частицы с заданной скоростью. Согласно традиционному подходу необходимо в этом случае отказаться от представления о локализации частицы и рассматривать движение плоской волны де Бройля.

Кульминацией трудности наглядного понимания квантовой механики является сам основополагающий эксперимент со щелями. Эксперименты по одночастичной интерференции микро-частиц показали, что даже одна частица интерферирует (сама с собой!) и, пройдя через экран с двумя щелями, размещается в конечном итоге на вторичном экране в силу характерного закона интерференции. Казалось бы, с позиций наглядного восприятия частица некоторым образом разрезается на щелях, разрезанные части интерферируют между собой, а в конце снова превращаются в целостную частицу при попадании на вторичный экран.

С другой стороны, очевидно, что принципиальный отказ от хотя бы отдаленной наглядной аналогии с классической механикой на начальном этапе построения квантовой теории приводит к значительному возрастанию сложности самой теории на последующих этапах и трудности ее обоснованного развития. Не случайно Э. Шредингер и говорил именно о «физической» механике микро-мира.

Следовательно, физически осмысленная квантовая теория должна придавать исключительное значение ответу на основополагающий вопрос: каким образом одна частица интерферирует сама с собой?

Любопытно поступить противоположным распространенному подходу методом. То есть первоначально не пытаться построить квантовую механику аналогично классической, а, приняв основной аппарат квантовой теории и ее результаты за основу без обсуждения, поискать аналогии в классической механике и в дальнейшем, если такие модельные аналогии будут найдены, снова перейти к осмыслению квантовой теории. Такой подход обоснован тем, что многие теоретические предсказания и результаты (хотя и не все) квантовой теории прошли многостороннюю и надежную экспериментальную проверку и опровержению при фиксированных начальных условиях не подлежат в любом случае.

Рассмотрим следующий очевидный пример.

Предположим, что два вертикально расположенных экрана (макроскопически подобных использованным в квантовых тестах) помещены в воду. Предположим далее, что по поверхности воды движется некоторый «квантовый аналог» галиллеевого корабля, создающий волны. После прохождения через одну из щелей он подвергнется воздействию волны, прошедшей через другую из щелей,

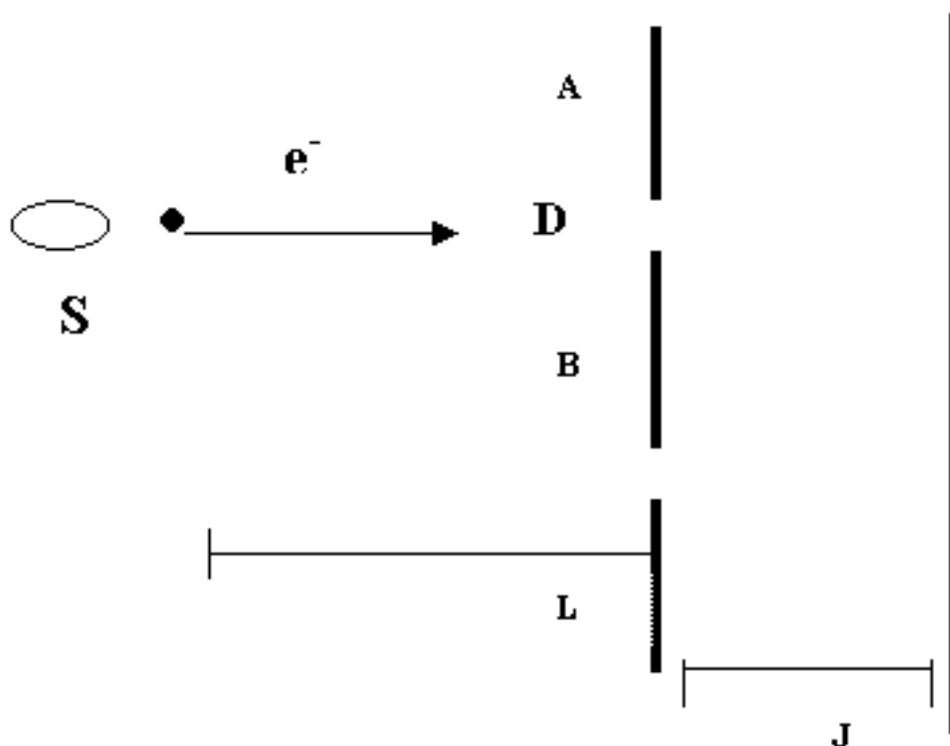


Рис. 1. Прохождение электронов через экран со щелями в традиционной постановке эксперимента.

