

А. В. Юров, А. А. Юрова, †А. Я. Шпилевой

СУЩЕСТВУЮТ ЛИ МИРЫ ЭВЕРЕТТА?

Показано, что так называемые миры Эверетта действуют друг на друга с силой, которую в принципе можно измерить «динамометром». Отсюда делается вывод, что эти миры реально существуют. Продемонстрировано, что вопреки распространенному мнению, многомировая (Эвереттовская) и «казуальная» (де Бройля – Бома) интерпретации совпадают. Для описания измерения координаты в терминах многомировой интерпретации применен ограниченный интеграл по путям.

96

It is shown that the Everett worlds act on each other with a force that, in principle, can be measured «with a dynamometer». Hence the conclusion that these worlds really exist. It is shown that, contrary to popular belief, the many-world (Everett) and «casual» (de Broglie – Bohm) interpretations coincide. A limited path integral was used to describe coordinate measurement in terms of multiworld interpretation.

Ключевые слова: «волна – пилот», эвереттовская интерпретация, ограниченный интеграл по путям.

Keywords: «wave – pilot», Everett interpretation, limited path integral.

Введение

Эта работа посвящена вопросу, вынесенному в заголовок, а именно: имеет ли смысл говорить о реальности существования объектов на различных ветвях волновой функции в состоянии суперпозиции, или это не более чем удобный способ описать поведение квантовых объектов [1; 2]? Например, вычисляя амплитуду перехода для электрона с помощью функционального интеграла, мы проводим интегрирование по всем траекториям, но подразумеваем, что после измерения электрон на самом деле находится на одной из ветвей. Интегрирование по остальным путям просто дает вклад в окончательный ответ, который прекрасно подтверждается опытом. Если же мы попытаемся поинтересоваться, где находятся эти невидимые траектории, то будем вынуждены либо признать наличие мультиверса, либо сказать, что этот вопрос не имеет смысла. Последняя точка зрения, по-видимому, наиболее распространена, поскольку позитивистски настроенное физическое большинство вполне удовлетворено вычислением амплитуд и не задает «бесмысленных» вопросов.

Это неудивительно. Существует общее мнение, что многомировая интерпретация квантовой механики (в дальнейшем MWI) – не более чем «интерпретация». Это означает, что нет никаких вычислений или



экспериментов, которые дали бы различные результаты в рамках миров Эверетта или Боровской теории. В таком случае выбор той или иной интерпретации — лишь дело вкуса.

Дойч и некоторые другие авторы не согласны с таким заключением. Они предлагают эксперименты, которые будут давать разные ответы в зависимости от того, верна или нет MWI. Например, Типлер в [3] отмечает, что борновская интерпретация волновой функции дает только относительные частоты, когда число наблюдений приближается к бесконечности. Используя MWI, он показывает, что наблюдаемые частоты должны приближаться к борновским частотам как $1 / N$, где N — число наблюдений. Отсюда делается вывод, что мы можем экспериментально проверить центральное утверждение MWI, измерив скорость сходимости к финальной частоте Борна. И наоборот, MWI позволяет нам рассчитать эту скорость сходимости, которую в принципе нельзя вычислить в рамках обычной, боровской интерпретации, включающей в себя коллапс волновой функции. Дойч в [4] предлагал гораздо более трудно реализуемый эксперимент, требующий наличия эффективных квантовых компьютеров. Во времена публикации этой работы (1985 г.), квантовые компьютеры были экзотикой, однако сейчас ситуация стремительно меняется, и, возможно, подобный эксперимент удастся поставить в обозримом будущем.

Более того, после обнаружения эффекта декогеренции [5–9] оказалось, что нет никакой необходимости в коллапсе волновой функции: взаимодействие с окружением делает недиагональные элементы матрицы плотности экспоненциально малыми, фактически превращая чистое состояние в смесь. Еще больше статус идеи редукции (коллапса) понизился после обнаружения соответствия AdS/CFT. Дело в том, что коллапс, рассматриваемый как реальный физический процесс, нарушает и линейность, и унитарность. Другим примером нарушения унитарности предполагался процесс испарения черных дыр, однако в рамках соответствия AdS/CFT удалось показать, что даже в такой, казалось бы, предельно экзотической ситуации унитарность сохраняется. Трудно поверить, что она нарушается в каждодневных лабораторных экспериментах!

