

ПИСЬМА В РЕДАКЦИЮ

Отклики читателей на статью М.Б. Менского "Квантовая механика: новые эксперименты, новые приложения и новые формулировки старых вопросов"

От редколлегии. В мировой литературе в настоящее время, как и в некоторые периоды в прошлом, широко обсуждаются вопросы, связанные с интерпретацией и, вообще основами, квантовой теории. В то же время в физической литературе на русском языке упомянутые проблемы сейчас не находят должного освещения. Поэтому в УФН недавно была опубликована обзорная статья М.Б. Менского "Квантовая механика: новые эксперименты, новые приложения и новые формулировки старых вопросов" (УФН 170 (6) 631 (2000)). В редакционном предисловии к этой статье было сообщено о готовности УФН публиковать письма читателей, посвященные обсуждению основ квантовой теории. Такие письма нами уже получены и помещены ниже. При этом, однако, редколлегия с целью обеспечения свободы дискуссии не подвергала эти письма рецензированию и не несет ответственности за их содержание. Мы полагаем, что в каких-то пределах такой подход в настоящее время оправдан.

PACS number: 03.65.Bz

Содержание

1. Липкин А.И. Существует ли явление "редукции волновой функции" при измерении в квантовой механике? (437).
2. Нахмансон Р.С. Физическая интерпретация квантовой механики (441).
3. Пилан А.М. Действительность и главный вопрос о квантовой информации (444).
4. Панов А.Д. О проблеме выбора альтернативы в квантовом измерении (447).
5. Лесовик Г.Б. Теория измерений и редукция волнового пакета (449).
6. Цехмистро И.З. Импликативно-логическая природа квантовых корреляций (452).
7. Менский М.Б. Квантовое измерение: декогеренция и сознание (459).

Вышеперечисленные отклики читателей публикуются в порядке поступления в редакцию с заключительным комментарием М.Б. Менского.

А.И. Липкин. Московский физико-технический институт,
141700 г. Долгопрудный, Московская обл., Российская Федерация
Тел. (095) 408-46-81. E-mail: lipkin@beep.ru
<http://science.rsuh.ru/Arkady/engle/PofSengl.htm>

Статья поступила 31 июля 2000 г.,
после доработки 30 октября 2000 г.

Существует ли явление "редукции волновой функции" при измерении в квантовой механике?

А.И. Липкин

Настоящее письмо является откликом на обзор [1]. Его цель — указать на принципиально иную позицию, не отмеченную в обзоре [1]. Речь идет о позиции, согласно которой признаются необоснованными и не имеющими экспериментального подтверждения явление "редукции (коллапса) волновой функции" (введенное Дж. Нейманом и П. Дираком в 1930-х годах) и тесно связанная с ней "квантовая теория измерений", безусловное существование которых кладется в основу [1]. Эта позиция представлена, в первую очередь, в хорошо известных работах Д.Н. Клышко [2, 3]. Такой же позиции придерживается и автор данного письма [4, 5]. Эта позиция изложена в нашей совместной большой статье "О "коллапсе волновой функции", "квантовой теории измерений" и "непонимании" квантовой механики" [6], где предложена четкая формулировка нерелятивистской квантовой механики, свободная от явления "редукции (коллапса) волновой функции". Данное письмо опирается на эту работу [6] (см. разделы 3.1, 3.3, 4)¹.

1. Анализ основных утверждений

Ключевым, исходным и очевидным понятием для идущей от Дж. Неймана традиции, которой придерживается и

¹ Основные моменты данного отклика на статью [1] были обсуждены с безвременно ушедшим Д.Н. Клышко сразу после выступления М.Б. Менского с изложением своей позиции на "Общемосковском семинаре по теоретической физике" В.Л. Гинзбурга (23 февраля 2000 г.).

М.Б. Менский, является постулат о существовании при измерении в квантовой механике явления "редукции волновой функции".

Один из наиболее общепринятых путей, на котором возникает "явление" "редукции волновой функции", выглядит так. Пусть измеряется какая-либо величина, например, положение частицы в плоскости экрана (фотопластинки), и этой величине отвечает оператор B , причем прибор показал некоторый результат b_1 . Согласно ряду учебников и мнению подавляющего большинства физиков из этого вытекают следующие утверждения:

утверждение 1: это измерение провозглашается явлением, которое должно описываться квантовой теорией;

утверждение 2: провозглашается, что на языке квантовой теории это явление описывается как мгновенное изменение волновой функции (ВФ) системы от $\Psi = \sum_k c_k |b_k\rangle$ (в общем виде в дираковских обозначениях) к $|b_1\rangle$ с вероятностью $|c_1|^2$ (в соответствии с правилами Борна); этот скачок и называется "редукцией" или "коллапсом" ВФ;

утверждение 3: провозглашается, что такой переход не описывается уравнением Шрёдингера, т.е. оказывается "незаконным" с точки зрения уравнений стандартной квантовой механики.

Выводимая из последнего утверждения (опирающегося на два первых) неполнота современной квантовой механики и необходимость дополнительного развития ее оснований и составляет суть того, что со времен Дж. Неймана имеют в виду под "**проблемой**" "редукции (коллапса) волновой функции".

Со времени ее формулировки в начале 1930-х годов эта проблема рассматривается как очень серьезная и ради ее преодоления в квантовую механику вводят даже сознание [7, 8] и множество миров (многомировая интерпретация Эверетта [9, 10]). Эта проблема стоит в центре и так называемой "квантовой теории измерений".

Отметим, что факт непосредственного наблюдения образования яркой точки на фотоэмульсии (в разных испытаниях точка образуется в разных местах фронта плоской волны, но при достаточно малом потоке частиц при каждом испытании образуется не более одной точки) и "явление" "коллапса (или редукции) ВФ" не одно и то же. Первое — эмпирический факт, второе — лишь возможная интерпретация этого факта, предполагающая выделенные выше теоретические утверждения 1–3.

Поэтому проанализируем эти утверждения и посмотрим, насколько они обоснованы.

Уже "**утверждение 1**" вызывает сомнение. Так, В.А. Фок (в ходе полемики с Бором) утверждает, что в структуре реального эксперимента в квантовой механике надо различать "три стадии: **приготовление** объекта (П), поведение объекта в фиксированных внешних условиях, которое только и является предметом описания квантово-механической теории (Т) и собственно **измерение** (И)" [11, с. 166]². Обозначим эту трехчленную структуру в виде структурной формулы:

Аналогичная целостность (а не одна ее теоретическая часть)

П	Т	И
---	---	---

под именем "ядра раздела науки" является предметом анализа в [4–6].

Граница между этими элементами подвижна — можно усложнить теоретическую часть за счет включения в нее части измерительной составляющей (этим занимается теория измерений), но ВСЮ измерительную часть, включающую процедуру сравнения с эталоном, включить в теорию ПРИНЦИПИАЛЬНО НЕЛЬЗЯ. Мы утверждаем, что процедура измерения содержит часть (сравнение с эталоном), **которая не может быть описана в рамках того раздела физики, в котором она используется** (скорее всего, верно еще более жесткое утверждение: процедура сравнения с эталоном не может без остатка рассматриваться никаким разделом физики в принципе). Аналогичным качеством обладают и процедуры приготовления. Это свойство крайних частей в структурной формуле П–Т–И мы называем "нетеоретичностью". У нас нет строгого доказательства этого утверждения, типа доказательства теоремы Геделя для арифметики, но можно привести ряд аргументов в его защиту.

Заметим, во-первых, что все это обсуждение, все эти аргументы можно применить не к квантовой, а к классической механике. Тогда аналогом критикуемой нами позиции будет требование описывать с помощью уравнений Ньютона экспериментатора, прикладывающего метр при измерении расстояния, пройденного, скажем, телом,двигающимся по гладкой наклонной плоскости. Подобное требование (как и "**утверждение 1**") является безусловным лишь с точки зрения позиции Лапласа, согласно которой "поскольку все, включая человека, состоит из атомов, а атомы описываются механикой, то все, включая действия и мысли человека, можно описать с помощью механических законов". На этот мировоззренческий, а не физический довод нечего возразить кроме того, что в XX в. идеология столь крайнего механицизма не общепринята. Так системный подход выдвинул противоположный тезис, утверждающий, что система обладает свойствами, которые не сводятся к свойствам ее элементов. Поэтому редукция всех явлений к механическим (классическим, как у Лапласа, или квантовым, как у Шрёдингера с его "кошкой") не является, безусловно, необходимой. Но это уже чисто философский вопрос, который более подробно обсуждается в [4, 5].

Критика "**утверждения 1**" уже накладывает тень на безусловность "**утверждения 2**". Но мы подвергнем анализу и другие основания этого утверждения.

С самого начала были понятны две трудности в формулировке "**утверждения 2**". Во-первых, было очевидно, что измерение может производиться так, что оно разрушит не только состояние, но и саму систему (например, регистрация квантовых частиц фотодетектором), поэтому В. Паули ввел деление измерений на измерения 1-го (неразрушающие) и 2-го (разрушающие состояние или даже систему) рода и ограничил применение рассматриваемого "**утверждения 2**" лишь к первому из них.

Во-вторых, постулаты Борна ничего не говорят о состоянии системы после измерения. Поэтому в качестве основного аргумента в пользу "**утверждения 2**" приводится высказанный еще Дж. Нейманом тезис о том, что если систему подвергнуть двум непосредственно следующим друг за другом измерениям (1-го рода), то результат второго измерения совпадет с результатом первого. Дж. Нейман ссылаясь при этом на опыт Комптона–Симонса [14] по столкновению фотонов и электронов. С тех пор это принято рассматривать как известный экспериментальный факт, подтверждающий "**утверждение 2**". Но правильна ли подобная интерпретация?

Корректная постановка вопроса для случая **повторного измерения** в камере Вильсона в рамках стандартной кван-

² Подобное членение можно найти и у Гейзенберга [12, с. 20], а также у Г. Маргенау [13], но там оно трактуется по-другому.

товой механики, опирающейся на уравнение Шрёдингера, рассмотрена Л. Шиффом [15, с. 242] как задача о вычислении распределения вероятностей возбуждения двух атомов пролетающей быстрой квантовой частицей (электроном). Результат дает заметную вероятность только в случае, если направление движения частицы почти параллельно как линии, соединяющей атомы, так и направлению конечного импульса рассеянной частицы. Другими словами, экспериментальные результаты, обычно приводимые в подтверждение тезиса Дж. Неймана и "утверждения 2", можно описать в рамках стандартной квантовой механики без "утверждения 2". На сегодняшний день, по-видимому, все известные эксперименты количественно описываются стандартными алгоритмами квантовой теории и постулатом Борна. Поэтому "утверждение 2" и основанное на нем "утверждение 3" являются тоже необоснованными.

Место "утверждения 3" в реальной квантовой механике занимает констатация того факта, что кроме уравнения Шрёдингера (или его аналога), описывающего связь (изменение) состояний в квантовой механике, требуются еще борновские правила "вероятностной интерпретации волновой функции" (ВИВФ), связывающие между собой математический образ некоторого состояния системы (волновую функцию) и соответствующие измерения и не имеющие отношения к изменению состояний. Так устроена квантовая механика. Аналогичная структура имеет место и в классической механике: там тоже за связь состояний отвечает уравнение движения, а процедура измерения (сравнение с эталоном) фиксирует определенное состояние.