и может разместиться перед вторичным экраном согласно интерференционной картине (хотя бы отчасти). Аналогично ли поведение рассмотренного объекта в этом случае, хотя бы качественно, квантовому случаю?

Нет, принципиально не аналогично.

Во-первых, в рассмотренном случае корабль движется, а волны следуют за ним, волны не опережают движение корабля. Для того чтобы получить интерференционную картину, свободно движущийся объект должен генерировать опережающее его собственное движение волны. Волны же галиллеевого корабля движутся за ним, его не опережают.

Во-вторых, для свободной квантовой частицы справедлив закон сохранения импульса, она движется равномерно без торможения «по инерции». В классике это соответствовало бы идеальной жидкости, однако не совсем понятна тогда природа возникающих волн.

Вернемся теперь на время снова в область «настоящих» квантовых явлений. Рассмотрим движение отдельных электронов, падающих на экран со щелями. На рисунке (см. рис.1) изображен источник частиц *S*, две щели *A*, *B*. Расстояние от частицы до первого экрана *L*, от первого экрана до второго *J*.

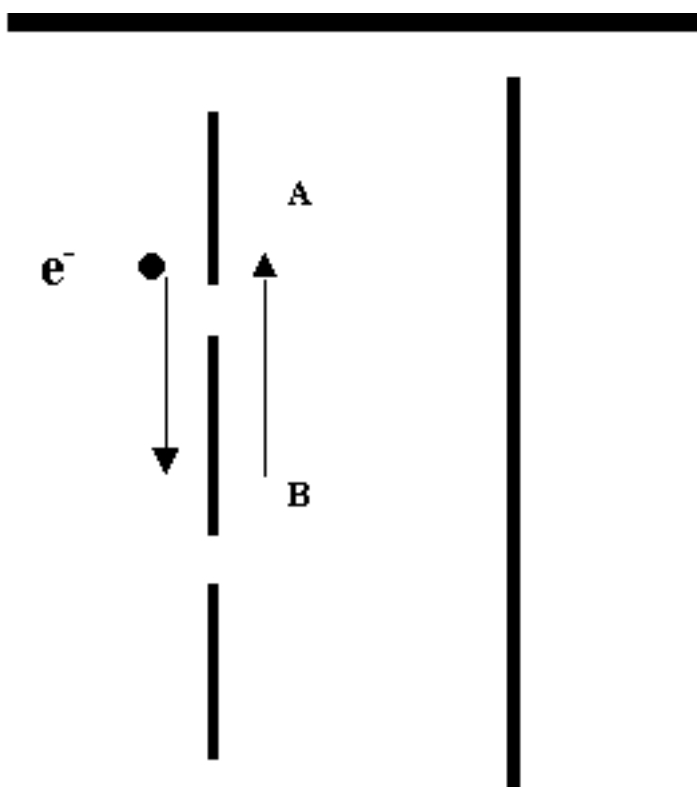


Рис. 2. Распространение волнового возмущения, порождаемого частицей, в случае, если оно существенно не опережает движение самой частицы, приводит к внутреннему противоречию теории.

Расстояние между щелями  $D$ .

Наибольшие трудности мы испытаем, когда начнем рассматривать приближение частиц к экрану со щелями.

Если волна существенно не опережает движение частицы и частица сравнительно близко подходит к экрану со щелями, то мы получаем, что у волны почти нет времени на прохождение от движущейся частицы до второй щели, а затем снова к первой (см. рис.1). Подобное прохождение является необходимым в приведенной аналогии, поскольку для характерного интерференционного распределения электронов у второго экрана необходимо их подвергнуть влиянию волн на всем участке  $J$ , в противном случае, т.е. при интерференционном воздействии волн на электроны только около вторичного экрана, частицы не успеют распределиться согласно интерференционной картине в силу своей инертности (они обладают массой!).