В данной работе мы предлагаем несколько более необычный подход, чтобы показать, что MWI является куда менее странной концепцией даже с точки зрения обычных, классических представлений. Как известно, кроме копенгагенской и многомировой интерпретаций существует и «казуальная» интерпретация или интерпретация де Бройля — Бома [10; 11]. Слово казуальный взято в кавычки потому, что, несмотря на апелляцию этой интерпретации к детерминистическому описанию, она бесполезна для попыток точного предсказания поведения квантовых объектов. Мы продемонстрируем аргументы в пользу того, что логическое развитие концепции де Бройля — Бома приводит к многомировой интерпретации Эверетта (следуя Дойчу, будем говорить о теории мультиверса). Также осознание того, что теория «волны — пилота» — следствие MWI, вероятно, позволяет устранить все слабые места в «казуальной» интерпретации, которые не удалось устранить де Бройлю и Бому.



Статья организована следующим образом. В первом разделе мы рассмотрим подробнее «казуальную» интерпретацию и укажем ее сильные и слабые места. Во втором разделе мы покажем, что теория де Бройля — Бома естественно приводит к MWI и фактически представляет собой математическое описание мультиверса. Неожиданным следствием является заключение, что эти «миры» действуют друг на друга с настоящей, реальной силой. Тем самым будет развеяна кажущаяся таинственность мультиверса. Имеется в виду следующее: сторонники многомировой интерпретации часто говорят, что какой-либо объект нашего мира — например, фотон — все время ощущает воздействие своих «двойников» из параллельных вселенных. Но как происходит это воздействие? Оказывается, ответ дают уравнения, написанные Бомом для обоснования казуальной интерпретации. Сама по себе физическая интерпретация Бома неверна (точнее, не доведена до логического конца), но предложенный им способ интерпретации уравнения Шрёдингера, как мы увидим, позволяет сдернуть покров таинственности с мультиверса. По-видимому, именно в такой форме следует описывать мультиверс, а не так, как это сделал Эверетт, используя для рассуждений обычный способ обращения с уравнением Шрёдингера и принципом суперпозиции. В третьем разделе мы применим ограниченный интеграл по путям для описания измерения координаты нерелятивистской частицы. Будет показано, что такое описание позволяет, вероятно, снять возражения против теории де Бройля — Бома как теории, приводящей к нефизической динамике. В заключении мы обсудим некоторые нерешенные проблемы.

Теория де Бройля — Бома

Пытаясь представить себе движение квантовой частицы, Л. де Бройль пришел к теории, которую он назвал теорией двойного решения (ДР; впервые озвучена на Сольвеевском конгрессе в 1927 г.). Согласно этой (так и не созданной) теории, частица, которую мы описываем всюду регулярной волновой функцией $\psi = \psi(x, y, z, t)$, должна описываться другой функцией $u = u(x, y, z, t)$, уже сингулярной в точке или некоторой локальной области. По мысли де Бройля, реальная частица и есть эта сингулярность, потому мы и «упускаем» частицу, работая с ψ , а не с u . Функции ψ и u имеют общий фазовый множитель. Это означает, что часть информации о частице содержится в ψ , но только часть, поэтому лучше, что можно извлечь из ψ , — это распределение вероятности для частицы. Если же использовать u , то можно получить полное описание динамики. Отметим, что динамика эта будет существенно неклассической. Так должно быть потому, что дебройлевская частица суть сингулярность в волновом поле. Само это поле ведет себя как волна, в частности, оно ощущает наличие внешних препятствий (например, число отверстий в экране), а значит, сингулярность в поле тоже ощущает эти препятствия и ведет себя не так, как вела бы классическая частица, подчиняющаяся ньютоновским законам. Тем не менее квантовая частица имеет вполне определенную траекторию.