Такой взгляд на проблему опирается на определенное понимание *состояния* в квантовой механике. Согласно определению, данному в [4, 5], состояние физической системы определяется тем, что его знание позволяет ответить на все могущие возникнуть в данном разделе физики вопросы относительно данной физической системы. Соответственно, поскольку мы полагаем, что все вопросы, которые можно задавать в квантовой механике, можно относить не к самим значениям измерений, а только к распределениям вероятностей различных измеримых величин, требующих для своего определения длинной серии измерений, то значения отдельного акта измерения сопоставить с состоянием системы (если оно не приготовлено в собственном состоянии) нельзя *ни до, ни после* этого акта измерения. Это, возможно, достаточно сильное утверждение, поскольку более привычно связывать состояние и определенность значений измеримых величин. Но оно находится в полном соответствии как с постулатами Борна, так и с другими постулатами квантовой механики [6].

Таким образом, мы приходим к провозглашенному Д.Н. Клышко и поддерживаемому автором выводу, что "проблема редукции ВФ" является лишь некоторой гипотезой (или постулатом), предложенной Дираком и Дж. Нейманом (1932 г.), и представляет собой типичный пример "порочного круга": сперва принимается на веру, что ВФ по неизвестной причине уничтожается вне области регистрации (для измерения типа определения положения частицы), а потом это принимается за закон природы, согласно известному англоязычному выражению — "adorned by repetition". Тем не менее в ряде учебников и монографий редукция объявляется одним из основных постулатов квантовой механики (см., например, [16]), хотя в других работах его необходимость подвергается сомнению (см. [17–21]). Проекционный постулат Дирака (используемый для описания редукции ВФ) фактически не нужен и никогда не используется для количественного описания реально наблюдаемых эффектов" [6].

2. Мифы³ о квантовом измерении

Глобальная цель "квантовой теории измерений", как она понимается в [1, 16, 17], — теоретическое (квантовомеханическое) описание процесса измерения, неразрывно связанного (по сути совпадающего) с "явлением" "редукции (коллапса) волновой функции" и "утверждениями 1–3", проанализированными выше. Поэтому приведенный выше критический анализ распространяется и на "квантовую теорию измерений" и с нашей точки зрения сама постановка такой глобальной цели неверна.

В чем же тогда состоит предмет "квантовой теории измерений"? Выделим среди типов воздействия измерительного прибора на измеряемую систему: 1) разрушение (в измерениях "второго" рода); 2) фильтрацию; 3) взаимодействие через пробное тело в косвенных измерениях.

Именно различные варианты косвенных измерений являются главной реальной областью исследования квантовой теории измерений. То есть адекватной областью исследования для квантовой теории измерений является теоретическое рассмотрение взаимодействия измеряемой системы и "пробного тела" в случае неразрушающего измерения "первого рода" в рамках стандартной квантовой механики. В этом случае происходит расширение рассматриваемой системы за счет включения в нее соответствующей части измерительного прибора (пробного тела или, что по сути то же, некоторой части измеряющей системы). Это эквивалентно **смещению границы Т–И** в описанной выше П–Т–И-структуре. Далее возникает квантовомеханическая задача о такой составной системе, которая решается стандартными методами с помощью уравнения Шрёдингера или его аналогов. Это нормальная строго поставленная квантовомеханическая задача. Но к полученному стандартными методами решению в конце часто прибавляют утверждение о "редукции ВФ" на тех основаниях, о которых говорилось выше. То есть в конце вводится теоретически никак не обоснованный скачок. Поэтому к собственно ТЕОРИИ измерений следует относить то, что получается до этого скачка. А это не выходит за пределы стандартной квантовой механики (куда мы включаем и квантовую статистическую механику, где роль волновой функции выполняет матрица плотности).

Аналогичная ситуация складывается вокруг анализа воздействия типа **фильтрации**. Целесообразно фильтрацию (например, с помощью экрана с отверстием или поляроида) отличать от измерения, где фильтрация часто используется как элемент измеряющего прибора. *Фильтры готовят состояние*, а что-то измерить можно лишь при наличии наряду с фильтром и *детектора* (под детектированием понимается реально наблюдаемые свидетельства существования частицы, например, щелчок в счетчике Гейгера или трек в камере Вильсона). Фильтрация направлена *непосредственно на состояния*, на контролируемое воздействие на них, а акты измерения направлены на значения измеримых величин, распределения вероятностей которых описывают состояние системы. При смещении границы Т–И или П–Т фильтрация включается внутрь теории. При этом иногда она описывается последовательно квантовомеханически, как в опыте Штерна–Герлаха, часто — менее последовательно (по сути квазиклассически) посредством соответствующего проекционного оператора в математическом слое. Иногда последнее делается не очень явно. Так, в рассматриваемом в [2] опыте быстрая частица с определенным импульсом регистрируется двумя

³ Под "мифами" подразумеваются утверждения, принимаемые без должного основания и не допускающие в принципе экспериментальной демонстрации.

счетчиками Гейгера, расположенными на некотором расстоянии друг от друга. При теоретическом рассмотрении этого опыта задача сводится к описанию взаимодействия этой частицы с атомами этих счетчиков, т.е. к задаче о неупругом рассеянии частицы на паре атомов, напоминающей упомянутую выше задачу о камере Вильсона. Но, в отличие от последней, здесь атомы "закреплены" посредством счетчиков Гейгера, размеры которых выступают как пространственные фильтры для состояний атомов, на которых происходит неупругое столкновение с частицей.

Во всех этих случаях никакой "проблемы редукции", как и в случае с пробным телом, не возникает.

Итак, исходная ГЛОБАЛЬНАЯ постановка "проблемы квантовой теории измерений", тесно связанная с "проблемой редукции волновой функции", некорректна в силу необоснованности лежащих в их основании "утверждений 1–3". Реальная же теория измерений связана с квантовомеханическим рассмотрением различных вариантов косвенных измерений и включает приблизительно тот же круг вопросов, что и классическая теория измерений. И там, и там любая часть процедуры измерения, которая формулируется как физическая задача, решается в рамках соответствующего существующего раздела физики. Но в состав процедур измерения и там, и там включена и процедура сравнения с эталоном, которая является принципиально технической, а не физическим или психо-ментальным (т.е. включающим сознание) явлением.

Таким образом, в настоящее время нерелятивистская квантовая механика с большой убедительностью описывается стандартным формализмом квантовой механики и подтверждается экспериментами. И нет никаких веских экспериментальных или теоретических оснований для утверждения о необходимости ревизии оснований нерелятивистской квантовой механики. В частности, не имеет под собой основания существующая уже более 70 лет традиция, в рамках которой пытаются включить "феномен сознания" в основания квантовой механики (традиция, идущая от Дж. Неймана [7] и представленная сегодня в мире такими весьма серьезными учеными как Е. Вигнер [24], Р. Пенроуз [8], а у нас в стране М.Б. Менским [1] и др.). "Мы всегда должны делить мир на две части — наблюдаемую систему и наблюдателя, — утверждал Дж. Нейман. — То, что такую границу можно поместить сколь угодно далеко внутрь организма действительного наблюдателя, и составляет содержание принципа психофизического параллелизма⁴. Однако... эта граница должна быть где-нибудь проведена... Ибо опыт может приводить только к утверждениям этого типа — наблюдатель испытал определенное (субъективное) восприятие, но никогда не к утверждениям таким, как: некоторая физическая величина имеет определенное значение" [7, с. 308]. Это утверждение Дж. Неймана сочетает мировоззрение физикализма (в духе Лапласа), инструментализма и очень популярного в 1930–1940 гг. неопозитивизма (логического позитивизма). С уходом неопозитивизма со сцены (он был раскритикован в пух и прах постпозитивистами 1960–1970 гг., см. подробнее в [5]) роль наблюдателя как средства разрешения проблемы измерения ("редукции ВФ") была отведена сознанию [1, 25, 16]. Сознание, как "Бог из машины" в пьесах XVII–XVIII вв., призвано обрывать эту "психофизическую" бесконечность (на сознание, как и на Бога, можно списать все). Приведенный выше анализ показывает шаткость основания этих положений.

⁴ Принцип психофизического параллелизма Дж. Нейман называет "фундаментальным для всякого естественнонаучного мировоззрения".

То же можно сказать и о появившейся в 1970-х годах многомировой интерпретации [9, 10], где предполагается, что каждое слагаемое в выражении $\Psi = \sum_k c_k |b_k\rangle$ "соответствует отдельному миру. В каждом мире существует своя квантовая система и свой наблюдатель, причем состояние системы и состояние наблюдателя скоррелированы. Процесс же измерения можно назвать процессом ветвления волновой функции или процессом "расщепления" миров". В каждом из параллельных миров измеримая величина B имеет определенное значение b_i , и именно это значение и видит наблюдатель, "поселяющийся в этом мире. Поэтому для наблюдателя в каждом из параллельных миров происходит эффективная редукция волнового пакета" [10, с. 25]. Не случайно при изложении последней обсуждают только случай одного наблюдателя. Случай более чем одного наблюдателя является трудноразрешимой задачей для этой "шизоидной" (от греч. schizo — разделяю) концепции.

Аналогичная ситуация имеет место и при так называемой "квантовой телепортации", когда речь идет о тройных корреляциях. "Принятая в [26–33] интерпретация эффекта, как и его название, базируется на распространенном представлении о мгновенной редукции (коллапсе) волновой функции в результате измерения, приводящей к квантовой нелокальности. Подчеркнем, что этот красивый эффект также полностью описывается количественным квантовым формализмом" [2, 34].

Что касается обсуждения концепции **декогеренции** [1, 35], то здесь надо различить ряд моментов.

1. В [1, 35] декогеренция связывается с проблемой "редукции волновой функции" при измерении в квантовой механике. Поскольку, с нашей точки зрения, такой проблемы нет, то этот аспект мы не рассматриваем.

2. Есть то, что М.Б. Менский классифицирует как мезосистемы — системы, состоящие из большого числа атомов, которые в случае очень большого числа атомов должны переходить в макросистемы. Здесь, по сути, речь идет об экспериментальной проверке выражения де Бройля для характерного масштаба проявления квантовомеханических интерференционных эффектов для все более массивных систем. Но никакого особого эффекта декогеренции здесь вводить не требуется.

3. Выделяется особый тип задач по взаимодействию квантовой системы с термостатом. Это и есть, собственно говоря, та область, где рождается и развивается теория декогеренции.

Подводя итог, можно сказать, что постулат Борна дает алгоритм сравнения теории и эксперимента. Это основной измерительный постулат квантовой механики, согласующийся со всеми известными экспериментами. Понятие же "редукции ВФ" в момент измерения выглядит излишним.

Настоящая работа выполнена на основе результатов, полученных при финансовой поддержке РФФИ, грант № 99-06-80244.

Список литературы

1. Менский М.Б. *УФН* **170** 631 (2000)
2. Клышко Д.Н. *УФН* **168** 975 (1998)
3. Klyshko D.N. *Phys. Lett. A* **243** 179 (1998)
4. Липкин А.И., в сб. *Философия науки* Вып. 2 (М.: ИФРАН, 1996) с. 199
5. Липкин А.И. *Модели современной физики (взгляд изнутри и извне)* (М.: Гнозис, 1999)
6. Клышко Д.Н., Липкин А.И. *Электронный журнал Исследовано в России* (53) 736 (2000) <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2000/053.pdf>
7. Нейман фон Дж. *Математические основы квантовой механики* (М.: Наука, 1964).