При  $D \gg L$  получаем, что характерное время распространения волны в указанной модели стремится к нулю:  $t \rightarrow 0$ .

А это приводит в пределе к бесконечной скорости распространения волны, необходимой для получения интерференционной картины:

$$v = 2\frac{D}{t},$$

$$t \rightarrow 0,$$

$$v \rightarrow \infty.$$

Очевидно, что рассмотрение физически реализуемых бесконечных скоростей в любом случае противоречит физической реальности.

Рассмотренная трудность характерна как для моделей, где частица генерирует волну, так и для моделей, где частица излучает другие частицы, назовем их квантами особого поля, для того чтобы они в дальнейшем повлияли на ее собственное движение и привели к формированию интерференционной картины.

Безусловно, можно предположить, что сгенерированная волна движется с большой, но конечной скоростью, однако для быстро движущихся электронов и сравнительно большого расстояния между щелями, как минимум, можно получить существенное превышение скорости света. А появление сверхсветовых скоростей и являлось исторически одним из главных критических замечаний против теории волны-пилота де Бройля.

Вернемся теперь снова в область классической механики. Как было рассмотрено, аналогию с кораблем, плывущем по воде, следует отвергнуть по принципиальным соображениям. Возникает вопрос: является ли отличие квантовой механики от классической столь радикальным, что оно исключает подобные аналогии вообще?

Если обратиться к эксперименту с кораблем, то одной из главных трудностей было появление очень больших скоростей распространения волны. Этой трудности можно избежать, если принять, что волновое возмущение движется задолго до частицы, опережает ее. Тогда возмущение проникает через щели до того, как частица к ним приблизится, и за экраном интерференционная волновая структура уже ожидает появления частицы.

Существует ли нечто подобное в классической механике?

Да, такое явление существует. Если взять некоторый шарик и положить его на натянутую горизонтально мембрану, а затем заставить катиться, то мы получим, что возмущение, сопутствующее шарiku, мембранной структуры движется с явным опережением, хотя и определяется движением шарика. Очевидно, что в реальности движение шарика помимо перемещения области неоднородности по мембране будет порождать и другой эффект. Эффект распространения колебаний.

В совокупности данные эффекты приведут ко всем основным квантовомеханическим следствиям: движение возмущения с опережением, распространение волновых возмущений, образование интерференционной картины, вторичное влияние волн на частицу без возникновения бесконечных скоростей и т.д.

Мембранная аналогия, как представляется автору настоящей статьи, соответствует духу Э. Шрёдингера развития квантовой теории, но является более общей, поскольку в ней частицы сами по себе, вообще говоря, при распространении не подобны волнам [15, 16].

#### 4. Замечания о возможности расширения оснований традиционной квантовой механики

Для того чтобы рассмотреть наиболее полную физическую теорию в классическом смысле, описывающую явления квантового типа, следует обратить внимание на тот факт, что концепция корпускулярно-волнового дуализма не является наиболее полным теоретическим представлением, описывающим известные из опыта свойства микрочастиц, проявляемые в волновом и корпускулярном поведении.

Например, когда рассматривается свободное движение частиц, утверждается, что они движутся как волны. В данном месте присутствует, как говорят математики, нестрогое обоснованное «сужение возможных представлений». Ведь утверждается не то, что частицы могут при определенных обстоятельствах обладать свойствами (отдельными!) волновых движений, а то, что они уже движутся точно как волны (при свободном распространении).

Полнота теории не может подразумевать отождествление волн и частиц; она лишь может утверждать обладание некоторыми общими свойствами при движении.

Характерно, что принципу полноты квантовой теории противоречат не только подходы Гейзенберга и др., но и подход де Бройля, и подход Э. Шрёдингера, так как, хотя у них квантовая механика и обладает свойствами классической непрерывности, волна при определенных условиях у них полностью тождественна частице. Частица жестко связана с волной.