Такова была остроумная идея де Бройля, которую он, к сожалению, не сумел обосновать. В ослабленной версии теория ДР была развита Д. Бомом и получила название «теория волны – пилота». Суть этой модели легко уяснить, обращаясь к базовому уравнению квантовой механики, то есть к уравнению Шрёдингера:

$$i\hbar\psi_t = -\frac{\hbar^2}{2m}\Delta\psi + V\psi. \quad (1)$$

Используя для комплексной волновой функции представление $\psi = Re^{iS/\hbar}$, получаем два уравнения для вещественных функций $R = R(t, x, y, z)$ и $S = S(t, x, y, z)$:

$$\begin{aligned} R_t &= -\frac{1}{2m}(R\Delta S + 2\nabla R\nabla S), \\ S_t &= -\left(\frac{1}{2m}(\nabla S)^2 + U\right), \end{aligned} \quad (2)$$

где

$$U = V + Q = V - \frac{\hbar^2}{2m} \frac{\Delta R}{R}. \quad (3)$$

Мы будем называть Q квантовым потенциалом. Второе уравнение имеет вид уравнения Гамильтона – Якоби, если считать S действием. Поэтому можно, следуя Бому, вообразить семейство траекторий некой частицы, ортогональное некоторой поверхности $S = const$. Если наложить дополнительное условие, что скорость частицы вычисляется по классической формуле

$$\vec{v} = \frac{\vec{\nabla} S}{m}, \quad (4)$$

то эти траектории будут ортогональны всем поверхностям равного действия. Другими словами, мы вполне можем представить частицу, которая в любой момент времени имеет строго определенную скорость и координату, хотя, согласно общепринятой точке зрения, такое даже помыслить нельзя!

Вместе с тем движение этой «частицы» будет существенно неклассическим. Это происходит потому, что, как диктует первое уравнение системы (2), квантовый потенциал Q зависит от S . Движение «частицы» (хотя кавычки в слове можно и убрать, что мы и будем делать дальше) оказывается сильно нелинейным и совершенно не похоже на движение классической частицы, когда $Q = 0$, то есть $\hbar = 0$. Самое главное, что система (2) эквивалентна уравнению (1), а значит, любые заключения о движении частицы, сделанные с помощью уравнения Гамильтона – Якоби плюс квантовый потенциал и первого уравнения в (2), будут приводить к тому, что предсказывает ортодоксальная квантовая механика, основанная на уравнении Шрёдингера. Отличие в том, что теперь ясно, где находится частица и что с ней происходит!



Наличие квантового потенциала приводит к наличию дополнительных к классическим сил, действующих на частицу:

$$\vec{F}_Q = -\vec{\nabla}Q. \quad (5)$$

Именно наличие этих сил позволяет частице совершать невозможное с классической точки зрения. Например, именно эти силы «перебрасывают» частицу через потенциальный барьер, высота которого больше классической энергии частицы. Именно эти силы отвечают на сбивающий с толку вопрос: что мешает частице попасть в некоторые места на экране, проходя через систему щелей? Ответ таков: квантовый потенциал в промежутке между поглощающим экраном и системой щелей ведет себя очень сложно (это поведение можно вычислить, решая уравнение (1)). В некоторых местах $R = 0$, что на языке стандартной интерпретации означает нулевую вероятность попадания частицы в эти места. На языке же теории «волны — пилота» равенство нулю R означает обращение в бесконечность Q и его градиента, то есть «квантовой силы» F_Q . Если квантовый потенциал при этом отрицателен, то на частицу действует бесконечно большая сила отталкивания, и нет ничего удивительного в том, что она не может попасть в эти места на экране. Если же $Q > 0$, то частица приобретает «бесконечно большую» скорость, и поэтому ее просто невозможно засечь в этих местах. В обоих случаях есть ясная и простая картина происходящего. Вероятно, по этой причине теорию де Бройля — Бома часто называют казуальной интерпретацией. Название это представляется нам неудачным, а точнее, вводящим в заблуждение. Создается впечатление, что мы на самом деле можем предсказывать траекторию частицы, как в классической механике. Это не так, потому что, как будет показано в следующем разделе, мы в принципе не можем знать начальных условий (это ясно понимал и Бом). Тем не менее ясно, что эта картина привлекательна хотя бы тем, что развеивает овладевшее умами многих поколений физиков убеждение, что траекторию квантовой частицы невозможно представить, что ее просто нет!

Теория «волны — пилота» многократно критиковалась. Приведем три наиболее сильных аргумента «против».

1. Неясна физическая суть квантового потенциала. Силы порождаются физическими полями. Какое поле порождает Q ?