8. Penrose R *Shadows of the Mind* (Oxford: Oxford Univ. Press, 1994)
9. DeWitt B S *Phys. Today* **23** (9) 30 (1970); **24** (4) 36 (1971)
10. Барвинский А О, Каменщик А Ю, Пономарев В Н *Фундаментальные проблемы интерпретации квантовой механики. Современный подход* (М.: МГПИ, 1988)
11. Фок В А "Критика взглядов Бора на квантовую механику", в сб. *Философские вопросы современной физики* (Под ред. И В Кузнецова, М Э Омеляновского) (М.: Госполитиздат, 1958) с. 61
12. Гейзенберг В *Физика и философия. Часть и целое* (М.: Наука, 1989) [Heisenberg W *Physik und Philosophie* (Frankfurt am Main: Ullstein Taschenbücher-Verlag, 1959); Heisenberg W *Der Teil und das Ganze. Gespräche im Umkreis der Atomphysik* (München: R. Piper, 1969)]
13. Margenau H *Philos. Sci.* **30** (1) 138 (1963)
14. Compton A H, Simon A W *Phys. Rev.* **26** 289 (1925)
15. Шифф Л И *Квантовая механика* 2-е изд. (М.: ИИЛ, 1959) [Schiff L I *Quantum Mechanics* 2nd ed. (New York: McGraw-Hill Book Co., 1955)]
16. Садбери А *Квантовая механика и физика элементарных частиц* (М.: Мир 1989) [Sudbery A *Quantum Mechanics and the Particles of Nature* (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1986)]
17. Margenau H *Ann. Phys.* (New York) **23** 469 (1963)
18. Home D, Whittaker M A B *Phys. Lett. A* **128** 1 (1988)
19. Ballentine L E *Int. J. Theor. Phys.* **27** 211 (1988)
20. Pascasio S, Namiki M, in *Fundamental Problems in Quantum Theory* (Ann. New York Acad. Sci., Vol. 755, Eds D M Greenberger, A Zehinger) (New York: The New York Acad. Sci., 1995) p. 335; Namiki M, Pascasio S *Phys. Rev. A* **44** 39 (1991)
21. Sini M, Levy-Leblond J (Eds) *Quantum Mechanics without Reduction* (Bristol: Hilger, 1990)
22. Hirota O, Holevo A S, Caves C M (Eds) *Quantum Communication, Computing, and Measurement* (New York: Plenum Press, 1997)
23. Воронцов Ю И *Теория и методы макроскопических измерений* (М.: Наука, 1989)
24. Wigner E P *Am. J. Phys.* **31** 6 (1963)
25. Braginsky V B, Khalili F Ya *Quantum Measurement* (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1992)
26. Boschi D et al. *Phys. Rev. Lett.* **80** 1121 (1998)
27. Bennett C H et al. *Phys. Rev. Lett.* **70** 1895 (1993)
28. Weinfurter H *Europhys. Lett.* **25** 559 (1994)
29. Davidovich L et al. *Phys. Rev. A* **50** R895 (1994)
30. Cirac J I, Parkins A S *Phys. Rev. A* **50** R4441 (1994)
31. Braunstein S L, Mann A *Phys. Rev. A* **51** R1727 (1995); **53** 630 (1996)
32. Braunstein S L, Kimble H J *Phys. Rev. Lett.* **80** 869 (1998)
33. Bouwmeester D et al. *Nature* **390** 575 (1997)
34. Клышко Д Н *ЖЭТФ* **144** 1171 (1998)
35. Менский М Б *УФН* **168** 1017 (1998)

Физическая интерпретация квантовой механики

Р.С. Нахмансон

Этот текст написан в связи с появлением статьи М.Б. Менского [1] и пожеланием Редколлегии *УФН* продолжить на страницах журнала свободное обсуждение фундаментальных физико-философских проблем квантовой механики в раздел "Письма в редакцию". Эти начальные и граничные условия предопределяют дискуссионную и конспективную форму изложения: в первой части я критически рассматриваю некоторые положения статьи Менского, а во второй кратко излагаю основы альтернатив-

ной интерпретации квантовой механики (КМ), отсылая за подробностями к оригинальным статьям.

1. Статья М.Б. Менского

В разделе 2.1 своей статьи Менский соглашается с распространенным мнением о том, что эксперимент, проведенный группой Аспекта [2] по проверке неравенства Белла [3], окончательно закрывает путь локально-реалистическим моделям. Это, однако, не так, и сам Аспект это знал. Новым в [2] по сравнению с экспериментами, проведенными в предыдущие 10 лет, было быстрое переключение условий детектирования фотонов, что исключало возможность релятивистской информационной связи между частицами ЭПР-пары. Так родилась легенда о нелокальности КМ, о "мгновенной" корреляции поведения ЭПР-пары, даже если частицы разнесены на сотни световых лет. Как справедливо отмечалось, в том числе в [1], это противоречит нашей "интуиции", "здравому смыслу", "common sense", воспитанных на повседневном окружении, но тут уж, как говорится, что поделать.

Однако посмотрим, что пишет Аспект в конце своей статьи [2]: "Переключение света осуществлялось за счет акусто-оптического взаимодействия света с 25-мегагерцевой ультразвуковой стоячей волной, что обеспечивало 50-мегагерцевое переключение, т.е. изменение ориентации каждые 10 наносекунд. Это время мало по сравнению с L/c (40 нс), но, к сожалению, с этими устройствами было невозможно получить случайное переключение. В этом отношении эксперимент был далек от задуманного".

Другой "experimentum crucis" — так называемый "задержанный выбор" ("delayed choice") — был выполнен группой Аллея [4]. Особенность состояла в том, что эта группа использовала случайное переключение ячейки Керра в одном из плеч интерферометра Маха — Цендера.

В чем тут дело, почему Аспект и Аллей стремились к случайности? Сами они об этом не распространялись. В 1993 г. на конференции в Олимпии я сказал Аллею: "Особенностью случайного ряда является непредсказуемость его членов. Значит ли это, что Вы подозревали способность частиц предсказывать ситуацию и хотели им помешать?" — "Пожалуй, Вы правы", — ответил он.

В явном виде идея предсказания, насколько мне известно, была впервые высказана в 1992 г. [5]. В недавней работе группы Цайлингера [6] такая возможность также подразумевается. Эта идея ведет к сознанию и его связи с материей, чему посвящена вторая половина статьи Менского. Есть, правда, существенная разница: в [5] и, в неявной форме, в [2, 4, 6] предполагается, что сама материя наделена сознанием, тогда как Менский, вслед за фон Нейманом и Вигнером, рассматривает только человеческое сознание.

К этому вопросу мы вернемся позже, а пока заметим, что если материя наделена способностью предсказывать, то теорема Белла теряет силу, локально-реалистические модели микромира возможны, а нелокальность изгоняется. Все это, включая сознание материи, может быть принято нашей интуицией и здравым смыслом. Если бы наш далекий предок-язычник, одушевлявший природу, или сегодняшний маленький ребенок могли бы использовать современную экспериментальную аппаратуру, поведение элементарных частиц не вызвало бы у них удивления.

В разделе 3 Менский рассматривает проблему суперпозиции волновых функций и ее трансформацию при переходе к макроскопическим системам ("шрёдингеровский кот"). Типичная ошибка, которую он, к сожалению, тоже делает, состоит в слишком далеко заходящем отождествлении математического конструкта — волновой функции — и материального объекта, будь то элементарная

Р.С. Нахмансон (R. Nakhmanson). Frankfurt am Main, Germany
E-mail: Nakhmanson@t-online.de

Статья поступила 14 августа 2000 г.,
после доработки 25 октября 2000 г.

частица или кот. Говоря о пространстве состояний, он забывает, что это пространство волновых функций, а не реальное пространство, и что суперпозиция функций не означает суперпозицию объектов. Цитирую начало раздела 3:

"Всем известно, что пространство состояний квантовомеханической системы линейно. Это значит, что наряду с любыми двумя ее состояниями $|\psi_1\rangle$, $|\psi_2\rangle$ возможным состоянием является также и их линейная комбинация (суперпозиция) $c_1|\psi_1\rangle + c_2|\psi_2\rangle$ с любыми (комплексными) коэффициентами c_1 , c_2 . Например, если точечная частица может находиться в одной из двух точек, то она может находиться и "одновременно в обеих точках". В классической механике ничего подобного нет... Более наглядно: камень может находиться либо в одной точке, либо в другой, но не в обеих".

Последнее наблюдение Менского, конечно, верно, но в отношении элементарной частицы он неправ: до сих пор никто не наблюдал одну и ту же частицу одновременно в двух точках и вряд ли это удастся кому-либо в будущем. Да, в микромире есть интерференция амплитуд, и распределение вероятностей в плоскости регистрации двухщелевого эксперимента не равно сумме однощелевых вероятностей. Да, картина выглядит так, как будто из волны, порожденной источником частиц, экран вырезает две когерентные волны, которые, интерферируя, дают осциллирующее распределение в плоскости регистрации. Но это все относится к волновой функции, а не к самой частице, да и разыгрывается не в реальном, а в конфигурационном пространстве, которое, по всей вероятности, находится в сознании самой частицы и там влияет на выбор угла рассеяния при взаимодействии частицы с краями щели. Что же касается самой частицы, то она не "раздваивается" согласно двум возможностям, а проходит только через одну щель. То же относится и к шрёдингеровскому коту. Сколько бы и каких волн, в том числе интерферирующих, не описывало состояние радиоактивного атома и кота, это относится только к вероятности распада атома и смерти кота, тогда как сам атом или распался, или еще нет, а кот, соответственно, или мертв, или еще жив, причем независимо от того, знаем ли мы состояние радиоактивного атома или нет, видим ли мы кота или нет. Тот же, кто разделяет так называемую "копенгагенскую" интерпретацию КМ и заявляет, что вопрос о том, через какую щель прошел электрон, не имеет смысла, если это не зарегистрировано, и в случае с котом не будет утруждать себя "бессмысленными" вопросами.

Особое место в статье Менского занимает раздел 4 как по объему (почти половина статьи), так и по содержанию. Речь идет о физической интерпретации столь успешно зарекомендовавшего себя математического формализма квантовой механики, проблемы столь же древней, как и сама КМ, и обсуждаемой до сих пор. Свой вклад в решение этой проблемы Менский видит в комбинации многомировой интерпретации Эверетта–Уилера и идеи фон Неймана–Вигнера о роли сознания наблюдателя.

Выбор Менского нельзя назвать удачным. Согласно многомировой интерпретации каждую секунду рождаются мириады *реальных* миров, и лишь ничтожная часть их успевает рекомбинировать со своими близнецами-братьями. Эта интерпретация неконструктивна, не поддается экспериментальной проверке, противоречит здравому смыслу. Не удивительно поэтому, что многомировая интерпретация рассматривается большинством как педагогический курьез, и сам Уилер от нее давно отказался.