Для обеспечения полноты квантовой теории вся указанная группа фактов позволяет сформулировать принцип нетождественности частиц и волн де Бройля в квантовой теории [15].

При своем движении и взаимодействиях частицы, вообще говоря (!), нетождественны волнам; возможным является как существование частиц, независимых от волн де Бройля, так и существование волн де Бройля, изолированных от частиц.

#### 5. Замечания о возможности экспериментальной проверки

Предлагается провести следующий эксперимент [15–17]. Исследуется интерференционная картина, получаемая в результате прохождения микрочастиц через экран с двумя щелями. При этом область возле одной из щелей заряжается до высокого по абсолютной величине потенциала, причем зарядом того же знака, что и у налетающих частиц. Т.о., практически для частиц прозрачной является только одна из щелей, в то время как для волн де Бройля прозрачны две щели. Присутствие интерференционной картины за экраном с щелями при том, что область около одной из щелей была заряжена до высокого (запирающего) потенциала, укажет на физический факт существования изолированной волны де Бройля.

На приведенных рисунках представлены для иллюстрации два случая. В



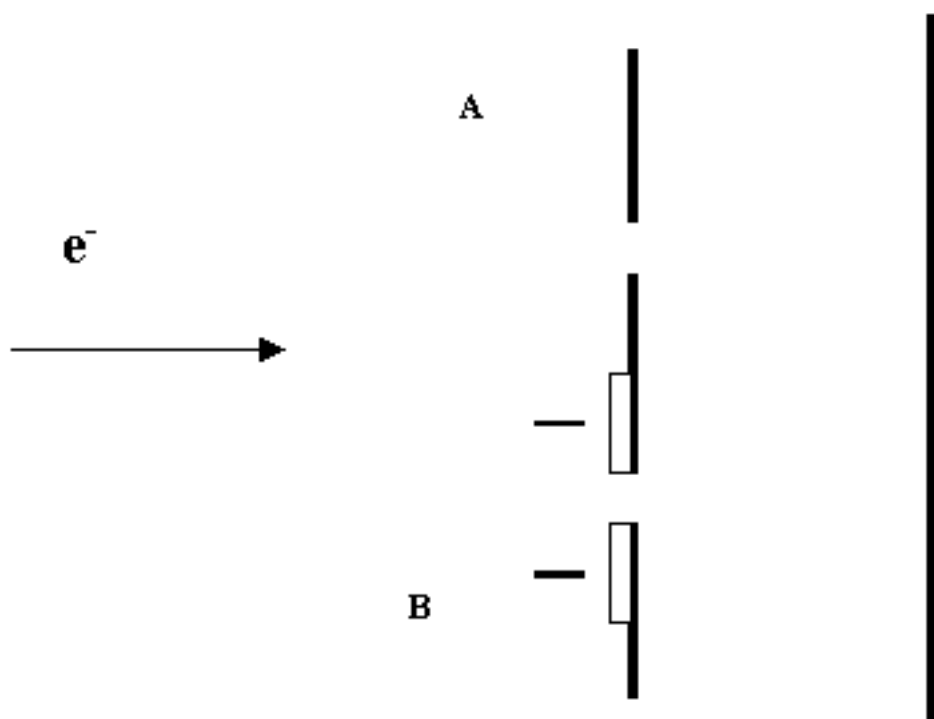


Рис. 3. Прохождение электронов через экран со щелями. Область вокруг одной из щелей (B) заряжена отрицательно.