2. Эта интерпретация по сути вводит «скрытые параметры», которыми являются координаты и импульс квантовой частицы. Но, как известно (см., например, превосходный обзор Клышко), существование таких параметров неизбежно ведет к нелокальной связи. К примеру, придется признать, что между элементами ЭПРовской пары существует таинственное «сверхсветовое» взаимодействие. Если квантовая механика остается вероятностной наукой, то такие связи — не более чем статистические корреляции и потому не опасны. Но если поведение частицы детерминированное, у нас появляются проблемы с теорией отно-



сительности. Ничего не меняет тот факт, что мы не можем управлять этими «сверхсветовыми» связями. Главное, они есть, а этого не должно быть. Значит, теорию «волны — пилота» не просто трудно, а невозможно обобщить на релятивистскую область!

3. При взаимодействии двух частиц (например, в опыте Франка — Герца) ситуация по Бому выглядит так: исходный волновой пакет (решение уравнения (1)) распадается из-за дисперсии на множество пакетов. Частица (электрон) «цепляется» за один из них. Но почему она «цепляется» именно за этот пакет?

Ответ на первые два возражения мы приведем в следующем разделе. Что же касается последнего аргумента, то на него ответил (хотя и несколько неуверенно) сам Бом. Он указал, что если бы мы в точности знали начальные условия, то смогли бы и предсказать, за какой пакет «цепляется» частица. Как мы уже говорили (и как будет показано ниже), мы не можем в принципе знать точных начальных условий, потому и не можем указать нужный пакет. В третьем разделе мы вернемся к этому вопросу.

От казуальной к многомировой интерпретации

Давайте вообразим, что развитие квантовой теории пошло иначе. После ряда попыток понять странности квантового мира Шрёдингер написал свое уравнение, но не в привычном виде (1), а как систему (2). Физики пришли бы к выводу, что в природе имеются доселе неведомые квантовые силы (5) и попытались бы понять их происхождение. Раз есть сила, значит должен быть источник этой силы. Именно в этом суть первого возражения из предыдущего раздела.

Квантовые силы совсем не похожи на привычные силы, порожденные электромагнитным или гравитационным полями. Чтобы понять, чем же они могут быть порождены, попробуем переписать первое уравнение системы (2), вводя функцию $P = R^2$. Учитывая (4), получаем

$$P_t + \operatorname{div}(P\vec{v}) = 0, \quad (6)$$

то есть уравнение неразрывности. В ортодоксальной квантовой теории P интерпретируется как вероятность. Действительно, глядя на (6), мы можем рассматривать P как плотность вероятности частиц некоторого ансамбля. Другими словами, выглядит это так, будто существует не одна частица, а ансамбль таких частиц. Фундаментально то, что только это уравнение способно указать нам источник квантовых сил. Других уравнений просто нет. Значит, источником квантовых сил является ансамбль частиц, одну из которых мы наблюдаем. Но воображаемый ансамбль не может служить источником реальных сил (5). Если мы реалисты, то должны признать этот ансамбль реально существующим. Иначе говоря, пытаясь понять казуальную интерпретацию (точнее, ответить на первое возражение), мы естественно приходим к многомировой интерпретации.



Красивой иллюстрацией могут служить стационарные состояния. Рассмотрим, например, атом в s -состоянии. Простое вычисление (Бом) приводит к тому, что

$$U = V + Q = 0$$

и $\vec{v} = 0$.

Таким образом, электрон, находящийся в таком состоянии, покоится, ибо кулоновская сила полностью уравновешивается квантовой силой (5). Далее Бом пишет: «Возможные положения частицы образуют, однако, статистический ансамбль с плотностью вероятности P » [1]. Но мы видели, что именно эти частицы являются источником квантовой силы. Таким образом, полная картина выглядит так: существует множество миров, в которых электрон покоится на своей орбите. На каждый электрон действуют кулоновская сила ядра и квантовая сила, которая суть интегральная сила, действующая на данный электрон со стороны всех его «аналогов» из других миров. В сумме эти силы компенсируют друг друга, почему все эти электроны и покоятся.

В результате «двойники» любой частицы из других миров реально действуют на эту частицу с исчезающе малой, но конечной силой, которую в принципе можно померить «динамометром». Силы эти очень малы, но поскольку «двойников» много, они могут при определенных условиях усиливаться и приводить к наблюдаемому эффекту. Все малые квантовые силы (5) складываются из неизмеримо более слабых, одночастичных сил.

