

МЕТОДИЧЕСКИЕ ЗАМЕТКИ

К вопросу об интерпретации квантовой физики

А.А. Гриб

Рассмотрен вопрос о современных интерпретациях квантовой физики. Подробно описаны копенгагенская интерпретация и многомировая интерпретация Эверетта.

PACS numbers: 01.65. + g, 01.70. + w, 03.65. – w

DOI: 10.3367/UFNr.0183.201312d.1337

Содержание

1. Введение (1337).
 2. Основные постулаты квантовой теории (1337).
 3. Копенгагенская интерпретация (1340).
 4. Интерпретация Эверетта (1345).
 - 4.1. Дискуссионные вопросы.
 5. Заключение (1350).
- Список литературы (1351).

1. Введение

В нашей статье [1] мы попытались проанализировать различные отечественные учебники по физике на предмет того, как нельзя интерпретировать квантовую физику после недавних теоретических достижений, таких как неравенства Белла, теорема Кошена–Шпекера [2–6], и новых экспериментов, таких как опыты Аспека, Цайлингера и др. [7, 8] по нарушению неравенств Белла, телепортации и т.п. Однако в [1] мы воздержались от суждений о том, как же всё-таки надо интерпретировать квантовую физику сегодня, в начале XXI в. В настоящей статье мы попытаемся высказать некоторые соображения о такой интерпретации.

Начнём с того, что успехи в квантовой теории описания явлений микромира от элементарных частиц до молекул, теории сверхпроводимости и сверхтекучести таковы, что ни у кого в физическом сообществе не возникает сомнений в правильности её математического аппарата, позволяющего делать все эти замечательные предсказания. Раскол в физическом сообществе начинается тогда, когда делаются попытки понять этот математический аппарат, т.е. дать его интерпретацию на обычном языке. Неудовлетворённость некоторых физиков философскими следствиями этого аппарата приводит к попыткам его изменения — введению скры-

тых параметров, отказу от принципа суперпозиции, расширению квантовой теории введением случайных историй [9–12]. Все эти изменения, однако, не привели к теории, способной конкурировать с той, которая излагается в учебниках. Поэтому мы не будем рассматривать интерпретации, требующие изменения стандартного аппарата квантовой физики. Тогда остаются три возможности.

1. *Прагматическая интерпретация.* Правила квантовой теории позволяют с большой точностью предсказывать результаты наших наблюдений, и нам этого достаточно. Будем принимать эти правила как таковые и не будем интересоваться, почему они именно такие, а не другие.

2. *Копенгагенская интерпретация.* Эта интерпретация имеет несколько разновидностей, в частности ту, которая указана в пункте 1. В настоящей статье мы обсудим одну из сравнительно недавних формулировок копенгагенской интерпретации, предложенную сыном Нильса Бора Оге Бором [13], суммировавшим результаты многолетних обсуждений интерпретации квантовой теории в Копенгагене во второй половине XX в.

3. *Многомировая интерпретация Эверетта.* Предложенная в 1957 г. Х. Эвереттом [14], многомировая интерпретация далее пропагандировалась Дж. Уилером [15], Б. Девиттом [16], и она используется некоторыми космологами, такими как С. Хокинг [17, 18], Дж. Хартль, А. Виленкин [19] и др., при попытках объяснить квантовое рождение Вселенной, основываясь на идее о волновой функции Вселенной, существующей в отсутствие наблюдателя. В отечественной литературе эта интерпретация обсуждалась на страницах УФН М.Б. Менским [20, 21].

2. Основные постулаты квантовой теории

Перечислим важнейшие постулаты квантовой теории, как они представлены в большинстве учебников. В случае интерпретации Эверетта эти постулаты подвергаются некоторому переосмыслению, хотя на математических расчётах это не сказывается.

1. Состояние квантового объекта (ради простоты изложения под квантовым объектом будем понимать одну частицу) определяется волновой функцией координат в пространстве-времени Минковского $\Psi(x, y, z, t)$,

А.А. Гриб. Российский государственный педагогический университет им. А.И. Герцена,
ул. Мойка 48, 191186 Санкт-Петербург, Российская Федерация
E-mail: Andrei_Grib@mail.ru

Статья поступила 21 марта 2013 г.,
после доработки 11 июня 2013 г.

являющейся вектором в гильбертовом пространстве, который преобразуется по унитарному представлению группы Пуанкаре при преобразованиях из этой группы.

2. Наблюдаемые свойства квантового объекта описываются самосопряжёнными операторами в гильбертовом пространстве. Множество этих операторов содержит, прежде всего, генераторы группы Пуанкаре: гамильтониан (трансляция во времени), импульс (трансляция в пространстве), момент количества движения и спин (три пространственных вращения), операторы трёх пространственных координат как нерелятивистский предел трёх лоренцевых вращений. При этом, как отмечается в [13], некоммутативность координаты и импульса, а следовательно, и соотношения неопределённости Гейзенберга для них есть следствие некоммутативности преобразований пространственных трансляций и лоренцевых вращений. Отсюда видна прямая связь квантовой физики и теории относительности. Без пространства-времени Минковского мы, вообще говоря, не имели бы той квантовой физики, которую имеем.

Множество наблюдаемых в общем случае содержит, кроме перечисленных, наблюдаемые, не имеющие классических аналогов, — пространственную и временную чётность (операции пространственного и временного отражения из полной группы Пуанкаре), зарядовую чётность, различного рода заряды: электрический, барионный, лептонный, странность, очарование, красоту, высоту. Наконец, к числу наблюдаемых относятся локальные операторы, выражающиеся через локальные квантованные поля. Для электромагнитного и других вещественных полей наблюдаемыми являются сами поля, для электрон-позитронного, барион-антибарионного и других невещественных полей — билинейные комбинации операторов полей.

1. В отсутствие измерений волновая функция с течением времени изменяется детерминированно по уравнению Шрёдингера

$$i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = \hat{H}\Psi.$$

При этом волновая функция преобразуется с помощью унитарного преобразования

$$\Psi(t_0) \rightarrow \Psi(t) = U(t - t_0) \Psi(t_0) = \exp[-i\hat{H}(t - t_0)] \Psi(t_0).$$

В гейзенберговском представлении волновая функция с течением времени не изменяется, но с течением времени изменяются операторы наблюдаемых: $\hat{A} \rightarrow U\hat{A}U^{-1}$.

II. *Постулат редукции волнового пакета.* При измерении прибором наблюдаемой $\hat{A}$ волновая функция $\Psi(t)$ скачком преобразуется в одну из собственных функций оператора $\hat{A}$, так что если

$$\Psi = \sum_n c_n u_n,$$

где

$$\hat{A}u_n = \lambda_n u_n,$$

то вероятность определённого показания λ_n прибора, измеряющего свойство A , определяется правилом Борна

$$w_n = |(u_n, \Psi)|^2.$$

Важно отметить, что именно при редукции [22, 23] возникает случайность — индетерминизм. В какую функцию u_n из множества $\{u_n\}$ с $|c_n|^2 \neq 0$ преобразуется волновая функция $\Psi(t)$ квантового объекта, полностью непредсказуемо. Как известно, фон Нейман по этому поводу сказал, что в квантовой механике "причиной дисперсии будет уже не наше незнание, а сама природа, которая не считается с принципом достаточного основания" [24, с. 226]. Вероятность в квантовой физике, в отличие от вероятности в классической физике, не является следствием нашего незнания, а есть *объективная вероятность*, описывающая *объективную случайность*. Волновая функция определяет "программу" поведения квантового объекта, запрещая ему переход в те u_n , для которых $w_n = |c_n|^2 = 0$. Экспериментальным проявлением вероятности $|c_n|^2$ является частота события λ_n , представляющего собой собственное число оператора $\hat{A}$ для собственной функции, при многократном повторении опыта. В чём состоит это повторение?

Частица, например электрон, "приготавливается" в некотором состоянии $\Psi(x, y, z, t_0)$. Затем измеряется её свойство A . Потом берётся такая же частица в том же состоянии и снова измеряется A . Опыт повторяется большое (в идеале неограниченное) число раз. В результате, согласно статистическому определению вероятности фон Мизеса, экспериментатор увидит частоты, с которыми наблюдаются $\lambda_1, \lambda_2, \dots$, определяемые правилом Борна.

Итак, предсказания, следующие из волновой функции, для своего подтверждения требуют, вообще говоря, рассмотрения ансамбля одинаково приготовленных частиц.

III. *Принцип суперпозиции.* Если Ψ_1, Ψ_2 — состояния системы, то любая их линейная комбинация $\Psi = c_1\Psi_1 + c_2\Psi_2$, где c_1, c_2 — комплексные числа, тоже представляет собой возможное состояние системы.

IV. *Корпускулярно-волновой дуализм.* Волновая функция квантовой частицы может быть получена в результате действия оператора локального квантованного поля, связанного с данной частицей, — электрон-позитронного для электрона и позитрона, электромагнитного для фотона и т.д. — на состояние фоковского вакуума. Поэтому понятно, почему волновая функция удовлетворяет уравнению Шрёдингера и в чём заключается причина и смысл корпускулярно-волнового дуализма. Причина состоит в том, что, хотя мы и наблюдаем частицу как точечный объект, программа её эволюции во времени определяется реально существующим (как элемент множества наблюдаемых квантового объекта) квантованным полем. Квадрат модуля волновой функции, определяющий вероятностную функцию распределения в пространстве, умноженный на заряд электрона, даст с точностью до нормировочного множителя плотность заряда электронного поля. Для наблюдения этой плотности необходимо состояние из бесконечного числа электронов — собственное для оператора частоты (см. ниже), так что и волновые свойства электрона мы наблюдаем как свойства этого ансамбля частиц. В самом деле, правило Борна, как показано Эвереттом [14], Грэхемом [25], Хартлем [26], может быть доказано.

Действительно, рассмотрим бесконечное множество одинаково приготовленных в разные моменты времени (индексы 1, 2, ...) состояний частицы и волновую функцию, являющуюся бесконечномерным тензорным про-

изведением фон Неймана:

$$|\Psi^\infty\rangle = |\Psi, 1\rangle \otimes |\Psi, 2\rangle \otimes \dots \quad (1)$$

Тогда можно показать [25, 26], что вектор $|\Psi^\infty\rangle$ — собственная функция особого оператора $\hat{f}^{(k)}$, собственное число которого — это частота результата λ_k при измерении свойства A ($\hat{A}u_n = \lambda_n u_n$), так что

$$\hat{f}^{(k)}|\Psi^\infty\rangle = |\langle k|\Psi\rangle|^2|\Psi^\infty\rangle. \quad (2)$$

Здесь мы используем дираковское обозначение: $|\langle k|\Psi\rangle|^2 = |\langle u_k, \Psi\rangle|^2$.

Обсудив постулаты квантовой физики, сформулируем, в чём же состоит проблема, раскалывающая физическое сообщество. Это проблема измерения. Она имеет две особенности.

А. Превращение чистого состояния в смесь состояний. Возникает вопрос: почему квантовый объект, если над ним не производится измерение, эволюционирует так, что его волновая функция изменяется детерминированно по уравнению Шрёдингера, что описывается унитарным оператором $U(t)$, а при измерении эта волновая функция непредсказуемым образом скачкообразно становится собственной функцией наблюдаемой величины? Разве измерение как взаимодействие частицы с прибором, в свою очередь состоящим из частиц, это не физическое взаимодействие, тоже описываемое уравнением Шрёдингера, т.е. унитарным оператором?

Покажем на простом примере, почему при измерении (так называемом измерении первого рода) нарушается унитарность эволюции.