Вторым компонентом интерпретации КМ у Менского является человеческое сознание, которое, по его мнению, осуществляет выбор альтернатив на квантовом уровне,

приводящий далее к макроскопическим следствиям, и теперь уже не только, например, к отклонению стрелки прибора: "*Функция сознания состоит в том, чтобы выбрать один из альтернативных эвереттовских миров*".

Предположение о решающей роли человеческого сознания в процессе измерения (фон Нейман, Вигнер, Лондон и Байер) вызывает ряд вопросов. Например, о чем сознании идет речь, когда рассматривается не спланированный эксперимент, а нечто, происходящее "само по себе", где человек является лишь посторонним наблюдателем, или его вообще нет поблизости? В конце статьи Менский пишет, что сознание есть фундаментальное физическое свойство, "... которым тем не менее обладает лишь живая материя", т.е. уже не только человек, но не договаривает, как можно было бы ожидать из контекста, имеется ли в виду также выбор альтернатив. Но достаточно ли быть живым, чтобы обладать сознанием? И где граница между живым и неживым? А что было, когда "живой" материи еще не было? Космология учит нас, что законы движения "неживой" материи были тогда практически те же, хотя на нее вроде никакая "живая" материя не смотрела.

Есть две возможности выйти из этого тупика. Первая возможность — предположить, что представления космологии иллюзорны по примеру разговора атеиста со священником:

Атеист: "Вот Вы говорите, что Бог сотворил Вселенную 6 тысяч лет назад, а наука доказала, что ей уже минимум 10 миллиардов лет!"

Священник: "Бог сотворил ее 6 тысяч лет назад такой, что она выглядит на все 15 миллиардов".

Вторая возможность — предположить, что сознанием наделена вся материя, как "живая", так и "неживая", причем именно сознание последней играет решающую роль в физических процессах. Это имеющее давнюю традицию предположение освобождает нас от человеческого солипсизма и многомирового кошмара, и позволяет естественно объяснить кажущуюся "нелокальность" и другие парадоксы квантового мира.

2. Информационная интерпретация КМ

Элементарные частицы сами обладают сознанием. Места в них достаточно: в типичном размере 10^{-18} м поместится порядка 10^{50} планковских ячеек, что много больше не только числа нейронов в мозгу человека, но и суммарного числа атомов всех известных нам биологических объектов. Поведение частиц целенаправленно, что отражено в телеологическом характере физических законов (вариационные принципы). При взаимодействиях частицы обмениваются информацией. Они должны иметь коррелированные представления о пространстве и времени, и в этом смысле можно говорить о выделенной системе (подобно Гринвичской). Единство ("holism") мира имеет информационную природу, Интернет материи существует, вероятно, со времен "Большого Взрыва". С тех пор прошло много времени, которое к тому же, если считать не на часы, а на события, в микромире течет быстрее. Можно ожидать, что цивилизация частиц прошла длинный путь эволюции. Может быть, ее лучшие времена уже позади, и сейчас она находится в состоянии застоя или упадка.

Волновая функция — это стратегия частицы. Она находится в сознании частицы и является результатом работы этого сознания над известной информацией о мире. При этом частица решает квантовомеханическую задачу. Многие правила решения люди уже угадали и изложили в статьях и книгах по КМ.

При получении новой информации частица корректирует свою стратегию, т.е. свою волновую функцию. Так

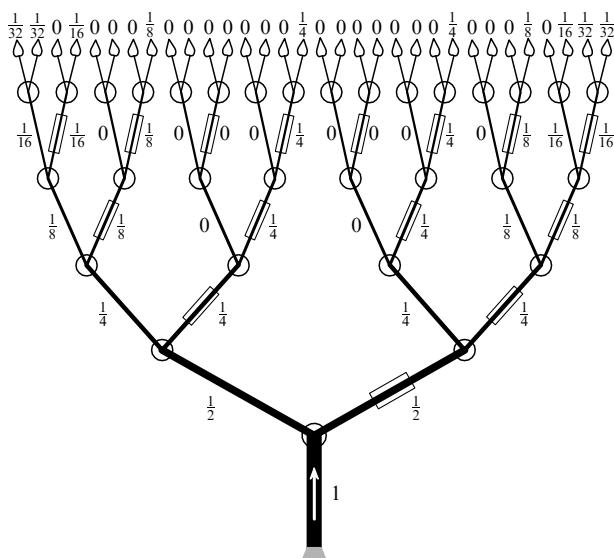


Рис. 2. Бинарное дерево. Цифрами показана вероятность нахождения частицы в различных ветвях дерева в случае моментального образования консервативного условного рефлекса.

одну и ту же интенсивность, а именно $1/32$ от интенсивности первоначального пучка (реальные зеркала делят пучок не строго поровну и имеют поглощение, но это не принципиально).

Введем теперь во все правые ветви (соответствующие, например, отражению от зеркал) "информационные ячейки" (на рисунке они показаны прямоугольниками), предъявляющие частицам некоторую информацию. Например, это опять могут быть наборы стеклянных пластинок, где информация закодирована через толщину пластинок и расстояние между ними. Информация, предъявляемая в каждом следующем ряду ячеек, является продолжением предыдущей.

Реальные ячейки будут вносить некоторое поглощение, но оно может быть учтено при обработке результатов или скомпенсировано введением во все левые ветви аналогичных ячеек, несущих, однако, "менее интересную" информацию. Например, если каждой букве нашего алфавита соответствует пластинка определенной толщины, то во всех компенсационных ячейках эти пластинки стоят в алфавитном порядке.

Согласно современной теории и практике введение информационных и компенсационных ячеек не нарушит равномерное распределение интенсивности между выходными ветвями. Но если частицы обладают сознанием, они могут заинтересоваться предлагаемой информацией. Пробуя различные направления ветвления, они обнаружат, что правые ветви более информативны, и начнут их предпочитать. Другими словами, у частиц выработается условный рефлекс. Это нарушит равномерное распределение частиц в выходных каналах. На рисунке 2 в качестве примера цифрами показана вероятность нахождения частицы в различных ветвях дерева в случае моментального образования консервативного условного рефлекса, т.е. когда частица после первого же сравнения левых и правых ветвей делает окончательный выбор в пользу последних.

Неравномерное распределение частиц в выходных каналах будет замечено экспериментатором и может быть справедливо интерпретировано как интерес частиц к информации и указание на их сознание. Этот важный результат даже не требует от частиц умения расшифровывать информацию, достаточна их любознательность. Точно так же

археологи отправлялись в дальние путешествия из интереса к древним иероглифическим письменам задолго до того, как научились их расшифровывать.

Суммарная информация, распределенная по ячейкам, в целом может составлять курс обучения некоему языку, на котором мы в дальнейшем будем общаться с частицами. Чтобы узнать, как далеко продвинулось обучение, экспериментатор время от времени может предъявлять частицам, например, такой текст: "Поверните, пожалуйста, налево". Так как частицы, стараясь не пропускать уроков, как правило, будут выбирать правые ветви, выполнение этой просьбы будет означать, что ее текст был расшифрован, и мы вышли на более высокий уровень информационного контакта.

Этим, однако, возможности схемы рис. 2 не ограничиваются. Сознательно выбирая направления ветвления, частица может в коде "лево"–"право" ("0"–"1") сама передать нам сообщение. Поскольку регистрация частицы в какой-либо выходной ветви однозначно определяет весь ее путь в дереве, мы сможем прочесть это сообщение. Например, самая левая выходная ветвь на рис. 2 соответствует сообщению "00000", а самая правая — "11111".

Изложенной интерпретации КМ посвящены также работы [7–8].

Список литературы

1. Менский М Б *УФН* **170** 631 (2000)
2. Aspect A, Dalibard J, Roger G *Phys. Rev. Lett.* **49** 1804 (1982)
3. Bell J S *Physics* **1** 195 (1964)
4. Alley C O et al., in *Proc. 2nd Int. Symposium on Foundations of Quantum Mechanics, Tokyo, 1987* (Eds M Namiki et al.) (Tokyo: Phys. Soc. Jpn, 1987) p. 36
5. Nakhmanson R, in *Waves and Particles of Light and Matter* (Eds A van der Merwe, A Garuccio) (New York: Plenum Press, 1994) p. 571
6. Weihs G et al. *Phys. Rev. Lett.* **81** 5039 (1998)
7. Nakhmanson R, in *Frontiers of Fundamental Physics* (Eds M Barone, F Selleri) (New York: Plenum Press, 1994) p. 591. (Можно найти по адресу: <http://arXiv.org/pdf/physics/0103006>)
8. Nakhmanson R, <http://arXiv.org/pdf/physics/0004047>
9. Nakhmanson R, <http://arXiv.org/pdf/physics/0005042>

Действительность и главный вопрос о квантовой информации

А.М. Пилан

На самом деле главный вопрос статьи М.Б. Менского "Квантовая механика: новые эксперименты, новые приложения и новые формулировки старых вопросов" состоит в том, какая информация существует в природе для (пред-)определения квантовых историй.

После 75 лет споров многие практики не верят в полезность обсуждения как квантовых парадоксов, так и понятия информации для физики. Вот на стр. 13 и 15 февральского номера *Phys. Today* 1999: "после своего успеха в демонстрации эйнштейнглмента (наличие запутан-

А.М. Пилан. Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера РАН, 63090 г. Новосибирск, просп. ак. Лаврентьева 11, Российская Федерация
E-mail: A.M.Pilan@inp.nsk.su

Статья поступила 14 августа 2000 г.,
после доработки 20 октября 2000 г.

ных состояний) Антон Цайлингер осторожно замечает, что "не будет большим парадоксом, если окажется, что квантовая механика может быть вообще про информацию", но Голдстейн отрубает: "...неужели Цайлингер истинно верит, что информация может быть просто и вообще сама по себе? — она всегда про конкретные вещи и явления... — и только этим интересна". Так в каком именно качестве и количестве есть в природе детерминирующая информация?

Обращение к множественности параллельных миров, выстраиваемых сознанием, т.е. по существу к философскому солипсизму, представленное в обсуждаемой обзорной статье М.Б. Менского [1], свидетельствует уже как будто о совсем отчаянном здесь положении. Но если посмотреть на роль "Бога" с "кибернетической" стороны, "Богу" проследить каждую из альтернативных судеб всех микросистем уж слишком накладно. Принимая приглашение от редакции высказаться в стиле "мозгового штурма", позвольте изложить догадки о форме представления квантовой информации.

Наступил кризис переосмысления КМ от механической машины к информационно-кибернетической машине. Уж если в квантовой механике детерминизма оказывается достаточно для создания "квантового компьютера" [2, 3], то ничто не мешает воображать весь мир "квантовым компьютером", вычисляющим и свою, и нашу судьбу. Что касается роли сознания "виртуальных человечков", разгадывающих его устройство, то живой мозг создан, как видно, "по образу и подобию" неживой природы — по принципу "голографического компьютера" [11].