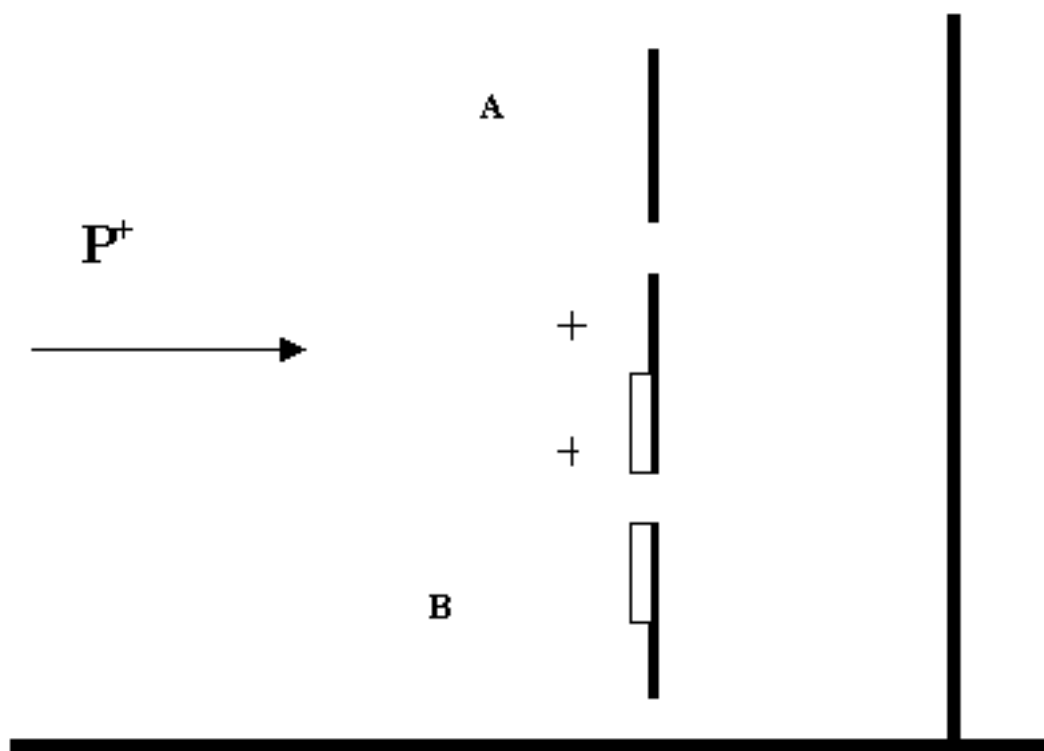


Рис. 4. Прохождение протонов через экран со щелями. Область вокруг одной из щелей (B) заряжена положительно.

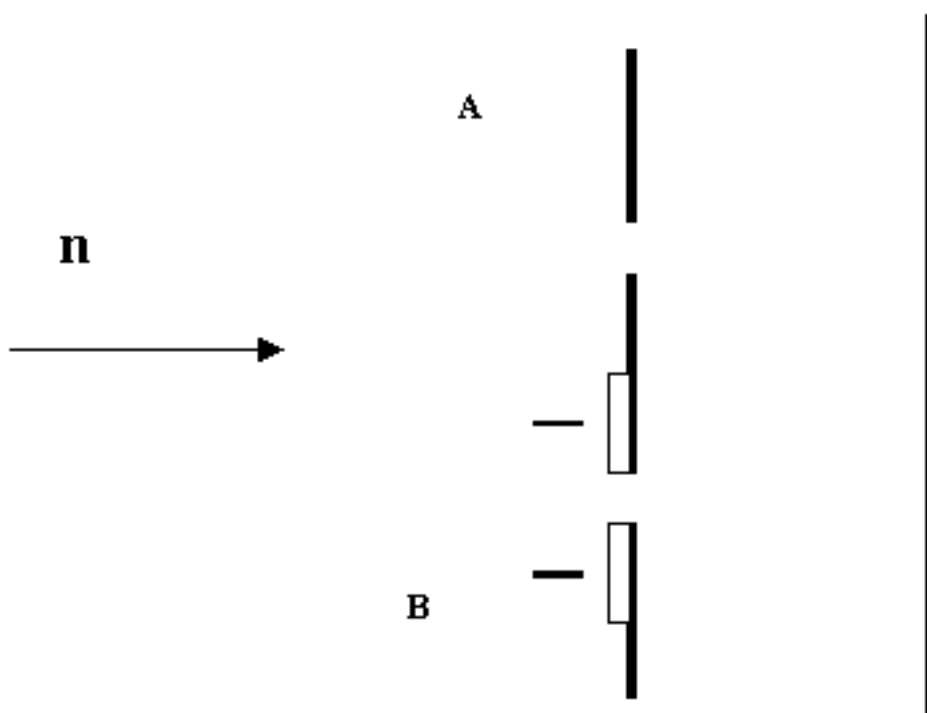


Рис. 5. Прохождение нейтронов через экран со щелями. Область вокруг одной из щелей (B) заряжена отрицательно.