Пусть имеется частица с волновой функцией $\Psi(x, y, z, t)$ и измеряющий наблюдаемую A прибор, первоначально находившийся в состоянии $\chi_0(x_a, y_a, z_a, t)$. Тогда при измерении, считая частицу и прибор квантовыми, мы должны иметь

$$\begin{aligned} \Psi(x, y, z, x_a, y_a, z_a, t) &= \left(\sum_n c_n u_n(x, y, z, t) \right) \chi_0(x_a, y_a, z_a, t) \rightarrow \\ &\rightarrow \sum_n c_n u_n(x, y, z, t') \chi_n(x_a, y_a, z_a, t'), \end{aligned} \quad (3)$$

где функции χ_n соответствуют разным положениям "стрелки" прибора.

Переход (3) требует специального вида взаимодействия, так как в общем случае мы имели бы разложение по разным базисам:

$$\sum_{n,k} c_{nk} u_n \chi_k, \quad (4)$$

что не приводит к измерению.

Итак, переход (3) происходит унитарно, согласно уравнению Шрёдингера.

Теперь зададимся вопросом: если полная система частица–прибор описывается в момент времени t функцией (3), то чем описывается при этом частица как подсистема? Ответ состоит в том, что в случае ортогональных u_n мы имеем матрицу плотности подсистемы:

$$\rho = \text{diag}(|c_1|^2, |c_2|^2, |c_3|^2, \dots),$$

диагональную в данном базисе. Какова же интерпретация этой матрицы плотности?

Для наблюдателя, следящего за подсистемой, матрица плотности ρ описывает смесь состояний, т.е. наблюдатель скажет, что частица находится в каком-то одном из множества состояний $u_1, u_2, \dots, u_N$, причём вероятность u_1 — $|c_1|^2$, вероятность u_2 — $|c_2|^2$ и т.д. Но при такой интерпретации вся система описывается уже не чистым состоянием — суперпозицией (3), но тоже смесью: с вероятностью $|c_1|^2$ система частица–прибор будет находиться в состоянии u_1, χ_1 , с вероятностью $|c_2|^2$ — в состоянии u_2, χ_2 и т.д.

Итак, всё зависит от того, посмотрит или не посмотрит наблюдатель на подсистему. Если наблюдение за подсистемой не проводится — наблюдается только система как целое, то смешения состояний не происходит — система по-прежнему описывается чистым состоянием.

Заметим, что важна сама возможность наблюдения. Именно относительно наблюдателя происходит превращение чистого состояния в смесь состояний. Де Бройль называл эту ситуацию дополнительностью целого и части: знание части разрушает целое.

Превращение чистого состояния, описываемого одной волновой функцией, в смесь состояний с разными волновыми функциями — неунитарная операция, противоречащая уравнению Шрёдингера. Конечным результатом измерения является "регистрация" наблюдателем, в какое из возможных состояний перешла система, т.е. из различных состояний u_n, χ_n фиксируется только одно — то, которое реализовалось. Этот последний акт регистрации полностью аналогичен таковому в классической физике, когда измерение произошло и наблюдатель уверен, что стрелка прибора заняла определённое положение, хотя пока и не знает, какое именно. Однако когда наблюдатель посмотрел на прибор, он из всех возможностей зарегистрировал только одну. Загадочным является превращение чистого состояния в смесь, нарушающее обычную унитарную эволюцию квантовой системы.

В книге В.А. Фока [27] справедливо указывается на то, что эти два типа изменения волновой функции отражают два типа изменений, присутствующих и в классической физике: изменение согласно уравнению движения и изменение начальных условий.

Редукция волнового пакета приводит к изменению начальных условий для последующей эволюции в результате вмешательства измеряющего прибора. Однако в книге [27] не говорится о том, что в классической физике это изменение начальных условий вследствие взаимодействия с прибором может быть описано законами той же классической физики. В квантовой физике это не так — результат измерения нельзя получить из уравнения Шрёдингера.

Автор настоящей статьи после выхода в свет книги [27] обсуждал эту проблему с Владимиром Александровичем Фоком в последние два года его жизни. Предполагалось издание новой книги с переводом на русский язык основных работ, посвящённых проблемам измерения, с предисловием В.А. Фока, в котором он изложил бы свою точку зрения, но, к сожалению, его кончина помешала осуществлению этого замысла.

Б. Другая проблема, связанная с измерением, определяется его особой ролью — превращением численно неопределённого значения физической величины в определённое. Это превращение — не просто фиксация, как в

классической физике, существовавшего до наблюдения значения, неопределённого только для наблюдателя, а превращение "объективной неопределённости" в число.

Как мы писали в [28–30], нарушение неравенств Белла в квантовой физике, подтверждаемое экспериментом, запрещает говорить о существовании численно определённых значений свойств, описываемых некоммутирующими операторами, до измерения. Измерение не фиксирует существовавшее до него значение, а *создаёт* его.

Другим примером, иллюстрирующим невозможность существования численных значений наблюдаемых до измерения, при использовании гильбертова пространства с числом измерений, большим единицы или равным единице, является пример Кошена–Шпекера — так называемый квантовый многогранник [3].

Теперь перейдём к интерпретациям квантовой физики, так или иначе принимающим её математический аппарат. Во введении мы уже говорили о прагматической интерпретации, суть которой состоит в том, что надо принять квантовые постулаты как данность и этим ограничиться. Если этим не ограничиваться, то возникают две возможности, рассматриваемые в разделах 3 и 4.

3. Копенгагенская интерпретация

Копенгагенская интерпретация первоначально была предложена Нильсом Бором, Вернером Гейзенбергом, Йоганном фон Нейманом, а во второй половине XX в. развита Оге Бором [13]. Основные её положения следующие.

Мир делится на квантовые объекты и приборы. Квантовые объекты описываются квантовой физикой, приборы — классической физикой, так что результаты измерений описываются классическим языком и классической (булевой) логикой. Сами приборы не обязательно должны быть макрообъектами, состоящими из большого числа микрочастиц, хотя в большинстве случаев это так. В опыте Штерна–Герлаха по измерению проекции спина электрона на некоторое направление роль прибора играют ионы серебра, движущиеся в том или ином направлении по классической траектории, в зависимости от направления магнитного поля и значения проекции спина. Ионы серебра не являются макротелами, но в условиях опыта их центр масс движется по классической траектории и играет роль классического прибора. Главное свойство прибора — это то, что наблюдатель измеряет с его помощью лишь коммутирующие наблюдаемые, позволяющие ему получить информацию о том или ином свойстве квантового объекта, несмотря на то что прибор состоит из квантовых объектов. Но, разумеется, в конечном счёте даже квазиклассическая траектория иона регистрируется макроприбором, например фотоплёнкой.

Обычно в качестве таких коммутирующих наблюдаемых прибора выбирают квазиклассические макронаблюдаемые, так что вследствие явления декогеренции (зависящей от числа частиц макроокружения) матрица плотности квантового объекта быстро становится диагональной. Свойства квантовых объектов, описываемые некоммутирующими операторами, получают численные значения в дополнительных экспериментах, проводимых с помощью разных приборов, однако независимо от из-

мерения свойства квантовых объектов никакими фиксированными числами не характеризуются. Для описания этой ситуации нам представляется весьма удачным введённое Н. Бором и В.А. Фоком понятие относительности к средствам наблюдения, иллюстрирующее "возникновение" численно определённых свойств при измерении. Это понятие впервые появляется в специальной теории относительности (СТО). Длина объекта и длительность процесса в СТО, в отличие от таковых в ньютоновской механике, характеризуют не атрибуты самого объекта, но "отношения" наблюдаемого объекта к другому объекту, связанному с наблюдателем, — инерциальной системе отсчёта. Система отсчёта как набор линеек и часов — это "прибор", измеряющий длину предмета и длительность процесса как "отношения" к этому прибору. Указанные "отношения" изменяются при изменении системы отсчёта, проявлением чего является лоренцево сокращение масштаба длины и времени. Конечно, существует "собственная" система отсчёта, что отражает "отношение" к самому себе. Тем не менее уже в СТО нельзя говорить о наличии определённых длины и длительности без указания системы отсчёта.

В квантовой физике квантовый объект "сам по себе" описывается операторами, а не числами, как в классической физике, так что этот объект "объективно" представляет собой множество операторов наблюдаемых. Как мы говорили в разделе 2, эти операторы есть генераторы группы Пуанкаре, операторы локальных квантованных полей, а также различные заряды калибровочных преобразований.

Относительно того или иного прибора, описываемого классически, а значит на языке чисел, операторы "превращаются" в числа — те или иные собственные числа операторов. Волновая функция характеризует некоторое особое "отношение" прибора и квантового объекта и в этом смысле совместно описывает то и другое. Волновая функция определена вместе с "приготавливающим" или "измеряющим" прибором. О важности рассмотрения такой категории, как "отношение", в современной физике также справедливо говорится в [31]. Ситуацию, возникшую в квантовой физике, иногда [32] описывают словами: в микромире имеется "объективная неопределённость", "объективная случайность" и "объективная вероятность". Подчёркнём ещё раз: квантовый объект "сам по себе", вообще говоря, не характеризуется каким-либо числом. Например, наличие оператора координаты вместо числа, указывающего положение объекта, может толковаться как "объективная неопределённость" положения в пространстве квантового объекта. Лишь при измерении "возникает" такое определяемое числом положение. Термин "объективная неопределённость", в отличие от "субъективной неопределённости", означает, что неопределённость не связана с нашим незнанием, как это имеет место в классической физике, а является свойством самого объекта. Вернер Гейзенберг [33] говорил, что квантовая физика становится близка платонизму, если пытаться говорить о квантовой реальности как о "самой по себе".

Описание на языке операторов может интерпретироваться как существование "координаты вообще", "импульса вообще", принцип тождественности частиц — как "существование частицы вообще" и т.п. Это философия средневекового реализма, спорившего с номина-

лизмом по вопросу о существовании общих понятий. Например, существует ли человек вообще, а не только конкретные Иван Александрович, Мария Александровна и т.п.? Как известно, спор был решён в пользу номинализма.

Но в квантовой механике принцип тождественности частиц говорит, что при наличии системы электронов ввиду их тождественности им нельзя дать отдельные "имена", наподобие первый, второй и т.д. Можно лишь сказать, сколько имеется электронов. Всё это даёт основания для более серьёзного отношения к реализму и платонизму, из него вытекающему.

Наконец, возможен язык, предлагаемый Д. Финкельштейном [34]. Квантовый объект — это совокупность "актов", описываемых операторами, однако прибор превращает "акты" в "факты", которые характеризуются коммутирующими операторами и потому описываются числами.

Эволюция квантового объекта во времени естественным образом описывается в гейзенберговском представлении. Так, в квантовой теории поля эволюция поля во времени при рассмотрении двойного коммутатора гамильтониана с полем естественно приводит к уравнениям для квантованного поля: уравнению Клейна–Фока для скалярного поля, уравнению Дирака для спинорного поля и т.п. Однако в шрёдингеровском представлении, которое обычно эквивалентно гейзенберговскому, нужно говорить о приборе, без которого волновая функция не определена. С точки зрения квантовой теории поля, волновая функция получается действием оператора поля на вакуум. И если прибор движется неинерциально, например с постоянным ускорением, то возникает эффект Фуллинг–Унру [35], так что эквивалентность нарушается. Подобная неэквивалентность возникает и в случае, когда в качестве фоковского вакуума для операторов поля с одной массой взят вакуум поля с другой массой [36]. Поэтому для описания эволюции квантовой системы во времени гейзенберговское представление, по-видимому, является предпочтительным.

Теперь обсудим подробнее проблему редукции волнового пакета.

Имеются различные попытки интерпретации редукции. Как известно, фон Нейман [24] связал редукцию с сознанием наблюдателя. Всякий прибор — это продолжение органов чувств наблюдателя, получающего информацию об окружающем мире. Любой прибор можно считать состоящим из квантовых объектов — атомов и молекул, а значит, к нему можно применять законы квантовой физики. При этом предполагается справедливый "принцип перенесения границы".