Доказано, что в природе существует "эйнштейнглмент" — ЭПР-связи, которые "телепатически" — поверх пространства — сковыывают свободу удаленных частиц "взаимными обязательствами", и эти связи по существу выполняют роль "скрытых параметров". Значит, физический мир ими до какой-то степени насыщен. До какой? И тут пока еще есть возможность высказывать крайние предположения. М.Б. Менский справедливо указал — надо сразу приготовиться к тому, что все это окажется уже не физика. Возникает принципиальная методологическая трудность — физика по определению определяется универсальным предсказанием исходов экспериментов для всевозможных наблюдателей, т.е., грубо говоря, предмет физики — инварианты группы Пуанкаре и группы внутренней зарядовой симметрии, постулируемые "демократическими принципами" — однородностью пространства и физики для всех. А инварианты групп физических симметрий формулируются не точнее амплитуд на языке функционалов квантовых состояний. Индивидуальная же история от квантового описания ускользает. Но сама материя и есть несимметрия в симметричном "физическом вакууме". А вакуум, по самоуверенному определению физиков, преобразуется по тривиальному представлению, а "элементарная частица — неприводимое представление группы Пуанкаре" (с точностью до искривленного пространства, в котором неизвестно, как эти представления строить). Опыт заставляет согласиться, что максимум информации *для физики* — волновая функция и что она характеризует именно способ приготовления квантового ансамбля, грубо говоря, последовательность фильтров (из коллиматоров и монохроматоров), после которой состояние исследуемых микросистем *физик считает идентичным*, а никак не саму отдельно взятую микрочастицу или микросистему, поскольку эти фильтры совершенно не чувствительны к наследию квантовых историй каждой частицы в ее индивидуальных ЭПР-связях.

Признание этих индивидуальных связей рушит буквально все "демократические" принципы физики — одно-

родность и изотропность вместе с микропричинностью, вместе с равноправием наблюдателей. "Господа, это же не физика...", — восклицали в спорах отцы квантовой механики, когда расставались с детерминизмом. А теперь пора расставаться с индетерминизмом.

Коль скоро "Господь Бог не играет в кости", надо узнать какую информацию он имеет к размышлению, т.е. в каком количестве и представлении. Под "Богом" подразумевается вовсе не скучающий от своего всемогущества индивидуум, строящий нам козни, а природный механизм определения судеб физических процессов; под информацией — не "Дух Святой", а нечто постижимое для теоретической физики.

В отличие от "реальности, данной нам в ощущениях", представление информации "Богу" назовем "действительностью", полагая, что за определяющий инвариант придется взять не интервал Минковского, а действие, имеющее натуральную меру Планка. Постоянная Планка — не просто параметр превращения квантовой механики в классическую, это универсальная мера, ответственная за различимость физических состояний, т.е. за существование природной меры информации. Эта его роль очевидна с 30-х годов, когда определили энтропию идеального газа.

Мысленно поставив себя на место Бога, придем к "индетерминизму" квантовой механики с изначной стороны, — через отрицание *квантовой случайности*, — если "Господь Бог не играет в кости", то совладать может только с конечной информацией, поэтому и непосильна для него классическая механика. Квантовая "неопределенность" дает с другой стороны наибольшую "определенность" в смысле "голографического принципа"¹, согласно которому количество доступной "Богу" физической информации в нашем мире должно иметь инвариантно определенную конечную количественную меру ("на пространственно-подобной 3-поверхности"), сохраняющуюся со временем от "3-слоя к 3-слою".

Роль "Бога" становится мыслимой или "вычислимой" только при *конечности всей информации, содержащейся в физическом мире*, поскольку ее носитель — физический мир (рассматриваемый для своей детерминирующей информации и как носитель, и как канал связи) имеет физически ограниченную емкость и пропускную способность, а она для всякого носителя ограничена классической мерой Лиувилля доступного ему фазового объема, измеренной в квантах действия — постоянных Планка, возведенных в степень числа степеней свободы. Объем этот растет с энергией и 3-объемом. Ресурсы их в видимой Вселенной ограничены. Пределом количества информации, передаваемой физической системой, является идентификация самого чистого состояния системы, если известен весь конечный список возможных ее состояний.

Все рассуждения о конечности полной меры информации противоречат абстрактной математической квантовой механике — ведь простая система, как атом водорода, имеет уже как будто счетное количество различных квантовых состояний, а "бескрайнее" поле — континуум. Но природа положила достаточно препятствий ими воспользоваться, так как континуум пространства — очевидный математический вымысел.

Разве же можно рассуждать о пространственных отношениях точек пространства, не указывая способа наблюде-

¹ Он возник первоначально с нижним ограничением энтропии в черных дырах [9], но далее, после "третьей суперструнной революции" предпринимаются попытки экстраполировать его на наш видимый мир (см. [10]). Видимый нам мир представляется замкнутой системой, а не открытой, в контакте с тепловым резервуаром, как в обычных рассуждениях об информации и энтропии [11].

ния этих отношений? Материальная точка давно пала жертвой квантовой механики и (вместе с мировой линией) заменилась расплывчатым "волновым пакетом". Фактически точка исчезла, мировая линия вместе с ней, но непрерывное пространство событий, описываемое вещественным 4-континуумом, как ни странно, устояло, оставаясь основой нынешней "стандартной модели" — локально — микропричинной квантовой теории поля с ее промежуточными регуляризациями и окончательными перенормировками. В обычной КТП свойства геометрического пространства проникают в интегралы по путям только через конкретный вид пропагатора. А при формальном выводе теории поля через порождающие функционалы, пропагатор можно не конкретизировать до последнего момента, т.е. можно наоборот попытаться извлечь геометрию пространства в виде функций Грина из свойств графа действительных отношений, как параметр его порядка. Усреднения по графу соответствуют функциям Грина. Сам же этот Граф для математиков, наверное, не слишком понятный объект — в нем гомологии с когомологиями синтезированы без определения гладкого многообразия — носителя, на котором они были бы сопоставлены цепям и дифференциальным формам.

Геометрия так и делает вид, что ничего не случилось. Признает только свою абсурдность в планковских масштабах. К поэтической картине кипящего вакуума из геометродинамики Дж.А. Уилера будем относиться скептически, особенно пока ни гравитационные волны, ни бозоны Хиггса не обнаружены. А вот если их так и не обнаружат, подобно абсолютной скорости относительно эфира, значит, фантом эфира — непрерывного физического поля (как непрерывной функции точно заданного пространства) опять физиков обманул, как перед опытами Майкельсона — Морли.

Заметим, что метрический тензор дублируется лагранжианом свободного поля частиц: волновая функция точно отсчитывает своими периодами — "часиками" инвариантный мировой интервал. "Прямая есть луч света", только луч настоящий, а вместо точек — "источники" и "детекторы". Мировой интервал разбух и растворился в фейнмановском интеграле. И хорошо бы вообще отказаться от пространственных отношений между точками пустоты в пользу отношений между материальными частицами. Судите сами. Как частицы, так и события привязаны к точкам только амплитудой волновой функции в нашем "театре теней" — "пространстве событий" Минковского, а ВФ представляет ансамбль. В силу односторонности и неделимости кванта, эту амплитуду наша "судебная защита" может приписать и пространству, а не частице, только чтобы в конце нашего "судебного процесса" справедливость восторжествовала, и ответственность за неподобающее волновое поведение была поделена между частицей и пространством поровну. Следуя духу относительности, скажем: "Нельзя увидеть без фотонов. И пощупать тоже". Справедливо поделить между ними ответственность за неподобающее для кванта, эту амплитуду наше "судебное поведение". Ведь при коллективном поведении (например, в усилительной среде лазера) нельзя атом уличить в индивидуальном излучении фотона, и поэтому глуп вопрос о том, где и когда произошло событие излучения фотона. Мир квазичастиц эквивалентен миру частиц и подчинен тем же законам с той же постоянной Планка. Метрические отношения между точками пустого пространства подменяются динамическими расстояниями в терминах действия между состояниями самих частиц, вовсе не обязательно локализованными в пространственных точках. Элементарные частицы, если взглянуть на них со стороны несущих информацию несимметрий, являются

идеальными "буквами", (анти)перестановочными абстрактными символами, квантово-тождественными идентификаторами. Информация заложена только в их взаиморасположении в контексте "гроссбуха". Задача — требуется естественный способ представления ЭПР-связей. Есть одна зацепка: действие — инвариантная метрика между состояниями.

ЭПР-связи для привычной физики являются констатацией законов сохранения общих интегралов движения распавшей системы в суммах этих величин по ее частям — отсюда корреляции импульсов, моментов, положений относительно центра масс и т.д. Все эти корреляции по квантовомеханически корректно заложены в диаграммах и соответствующих им интегралах Фейнмана: амплитуды "неправильных" процессов вдали от "массовой оболочки" — классической траектории — разрушаются интерференцией путей. Глобальный же интеграл Фейнмана по всему миру дает матрицу рассеяния для всего одинакового везде. Как же может быть отображено известное "Богу" текущее состояние дел в мире?

Возможность информационного толкования меры объема функционального пространства состояний для фейнмановского интеграла первым (кажется) высказал Ганс Бремерман² и там же указал на возможность истолкования перенормировок (деления на вакуумный пузырь) как "вычитания бесконечной априорной информации".

Искомой Мере информации, очевидно, должно соответствовать некое неравновесное обобщение свободной энергии Гельмгольца, которое, кажется, можно провести через интеграл по "евклидовым" "туннельным" путям в пространственно-подобном сечении пространства событий. Если в обычной статистической механике равновесный статистический интеграл по путям берется между всеми полевыми конфигурациями, периодичными с мнимовременным периодом, равным обратной температуре [15], что и соответствует состоянию равновесия, то в том, что касается вычисления статистической суммы числа различных состояний "живого" мира и меры информации, содержащейся в нем, то сумма путей должна вычисляться не по всевозможным полевым конфигурациям, а по конкретным взаимоотношениям "частиц материи", выраженным в действиях переходов между ними. Возникает граф (бинарных?) отношений, который надо понимать не как комбинаторный предел, а как конкретную, фиксированную судьбой реализацию фейнмановского графа. Прототипом этой Меры информации в уже существующей квантовой теории поля можно принять логарифм фейнмановского интеграла (точнее, конечной суммы) "междудействия" всех существующих частиц по евклидовой области. Определяющие информационную стоимость "невероятности" текущих глобальных состояния системы могут быть определены (как в теории надежности) детерминантами матрицы интенсивностей переходов между ее глобальными состояниями, с отрицательными величинами для самопереходов на главной диагонали, если соответствующую выделенному состоянию строку и столбец заменить единицами, вероятности заменить вещественными экспонентами действия, и этот частный детерминант поделить на глобальный детерминант общей нормирующей матрицы. Аналог большой статистической суммы и вакуумного нормировочного "пузыря" из фермионного и бозонного детерминантов теории поля, но не по всем комбинаторным вакуумным диаграммам, а по конкретной действительности. "Вакуум — весь мир". "Знаешь вакуум — знаешь теорию". Большую

² Конец дополнения "Аналитические представления, произведения распределений" в книге [12].

статистическую сумму и следует считать от природы конечной и заданной величиной. А она получается в терминах действия. Эволюция же протекает по пути сохранения информации, это должно быть эквивалентно принципу наименьшего действия. Возникает возможность описать фазовые переходы при охлаждении как накопление "памяти" со сжатием "файлов" освобождающим ячейки памяти. Отсюда и "стрела времени", и такие еще странно-сти физического мира, как биология с разумом наверху

Если символы в "гроссбухе" являются элементами однородного пространства (в котором транзитивно действует некая единая группа), то элементарный символ сведется к булевой единице, отмечающей присутствие чего-то... А все информативные предикаты сведутся к положению символа в "гроссбухе", положение характеризуется только числом (полу)шагов действия между символами (вспомним о дискретности наблюдаемых квантовых состояний компактных систем). Символы уложены не в строку, как двоичный код для машины Тьюринга, а в вершины многосвязного графа. То есть "костяшки на счетах у Бога" нанизаны не на общий одномерный стержень, как в речи или тексте, а пронизаны множеством спутанных "эйнштейнглментом" струн.