Такое толкование не только проясняет физическую суть (5), но и снимает покров тайны с многомировой интерпретации. Оказывается, между этими мирами действуют обычные физические силы, которые, правда, очень малы, но ничего таинственного в них нет.

Недавно некоторое буквальное развитие этой идеи было дано в работах [12–15]. Авторы показали, что все квантовые явления можно моделировать, заменяя классический гамильтониан на конечное число гамильтонианов (по одному на каждый «мир») с добавлением потенциала взаимодействия. Обычное уравнение Шрёдингера возникает в пределе, когда число «взаимодействующих миров» стремится к бесконечности. Именно в таком пределе мы и будем работать ниже.

Вслед за Бомом авторы работы [12] сделали понятным ответ на вопрос, почему мы не знаем и не можем знать точных начальных условий для данной частицы. Происходит это потому, что мы не знаем, в каком мире находимся. В каждом мире динамика частицы полностью детерминирована. На частицу действуют обычные силы, порожденные потенциалом V , и квантовые, порожденные всеми остальными «частицами-двойниками». Задать начальные условия для системы (2) означает знать, в каком из миров мы находимся. Поскольку этого мы не знаем, точные начальные условия нам неизвестны. Вот и все о пресловутой квантовой неопределенности. В [12] эти рассуждения проведены формально и показано, как возникает принцип неопределенности в бесконечном пределе. Заметим, что если бы мир был один, то вопросов тако-



го типа бы не возникало. В принципе мы могли бы узнать точные начальные условия, но в этом случае не было бы и квантовых сил (то есть квантового поведения), ибо эти силы порождаются, по терминологии работы [12], частицами из «других миров». Если же другие миры есть, то есть и квантовые силы, а значит, квантовое поведение, но тогда мы не знаем, в каком мире находимся. Следовательно, возникает квантовая неопределенность. Этот вопрос был с предельной ясностью рассмотрен в [16].

Таким образом, если посмотреть на многомировую интерпретацию с позиции теории «волны — пилота», все становится гораздо понятнее. Квантовые неопределенности перестают быть чем-то запредельным и фундаментальным, все становится четким и представимым.

Перейдем ко второй проблеме, проблеме локальности. Мы сэкономим время и усилия, рассмотрев простой и известный мысленный эксперимент.

Пусть в некоторый момент времени из некоторой точки O разлетаются члены синглетной ЭПР-пары. Частица 1 летит к наблюдателю A , а частица 2 — к наблюдателю B , причем оба равноудалены от O . Чтобы не путаться с релятивистскими осложнениями, будем считать, что A и B покоятся относительно O и друг друга. Тогда множества одновременных событий для A и B совпадают. Будем считать, что частицы 1 и 2 одновременно достигают A и B . В этот момент A измеряет проекцию спина частицы 1 на ось OX , то есть s_x , а B измеряет s_z частицы 2. На первый взгляд, им удалось совершить невозможное: встретившись и обменявшись результатами измерений, они определяют s_x и s_z у обеих частиц в момент измерения. Как же быть?

Если мы придерживаемся теории со «скрытыми параметрами», то должны допустить наличие «сверхсветовой» связи между частицами 1 и 2. В самом деле, почему A не может проделать такой опыт над частицей 1? Потому что, измеряя s_x , он возмущает s_z . Значит, квантовую механику со «скрытыми параметрами» можно спасти, только допустив, что возмущая s_z у частицы 1, он *в то же время* возмущает s_z у частицы 2. Это то, что Эйнштейн называл «действием призраков на расстоянии», а мы, следуя установившейся терминологии, будем называть квантовой нелокальностью. Возражения такого типа и убедили физиков, что теории со «скрытыми параметрами» неверны. Часто об этом говорят как об экспериментальном опровержении моделей со «скрытыми параметрами», ссылаясь при этом на опыты Аспека. Как мы видим, никаких экспериментальных опровержений на самом деле нет. Есть трудности в согласовании результатов экспериментов с теорией относительности, причем эти трудности выглядят неодолимыми.