Граница прибор–объект может переноситься к глазам наблюдателя, которые считаются классическими, в то же время то, что ранее считалось прибором, теперь объединено с изучаемым объектом в одну квантовую систему. Фон Нейманом было показано, что результат наблюдения не зависит от того, где проведена граница. Эту границу можно провести далее в мозг наблюдателя, однако всегда остаётся сознание или "абстрактное я" наблюдателя как субъект познания, получающий информацию.

Граница прибор–объект может проводиться не обязательно в настоящем времени. Классичность рассмотрения прибора позволяет, применяя к нему законы классической физики с её детерминизмом, говорить о

том, что прибор при измерении, до того как наблюдатель посмотрел на него, уже выдал какой-то определённый, хотя и неизвестный наблюдателю результат. Логика здесь та, что если бы наблюдатель посмотрел не сейчас, а в прошлом на объект, называемый им прибором, взаимодействовавшим с микрообъектом посредством взаимодействия специального вида, называемого гамильтонианом измерения, то он увидел бы вполне определённый результат.

Идею фон Неймана о роли субъекта познания в процессе редукции волнового пакета критикуют за "солипсизм". Так, в [37] не без иронии говорится, что, согласно этой интерпретации, "каждый из нас должен придерживаться взгляда, что только он является значащим наблюдателем, в то время как вся остальная Вселенная и её обитатели в любое время удовлетворяют уравнению Шрёдингера, за исключением случаев, когда он проводит наблюдение".

На это возражение следует ответить известным из философии аргументом [38], согласно которому к субъекту познания неприменимо понятие числа. Субъект познания всегда только Я. Всё остальное — объекты для этого Я. Разумеется, это Я нельзя отождествлять со мною как Марией, Андреем или ещё с кем-то из объектов как для меня самого, так и для других. Маня величия возникает, только если я, как Мария, в отличие от Сергея, есть Субъект, а он — всего лишь объект. Каждый наблюдатель, познающий что-либо, есть Я как субъект познания. Поскольку Я единственно, тогда то, что вижу Я как результат квантового наблюдения, будет тем же и для других наблюдателей. Поэтому здесь не возникнет парадокса типа парадокса "друга Вигнера", согласно которому, если редукция проводится сознанием наблюдателя, то разные люди, например Вигнер и его друг, могли бы видеть разные результаты. В этом парадоксе предполагается множество сознаний, что не соответствует аргументации фон Неймана. Очевидно, фон Нейман, который был связан с великой германской философской традицией, отдавал себе отчёт в том, что он называл "абстрактным Я наблюдателя".

Впрочем, и без философских рассуждений можно заметить, что, согласно правилам квантовой механики для измерений первого рода, когда после измерения объект находится в собственном состоянии оператора наблюдаемой, противоречия между измерениями двух наблюдателей не возникает, если измерения проводятся в разные моменты времени. Если сначала измерение сделал друг Вигнера, а потом Вигнер, или наоборот, то они оба увидят один и тот же результат.

Аналогичных взглядов на роль сознания придерживался и Шрёдингер. В работе *Что такое жизнь с точки зрения физики?* [39] он писал: «"Я", взятое в самом широком значении этого слова — то есть каждый сознательный разум, когда-либо говоривший или чувствовавший "я", — представляет собой не что иное, как субъект, могущий управлять "движением атомов" согласно законам природы».

Идею о том, что именно сознание наблюдателя осуществляет редукцию волнового пакета, в дальнейшем разрабатывали Ф. Лондон и Э. Бауэр [40], Э. Вигнер [41] и Р. Пенроуз [42].

Приведём рассуждения Лондона и Бауэра. Пусть сложная система — квантовый объект X, аппарат Y и наблюдатель Z — описывается после взаимодействия

квантового объекта с прибором волновой функций

$$|\Psi(x, y, z)\rangle = \sum_k a_k |u_k(x)\rangle \otimes |v_k(y)\rangle \otimes |w_k(z)\rangle, \quad (5)$$

где $|w_k(z)\rangle$ — различные состояния наблюдателя. Заметим, что здесь наблюдатель, в отличие от наблюдателя фон Неймана, объективируется и описывается волновой функцией. Разумеется, такие философы, как А. Шопенгауэр или Н.А. Бердяев, сразу бы сказали, что речь идёт не о субъекте познания, а о сознании как объективном свойстве наблюдателя.

Наблюдатель как подсистема сложной системы описывается матрицей плотности, которая, однако, ещё не истолковывается как смесь состояний. Но далее авторы [40] говорят: "Для него (наблюдателя) только объект X и аппарат Y принадлежат внешнему миру. Напротив, с самим собой он имеет специальные отношения: у него есть хорошо известная способность, которую можно назвать способностью к самонаблюдению (интроспекции). Он может зафиксировать своё состояние без всякого посредника. Благодаря этому самопознанию он может разорвать цепь статистических связей, выражаемых волновой функцией $\sum_k a_k |u_k(x)\rangle \otimes |v_k(y)\rangle \otimes |w_k(z)\rangle$, говоря: я нахожусь в состоянии $|w_k(z)\rangle$ или я вижу $g = g_k$ (g — показание прибора) или прямо $f = f_k$ (f — свойство квантового объекта)".

Итак, именно сознание наблюдателя ответственно за преобразование матрицы плотности в смесь чистых состояний, так что интроспекция производит новую волновую функцию объекта $|u_k(x)\rangle$. Сознание, в отличие от бессознательного, может обнаружить себя в каком-то чистом состоянии из набора $w_k(z)$, но не в состоянии описываемом матрицей плотности.

Здесь, однако, можно поставить вопрос о парадоксе "друга Вигнера". Переход в чистое состояние обусловлен не объективным процессом вне наблюдателя, но обусловлен чем-то типа выбора наблюдателя. Почему бы тогда другому наблюдателю не сделать другой выбор? Важно, однако, заметить, что многое зависит от того, кто делает измерение первым, а кто — вторым. Если первый наблюдатель совершил редукцию к определённой волновой функции, то второй наблюдатель, согласно свойству гамильтониана измерения, производящий то же измерение, получит ту же волновую функцию, что и первый (Эверетт привёл это же рассуждение (см. [14]), аргументируя, почему разные наблюдатели оказываются в одном и том же мире из множества эвереттовских миров). Близкой точки зрения на роль сознания придерживаются Сквайрс [43] и Менский [21, 44, 45].

Очевидно, что доказательство правильности подобной интерпретации нужно искать в психологии и физиологии, для которых главной нерешённой проблемой является психофизическая проблема: как сознание (нечто явно нематериальное, описываемое в психологических терминах) управляет телом, описываемым в физических терминах. Вопрос о том, может ли квантовая теория помочь решить эту проблему, остаётся открытым.

Возражением против этой точки зрения может служить вопрос Р. Пенроуза [46], заданный в связи с эвереттовской интерпретацией: "Откуда мы знаем, что сознание не может осознавать себя описываемым матрицей плотности или несколькими волновыми функциями?"

Добавим к изложенному, что индетерминизм и вероятность, возникающие при измерении, обусловлены

наблюдателем — в объективном квантовом мире их нет. Если же эта вероятность — объективная, то она отражает неконтролируемую случайность выбора наблюдателя. Наблюдатель не может управлять этой случайностью и, хотя она и не связана с его незнанием, как в классической физике, она определяется его выбором.

В связи с этим может быть поставлен вопрос М.Б. Менского [21]: не может ли наблюдатель, имеющий в подсознании доступ ко всем возможностям, определяемым суперпозицией, сделать "выгодный" для себя выбор?

Если наблюдатель будет делать это много раз, то он придёт к нарушению вероятностных предсказаний квантовой физики. В единичных случаях такой выбор возможен, но при многократном повторении отличить ситуацию воздействия сознания от чистого совпадения не представляется возможным.

Наконец, если наблюдатель все-таки не может сделать такого выбора, то естественной представляется идея, что этот выбор делает микрочастица, но только по отношению к наблюдателю, получающему информацию о ней. Эта позиция близка к позиции Дирака на ранней стадии развития квантовой физики, когда он говорил о свободе воли электрона.

Роль получения информации наблюдателем особенно подчёркивается "отрицательными" экспериментами. Первый такой пример был предложен Реннингером [47].

Пусть источник заряженных частиц (электронов) помещён внутрь сферы, покрытой сцинтиллирующим веществом. Эта сфера находится внутри другой сферы с большим радиусом, причём в первой сфере есть дыра. Электрон, ударяясь о первую сферу, вызывает сцинтилляцию — вспышку. Информация о наличии или отсутствии вспышки на первой сфере передаётся наблюдателю (через электромагнитное излучение). Пусть, однако, электрон вылетел из источника, но сцинтилляции не обнаружено. Тогда наблюдатель скажет, что электрон пролетел через дыру. В силу соотношения неопределённостей Гейзенберга импульс этого прошедшего через дыру электрона — другой, чем без отрицательного наблюдения, и он не совпадает с импульсом этой частицы, вылетающей из источника. Редукция волнового пакета произошла и при наличии ненаблюдения электрона в определённой области пространства. В макрослучае это соответствовало бы ситуации, когда наблюдателю известно, что из Бологого вышел поезд с известной скоростью то ли в Петербург, то ли в Москву. И вот наблюдение отсутствия поезда в Твери меняет скорость поезда, идущего из Петербурга.

В отличие от приверженцев обсуждённой выше модели редукции, Роджер Пенроуз [42, 46] защищает идею "объективной редукции" как некоторого физического процесса, нарушающего унитарность эволюции. "Объективная редукция" Пенроуза в свете применения принципа относительности к средствам наблюдения напоминает идею Лоренца и Фитцджеральда о том, чтобы истолковывать лоренцево сокращение длины при переходе в другую систему отсчёта как следствие воздействия электромагнитных сил, сжимающих тело, а не как геометрическое свойство четырёхмерного пространства-времени Минковского.

В качестве такого процесса Пенроуз предлагает процесс в квантовой гравитации. Он считает, что в квантовой гравитации нарушается унитарность, так как не верит,

что может существовать суперпозиция разных пространств-времени.

Квантовую гравитацию, возможно, надо учитывать при взаимодействии с макротелами. То, что макротела для своего квантового описания, по-видимому, требуют квантования гравитации, обсуждается довольно давно. Если написать длину волны де Бройля для грузовика (его центра масс), то период такого колебания будет намного меньше планковского времени, что указывает на необходимость квантования гравитации.

К сожалению, квантовая гравитация до сих пор не создана, поэтому предложение Пенроуза остаётся гипотезой.

Некоторое подтверждение идея роли сознания получила в направлении квантовой аксиоматики, получившем название "квантовая логика".

У одного из создателей квантовой механики И. фон Неймана возник вопрос о том, почему свойства квантовых объектов описываются операторами в гильбертовом пространстве [24, гл. 6]. В работе Биркгоффа и фон Неймана [48] обнаружено, что это связано с существованием особой математической структуры — ортомодулярной решётки с дополнением (точные определения см., например, в [28]), обладающей свойствами логической структуры с операциями "И" (конъюнкции — $\wedge$), "ИЛИ" (дизъюнкции — $\vee$), "НЕ" (отрицания — $\neg$), для которой нарушено свойство "И", "ИЛИ". В аристотелевой (или булевой) логике всегда

$$A \wedge (B \vee C) = (A \wedge B) \vee (A \wedge C). \quad (6)$$

Однако если

$$A \wedge (B \vee C) \neq (A \wedge B) \vee (A \wedge C), \quad (7)$$

то это приводит к квантовой теории с её некоммутирующими операторами. Первоначально в работе [48] был рассмотрен простой случай конечномерного гильбертова пространства. В дальнейшем благодаря усилиям швейцарской школы теоретиков Яуха, Пирона и др. [49, 50] было проведено обобщение для случая бесконечномерного гильбертова пространства.