Итак:

1. "Господь Бог не играет в кости", но при этом владеет только конечной информацией.

2. "Голографический принцип" — вся физическая информация в причинно-связной мировой области имеет конечную меру и сохраняется по этой мере.

3. Информация скорее всего известна Богу в виде графа (матрицы) "действительных" расстояний (отношений) между элементарными идентификаторами, или между различимыми состояниями мира в целом. За различимость отвечает мера действия по пути. Эта картина сопоставима фейнмановским диаграммам, поскольку вероятности, амплитуды и представления групп Ли являются экспонентами действия, а информация связана с действием непосредственно после логарифмирования этих экспонент. Чтобы информация оказалась конечной без произвола, надо попробовать обойтись конкретным (полу)целочисленным действием.

Для обоснования следует перечислить аморфный список литературы, содержащей не слишком прозрачные аналогии [11–14]. Превращение чистого состояния в матрицу плотности в процедуре измерения описано Зуреком в [5], изложено в [6]. Вывод о сохранении информации получается, если всякий раз и измерительный прибор, и наблюдателя включать в замкнутую физическую систему, спрятанную под общим унитарным оператором эволюции — важно не вынимать и не толкать обратно информацию. Неисповедимы пути квантовой системы — не может прибавиться знаний у Бога (ведь и мы в Его ведении).

Список литературы

1. Менский М Б *УФН* **170** 631 (2000)
2. Фейнман Р *УФН* **149** 671 (1986)
3. Килин С Я *УФН* **169** 507 (1999)
4. Садбери А *Квантовая механика и физика элементарных частиц* Гл. 5 (М.: Мир, 1989)
5. Zurek W H *Phys. Rev. D* **26** 1862 (1982)
6. Менский М Б *УФН* **168** 1017 (1998)
7. Бремерман Г *Распределения, комплексные переменные и преобразование Фурье* (М.: Мир, 1968)
8. Bekenstein J D *Lett. Nuovo Cimento* **11** 467 (1974)
9. Kaloper N, Linde A *Phys. Rev. D* **60** 103509 (1999)
10. Климонтович Ю Л *УФН* **169** 443 (1999)
11. Charline G *Phys. Rep.* **315** 95 (1999)

12. Petersen C, Soberberg B, in *Local Search in Combinatorial Optimization* (Eds E Aats, J K Lenstra) (New York: John Wiley & Sons, 1997) см. главу "Artificial neural networks"
13. Фок В В, Чехов Л О *ТМФ* **120** 511 (1999); Чехов Л О *УМН* **54** (6) 109 (1999)
14. Литинский Л Б *ТМФ* **118** (1) 133 (1999)
15. Фейнман Р П, Хибс А *Квантовая механика и интегралы по траекториям* (М.: Мир, 1968)
16. Wilczek F *Phys. Today* **52** (1) 11 (1999)

О проблеме выбора альтернативы в квантовом измерении

А.Д. Панов

В последнее время динамично развиваются два новых тесно связанных направления исследований в квантовой теории — квантовая информатика и теория декогеренции. Сейчас ряд основных представлений, принадлежащих этому кругу вопросов, можно считать относительно устоявшимся. Достаточно популярное, но и без излишних упрощений, введение в эту новую область дается в первых трех разделах статьи М.Б. Менского [1]. Четвертый раздел статьи посвящен роли сознания наблюдателя в квантовом измерении и, по нашему мнению, является в достаточной мере дискуссионным.

Рассматриваемая проблема состоит в следующем. Можно попытаться описать процесс измерения, опираясь исключительно на унитарную эволюцию в соответствии с уравнением Шрёдингера, как это впервые предложил сделать Эверетт [2]. Последовательное применение уравнения Шрёдингера к замкнутой системе, включающей наблюдаемый микроробъект и макроскопическое окружение (приборы и др.), приводит к суперпозиции макроскопически различных квантовых состояний, описывающих альтернативные исходы измерения. Уважаемый автор замечает, что такое описание не дает никакого механизма селекции одной из альтернатив. Так как в реальном опыте каждый экспериментатор имеет дело лишь с одной альтернативой, такое описание измерения рассматривается как неполное — в нем не хватает механизма выбора альтернативы. Далее автор замечает, что теория, которая могла бы описывать такой механизм, обязательно должна включать сознание и предлагает включить его в теорию как элемент, призванный логически замкнуть полностью квантовое описание измерения. Сознание наделяется *функцией* выбора одной из альтернатив из когерентной суперпозиции различных возможных исходов измерения, приводя к согласию предсказаний теории и опыта. Насколько мы понимаем, это означает, что сознание выводится за рамки динамического описания и предстает как явный *метатеоретический* элемент для интерпретации теории. Поскольку существует иная точка зрения на роль и место сознания в квантовом измерении и ввиду важности обсуждаемого вопроса, мы считаем необходимым представить ее в этом письме.

Известен ряд работ, в которых рассматривается последовательно квантовое описание выбора альтернативы

А.Д. Панов. Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельщина, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, 119899 Москва, Российская Федерация
Тел. (095) 939-58-75, 939-38-08
E-mail: a.panov@relcom.ru

Статья поступила 3 октября 2000 г.

сознанием наблюдателя в квантовом измерении. Так, центральным моментом классической работы Эверетта [2] было именно явное включение сознания в квантовое описание. Более того, Эверетт прямо утверждает, что такое описание *предсказывает*, что сознание наблюдателя *должно* делать выбор одной из альтернатив. Современное освещение этой проблематики можно найти в работе Цее [3] и ссылках в ней. Покажем, как выбор альтернативы сознанием в квантовом измерении можно описать исключительно в рамках унитарной квантовой эволюции.

Рассмотрим систему, состоящую из следующих четырех частей: S — измеряемая микросистема; D — прибор (в состав прибора могут быть включены также все каналы связи, необходимые для того, чтобы довести информацию до сознания наблюдателя); M — сознание наблюдателя или мозг наблюдателя; E — макроскопическое окружение (может в себя включать сколь угодно большой фрагмент Вселенной, *но только не весь остаток Вселенной*). Объединенную систему $U = S \otimes D \otimes M \otimes E$ считаем изолированной и совершающей унитарную эволюцию во времени. Пусть начальное состояние системы S перед измерением есть

$$|\Psi_0\rangle = (\alpha|S_a\rangle + \beta|S_b\rangle)|D_0\rangle|M_0\rangle|E_0\rangle,$$

где $|D_0\rangle$, $|M_0\rangle$, $|E_0\rangle$ — состояние прибора, сознания и окружения до измерения, а состояния микросистемы $|S_a\rangle$ и $|S_b\rangle$ взаимно ортогональны. Для простоты будем считать, что микросистема взаимодействует только с прибором, прибор взаимодействует только с сознанием наблюдателя, сознание наблюдателя взаимодействует с окружением. Предполагаем также, что все взаимодействия устроены подобно неразрушающим измерениям.

Процесс измерения можно представить в виде трех последовательных этапов. Первый этап — взаимодействие микросистемы с прибором, которое приводит к корреляции показаний прибора и состояния микросистемы:

$$\begin{aligned} &(\alpha|S_a\rangle + \beta|S_b\rangle)|D_0\rangle|M_0\rangle|E_0\rangle \rightarrow \\ &\rightarrow (\alpha|S_a\rangle|D_a\rangle + \beta|S_b\rangle|D_b\rangle)|M_0\rangle|E_0\rangle. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь $|D_a\rangle$ и $|D_b\rangle$ представляют показания прибора, отвечающие состояниям $|S_a\rangle$ и $|S_b\rangle$ микросистемы. Второй этап — воздействие прибора на сознание наблюдателя, которое приводит к корреляции состояния сознания и показаний прибора:

$$\begin{aligned} &(\alpha|S_a\rangle|D_a\rangle + \beta|S_b\rangle|D_b\rangle)|M_0\rangle|E_0\rangle \rightarrow \\ &\rightarrow (\alpha|S_a\rangle|D_a\rangle|M_a\rangle + \beta|S_b\rangle|D_b\rangle|M_b\rangle)|E_0\rangle. \end{aligned} \quad (2)$$

Третий этап — взаимодействие сознания наблюдателя с окружением, которое приводит к корреляции состояния сознания и окружения:

$$\begin{aligned} &(\alpha|S_a\rangle|D_a\rangle|M_a\rangle + \beta|S_b\rangle|D_b\rangle|M_b\rangle)|E_0\rangle \rightarrow \\ &\rightarrow (\alpha|S_a\rangle|D_a\rangle|M_a\rangle|E_a\rangle + \beta|S_b\rangle|D_b\rangle|M_b\rangle|E_b\rangle). \end{aligned} \quad (3)$$

Этот этап является существенным, так как именно здесь проявляется классичность сознания. Состояние сознания, как классического объекта, должно быстро декогерировать из-за взаимодействия с окружением.

Наблюдатель непосредственно воспринимает только свои собственные субъективные ощущения, т. е. состояние своего сознания. Поэтому субъективные ощущения наблю-

дателя определяются редуцированной матрицей плотности его сознания, получающейся из полной функции состояния объединенной системы усреднением по внешним по отношению к сознанию степеням свободы. После этапа (1) состояние сознания, очевидно, не изменяется по сравнению с исходным. После этапа (2) сознание более не описывается единственным вектором состояния. Предполагая, что для различающихся макросостояний $\langle D_a|D_b\rangle \cong 0$, из правой части уравнения (2) легко найти редуцированную матрицу плотности сознания наблюдателя:

$$\rho_M^{(2)} = |\alpha|^2|M_a\rangle\langle M_a| + |\beta|^2|M_b\rangle\langle M_b|. \quad (4)$$

Состояние сознания декогерирует из-за возникновения корреляций между состояниями прибора и состояниями сознания. Предполагая $\langle E_a|E_b\rangle \cong 0$, из правой части уравнения (3) нетрудно найти состояние сознания по окончании третьего шага эволюции, и, как легко убедиться, $\rho_M^{(3)} = \rho_M^{(2)}$. Этап (3) ничего не меняет в сознании наблюдателя, все существенные изменения происходят уже на этапе (2).

Состояние сознания (4) следует интерпретировать следующим образом. Так как $|M_a\rangle$ и $|M_b\rangle$ есть классические макросостояния, то состояние (4) является полностью декогерентным классическим распределением вероятностей, подобным распределению $\rho(p, q)$ статистической механики. Это, в свою очередь, означает, во-первых, что система M оказывается в одном, и только одном, из двух классических состояний, во-вторых, вероятности оказаться в них есть $|\alpha|^2$ и $|\beta|^2$, как и предсказывает проекционный постулат. Точно так же как в статистической механике нет проблемы выбора одного из классических состояний (p, q) для состояния, заданного распределением $\rho(p, q)$, так и здесь проблемы выбора состояния сознания уже нет. Наблюдатель воспринимает себя в одном из классических состояний: либо $|M_a\rangle$, либо $|M_b\rangle$, т. е. выбор сделан. Наличие функции распределения показывает только, что *заранее* нельзя сказать, в каком состоянии сознание окажется. Более того, следуя Эверетту можно констатировать, что формализм *предсказывает* — в момент возникновения корреляций состояний прибора и сознания наблюдатель субъективно делает выбор альтернативы. Заметим, что точное уравнение Шрёдингера дает неселективное описание эволюции, поэтому никакого более детального описания выбора одной из альтернатив требовать нельзя; для этого просто нет подходящего языка.