Хотя многомировая интерпретация, как мы видели, сама по себе является теорией со «скрытыми параметрами» (ибо она получается из теории «волны — пилота»), она тем не менее свободна от таких проблем. Происходит это потому, что *в многомировой интерпретации нет никакой нелокальности*.



В самом деле, рассмотрим этот же опыт с позиции многомировой интерпретации. В половине миров измерение, проведенное А над частицей 1, даст $s_x^{(1)} = 1/2$, а в другой половине — $s_x^{(1)} = -1/2$. При этом в каждом мире частица имеет одновременно определенное значение всех проекций спина, то есть не только $s_x^{(1)}$, но и, скажем, $s_z^{(1)}$. Однако эти миры никак не действуют друг на друга, поэтому, измеряя $s_x^{(1)}$, наблюдатель А с равной вероятностью может оказаться либо в мире, где $s_z^{(1)} = 1/2$, либо в мире, где $s_z^{(1)} = -1/2$. Пусть он попал в мир, где $s_z^{(1)} = -1/2$. Очевидно, что в этом мире измерение, проведенное Б, даст $s_z^{(2)} = +1/2$. Никакой нелокальности при этом нет. Однако следует четко понимать цену, которую мы за это платим: нелокальности удастся избежать потому, что наблюдатель и прибор тоже должны рассматриваться квантовомеханически (подробности см. в работе [17]).

Таким образом, многомировая интерпретация избавляет нас от «действия призраков на расстоянии», и становится ясным, что обобщение теории «волны — пилота» на релятивистскую область вполне возможно.

Подведем предварительные итоги. Если осознать, что теория «волны — пилота» и многомировая картина — это не разные интерпретации, а одна и та же теория, то обычные возражения против казуальной интерпретации исчезают, а сама MWI становится понятной и лишается мистического ореола. Квантовая механика оказывается теорией, описывающей взаимодействие частицы с ее «двойниками» из других миров, причем это взаимодействие выражается на привычном языке сил.

Ограниченный фейнмановский интеграл

Если многомировая и казуальная интерпретации суть одно и то же, то любое возражение против одной из них автоматически должно либо разрешаться в рамках другой (в этом вся сила объединения этих интерпретаций, как показано выше), либо становиться возражением против обеих интерпретаций. В этом разделе мы рассмотрим еще одно возражение против теории «волны — пилота», которое не так известно, как рассмотренные выше три контраргумента, но тем не менее выглядит достаточно серьезно.

В 1980 г. Белл отметил, что в некоторых ситуациях бомовская траектория сильно отличается от того, что следовало бы ожидать. Энглерт с соавторами [18], Аронов и Вайдман [19], в свою очередь, показали, что эти траектории могут быть отличны от того, что, несомненно, должен был показать измерительный прибор. На этом основании Энглерт даже назвал эти траектории «сюрреалистическими траекториями».

В данном разделе мы хотим показать, что проблема «сюрреалистических бомовских траекторий» может быть разрешена за счет достаточно нового формализма, развитого Менским [20] и получившего название «метод ограниченного фейнмановского интеграла». Этот подход может служить для описания того, что же на самом деле происходит при квантовомеханическом измерении.



Основная идея (подробности см. в [20]) заключается в следующем. Пусть мы измеряем наблюдаемую $A(t)$. Прибор настроен так, чтобы измерить собственное значение этой переменной, равное $a(t)$. В этом случае нет необходимости учитывать все пути при вычислении фейнмановского интеграла. Достаточно проинтегрировать по «квантовому коридору», центрированному около значения $a(t)$. Этого можно добиться, умножая амплитуду перехода на множитель

$$w_T = \exp\left\{-\kappa \int_0^T dt [A(t) - a(t)]^2\right\}, \quad (7)$$

где T — время, в течение которого производится измерение, а $\kappa > 0$ — величина, характеризующая интенсивность взаимодействия измеряемой величины с прибором.

Разумеется, это чистая феноменология, но как показывает опыт, весьма действенная и эффективная. Можно перейти на привычный язык гамильтонианов и волновых функций. Наличие множителя (7) в фейнмановском интеграле означает, что процесс измерения описывается комплексным, эффективным гамильтонианом

$$H = H - i\kappa\hbar [A(t) - a(t)]^2, \quad (8)$$

где H — обычный гамильтониан.