Логика нашего сознания является дистрибутивной, или булевой, тогда как в микромире реализуется другая — нечеловеческая, небулева логика. Логика, как и геометрия, в которой есть много неевклидовых геометрий, не единственна. Другие логики как логики поведения каких-то объектов могут быть обнаружены экспериментально. Для этого надо определить эксперименты, в которых свойства объектов могли бы быть измерены, так что вместе с ними могли бы быть установлены также экспериментально более сложные свойства, понимаемые как конъюнкция и дизъюнкция исходных. После этого надо также экспериментально проверить, выполняется ли свойство дистрибутивности для конъюнкции и дизъюнкции.

В небулевой логике возможно утверждение, что точечный электрон с определённым импульсом (свойство A), пролетающий через экран с двумя щелями (свойства B, C), т.е. $A \wedge (B \vee C)$, — это не то же самое, что электрон, который, оставаясь точечным, пролетает или через щель C , или через щель B .

Роль сознания в "квантовой логике" проявляется в двух следующих аспектах:

а) булево сознание, получая информацию о микромире, проецирует небулев квантово-логический мир на

булеву структуру. Неизоморфность этих структур проявляется в том, что сознание в разные моменты времени выбирает какие-то булевы подструктуры, соответствующие множествам коммутирующих операторов квантового объекта, так что некоммутирующие операторы измеряются в разные моменты времени, чтобы можно было получить информацию о квантовом объекте. Здесь очень важна роль времени, как если бы наблюдатель специально выдумал время, чтобы определить квантовый объект [51];

б) булево сознание определяет на наблюдаемых булевой подсистемы функцию истинности (различие между истинным и ложным). Однако, в отличие от функции истинности в классической физике, до наблюдения эта функция в общем случае (теорема Кошена — Шпекера [2]) не определена на недистрибутивной решётке и она возникает случайно, что и является причиной квантового индетерминизма и относительности к наблюдению.

Можно задать вопрос: если небулева логика — нечеловеческая, то как мы вообще можем о ней рассуждать?

Но здесь ситуация вполне аналогична ситуации с добавочными измерениями. Мы не можем вообразить четвёртое и пятое измерения. Однако аналитическая геометрия позволяет перевести вопрос об образах многомерного мира в вопрос об алгебраических уравнениях, представляющих эти образы без необходимости привлечения геометрического воображения. Здесь уместно вспомнить слова Л.Д. Ландау о том, что человек может понять то, что не может вообразить. Так и небулева логика изучается с помощью замены логических операций решёточными операциями, изоморфными логическим, но с ними не совпадающими.

Не прибегая к сложным математическим рассуждениям, предполагая в свою очередь знакомство с соответствующими определениями, проиллюстрируем изложенное на простом примере частицы со спином $S = 1/2$, характеризуемой двумя проекциями спина на оси x, y [28]. Построим диаграмму Хассе квантово-логической решётки (см. рисунок). Из диаграммы Хассе

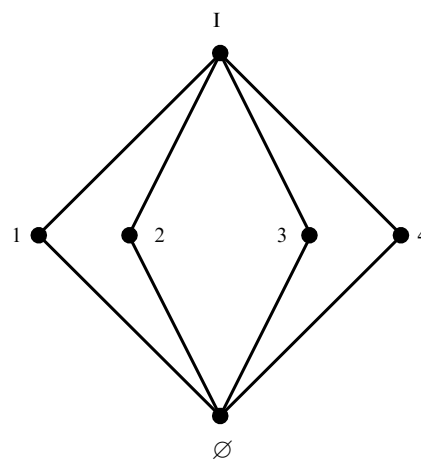


Рисунок. Диаграмма Хассе. Кружок $\emptyset$ означает "всегда ложно", кружок I означает "всегда истинно". Кружки 1, 2, 3, 4, называемые логическими атомами, означают: 1 — $S_x = 1/2$, 2 — $S_x = -1/2$, 3 — $S_y = 1/2$, 4 — $S_y = -1/2$. Линии, пересекающиеся внизу, означают конъюнкцию, наверху — дизъюнкцию. Линия, идущая вверх, означает "следует".

видно, что

$$1 \wedge 2 = 2 \wedge 3 = 3 \wedge 4 = 2 \wedge 4 = \emptyset, \quad (8)$$

$$1 \vee 2 = 2 \vee 3 = 3 \vee 4 = 1 \vee 4 = I. \quad (9)$$

Однако свойство дистрибутивности нарушено:

$$1 \wedge (2 \vee 3) = 1 \wedge I = 1 \neq (1 \wedge 2) \vee (1 \wedge 3) = \emptyset \vee \emptyset = \emptyset. \quad (10)$$

Здесь, согласно свойству решётки, предполагается, что $1 \wedge I = 1$. Наблюдатель мог бы ввести для данной простой решётки функцию истинности, например 1 — истинно, а 2, 3, 4 как несовместные с 1 — ложны. Кстати, заметим, что для более сложных квантовых систем, в частности со спином 1, имеется пример Кошена — Шпекера, Переса [3], в котором, в отличие от булевой решётки, такую функцию вообще ввести нельзя. Но и в приведённом нами простом примере видно, что из двух ложных 3, 4 следует: 3 или 4 всегда истинно, что, конечно, противоречит нашей логике.

Поэтому "булев наблюдатель" видит булеву подрешётку из элементов, для которой никаких противоречий с его логикой нет. В следующий момент времени он выделяет другую булеву систему — 3, 4 — и приписывает ей новую функцию истинности: 3 истинно, 4 ложно или 4 истинно, 3 ложно. Всё это неизбежно при его булевом сознании. Не может же он допустить, что оба 3, 4 ложны, а 3 или 4 истинно. Тем самым "булеизация" небулевой логики приводит к индетерминированному определению истинности и относительности к средствам измерения.

Таким образом, нельзя полагать, что истинность и ложность существуют у квантовой системы до измерения и отличие квантового объекта от классического проявляется только в недистрибутивности с существующими независимо от наблюдателя значениями истинности. Невозможно говорить о каком-либо существовании определённых значений физических величин, описываемых некоммутирующими операторами, независимо от измерений.

Недистрибутивность, как легко понять, противоречит аксиомам Колмогорова определения вероятности и требует введения амплитуды вероятности как нового описания случайности для небулевой решётки. Это было осознано ещё Биркгоффом и фон Нейманом, но подробное рассмотрение выходит за рамки настоящей статьи.

Здесь мы кратко рассмотрели квантово-логический вариант копенгагенской интерпретации, который позволяет в добавление к утверждениям Лондона и Бауера и фон Неймана, сказать, что важной функцией сознания является различение истинного и ложного. Без этой функции сознание вряд ли можно назвать сознанием. Но в булевой классической физике истинное и ложное различаются "объективно" и без упоминания о сознании. Напротив, в квантовой физике истинное и ложное возникают у микрообъектов при осознании их свойств, не существуя без такого осознания. Однако, что окажется истинным, а что ложным для сознания, определяется не самим сознанием, а внешним к нему объектом случайным образом с вероятностью, вычисляемой на булевой подструктуре с помощью волновой функции.

Наконец, имеется мнение, часто связываемое с некоторыми высказываниями Нильса Бора, что в макроскопических телах есть нечто, не позволяющее полностью применять к ним квантовую теорию, так что сознание не играет особой роли и макроприборы показывают то же, что они показывали бы и в отсутствие сознания.

Одно время казалось, что макротела отличаются от микрообъектов тем, что они состоят из большого числа микрообъектов, и возможна ситуация, аналогичная ситуации при переходе от статистической физики к термодинамике. Классическая физика тогда, подобно термодинамике, становится тем точнее, чем большее число частиц содержит макрообъект. Однако эта надежда рухнула после доказательства Хеппом [52] теоремы, утверждающей, что для любой квантовой системы с большим, но конечным числом частиц всегда найдётся наблюдаемая, оператор которой не коммутирует с остальными, и измерение этой наблюдаемой приведёт к сколь угодно большому отличию от классической теории. Только в случае актуально бесконечного числа частиц можно получить классическую теорию, в которой интерференционные эффекты отсутствуют из-за возникновения правил суперотбора. Реальные макрообъекты всегда состоят из конечного числа микрочастиц.

Другая попытка перейти от рассмотрения микрообъектов к рассмотрению макрообъектов основывается на идее декогеренции. Суть идеи заключается в том, что макротело не только состоит из большого числа частиц, но и взаимодействует с большим числом частиц "окружения". Если произвести усреднение по числу частиц "окружения", интересуясь только описанием макротела, то можно выделить некоторую систему квазиклассических коммутирующих друг с другом наблюдаемых, так что эволюцию выделенной системы в этом базисе можно будет описать с хорошей точностью языком классической физики. Так, если нас интересует положение стрелки макроприбора, то надо различать внешнее и внутреннее окружение, содержащее макроскопическое число частиц.

На положение центра тяжести стрелки, рассматриваемое квантово-механически, влияет взаимодействие и с частицами самой стрелки, и с частицами вне её. Стрелка как подсистема описывается матрицей плотности, которая в квазиклассическом базисе за короткое время диагонализует. Интерференционные члены, наличие которых отличает квантовую систему от классической, за короткое время, определяемое для некоторых конкретных случаев (например, систем осцилляторов) экспонентой, в отрицательном показателе степени которой стоит число частиц окружения, быстро обнуляются. Именно поэтому мы не видим интерференции живого и мёртвого состояний знаменитого шрёдингеровского кота. (Подробнее изложение декогеренции см. в [53].)

Решает ли декогеренция проблему измерения? Многие считают, что нет. Так, Дж. Белл задаёт вопрос о том, что в природе заставляет квантовую систему, содержащую макротело, сказать: "Я система, а ты — окружение, и мы по тебе будем усреднять" [54]. Также отмечается, что диагонализация матрицы плотности без наблюдения подсистемы ещё не означает появления смеси состояний для всей системы, что обсуждалось нами выше в связи с нарушением унитарности при измерении. Декогеренция только объясняет, почему мы — люди-наблюдатели — не видим интерференции макротел.

Войцех Цурек [55], а также М.Б. Менский [21] в связи с наличием избранного квазиклассического базиса из собственных функций коммутирующих макронаблюдаемых пытаются связать этот выбор с биологическим отбором в эволюции. При этом не только живые существа приспосабливаются к природе, но и природа приспосабливается к наблюдающим её живым существам. Проблема жизни с точки зрения физики обсуждалась также в [56, 57]. Живые существа оказываются более приспособленными, когда в отношении к близкому им макромиру они не задают "опасных" вопросов, что соответствует выбору специальной "системы отсчёта в гильбертовом пространстве", так что вследствие декогеренции приближённо справедлива классическая физика с её детерминизмом и предсказуемостью.

Существуют и другие базисы, в которых рядом с нами свободно гуляют шрёдингеровские коты в состоянии интерференции. Так что квантовая физика со всей своей непредсказуемостью вторгается в макромир. Аналогичная идея в связи с некоторыми проблемами психологии обсуждалась автором настоящей статьи в [58]. Декогеренция играет важную роль и в нашем образе макроскопической Вселенной, которая, несмотря на свою исходную квантованность, относительно квазиклассического базиса представляется нам классической.

Важно отметить, что декогеренция для макротела как квантовых объектов, состоящих из большого числа частиц, взаимодействующих с большим числом частиц окружения, есть следствие "запутанности" состояний частиц макротела и его окружения, так что само тело описывается матрицей плотности. Это означает, что макроприбор (как и любое "классическое" тело) с квантовой точки зрения совсем не изолирован от окружающего мира.

Более того, макроскопически изолированный от Вселенной прибор с микроскопической точки зрения совсем от неё не изолирован и даже ввиду запутанности состояний более связан с ней, чем отдельная квантовая частица. Это новое понимание классических макрообъектов с квантовой точки зрения является важным открытием последних лет.