Таким образом, выбор наблюдателя полностью описан в рамках унитарной эволюции. Несмотря на то, что вся объединенная система U совершает унитарную эволюцию и не делает никакого выбора, сознание наблюдателя субъективно такой выбор делает, и *механизм выбора явно описан*.

Может показаться, что такой подход может привести к полному решению проблемы квантового измерения. Однако, по нашему мнению, это не так. Решение проблемы измерения действительно дано в рамках введенной выше модели, но при более внимательном рассмотрении сама модель в некоторых отношениях должна быть признана несостоятельной. Мы рассматривали объединенную систему U как изолированную и совершающую унитарную эволюцию, что, в действительности, даже приближенно не может быть принято для макроскопической системы рассмотренного типа. Окружение E , будучи макроскопическим и классическим, должно чрезвычайно эффективно декогерировать при взаимодействии с "окружением этого окружения", что приведет к декогеренции и всего состояния объединенной системы U . Поэтому мы должны признать, что система U принципиально является открытой и не может совершать унитарную эволюцию.

Модель можно попытаться улучшить, объявив формально, что окружение E представляет собой весь остаток Вселенной. Тогда система U становится действительно замкнутой, так как Вселенная не имеет окружения. Однако это недопустимо по следующей причине. Если мы объявили систему E остатком Вселенной, то система U представляет уже Вселенную целиком. Однако хорошо известно [4], что для точного квантового состояния Вселенной не существует понятия внешнего времени, и эволюция квантового состояния Вселенной не есть унитарная эволюция во времени. Таким образом, опять унитарное описание эволюции системы U как эволюции во времени становится невозможным.

Можно представить себе два пути (две программы), на которых указанная трудность может быть устранена. Это либо (А) создание последовательно квантового описания Вселенной вместе с явным описанием генерации внутреннего феноменологического времени, указанием явного способа описания подсистем Вселенной и указанием способа связи этих подсистем с внутренним временем, т.е. создание полной квантовой космологии. Либо (В) учет всей внешней по отношению к рассматриваемой объединенной квантовой системе U Вселенной феноменологически: с использованием спонтанной редукции волновой функции, с помощью положительно-определенных операторов, с помощью ограниченного интеграла по путям или каким-то другим способом. Наиболее последовательным представляется путь (А), однако в настоящее время неясно, выполнима ли такая программа хотя бы в принципе. Путь (В), как замечает уважаемый автор статьи [1], не приводит к логическим трудностям и парадоксам. Однако, по нашему мнению, он может вызывать неудовлетворенность на том основании, что наряду с фундаментальным динамическим законом (уравнение Шрёдингера) в теорию вводится феноменология, которая имеет столь же фундаментальный характер, как и сами динамические законы. Эта феноменология фундаментальна в том смысле, что она должна считаться в принципе ниоткуда невыводимой (в отличие, например, от термодинамики, которая выводима из статистической физики). Она должна была бы выводиться из квантовой космологии, но в программе (В) квантовая космология оказывается существенно за рамками теории. Проблема усугубляется еще и тем (и это, по нашему мнению, является логической трудностью программы (В)), что возможны разные способы введения такой феноменологии, при этом не доказано, что все способы эквивалентны. На наш взгляд, проблема квантового измерения как раз и заключается в существовании дилеммы: либо квантовая теория измерения есть на самом деле квантовая космология, либо она содержит неустранимую и не вполне однозначную феноменологию.

Мы показали, что динамическое описание выбора альтернативы сознанием возможно в рамках рассмотренной выше унитарной модели. Хотя модель, как было отмечено, и может вызывать серьезные возражения, возможность такого описания, по нашему мнению, является определенным указанием на то, что сознание наблюдателя *a priori* не следует выводить за рамки унитарной квантовой динамики и поддерживает принцип психофизического параллелизма на квантовом уровне.

Список литературы

1. Менский М Б *УФН* **170** 631 (2000)
2. Everett H III *Rev. Mod. Phys.* **29** 454 (1957)
3. Zeh H D, quant-ph/9908084; *Found. Phys. Lett.* **13** 221 (2000)
4. DeWitt B S *Phys. Rev.* **160** 1113 (1967)

Теория измерений и редукция волнового пакета

Г.Б. Лесовик

В *УФН* **170** (6) 631 (2000) была опубликована интересная статья М.Б. Менского, в которой затронут ряд вопросов, связанных с теорией измерения в квантовой механике, в частности обсуждается возможность интерпретации функции сознания в терминах квантовых измерений.

Уже сам факт написания и публикации такой статьи мне кажется очень важным и отрадным явлением. Как справедливо отмечалось в редакционном предисловии к статье М.Б. Менского (далее для краткости М.Б.М.), в советской (да и в российской) научной литературе обсуждения вопросов философского порядка, связанных с теорией измерения, почти не было. Такой крайний прагматизм советской (теперь российской) школы теоретической физики, возможно навеянный идеологическим давлением многих десятилетий, к сожалению, в сильной степени сохраняется и по сей день. Искусственное ограничение свободы мысли всегда дает свои "плоды". Сегодняшнее отставание нашего "теоретического цеха" по части идейной базы квантовых компьютеров (алгоритмов и т.п.) и в ряде аналогичных вопросов (и это при очень высоком, в общем, уровне школ теоретической физики и математики!) — еще одна иллюстрация этого правила. Некоторым утешением может служить лишь то, что по части именно прагматических идей (например, как можно построить квантовый компьютер "в железе") дела обстоят уже заметно лучше.

Возвращаясь теперь собственно к содержанию статьи М.Б.М., хотелось бы высказаться более детально по поводу некоторых вопросов, в которых автор данного письма не вполне согласен с мнением М.Б.М.

Суть моего письма сводится к следующему. Я излагаю (весьма сжато) свою точку зрения (которая является проверяемой гипотезой) на теорию измерения, которая подразумевает, что квантовая теория является полной теорией и, в частности, может (в принципе) полностью описать взаимодействие "квантовых" объектов с "классическими", "редукцию волнового пакета" и т.д. При этом источником "вероятности", присущей квантовой механике + стандартной интерпретации, предлагается считать детектор, который можно рассматривать как резервуар с особыми свойствами (см. более детально ниже). Именно степени свободы резервуара играют по нашей версии роль скрытых переменных Боба.

Тем самым обсуждавшийся М.Б.М. выбор альтернативы, возникающей в результате квантового измерения, осуществляется резервуаром. Фактически мы утверждаем, что квантовая вероятность имеет ту же самую природу, что и классическая, возникающая, например, при подбрасывании монеты. При этом, если в классическом случае исчезающе мала мера пространства начальных состояний, приводящих к падению монеты точно на ребро, то в квантовом случае этому должна соответствовать малость меры начальных состояний, приводящих к состоянию типа "шрёдингеровского кота" (ШК) — суперпозиции макроско-

Г.Б. Лесовик. Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау РАН, 117334 Москва, ул. Косыгина 2, Российская Федерация
Тел. (095) 137-32-44. Факс (095) 938-20-77
E-mail: lesovik@landau.ac.ru

Статья поступила 17 декабря 2000 г.

пически различных состояний. Заметим, что в многомировой интерпретации Эверетта III (поддержанной М.Б. Менским) как раз предполагается обратное, а именно, что начальные состояния, приводящие к суперпозициям различных макроскопических состояний, являются типичными. Так это или нет с точки зрения существующей квантовой теории можно проверить совершенно конкретными вычислениями стандартными методами (см. ниже). Такая проверка выглядит на сегодняшний день делом вполне возможным, хотя технически и не вполне тривиальным, и скорее всего в ближайшем будущем этот вопрос будет разрешен. Одной из целей моего письма собственно и является попытка внятно сформулировать, какие же именно величины следует вычислить, чтобы полнее и недвусмысленнее разрешить вопрос об измерениях в квантовой механике. Такие формулировки изложены чуть ниже в конце письма, а пока я изложу некоторые соображения, выходящие за пределы собственно физики, в связи с проблемами, возникающими при *любом* ответе на технический вопрос о редукции волнового пакета в рамках имеющейся квантовой теории.

Вариант 1. Удастся продемонстрировать редукцию волнового пакета.

Итак, если мы предположим сначала, несколько опережая события, мою точку зрения справедливой и доказанной, а квантовую теорию — полной и, более того, детерминистической в своей основе теорией, мы оказываемся фактически в ситуации прошлого или даже более раннего столетия, когда классическая механика считалась теоретически и экспериментально устоявшейся теорией, вполне удовлетворительно описывающей физический мир. Это приводит нас к следующему вопросу. Если современная физика в состоянии, в принципе, описать весь материальный мир, в том числе и человека с его нервной системой, генетическим механизмом и т.д., то и его психика, "свобода воли" и вообще все проявления также есть вполне однозначный результат унитарной эволюции нашей метагалактики, определенный начальными условиями "Большого Взрыва", быть может, слегка поправленный, например, наличием черных дыр. Вряд ли найдется большое число сторонников такой точки зрения, не разделяет ее и автор письма. Как можно примирить, и возможно ли это в принципе, детерминистическую физику, например, с субъективным ощущением "свободы выбора"? Выход мог бы быть в рассмотрении некоторого явления, которое пока не присутствует в стандартной квантовой теории. В восточной философии, например, кроме концепций Сознания и Материи, есть концепция Связника (Фохат), обеспечивающего взаимовлияние. Каким бы трансцендентным ни было это явление, должен иметься некоторый эффект, который экспериментально может быть обнаружен, например, как неустранимый слабый сбой фазы. Такого сорта идеи обсуждались, в частности, Б.Б. Кадомцевым, который вводил понятие внешнего шума как источника декогерентности. Р. Пенроуз в книге *Тени Разума* такое предполагаемое явление называет "фактором X". Единственное отличие в мнении автора настоящего письма от идей вышеупомянутых известных физиков в том, что существование подобного явления, как мне кажется, никак не следует из имеющейся теории и вовсе не необходимо для разрешения вопросов теории измерения (в соответствии с предположением (1) см. выше).

Как бы то ни было, если такой внешний шум существует, то он может быть как-то количественно описан, на основе экспериментальных данных. Практическое создание достаточно больших устройств, эволюционирующих в течение заметного времени унитарно (квантовых компьютеров),

возможно позволит экспериментально определить, с какой же точностью эволюция известной и, с точки зрения современной физики, полностью описанной физической системы может быть унитарной.

Скорее всего, эффект "внешнего шума" настолько слаб, что на фоне обычных известных причин сбоя фазы его будет невозможно достоверно выделить, но ответ — за будущим экспериментом.

Вариант 2. Не удастся продемонстрировать редукцию волнового пакета.