Рассмотрим для примера измерение координаты. Пусть прибор настроен так, что мы мерим координату в точке $r_0 = (0, 0, 0)$. При этом $A(t) = r$, а $a = 0$. Используя (8), получаем эффективное уравнение Шрёдингера:

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \Delta \psi - i\kappa\hbar r^2 \psi + ig\psi. \quad (9)$$

Уравнение (9) в точности совпадает с уравнением, которое вывел Кадомцев в [21], рассматривая «приближение непрерывного коллапсирования», поэтому мы воспользовались результатами Кадомцева и сразу добавили вещественную константу g в правую часть уравнения (9), чтобы частота осцилляций ψ была вещественной, а сама функция — нормируемой.

Решение (9) (без нормировочных множителей) имеет вид

$$\psi(t, r) = \exp\left[-i\omega\left(t + \frac{km}{3\hbar}r^2\right) - \frac{1}{3}\frac{m\omega}{\hbar}r^2\right], \quad (10)$$

где

$$\omega = \frac{3}{2}\sqrt{\frac{\hbar\kappa}{m}}, \quad \alpha = -\frac{4km\omega^2}{9\hbar}, \quad g = -k\hbar\omega, \quad k = \pm 1.$$

Чтобы $\alpha > 0$, следует выбрать $k = -1$. Решение (10), очевидно, нормируемо.



Теперь перейдем к модели «волны — пилота». Для этого используем представление $\psi = R \exp(iS/\hbar)$, откуда находим энергию боровской частицы и ее скорость:

$$E = -\frac{\partial S}{\partial t} = \hbar\omega, \quad \vec{v} = \frac{1}{m} \vec{\nabla} S = \frac{2w}{3} \vec{r}. \quad (11)$$

Таким образом, мы видим, что если использовать казуальный подход вместе с ограниченным фейнмановским интегралом, то результаты получаются разумными: боровская частица обладает конечной энергией, а скорость ее тем меньше, чем ближе она к точке измерения. Это означает, что окрест точки, где производится измерение координаты, то есть $(r)_0$ она проводит большую часть времени, а значит, и вероятность поймать ее в малой окрестности этой точки максимальна, как можно непосредственно убедиться с помощью волновой функции (10). Вся «сюрреалистичность» исчезла.

Заметим еще, что хотя создается впечатление, что частица должна остаться в точке измерения, так как там ее скорость равна нулю (см. (11)), это неверно, поскольку на нее все время действуют квантовые силы. Несложно убедиться, что

$$\vec{F}_Q = \frac{4}{9} m w^2 \vec{r}.$$

Эта «измерительная сила» равна нулю только точно в точке $r = 0$ и линейно растет для частиц, отклоняющихся от точного попадания в начало координат. Становится еще более очевидным, что проще всего зафиксировать частицу именно около точки измерения.

Заключение

Мы постарались показать следующее:

- 1) казуальная интерпретация, доведенная до логического завершения, приводит к многомировой интерпретации;
- 2) понимание того, что теория «волны — пилота» есть не что иное, как теория Эверетта, позволяет ответить почти на все возражения против казуальной интерпретации;
- 3) наоборот, понимание, что многомировая интерпретация естественно излагается на языке теории «волны — пилота», позволяет снять покров таинственности с многомировой интерпретации. В частности, оказывается, что разные миры действуют друг на друга с обычными силами;
- 4) соответственно, мы выражаем надежду, что все остальные возражения против теории «волны — пилота» могут быть устранены, если описывать измерение с помощью ограниченного фейнмановского интеграла. Однако этот вопрос пока остается открытым.