4. Интерпретация Эверетта

Весьма популярной в последние годы стала интерпретация Эверетта [14], предложенная им в 1957 г. и вначале поддержанная Уилером, опубликовавшим небольшую статью [15] в том же номере журнала, где была напечатана статья Эверетта.

Хью Эверетт, американский физик-теоретик, закончил Принстонский университет. Отличался большими математическими способностями. Его диссертация была посвящена новой интерпретации квантовой механики на основе объективного понятия волновой функции. Диссертация была опубликована [16] значительно позднее его знаменитой статьи — в 1973 г. Эверетт после неудачных, с его точки зрения, дискуссий с известными физиками бросил заниматься физикой и перешёл работать в секретный отдел Пентагона, где занимался математической формулировкой стратегий ядерной войны, в частности, проводил расчёты возможных последствий радиоактивного заражения, а также оптимизации ядерных ударов по СССР. Отличался малообщительным характером, страдал от алкоголизма (впрочем, соглас-

но [59], этот его недостаток преувеличен). Умер в возрасте 51 года в 1982 г. Имел двух детей — Марка, ставшего известным рок-музыкантом, и дочь Элизабет, покончившую с собой с помощью снотворных в 1996 г. и оставившую записку, что она "собирается соединиться со своим отцом в другой Вселенной" [60].

Интерпретация Эверетта получила название "многомировой интерпретации" или интерпретации "многих Вселенных".

Несколько слов об истории вопроса. По свидетельству одного из наиболее активных "эвереттовцев" Дэвида Дойча, впервые идею о многих мирах, описываемых одной волновой функцией, высказал в лекции Шрёдингер, добавив, что, "возможно, его аудитория подумает, что он сошёл с ума", в связи с чем он ничего не публиковал на эту тему [61].

После опубликования в 1957 г. работы [14] Эверетт ездил в Копенгаген, где пытался обсуждать свою интерпретацию с Бором. Однако там он встретил довольно прохладное отношение к своей теории. Особенно резко против неё выступил Розенфельд, впоследствии писавший Беллу о том, что если предположить существование универсальной волновой функции Вселенной, то мы "будем созерцать Вселенную с точки зрения Бога" [62].

Прохладно отнеслись к теории Эверетта и такие создатели квантовой физики, как Дирак, Вигнер, Фейнман. В частности, Фейнман писал [62]: "Концепция универсальной волновой функции приводит к серьёзным трудностям. Это связано с тем, что эта функция должна содержать амплитуды для всех возможных миров, зависящих от квантово-механических возможностей в прошлом, и тем самым надо верить в одинаковую реальность бесконечности возможных миров".

Норберт Винер выражал сомнение в возможности введения лебеговой меры в гильбертовом пространстве и советовал Эверетту опубликовать его статью как некоторый "комментарий к существующим дебатам о квантовой теории, но не как определённый результат" [62].

Ситуация, однако, переменилась в 1967 г., после того как Б. Девитт написал уравнение Уилера–Девитта для волновой функции Вселенной. С этого момента Девитт стал активным сторонником и пропагандистом эвереттовской интерпретации. Надо сказать, что и Уилер вначале поддерживал интерпретацию Эверетта, поскольку считал, что она поможет при построении квантовой гравитации. Однако в 1977 г. Уилер отказался от этой интерпретации как "вводящей бесконечное количество ненаблюдаемых миров в качестве метафизического багажа" и перешёл к интерпретации фон Неймана, Вигнера, в которой сознание наблюдателя не описывается волновой функцией [62].

Белл критиковал интерпретацию Эверетта за то, что в ней существует "много прошлых и много будущих" [54].

Тем не менее после работ Девитта развернулась деятельность по "квантовой космологии", в которой с самого начала постулировалось существование некоторой волновой функции Вселенной, не зависящей от какого бы то ни было наблюдателя и имеющей такой же объективный статус, как и электромагнитное поле.

С целью избавиться от проблемы сингулярности в начале Вселенной такие космологи, как Хокинг, Виленкин, используют это понятие в научных и научно-популярных работах. При этом Виленкин в [19] прямо говорит о своей приверженности интерпретации Эве-

ретта. Что касается Хокинга, то он не очень чётко высказывается, какой именно интерпретации квантовой физики он придерживается, постулируя свою волновую функцию Вселенной как интеграл по некоторой мере (вещественной, а не фейнмановской!) по различным Вселенным с евклидовой метрикой.

Однако ясно, что если считать интерпретацию Эверетта ложной, то и работы по квантовой космологии становятся весьма сомнительными, если, конечно, не согласиться с Уилером, что сознание — не часть Вселенной и вся Вселенная определена относительно этого сознания, согласно его концепции "участвующей Вселенной". Но тогда, как и в любой разновидности копенгагенской интерпретации, нужно говорить о приговоре и измерении волновой функции, редукции волнового пакета наблюдателем, т.е. о всём том, чем пренебрегают авторы работ по квантовой космологии.

Активными сторонниками эвереттовской интерпретации являются Д. Дойч в Англии [63], Б. Картер в Австралии [64], М. Тегмарк в США [65], Дон Пейдж в Канаде [66], М.Б. Менский в России [20, 21], Л. Вайдман в Израиле [67].

В 2007 г. в связи с пятидесятилетием публикации Эверетта был выпущен специальный номер *Nature* [68], посвящённый его интерпретации, опубликована популярная статья в *Scientific American* [69], проведены две международные конференции и снят фильм Би-би-си о параллельных Вселенных. Наконец, в популярной литературе параллельные Вселенные в смысле Эверетта рекламируют сторонники теории суперструн как теории всего (см., например, [70]).

Теперь перейдём непосредственно к обсуждению интерпретации Эверетта. При этом мы будем использовать слова не только самого Эверетта, но и современных "эвереттовцев". С самого начала интерпретация Эверетта позиционирует себя как антикопенгагенская.

1. Волновая функция является такой же объективной реальностью, как и электромагнитное поле, и ни от какого наблюдателя не зависит.

2. Существует универсальная волновая функция — волновая функция Вселенной. Такой эвереттовец, как Тегмарк [65], говорит о существовании кроме универсальной волновой функции "эпистемологических" волновых функций отдельных частиц, с которыми имеют дело экспериментаторы. Эти функции, однако, тоже существуют объективно.

3. Волновая функция удовлетворяет уравнению Шрёдингера и изменяется унитарно. Никакой редукции волнового пакета как неунитарной операции постулировать не надо, все наблюдаемые свойства следуют из уравнения Шрёдингера.

4. При измерении какой-либо физической величины в случае суперпозиции волновых функций происходит "расщепление" как исходного состояния наблюдателя, так и исходного состояния частицы на множество различных состояний, принадлежащих разным "мирам", или Вселенным, не взаимодействующим между собой. Наряду с расщеплением, в силу обратимости во времени уравнения Шрёдингера, возможно и слияние "миров", что отличает данную теорию от стандартной квантовой физики, в которой обратимость нарушается при измерении. Поэтому утверждение, что эвереттовская интерпретация приводит к тем же следствиям, что и копенгаген-

ская, конечно, неверно. Вопрос заключается только в том, как это экспериментально проверить.

5. Квантовая механика применима ко всем явлениям — как микроскопическим, так и макроскопическим. Классическая физика есть приближённое описание таких квантовых объектов с большим числом частиц, для которых выполняется свойство декогерентности.

Собственно, из приведённых выше положений видно, почему Шрёдингер мог бы полностью их поддержать. В самом деле, Шрёдингер мог бы ответить критикам своей позиции, состоящей в том, что волны существуют объективно и электрон — это волна, следующее. Критики говорили, что электрон наблюдается всегда как точечная частица и отличается от электромагнитной волны, для которой в каждой точке фронта различные радиоприёмники что-то регистрируют. Электрон никогда не наблюдается как "размазанный" по поверхности фронта, а потому волна электрона — это "волна вероятности" обнаружения электрона в каком-то месте пространства.

Но, следуя Эверетту, Шрёдингер мог бы сказать, что электрон, оставаясь точечной частицей, одновременно (разумеется, никак не размножаясь) находится в разных местах пространства в разных мирах, в которых состояния наблюдателя тоже различаются и соответствуют разным результатам наблюдения, причём эти миры для разных состояний наблюдателя являются независимыми и не взаимодействуют между собой.

Скажем несколько слов о статье Эверетта [14]. Все математические формулы, встречающиеся в этой статье, есть и в обычной квантовой механике. Различие заключается в их интерпретации. Важную роль играет понятие "относительной волновой функции" подсистемы квантовой системы. Если сложная система S состоит из двух подсистем, S_1 , S_2 , то гильбертово пространство для S представляет собой тензорное произведение гильбертовых пространств подсистем. Если в этих пространствах существуют полные ортонормированные базисы $\{\xi_i^{S_1}\}$, $\{\eta_j^{S_2}\}$, то общее состояние S может быть представлено как

$$\Psi^S = \sum_{i,j} a_{ij} \xi_i^{S_1} \eta_j^{S_2}. \quad (11)$$

Отсюда следует: несмотря на то что S пребывает в определённом состоянии Ψ_S , подсистемы не находятся в определённых состояниях независимо друг от друга. Но при определённом выборе состояния одной подсистемы мы можем определить соответствующее относительное состояние другой подсистемы. Так, выбирая ξ_k как состояние S_1 , мы получаем относительное состояние в S_2 в виде

$$\Psi(S_2; \text{rel}(\xi_k, S_1)) = N_k \sum_j a_{kj} \eta_j^{S_2}, \quad (12)$$

где N_k — нормировочный множитель. Поэтому далее в [14] утверждается: "Бессмысленно говорить об абсолютном состоянии подсистемы, можно говорить только о состоянии, относительном к данному состоянию другой подсистемы".

Сравнивая с ситуацией в теории относительности, где длина предмета определена по отношению к системе отсчёта, а без указания такой системы являет собой

нечто неопределённое, замечаем, рассматривая систему частица – прибор – наблюдатель, в которой наблюдатель также, согласно Эверетту, описывается волновой функцией, что волновая функция наблюдателя определена относительно волновой функции прибора, а последняя в свою очередь определена относительно волновой функции частицы. Впрочем, до измерения, согласно формуле (10) статьи Эверетта, наблюдатель характеризовался некоторой "абсолютной" волновой функцией, определяемой памятью о событиях, так что система наблюдатель – квантовый объект до взаимодействия при измерении друг с другом, согласно гамильтониану измерения, описывается как (формула (10) в [14])

$$\Psi^{S+O} = \Phi_i \Psi^O[\dots]. \quad (13)$$

Измерение некоторой величины, описываемой оператором наблюдаемой $\hat{A}$ с собственными функциями Φ_i , обладает следующими свойствами.

Если квантовая система находилась в собственном состоянии оператора $\hat{A}$, то после измерения полная волновая функция преобразуется в функцию (формула (11) в [14]):

$$\Psi^{S+O} = \Phi_i \Psi^O[\dots \alpha_i]. \quad (14)$$

Однако если начальное состояние квантового объекта представляет собой суперпозицию собственных состояний $\sum_i a_i \Phi_i$, то конечное состояние после измерения выражается в виде (формула (12) в [14])

$$\Psi^{S+O} = \sum_i a_i \Phi_i \Psi^O[\dots \alpha_i], \quad (15)$$

где α_i означает появление в памяти наблюдателя результата α_i как показания прибора, связанного с собственным числом оператора $\hat{A}$, соответствующим собственной функции Φ_i этого оператора.

И вот теперь возникает важный момент в интерпретации этого очевидного свойства измерения. Эверетт настаивает на следующем.

1. Квантовая физика описывает всё — как микромир, так и макромир. Делить мир, как предложил Бор, на квантовый и классический, описывая макроприбор и наблюдателя классически, а микрообъект квантовой теорией, — не требуется.