первом случае (см. рис.3) отдельные электроны падают на экран со щелями. При этом одна из щелей заряжена отрицательно.

Во втором случае (см. рис.4) протоны падают на экран со щелями. Одна из щелей заряжена положительно.

Следует обратить внимание на то, что косвенным подтверждением приведенных рассуждений является возможность эксперимента с нейтральными частицами – нейтронами. Очевидно, что если заряжена одна из щелей (положительно или отрицательно), то это не окажет существенного влияния на движение нейтронов. Они будут двигаться так, как будто обе щели открыты и образуют обычную интерференционную картину (см. рис.5).

На приведенном примере видно, что квантовомеханические явления в микромире носят более фундаментальный характер, чем, например, зарядовые свойства микрочастиц.

## 6. Замечания о перестройке формализма

Указанный подход приводит к определенной перестройке формализма квантовой теории.

Рассмотрим теперь характер интерференционной картины, образованной в результате прохождения заряженных частиц через экран со щелями, из которых область вокруг одной из щелей заряжена до высокого по абсолютной величине

потенциала.

Пусть  $|\psi_1\rangle$  – вектор состояния, описывающий прохождение частицы через одну из щелей, ту, которая не заряжена. Через вторую щель частицы не пройдут с высокой степенью вероятности.

Пусть  $|\psi_1^0\rangle$  – вектор состояния, который описывает прохождение чистых волн де Бройля через первую из щелей (ту, которая не заряжена);  $|\psi_2^0\rangle$  – вектор состояния, описывающий прохождение чистых волн де Бройля через вторую щель (область вокруг которой заряжена до высокого по абсолютной величине электромагнитного потенциала зарядом того же знака, что и у налетающих частиц). Некоторая абстрактность «чистых» волн де Бройля, вводимых в настоящей работе, может быть отчасти преодолена просто рассмотрением того, как бы двигались незаряженные частицы. Например, нейтроны вместо протонов и т.д.

Итак, для распределения плотности вероятности чистых волн де Бройля после прохождения первого экрана имеем:

$$J_0 \sim \langle \psi | \psi \rangle,$$

где

$$|\psi\rangle = |\psi_1^0\rangle + |\psi_2^0\rangle.$$

Иными словами, если бы двигались нейтроны, то мы получили бы такое распределение.

Однако заряженные частицы непосредственно после прохождения первого экрана будут, очевидно, распределены по-другому:

$$J_1 \sim \langle \psi_1 | \psi_1 \rangle.$$

Поскольку в дальнейшем частицы подвергнутся влиянию прошедших через вторую щель волн де Бройля, то следует написать для итоговой плотности вероятности [15]:

$$J \sim J_0 J_1 \sim \langle \psi_1 | \psi_1 \rangle \langle \psi | \psi \rangle.$$

(Вероятность одновременной реализации двух независимых явлений равна произведению вероятностей отдельных явлений.)

Приведенное выражение очевидным образом отличается от обычных картин прохождения частиц через экран со щелями. В этом случае напротив незаряженной щели мы получим распределение, однако, не подобное гауссовскому, а подобное отмодулированному гауссовскому, т.е. с наложенной синусоидой. В обычных случаях мы должны были бы иметь либо интерференционную картину, симметричную относительно двух щелей, либо подобную гауссовской, напротив одной из щелей (т.е. максимум напротив центра щели и затем монотонное падение в распределении электронов на втором экране).