Список литературы

1. *Everett H.* «Relative State» Formulation of Quantum Mechanics // *Rev. Mod. Phys.* 1957. Vol. 29, iss. 3. P. 454–462. doi:10.1103/RevModPhys.29.454.
2. *The Many-Worlds Interpretation of Quantum Mechanics* / ed. by B.S. DeWitt, N. Graham. Princeton, 1973.
3. *Tipler F.J.* Testing Many-Worlds Quantum Theory by Measuring Pattern Convergence Rates. arXiv:0809.4422 [quant-ph].
4. *Deutsch D.* Quantum Theory as a Universal Physical Theory // *Int. J. Theor. Phys.* 1985. Vol. 24. P. 1–41.
5. *Zurek W.H.* Pointer Basis of Quantum Apparatus: into what Mixture Does the Wave Packet Collapse? // *Phys. Rev. D.* 1981. Vol. 24, iss. 6. 1516.
6. *Zurek W.H.* Environment-Induced Superselection Rules // *Phys. Rev. D.* 1982. Vol. 26, iss. 8. 1862.
7. *Joos E., Zeh H.D.* The Emergence of Classical Properties through Interaction with the Environment // *Z. Phys. B.* 1985. Vol. 59, iss. 2. P. 223–243.
8. *Zurek W. H.* Decoherence and the Transition from Quantum to Classical // *Phys. Today.* 1991. Vol. 44, iss. 10. P. 36–48.
9. *Tegmark M.* The Interpretation of Quantum Mechanics: Many Worlds or Many Words? // *Fortsch. Phys.* 1998. Vol. 46, iss. 6–8. P. 855–862. arXiv:quant-ph/9709032.
10. *Bohm D.* A Suggested Interpretation of the Quantum Theory in Terms of «Hidden» Variables, I and II // *Phys. Rev.* 1952. Vol. 85, iss. 2. P. 166–193.
11. *Bohm D.* Comments on an Article of Takabayasi Concerning the Formulation of Quantum Mechanics with Classical Pictures // *Progr. Theor. Phys.* 1953. Vol. 9, iss. 3. P. 273–287.
12. *Hall M.J.W., Deckert D.-A., Wiseman H.M.* Quantum Phenomena Modelled by Interactions between Many Classical Worlds // *Phys. Rev. X.* 2014. Vol. 4, iss. 4. 041013.
13. *Sturniolo S.* Computational Applications of the Many Interacting Worlds Interpretation of Quantum Mechanics // *Phys. Rev. E.* 2018. Vol. 97, iss. 5. 053311.
14. *Herrmann H., Hall M.J.W., Wiseman H.M., Deckert D.-A.* Ground States in the Many Interacting Worlds Approach. arXiv:1712.01918[quant-ph].
15. *Ghadimi M., Hall M.J.W., Wiseman H.M.* Nonlocality in Bell's Theorem, in Bohm's Theory, and in Many Interacting Worlds Theorizing // *Entropy.* 2018. Vol. 20, iss. 8. P. 567–585.
16. *Tipler F.J.* Hamilton – Jacobi Many-Worlds Theory and the Heisenberg Uncertainty Principle. arXiv:1007.4566 [quant-ph].
17. *Tipler F.J.* Quantum Nonlocality Does Not Exist // *PNAS.* 2014. Vol. 111, iss. 31. P. 11281–11286.
18. *Englert B., Scully M.O., Süssmann G., Walther H.* Surrealistic Bohm Trajectories // *Zeitschrift für Naturforschung.* 1992. Bdch. 47a. S. 1175–1186.
19. *Aharonov Ya., Vaidman L.* About Position Measurements Which Do Not Show the Bohmian Particle Position. arXiv:quant-ph/9511005.
20. *Менский М.Б.* Явление декогеренции и теория непрерывных квантовых измерений // *Успехи физических наук.* 1998. №168. С. 1017–1035.
21. *Кадо́мцев Б.Б.* Необратимость в квантовой механике // *Успехи физических наук.* 2003. №173. С. 1221–1240.

Об авторах

Артём Валерианович Юров – д-р физ.-мат. наук, проф., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.

E-mail: artyom_yurov@mail.ru



Алла Александровна Юрова — канд. физ.-мат. наук, доц., Балтийский федеральный университет им. И. Канта; Калининградский государственный технический университет, Россия.

E-mail: AIUrova@kantiana.ru

† Алексей Яковлевич Шпилевой — канд. физ.-мат. наук, доц., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.

E-mail: AShpilevoi@kantiana.ru

The authors

Prof. Artyom V. Yurov, I. Kant Baltic Federal University, Russia.

E-mail: artyom_yurov@mail.ru

Dr Alla A. Yurova, Associate Professor, I. Kant Baltic Federal University; Kaliningrad State Tehnical University, Russia.

E-mail: AIUrova@kantiana.ru

† Dr Aleksey Y. Shpilevoy, Associate Professor, I. Kant Baltic Federal University, Russia.

E-mail: AShpilevoi@kantiana.ru