2. Сознание не играет никакой роли, наблюдатель может быть заменён автоматом или компьютером с памятью.

3. Все члены суперпозиции в (12) одинаково реальны. Никакой редукции волнового пакета делать не надо. В частности, нельзя утверждать вслед за копенгагенской школой, что лишь один член из суммы с вероятностью, определяемой формулой Борна, реализуется в результате измерения. Происходит "расщепление" начальной волновой функции на суперпозицию (12), и каждый член этой суперпозиции описывает реальный "мир" (или ветвь), в котором наблюдатель видит определённый результат измерения, разный в разных мирах.

4. Миров не взаимодействуют между собой, поэтому наблюдатель в одном мире ничего не знает о другом.

Далее показывается, что при повторном измерении той же величины наблюдатель в фиксированном мире вследствие унитарной эволюции каждой ветви увидит тот же результат.

Затем вводится понятие меры для суперпозиции $\sum_i a_i \Phi_i = \alpha \Phi'$:

$$m(\alpha) = \sum_{i=1}^n m(\alpha_i), \quad (16)$$

и доказывается, что счётная аддитивность этой меры фиксирует её как

$$m(\alpha_i) = c a_i^* a_i, \quad (17)$$

где c — постоянная, т.е. получена формула Борна для вероятности в квантовой физике.

Наконец, рассмотрена система многих квантовых объектов: $S_1, S_2, \dots, S_n$, которые идентичны в том смысле, что описываются одной и той же волновой функцией: $\Psi^{S_1} = \Psi^{S_2} = \dots = \Psi^{S_n} = \sum_i a_i \Phi_i$. До измерения волновая функция системы и наблюдателя с памятью выражается в виде

$$\Psi^{S_1+S_2+\dots+S_n+O} = \Psi^{S_1} \Psi^{S_2} \dots \Psi^{S_n} \Psi^O[\dots]. \quad (18)$$

После r измерений ($r \leq n$), предполагая, что измерения одной и той же величины A проводятся в порядке $S_1, S_2, \dots, S_r$, для n систем получим

$$\Psi_r = \sum_{i,j,\dots,k} a_i a_j \dots a_k \Phi_i^{S_1} \Phi_j^{S_2} \dots \Phi_k^{S_r} \Psi^{S_{r+1}} \dots \Psi^{S_n} \Psi^O[\alpha_i^1 \alpha_j^2 \dots \alpha_k^r]. \quad (19)$$

Функция Ψ_r интерпретируется как суперпозиция состояний:

$$\Psi'_{ij\dots k} = \Phi_i^{S_1} \Phi_j^{S_2} \dots \Phi_k^{S_r} \Psi^{S_{r+1}} \dots \Psi^{S_n} \Psi^O[\alpha_i^1 \alpha_j^2 \dots \alpha_k^r], \quad (20)$$

каждое из которых описывает наблюдателя с определённой последовательностью в памяти:

$$[\alpha_i^1 \alpha_j^2 \dots \alpha_k^r]. \quad (21)$$

При этом относительно памяти наблюдателя состояние системы представляет собой произведение собственных волновых функций $\Phi_i^{S_1}, \Phi_j^{S_2}, \dots, \Phi_k^{S_r}$ систем, остальные волновые функции системы остаются теми же.

В памяти наблюдателя присутствует случайная для наблюдателя, фиксировавшего какой-то мир, и неслучайная в природе конфигурация вида (21). Какие-то из чисел последовательности будут совпадать, а какие-то — нет. В разных ветвях будут разные последовательности.

Из всего приведённого выше делается вывод: без всякой редукции волнового пакета получается, что наблюдатель, который может быть автоматом, в одном из миров показывает то, что на самом деле показывает прибор при измерении квантовых объектов.

4.1. Дискуссионные вопросы

К сожалению, как защитники интерпретации Эверетта, так и её противники часто очень неточно, а иногда и неверно толкуют его идею расщепления на "миры". Говорится о появлении при расщеплении "копий" или "двойников" частицы и наблюдателя как о некотором их "размножении" при измерении. Такое "размножение" противоречит закону сохранения энергии и заряда и представляет собой физическую бессмыслицу.

Расщепление происходит в гильбертовом пространстве — это размножение состояний одного объекта, а не самих объектов.

Один электрон после его измерения, оставаясь одним-единственным, как и наблюдатель остаётся един-

ственным (никаких двойников!), описывается сразу многими относительными состояниями. В одном из этих состояний наблюдатель видит один результат, а в другом — другой. Тем самым наблюдатель с одним и тем же телом, которое не размножается, сразу находится во многих состояниях, так что в одном состоянии он видит один результат, в другом — другой, в третьем — третий и т.п. Не случайно эту ситуацию сам Девитт [16] называл шизофренической... Впрочем, об этом надо спросить психиатров, которые, возможно, смогут сказать физикам и что-то полезное...

Другой иллюстрацией идеи расщепления могут служить картины Эшера или некоторые картины Сальвадора Дали. Например, на картине Эшера "Дикие гуси" изображены летящие гуси, которые являются белыми, если они летят в одну сторону, и наоборот — чёрными, если летят в другую сторону. Итак, одна картина (без размножения картин) может быть названа по двум состояниям "белые – чёрные гуси".

Так или иначе упрёк в нарушении законов сохранения к эвереттовской интерпретации не относится. Критика касается в основном двух проблем этой интерпретации — проблемы предпочтительного базиса и проблемы вероятности.

Проблема предпочтительного базиса. В копенгагенской интерпретации, если наблюдатель выбирает измерение какой-либо наблюдаемой, описываемой оператором $\hat{A}$, то показаниям прибора он ставит в соответствие собственные функции и собственные числа этого оператора. В эвереттовской интерпретации наблюдатель ничего не "выбирает", всё происходит по уравнению Шрёдингера. Но тогда волновую функцию частицы можно разлагать по любому ортонормированному базису, а не только по тому, который выбирается в копенгагенской интерпретации.

Ответ эвереттовцев заключается в использовании явления декогеренции. Если прибор состоит из большого числа частиц, то существует такой выделенный базис, который позволяет благодаря декогеренции приближённо говорить об отсутствии интерференции между различными членами суперпозиции состояний макрообъекта.

Тем самым "миры", на которые происходит расщепление, не взаимодействуют между собой, а наблюдатель в одном состоянии ничего не знает о существовании других. При этом отмечается, что вследствие взаимодействия тела наблюдателя с другими макрообъектами в конечном счёте происходит расщепление состояний Вселенной. Поэтому приходится говорить о "многих Вселенных" [65]. Впрочем, здесь имеет место та же неточность — это не много Вселенных, а одна Вселенная во многих состояниях. Так, говорят, что знаменитый шрёдингеровский кот в одной Вселенной жив, в другой — мёртв и т.п.

В качестве возражения отметим, однако, что существуют измерения, например измерение спина электрона в опыте Штерна – Герлаха, в которых прибор не является макроскопическим. В указанном опыте роль прибора играют ионы серебра, движущиеся по квазиклассическим траекториям в ту или иную сторону, и декогеренция вряд ли играет какую-либо роль.

Проблема вероятности. В эвереттовской интерпретации всё детерминировано и не видно никакой случайной величины, принимающей с некоторой вероятностью

те или иные значения. С другой стороны, Эверетт получил, как мы говорили выше, некоторую счётно-аддитивную меру на элементах суперпозиции, совпадающую с получаемой по правилу Борна. Каков её смысл?

Ответ пытаются найти в том, что отдельный наблюдатель в каком-то из миров, ничего не знающий о существовании других миров, воспринимает себя как оказавшегося в этом мире случайно. При этом, однако, многие эвереттовцы, в отличие от самого Эверетта, вынуждены обращаться к сознанию, что, конечно, является некоторой капитуляцией перед Копенгагеном...

Тегмарк [65] в качестве иллюстрации предлагает следующий пример.

Некий пациент после операции под общим наркозом просыпается в какой-то палате с определённым номером. Если общий наркоз понимать как квантовое измерение, то существует много копий (состояний) пациента, из которых он воспринимает только одну. В следующий раз после повторной операции под наркозом пациент может оказаться в палате с другим номером. Тем самым номер является для него случайной величиной. Но какова вероятность отождествления наблюдателя с фиксированной копией? Если все миры одинаково существуют, то можно было бы приписать одинаковую вероятность для каждого мира при его осознании наблюдателем, что противоречит квантовой физике. Так, если состояние является собственной функцией оператора проекции спина электрона на ось z , а измеряется проекция оператора спина на ось, направленную под некоторым углом к оси z , то вероятности того или иного результата определяются квадратами косинуса и синуса угла, а они никак не равны $1/2$. Если пытаться выразить вероятность через частоту фиксации определённого "мира", то эта частота может быть какой угодно, с чем соглашаются сами эвереттовцы. Поэтому приверженцы эвереттовской интерпретации отказываются от частотной или статистической интерпретации вероятности фон Низеса.

Согласно идее Дойча [71], предлагается субъективная, не связанная с частотой интерпретация вероятности, используемая в теории принятия решений. Именно эта вероятность отождествляется с получаемой по борновской формуле.

Так, если вам говорят, что в результате принятого решения в одном случае вы можете выиграть тысячу долларов, в другом — пятьсот, а в третьем — ничего, то вы, не зная о частотах выигрышей, принимаете решение, исходя из ваших субъективных оценок. Но при этом, конечно, нужно опираться на какое-то объективное свойство (никакие частоты Вам не известны!), "известное Вам", чтобы не попасть впросак. Например, таким свойством может быть симметрия монеты или её нарушение, если выигрыш зависит от того, выпадет "орёл" или "решка", либо прошлый опыт принимающего решение...

В случае эвереттовской интерпретации имеется множество миров с наблюдателем в них. Однако наблюдатель видит "себя" (или "меня") как "воплощённого" в одном из миров, а другие его состояния (или "копии", как говорят эвереттовцы) не наблюдают (не осознают). Что определяет это "воплощение" или "предпочтение" одного мира перед другим?

Единственное, что присутствует в математической теории, — это коэффициенты в суперпозиции или веса

как квадраты их модуля. Поэтому возникает искушение считать эти разные коэффициенты чем-то вроде элементов платёжной матрицы в квантовой игре. Чем больше коэффициент, тем предпочтительнее этот мир для наблюдателя.

Касаясь этого аспекта, Тегмарк [65] говорит, что расщепляющийся наблюдатель будет пользоваться борновской формулой как определяющей некую меру на мирах. Эта мера определена из свойств гильбертова пространства. Если до измерения имелась начальная волновая функция, а после него — другая, то ничего, кроме скалярного произведения двух волновых функций и квадрата модуля этого произведения (совпадающего с квадратом модуля коэффициента в суперпозиции), в качестве такой меры предложить нельзя. Для разных волновых функций, характеризующих миры, соответствующие веса будут разными. Можно ли, однако, согласиться с Саундерсом [72, 73] в том, что в теории Эверетта, настаивающей на унитарности эволюции, амплитуды вероятности миров, как и веса, не наблюдаемы, в отличие от амплитуд вероятности в копенгагенской интерпретации? Сам Эверетт, судя по его статье [14], с этим не соглашался. Согласно формулам (19)–(21) настоящей статьи, в "памяти" наблюдателя содержатся "частоты" наблюдений тех или иных миров. Если бы это было не так, то никакого разговора о квантовой механике и её экспериментальной проверке — дифракции и интерференции электронов и т.п. (когда наблюдаются именно частоты попадания частиц в те или иные точки) — не было бы вообще.

Впрочем, означает ли это на эвереттовском языке, что на фотографии дифракционной картины мы имеем следы разных миров? И какому миру (или Вселенной?) принадлежит сейчас эта фотография? Можно ли при этом говорить, что множество прошлых миров встречается в одном настоящем?