Как хорошо видно из эксперимента со щелями, вообще говоря, необходимо одновременно рассматривать не одно уравнение Шредингера, а два. Одно с электромагнитным потенциалом, другое без него, описывающее движение «чистых» волн де Бройля:

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \psi + U(\vec{r})\psi,$$

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \psi.$$

Этот подход приводит к весьма существенной перестройке всего квантовомеханического формализма при физическом применении операторов Шрёдингера [18]. Обычный подход является неполным, хотя и для стандартного круга квантовомеханических эффектов остается правильным. Например, классические квантовомеханические описания останутся в силе для атома водорода, поскольку никакого экрана со щелями в атоме водорода, естественно, нет.

Распространение волнового возмущения сопутствует движению частицы; вместе с тем оно опережает движение самой частицы. Поэтому выражения, описывающие распространение волны в традиционной квантовой механике, нуждаются в некоторых изменениях. Выражение, описывающее распространение волны де Бройля должно иметь вид:

$$\varphi \sim \varphi_0 f(\vec{r}) e^{i(-\omega t + \vec{k}(\vec{r} + \vec{R}))},$$

где вектор  $\vec{R}$  характеризует положение частицы, вектор  $\vec{r}$  характеризует положение точки пространства, до которой дошло волновое возмущение, относительно положения частицы (!),  $f(\vec{r})$  – некоторая функция расстояния от заданной точки пространства, до которой дошло возмущение, до движущейся частицы.

При  $r = 0$  получаем обычную волну де Бройля.

В заключение автор хотел бы особенно поблагодарить Елену Палешеву за помощь в подготовке статьи к опубликованию, своих учителей Н.А. Буркову и В.В. Кашкарова за важное обсуждение ряда вопросов, а также помощь в работе.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Бор Н. *Квантовая механика и физическая реальность*. Избранные научные труды. Т.2., М.: Наука, 1971.
2. Бор Н. *Можно ли считать квантовомеханическое описание физической реальности полным?* Избранные научные труды. Т.2., М.: Наука, 1971.
3. Шредингер Э. *Квантование как задача о собственных значениях. Первое сообщение*. Избранные труды по квантовой механике. М.: Наука, 1976.
4. Паули В. *Некоторые вопросы интерпретации квантовой механики*. М.: Наука, 1933.
5. Планк М. *О работах Шредингера по волновой механике*. Избранные труды. М.: Наука, 1975.
6. Планк М. *Попытка синтеза волновой и корпускулярной механики*. Избранные труды. М.: Наука, 1975.
7. Планк М. *Попытка синтеза волновой и корпускулярной механики (дополнение)*. Избранные труды. М.: Наука, 1975.
8. Шредингер Э. *Непрерывный переход от микро- к макромеханике*. Избранные труды по квантовой механике. М.: Наука, 1976.
9. Луи де Бройль *Революция в физике (Новая физика и кванты)*. М.: Атомиздат, 1965.

10. Сивухин Д.В. *Атомная физика. Курс общей физики*. Т.5 М.: Наука.
11. Матвеев А.Н. *Атомная физика*. М.: Высшая школа, 1989.
12. Блохинцев Д.И. *Основы квантовой механики*. М.: Наука, 1983.
13. Давыдов А.С. *Квантовая механика*. М.: Наука, 1963.
14. Бом Д. *Квантовая теория*. М.: Наука, 1965.
15. Филиппов Р.В. *Принцип нетождественности микрочастиц и волн де Бройля в квантовой механике // Современные достижения физики и фундаментальное физическое образование. 2-я Международная конференция. Тезисы докладов*. Алматы. 2001. С.116.
16. Filippov R.V. *Principle of nonidentity of particles and DeBroglie waves or a membrane analogy in quantum theory and its experimental role // Theoretical and experimental problems of general relativity and gravitation. Abstracts. 11th International Conference*. Tomsk. 2002. P.43.
17. Филиппов Р.В. *О возможности новой экспериментальной проверки оснований квантовой механики // 55-я Республиканская конференция молодых ученых, магистрантов и студентов*. Алматы. 2001. С.12.
18. Цикон Х., Фрёзе Р., Кирш В., Саймон Б. *Операторы Шредингера с приложениями к квантовой механике и глобальной геометрии*. М.: Мир, 1990.