Более того, как показано Грэхемом [25], частоты, определяемые согласно предложению Эверетта по числу совпадающих значений в памяти прибора (см. формулы (19)–(21)), могут быть какими угодно, и именно это обстоятельство послужило основанием для утверждения Саундерса.

Возвращаясь к идее Дойча о теории принятия решений, заметим, однако, что если в теории принятия решений в бизнесе всё понятно, то понять, почему наблюдатель, не имеющий никакой выгоды в том, чтобы спин электрона был направлен вверх или вниз, предпочитает "воплотиться" в один мир, а не в другой, нельзя.

Здесь возможен другой вариант рассуждений, близкий к тому, который мы приводили в связи с копенгагенской интерпретацией.

Согласно принципу относительности к средствам измерения Бора–Фока, дополненному эвереттовским понятием относительности состояния подсистемы, определённое показание прибора, измеряющего свойства частицы, есть "отношение" частицы и наблюдателя. Принимая "неоэвереттовскую" точку зрения, состоящую в том, что сознание наблюдателя важно при отождествлении его состояния с каким-то одним из состояний, возникших при расщеплении, тогда как другие состояния существуют, но не воспринимаются им, мы могли бы сказать следующее. Электрон, хотя и обладающий чем-то вроде свободы выбора, но ввиду отсутствия сознания вряд ли способный принимать решения, характеризуется

многими "отношениями" к наблюдателю. Борновская мера может пониматься как определённая на этих отношениях, характеризующих, по определению, и электрон, и наблюдателя. При повторных измерениях электрона с одинаковой волновой функцией у наблюдателя возникнет "традиция" видеть себя чаще в мире с большим борновским весом. Эта традиция обусловлена тем, что при повторном измерении одного электрона с начально заданной волновой функцией наблюдатель, как мы говорили выше, видит себя в том же мире. Если вес не сильно отличается от единицы, то наблюдатель скорее увидит себя там же (в том же мире).

Однако традиция — вещь хрупкая, и от неё можно отказаться, и тогда реализуются другие веса, даже малые, заданные на отношениях наблюдателя и электрона. Хрупкость традиции отождествления состояния наблюдателя с одним из миров является причиной indeterminизма квантовой механики. Является ли, однако, выбор мира чем-то, зависящим от воли наблюдателя, как утверждают сторонники теории принятия решения, или всё же это не так? Поскольку борновская мера описывает не только наблюдателя, но и "субъект-объектное единство частицы и наблюдателя", можно полагать, что ответ на этот вопрос должен быть отрицательным.

Наблюдатель не по своей (не только по своей!) воле осознаёт себя в фиксированном мире. При этом надо говорить о сознании как о выборе одной из альтернатив (здесь мы соглашаемся с точкой зрения М.Б. Менского в [20]) или миров не как о свойстве мозга или чего-то "приватизированного" данным наблюдателем, но как о нелокальном свойстве, охватывающем наблюдателя и познаваемое. В философии интуитивизма это формулируется как утверждение: "объект знания имманентен знанию" [74].

Познание — это объективный процесс, охватывающий, подобно времени, и наблюдателя, и наблюдаемое. Сознание — нелокальное свойство электрона и наблюдателя, и оно связано не только с мозгом. Борновская формула — характеристика этого нелокального свойства.

Здесь мы должны согласиться с Девиоттом [16] в том, что квантовая вероятность — особая вероятность, не сводящаяся к какой-либо классической вероятности, в частности к той субъективной вероятности, которая присутствует в теории принятия решений. Одинаковое существование миров не означает, что наблюдатель, как в случае бросания кости с шестью одинаковыми гранями, может принимать классическое определение вероятности и приписывать мирам одну и ту же вероятность. Убедителен ли этот ответ? Вряд ли! Все эти рассуждения о наблюдателе, принятии им решений, сознании и т.п. никак не связаны с уравнением Шрёдингера и математикой квантовой механики, согласно первоначальной идее, всё описывающей, и являются тем же разговором о редукции волнового пакета, только гораздо более туманным и запутанным.

О роли сознания в эвереттовской интерпретации говорит и Брандон Картер [64], отвергающий теорию принятия решений Дойча.

Дилемму одинакового существования разных миров в суперпозиции и разной вероятности их наблюдения, согласно борновской мере, предлагается решать по аналогии с "русской рулеткой" — игрой, которую придумали белые офицеры. Револьвер заряжается пятью пат-

ронами, из них четыре холостых, один — боевой. С точки зрения числа исходов, вероятность какого-то исхода равна одной пятой, но с точки зрения потенциального самоубийцы вероятность того, что он останется жив, — четыре пятых, а вероятность того, что погибнет, — одна пятая.

Важную роль при этом играет отождествление и различение миров. Поэтому наблюдатель при отождествлении себя с одной из копий может отождествлять какие-то миры и вводить разные веса для группы отождествляемых им миров и миров, различаемых им. Впрочем, как при этом получить именно борновскую формулу и почему она должна быть собственно борновской (и почему её вообще надо получать?) — остаётся неясным. Вряд ли можно получить правила квантовой физики из каких бы то ни было классических аналогов.

Картер критикует также идею "возникновения миров" при расщеплении, считая, что миры "существуют вечно" и всё дело в их различении и отождествлении. Разумеется, уравнение Шрёдингера при этом нужно применять ко всем волновым функциям (бесконечно большому числу), что напоминает нам о критическом замечании Фейнмана о необходимости рассмотрения бесконечно большого числа амплитуд вероятности в эвереттовской теории, делающей такую теорию малоприменимой. Критиком подхода субъективной вероятности в [75] является А. Кент, утверждающий, что используемый подход противоречив. В любом случае, по мнению автора настоящей статьи, этот подход представляется хотя и интересным, но не настолько обоснованным, чтобы включать его в учебники по квантовой физике.

Таким образом, следует согласиться с Кентом [75], что статьи эвереттовцев часто противоречат друг другу и пока не существует общепринятой интерпретации эвереттовской интерпретации...

Одни авторы (например, Девиитт) подчёркивают, что сознание не играет никакой роли, другие говорят противоположное и пытаются использовать теорию принятия решений. Наконец, сам главный пропагандист Д. Дойч [63] справедливо обращает внимание на недостаточный анализ таких примеров, как расщепление волнового пакета, в которых миры явно взаимодействуют и имеется интерференция. Даже столь популярный пример двухщелевого эксперимента с квантовой частицей нигде подробно не рассмотрен в этой интерпретации.

Имеются противоречивые мнения по поводу не только "расщепления" миров, но и их "слияния", о чём мы говорили выше. Одни соглашались с необходимостью слияния [65], другие — нет, поскольку считают невозможным слияние макроскопических декогерентных миров.

5. Заключение

Подводя итоги, скажем, что мы, конечно, отдаём предпочтение копенгагенской интерпретации как наиболее разработанной и согласующейся со всеми наблюдениями в микромире. Неприятие копенгагенской интерпретации теми или иными физиками обусловлено материалистическими философскими предрассудками, что вряд ли может считаться серьёзным аргументом против её принятия [76]. К сожалению, в сторону материализма толкает учёных и дистанцирование от разного рода

паранаук, дискредитирующих нематериалистическую философию.

Любопытно, однако, что противники копенгагенской интерпретации, придерживающиеся, как они говорят, "реалистической" многомировой интерпретации, сами вынуждены, по злой иронии, говорить о сознании, необходимости отождествления наблюдателя с чем-то фиксированным в определённом мире, т.е. имеется некая "сходимость" разных интерпретаций. Мы здесь не говорим о разного рода "эвереттовской мистике" с параллельными вселенными в фантастических романах, кинофильмах и средствах массовой информации [69].

Но и в самой копенгагенской интерпретации, если её тоже считать реалистической, где квантовая реальность, не зависящая от наблюдателя, описывается операторами, а не числами, как об этом писал Оге Бор, эволюция во времени должна описываться, как мы говорили, в гейзенберговском представлении. Итак, квантовая реальность на языке операторов сразу содержит вследствие возможности спектрального разложения по проекторам на собственные состояния не один мир, а много миров, а эволюция есть эволюция сразу всех этих миров. Это, конечно, очень близко к эвереттовской картине.

Тем не менее копенгагенская интерпретация с её подчёркиванием роли сознания может дать нечто новое в вопросе о связи сознания и мозга. Для этого надо, согласно фон Нейману, провести границу сознание — мозг. Дискуссии, проведённые автором настоящей статьи в течение более 30 лет в Институте мозга человека РАН (Санкт-Петербург), хотя и не привели к каким-то конкретным результатам, выявили несколько пунктов согласия.

1. Специалистов по мозгу заинтересовали свойства нелокальности, или запутанности, квантовых состояний многих частиц, имеющие аналоги в нелокальных проявлениях работы мозга как целого.

2. Главная проблема как философии, так и психологии и теории мозга формулируется как психофизическая проблема. Каким образом явно нематериальные психические процессы управляют физическими и химическими процессами мозга и тела и воздействуют на них? Квантовая физика на примере отрицательных экспериментов, в которых отрицательная информация, не сопровождающаяся передачей энергии или импульса от наблюдателя (прибора) наблюдаемому квантовому объекту, но приводящая к изменению импульса и энергии наблюдаемого объекта (в пределах соотношения неопределённостей), указывает на возможное решение этой проблемы [77]. Таким образом, нематериальное сознание, не обладающее физической энергией и импульсом, в силу главного своего свойства — осознания как получения информации — может привести к физическим и химическим следствиям.

3. Уникальность ситуации осознания мною процессов в моём теле состоит в том, что здесь сознание, как и вообще психическое, являясь нематериальным, рассматриваемое как квантовый прибор, не состоит из квантовых частиц, а значит, к нему неприменимо понятие декогеренции.

Информация о физических характеристиках тела формулируется не в физических терминах — положении стрелки прибора и т.п., а в чисто психических терминах: радости, боли и тому подобных ощущений. Отсутствие

декогеренции у такого "прибора" означает, что данный "прибор", в отличие от обычного прибора физического эксперимента, может наблюдать не только классические наблюдаемые... Шрёдингеровские коты могут наблюдаться мною в моём теле. Любопытно, что любое внешнее наблюдение над мозгом, так или иначе использующее физические приборы, в силу действующей в этом случае декогеренции не позволит увидеть это взаимодействие моего сознания и тела. Впрочем, хорошо известно, что, сколько бы ни разрезать мозг, там не удастся увидеть сознания... Упомянутое свойство можно назвать "квантовой конспирацией".

Большой трудностью, однако, при контактах с биологами и медиками (большей, чем с физиками) является их традиционная материалистическая, детерминированная на уровне ньютоновского механистического мировоззрения позиция. Исключениями являлись беседы с Н.П. Бехтеревой, отличавшейся большой свободой мысли и склонностью к философским обобщениям своих многолетних наблюдений работы мозга, а также с директором Института мозга человека РАН С.В. Медведевым, имеющим физическое образование.

Что касается многомировой интерпретации, то, хотя мы считаем её недостаточно разработанной и представляющей сегодня скорее набор не всегда связанных между собой и убедительно доказанных идей, следует заметить, что открывшееся нам сегодня понимание того, что большая часть Вселенной — это ненаблюдаемые (невидимые) тёмная материя и тёмная энергия, заставляет серьёзно отнестись к теории, в которой как аксиома предполагается существование многих ненаблюдаемых миров. Вопрос в том — как гравитируют эти миры.

Работа выполнена в рамках сотрудничества с Центром Коперника междисциплинарных исследований (Краков, Польша) при финансовой поддержке фондом Темпльтона.

Список литературы

1. Гриб А А, Петрова Д В *Изд. вузов. Физика* (8) 32 (2010) [Grib A A, Petrova D V *Russ. Phys. J.* **53** 803 (2011)]
2. Kochen S, Specker E P *J. Math. Mech.* **17** 59 (1967)
3. Cassinello A, Gallego A *Am. J. Phys.* **73** 273 (2005)
4. Белинский А В *УФН* **167** 323 (1997) [Belinskii A V *Phys. Usp.* **40** 305 (1997)]
5. Белинский А В *УФН* **164** 231 (1994) [Belinskii A V *Phys. Usp.* **37** 219 (1994)]
6. Белинский А В *УФН* **164** 435 (1994) [Belinskii A V *Phys. Usp.* **37** 413 (1994)]
7. Aspect A, Dalibard J, Roger G *Phys. Rev. Lett.* **49** 1804 (1982)
8. Bouwmeester D et al. *Nature* **390** 575 (1997)
9. Bohm D, Hiley B J *The Undivided Universe: an Ontological Interpretation of Quantum Theory* (London: Routledge, 1993)
10. Wigner E P, in *The Scientist Speculates* (Ed. I J Good) (London: Heinemann, 1961) p. 284
11. Gell-Mann M, Hartle J B *Phys. Rev. D* **47** 3345 (1993)
12. Котельников В А *УФН* **179** 204 (2009) [Kotel'nikov V A *Phys. Usp.* **52** 185 (2009)]
13. Bohr A, Ulfbeck O *Rev. Mod. Phys.* **67** 1 (1995)
14. Everett H (III) *Rev. Mod. Phys.* **29** 454 (1957); in *The Many-Worlds Interpretation of Quantum Mechanics* (Eds B S DeWitt, N Graham) (Princeton, N.J.: Princeton Univ. Press, 1973) p. 141
15. Wheeler J A *Rev. Mod. Phys.* **29** 463 (1957); in *The Many-Worlds Interpretation of Quantum Mechanics* (Eds B S DeWitt, N Graham) (Princeton, N.J.: Princeton Univ. Press, 1973) p. 151
16. DeWitt B, in *The Many-Worlds Interpretation of Quantum Mechanics* (Eds B S DeWitt, N Graham) (Princeton, N.J.: Princeton Univ. Press, 1973) p. 167
17. Hartle J B, Hawking S W *Phys. Rev. D* **28** 2960 (1983)
18. Hawking S W *A Brief History of Time: from the Big Bang to Black Holes* (Toronto: Bantam Books, 1988) [Хокинг С *Краткая история времени: От большого взрыва до черных дыр* (СПб.: Амфора, 2007)]
19. Vilenkin A *Many Worlds in One: the Search for Other Universes* (New York: Hill and Wang, 2006) [Виленкин А *Мир многих миров. Физики в поисках параллельных вселенных* (М.: Астрель, 2010)]
20. Менский М Б *УФН* **170** 631 (2000) [Menskii M B *Phys. Usp.* **43** 585 (2000)]
21. Менский М Б *УФН* **175** 413 (2005) [Menskii M B *Phys. Usp.* **48** 389 (2005)]
22. Кадомцев Б Б, Кадомцев М Б *УФН* **166** 651 (1996) [Kadomtsev B B, Kadomtsev M B *Phys. Usp.* **39** 609 (1996)]
23. Лесовик Г Б *УФН* **171** 449 (2001) [Lesovik G B *Phys. Usp.* **44** 429 (2001)]
24. von Neumann J *Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik* (Berlin: J. Springer, 1932) [Mathematical Foundations of Quantum Mechanics (Princeton, N.J.: Princeton Univ. Press, 1955); фон Нейман И *Математические основания квантовой механики* (М.: Наука, 1964)]
25. Graham N, in *The Many-Worlds Interpretation of Quantum Mechanics* (Eds B S DeWitt, N Graham) (Princeton, N.J.: Princeton Univ. Press, 1973) p. 229
26. Hartle J B *Am. J. Phys.* **36** 704 (1968)
27. Фок В А *Квантовая физика и строение материи* (М.: Либроком, 2010)
28. Grib A A, Rodrigues W A (Jr.) *Nonlocality in Quantum Physics* (New York: Kluwer Academic/Plenum Publ., 1999)
29. Гриб А А *УФН* **142** 619 (1984) [Grib A A *Sov. Phys. Usp.* **27** 284 (1984)]
30. Гриб А А *Нарушение неравенств Белла и проблема измерения в квантовой теории* (Лекции для молодых ученых, P2-92-211) (Дубна: ОИЯИ, 1992)
31. Владимиров Ю С *Основания физики* (М.: Бином. Лаб. знаний, 2008)
32. Shimony A, in Penrose R et al. *The Large, the Small, and the Human Mind* (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1999) [Шимони А, в кн. Хокинг С и др. *Большое, малое и человеческий разум. Спор о физическом мире и мире идей* (СПб.: Амфора, 2012) с. 14]
33. Heisenberg W *Physik und Philosophie* (Stuttgart: S. Hirzel, 1959) [Physics and Philosophy (Amherst, N.Y.: Prometheus Books, 1999); Гейзенберг В *Физика и философия. Часть и целое* (М.: Наука, 1989)]
34. Finkelstein D *Quantum Relativity: a Synthesis of the Ideas of Einstein and Heisenberg* (Berlin: Springer, 1996)
35. Гриб А А, Мамаев С Г, Мостепаненко В М *Вакуумные квантовые эффекты в сильных полях* (М.: Энергоатомиздат, 1988)
36. Гриб А А *Вестник ЛГУ* (10) 61 (1969)
37. Everett H (III), in *The Many-Worlds Interpretation of Quantum Mechanics* (Eds B S DeWitt, N Graham) (Princeton, N.J.: Princeton Univ. Press, 1973) p. 3
38. Schopenhauer A *Die Welt als Wille und Vorstellung* (Leipzig: F. A. Brockhaus, 1859) [The World as Will and Presentation (New York: Pearson Longman, 2008–2011); Шопенгауэр А *Мир как воля и представление* (М.: Просвещение, 1990)]
39. Schrödinger E *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell* (Cambridge: The Univ. Press, 1945) [Шредингер Э *Что такое жизнь с точки зрения физики?* (М.: ИЛ, 1947)]
40. London F, Bauer E *La Théorie de l'observation en Mécanique Quantique* (Paris: Hermann and Cie, 1939)
41. Wigner E P, in *The Scientist Speculates* (Ed. I J Good) (London: Heinemann, 1961) p. 204

42. Penrose R *The Emperor's New Mind: Concerning Computers, Minds, and the Laws of Physics* (New York: Penguin Books, 1991) [Пенроуз Р *Новый ум короля. О компьютерах, мышлении и законах физики* (М.: УРСС, 2003)]
43. Squires E *Conscious Mind in the Physical World* (Bristol: A. Hilger, 1990)
44. Менский М Б *УФН* **171** 459 (2001) [Menskii M B *Phys. Usp.* **44** 438 (2001)]
45. Менский М Б *УФН* **177** 415 (2007) [Menskii M B *Phys. Usp.* **50** 397 (2007)]
46. Penrose R, in Penrose R et al. *The Large, the Small, and the Human Mind* (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1999) [Пенроуз Р, в кн. Хокинг С и др. *Большое, малое и человеческий разум. Спор о физическом мире и мире идей* (СПб.: Амфора, 2012) с. 58]
47. Renninger M Z. *Phys.* **158** 417 (1960)
48. Birkhoff G, von Neumann J *Ann. Math.* **37** 823 (1936)
49. Jauch J M *Foundations of Quantum Mechanics* (Reading, Mass.: Addison-Wesley Publ. Co., 1968)
50. Piron C, Ph.D. Thesis (Lausanne: Univ. Lausanne, 1993)
51. Grib A A *Int. J. Theor. Phys.* **32** 2389 (1993)
52. Hepp K *Helv. Phys. Acta* **45** 2237 (1972)
53. Менский М Б *УФН* **173** 1199 (2003) [Menskii M B *Phys. Usp.* **46** 1163 (2003)]
54. Bell J S *Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics* (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1987) p. 117
55. Zurek W H *Phys. Today* **44** (10) 36 (1991)
56. Иваницкий Г Р *УФН* **180** 337 (2010) [Ivanitskii G R *Phys. Usp.* **53** 327 (2010)]
57. Реутов В П, Шехтер А Н *УФН* **180** 393 (2010) [Reutov V P, Schechter A N *Phys. Usp.* **53** 377 (2010)]
58. Грив А А *Методологическое значение квантовой физики для психологии (памяти В.А. Фока)* (Л.: Изд-во ЛГУ, 1980)
59. Shikhovtsev E B *NeuroQuantology* **11** (Suppl. 1) 160 (2013)
60. Byrne P *Sci. Am.* **297** (6) 98 (2007)
61. Schrödinger E *The Interpretation of Quantum Mechanics: Dublin Seminars (1949–1955) and Other Unpublished Essays* (Woodbridge, Conn.: Ox Bow Press, 1995)
62. Byrne P, in *Many Worlds? Everett, Quantum Theory, and Reality* (Eds S Saunders et al.) (Oxford: Oxford Univ. Press, 2010) p. 521
63. Deutsch D, in *Many Worlds? Everett, Quantum Theory, and Reality* (Eds S Saunders et al.) (Oxford: Oxford Univ. Press, 2010) p. 542
64. Carter B, arXiv:1203.0952
65. Tegmark M, in *Many Worlds? Everett, Quantum Theory, and Reality* (Eds S Saunders et al.) (Oxford: Oxford Univ. Press, 2010) p. 553
66. Page D N *Int. J. Mod. Phys. D* **5** 583 (1996)
67. Vaidman L "Many-Worlds interpretation of quantum mechanics", The Stanford Encyclopedia of Philosophy, Summer 2002 ed. (Principal Ed. E N Zalta) (Stanford: Stanford Univ., 2002); <http://plato.stanford.edu/archives/sum2002/entries/qm-manyworlds/>
68. Tegmark M *Nature* **448** 23 (2007)
69. Deutsch D *Proc. R. Soc. Lond. A* **455** 3129 (1999)
70. Kaku M *Physics of the Impossible* (New York: Doubleday, 2008) [Как М *Физика невозможного* (М.: Династия, 2012)]
71. Deutsch D *The Fabric of Reality: the Science of Parallel Universes and Its Implications* (New York: Allen Lane, 1997)
72. Saunders S, in *Many Worlds? Everett, Quantum Theory, and Reality* (Eds S Saunders et al.) (Oxford: Oxford Univ. Press, 2010) p. 3
73. Saunders S, in *Many Worlds? Everett, Quantum Theory, and Reality* (Eds S Saunders et al.) (Oxford: Oxford Univ. Press, 2010) p. 151
74. Лосский Н О *Обоснование интуитивизма* (Записки Историко-филол. фак. Имп. С.-Петербур. ун-та, Ч. 78) (СПб.: Тип. М. М. Стасюлевича, 1906)
75. Kent A, in *Many Worlds? Everett, Quantum Theory, and Reality* (Eds S Saunders et al.) (Oxford: Oxford Univ. Press, 2010) p. 307
76. Попов М А *УФН* **173** 1382 (2003) [Popov M A *Phys. Usp.* **46** 1307 (2003)]
77. Grib A A, Revista Electronica de Letras, RP 11/99 (Brasil: IMECC, UNICAMP, 1999)

On the problem of the interpretation of quantum physics

A.A. Grib

Herzen Russian State Pedagogical University,
ul. Moika 48, 191186 St. Petersburg, Russian Federation
E-mail: Andrei_Grib@mail.ru

Current thinking on the interpretation of quantum physics is reviewed, with special detail given to the Copenhagen and Everett many-worlds interpretations.

PACS numbers: **01.65. + g**, **01.70. + w**, **03.65. – w**

DOI: 10.3367/UFNr.0183.201312d.1337

Bibliography — 77 references

Received 21 March 2013, revised 11 June 2013

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **183** (12) 1337–1352 (2013)

Physics – Uspekhi **56** (12) (2013)