Обсуждавшийся М.Б. Менским выбор альтернативы, возникающей в результате квантового измерения, является ключевым вопросом, беспокоившим многих. Особенно ярко по этому поводу высказывался Эйнштейн. Если считать, что такой выбор действительно происходит неким совершенно мистическим образом, так что механизм выбора нигде более в физике не возникал бы (а именно так дело выглядит в стандартной интерпретации), то вполне естественно считать (см. М.Б.М., также Р. Пенроуз), что именно "в этом месте" физика естественно соприкасается с вопросами к физике не относящимися, например с вопросом о природе сознания. Именно такая ситуация имела бы место, если технически продемонстрировать редукцию волнового пакета не просто не удалось бы, а, более того, стало бы вполне ясно, что это невозможно в рамках существующей теории.

Тем не менее, не отрицая в принципе такой возможности, мы хотим отметить, что это была бы довольно странная ситуация, когда главный механизм этого явления скрыто присутствует как главная и единственная причина редукции волновых пакетов с непредсказуемым исходом и нигде более себя не проявляет, не поддается количественным характеристикам и т.д. Более вероятным кажется существование вполне описываемого физикой (по крайней мере экспериментальной) механизма (см. выше).

Обсудим теперь более детально вопрос о теоретической (технической) демонстрации возможности редукции волнового пакета. Сначала заметим, что если удастся технически продемонстрировать редукцию волнового пакета как результат унитарной эволюции системы частицы + резервуар при заданном состоянии системы, результат может быть только однозначным, т.е. какая альтернатива реализована, должно быть ясно из вида конечной волновой функции. Это, однако, непростая задача. Фактически требуется определить исход измерения как функции бесконечного числа переменных, описывающих детектор (резервуар). То, что только бесконечное число переменных, имеющееся, например, в пространственно неограниченном резервуаре с мягкими модами (типа фотонов) может обеспечить редукцию волнового пакета, довольно очевидно. Поэтому ясно, что, например численный счет может дать только некоторые указания на соответствующую тенденцию (что, впрочем, тоже очень полезно).

Другой путь — это вычислять некоторые усредненные по состоянию резервуара величины. Рассмотрим этот вопрос на примере задачи о частице в двухъямном потенциале, связанной с некоторым резервуаром. Такая задача ранее изучалась многими авторами, она же оказалась хорошей моделью для изучения процессов декогерентности в физически реализованных квантовых битах (кубитах). В силу хорошей изученности эта модель может послужить и для выяснения интересующего нас вопроса, так как при определенных условиях на резервуар она может рассматриваться как модель детектора.

В такой задаче обычно изучается разность вероятностей того, что частица находится в левой, либо в правой яме $P(t) = P_L(t) - P_R(t)$, усредненная по состоянию резервуара.

Изучения такой величины, однако, недостаточно для наших целей. Скажем, обращение ее в нуль на бесконечности могло бы происходить разными способами. Можно себе представить, что в зависимости от состояния резервуара либо $P_L(\infty) = 1$, либо $P_R(\infty) = 1$, как мы и предполагаем. Однако не исключен и вариант $P_{L(R)}(\infty) = 1/2$, или существует какая-то функция распределения для вероятностей, а конечные состояния есть состояния типа шрёдингеровского кота, т.е. когерентные суперпозиции левых и правых. Поэтому было бы интересно изучить, например такую величину:

$$M = P_L(t)P_R(t), \quad (1)$$

усредненную по состояниям резервуара. Такая величина обращается в нуль уже тогда и только тогда, когда состояния типа ШК исключены (или мера таких состояний, нормированная на полную меру, обращается в нуль).

Представим теперь дополнительный, быть может несколько неожиданный, аргумент в пользу того, что именно резервуар отвечает за исход измерения. Если бы кроме волновой функции частицы на исход измерения влияло бы состояние резервуара, естественно было бы предположить, как такое влияние снижало бы точность правила "квадрата волновой функции" и делало бы его законом только в идеализированной ситуации.

Именно так и обстоит дело, и такое явление известно как фликкер-шум (эффект мерцания) или, как говорят для краткости, "1/f-шум" (по типичной зависимости спектра от частоты). Такой шум возникает во всех неравновесных процессах, а процесс последовательного изготовления и последующего детектирования большого числа частиц в одном из состояний является одним из примеров такого процесса. Более или менее общепринятая точка зрения на природу фликкер-шума такова. В каждой системе, помимо детектируемых частиц (например, это электроны в проводнике), имеется большое количество других, взаимодействующих с этими частицами степеней свободы (фононы, фотоны, примеси). Эти степени свободы и обеспечивают своеобразное "мерцание" во времени, в том числе на очень больших временных масштабах. Это приводит к тому, что попытка измерять как можно дольше для большей точности наталкивается на быстро растущую по времени ошибку $\delta N \propto t$ (в случае отклонения спектральной плотности от 1/f степень времени соответственно изменится). При этом, конечно, не все степени свободы, дающие вклад во фликкер-шум, обязательно существенны для редукции волнового пакета, но степени свободы детектора (или резервуара, ответственного за редукцию волнового пакета) обязательно дадут вклад в шум.

Обсудим теперь другой сложный вопрос теории измерения: скорость редукции волнового пакета. Эта проблема особенно ярко возникает в эксперименте Эйнштейна–Подольского–Розена (ЭПР). С точки зрения теории такая же проблема возникает и при описании обычного измерения координаты одной частицы. Действительно, в последнем случае после регистрации частицы в одной точке мы уверены, что в других точках этого не произойдет: в этом случае, опять же, налицо нелокальное изменение априорных вероятностей. И в том, и в другом случае, если считать время, необходимое для измерения, конечным и не зависящим от вида волновых пакетов, приходится предполагать, что редукция волнового пакета (локализация волновой функции) происходит со скоростью превышающей скорость света. Вообще говоря, это обстоятельство не противоречит релятивистской инвариантности и не дает возможности передавать информацию быстрее скорости света

(это обстоятельство подробно обсуждалось многими авторами).

Тем не менее и в этом вопросе имеется явная необходимость продемонстрировать технически, как это происходит. По аналогии с (1) следовало бы изучить разновременной коррелятор

$$\langle P_L(t)P_R(t + \tau) \rangle. \quad (2)$$

Качественно редукцию волнового пакета можно представить как процесс туннелирования. Такая аналогия особенно уместна, например, для случая расщепления волнового пакета, падающего через одномерный проводник на сочленение с двумя другими (сочленение в форме буквы Y). Предположим, прошедшая частица может быть зарегистрирована в одном из проводников детекторами, расположенными на большом расстоянии от сочленения. После регистрации одним из детекторов регистрация в другом может произойти только в результате сбоя. В процессе запутывания степеней свободы первого детектора за степени свободы частицы волновой пакет, расположенный возле второго детектора, должен начать уменьшаться по абсолютной величине и, быть может, как-то деформироваться. Тем не менее эта деформация не может привести к буквальному стягиванию (движению) этого волнового пакета к первому — это противоречило бы динамике распространения и вероятностям детектирования, вычисленным стандартным образом. Остается предполагать, что происходит процесс типа туннелирования, при котором волновой пакет (из канала с несработавшим детектором) не появляется ни в каких промежуточных положениях, а просто (за некоторое время) исчезает.

В заключение подчеркнем основной лейтмотив этого письма. Многие сложные вопросы теории измерения в квантовой механике могут быть переведены с уровня качественных рассуждений и аргументов "верю — не верю" на уровень конкретной теоретической и экспериментальной проверки определенных предположений, гипотез и теорий. Формулировка таких *проверяемых гипотез* — уже некоторый шаг вперед, и выше была сделана попытка представить некоторые из них.

В частности, мы предположили, что:

а) резервуар есть источник квантовомеханической вероятностности, и имеется прямая аналогия между классическими и квантовыми "случайными" процессами;

б) степени свободы детектора играют роль "скрытых переменных";

в) фликкер-шум можно рассматривать как свидетельство определяющей роли резервуара во всех видах шумов, в том числе дробового, возникающего, как принято считать (при низких температурах), из-за "квантовомеханической вероятностности";

г) квантовая механика локальна в том смысле, что все фундаментальные законы локальны, а "нелокальность", связанная со сверхсветовой редукцией волнового пакета, есть явление (качественно похожее на туннелирование), которое следует из этих локальных и лоренц-инвариантных законов (уравнений);

д) должно существовать некоторое экспериментально обнаружимое явление ("фактор X" Пенроуза, "внешний шум" Кадомцева), которое указывает на неустранимую неунитарность эволюции квантовой системы.

Если перечисленные выше гипотезы а)–г) верны, существование такого явления не следует из теории, и аргументом в пользу его возможного наличия может служить лишь уверенность в том, что Вселенная вместе с живущим в ней человеком не является "квантовым компьютером" со строго определенным поведением.

Импликативно-логическая природа квантовых корреляций

И.З. Цехмистро

Хорошо известные "мистерии" квантовой механики сводятся к двум вопросам: 1) почему вероятности первичны в описании физической реальности; 2) почему эти вероятности в так называемом чистом квантовом состоянии удивительным образом скоррелированы, что находит подтверждение в ЭПР-экспериментах.

Очевидно, что независимых ответов на эти вопросы быть не может потому, что прояснение природы квантовых вероятностей одновременно должно прояснить и природу их скоррелированности. И того, и другого можно достичь, идя испытанным путем — распространив общий релятивистский подход в физике на предельно общие понятия "элемент" и "множество". Релятивизация понятий "элемент" и "множество" означает, что в конечном счете мир существует как неделимая целостность, а не множество (каких-либо элементов)¹. Это в точности соответствует квантовой картине мира. Поскольку квантовые системы в так называемом чистом состоянии не могут быть полностью разложены на множества элементов, мы вынуждены описывать их в терминах потенциальных возможностей выделения таких элементов и в терминах соответствующих вероятностей, представляющих теперь их (т.е. квантовых систем) объективно-реальную структуру.

С другой стороны, это квантовое свойство мира как неделимой целостности ответственно за импликативно-логические свойства структуры им же порожаемых потенциальных возможностей квантовых систем, что нашло строгое подтверждение в квантово-корреляционных экспериментах. *Редукция волновой функции и квантово-корреляционные эффекты являются тривиальным следствием импликативно-логической организации потенциальных возможностей в квантовых системах. Эти эффекты имеют не физически-причинную и не материальную, но реляционную природу и порождаются изменениями (вследствие измерения или физического взаимодействия) в структуре отношений взаимодополнительных сторон реальности. Одна из этих сторон выражает актуально существующую структуру системы как реального (и физически верифицируемого), но лишь относительно выделяемого множества (относительно выделяемого в силу конечной неразложимости системы на элементы и множества). Другая сторона системы — не менее реальная — выражает наборы потенциальных возможностей, объективно прису-*

щих системе и порожаемых тем же свойством неразложимости ее на элементы и множества. В этом свойстве конечной неразложимости системы на элементы и множества проявляется третий и наиболее глубокий аспект физической реальности — квантовое свойство мира как неделимой единицы. Именно это свойство управляет миром потенциальных возможностей квантовой системы по законам логической импликации в зависимости от того, что происходит в ее актуально-множественной конфигурации под влиянием измерения (или физического взаимодействия).

1. Общий реляционный подход

Саймон Кохен [1] на симпозиуме по основаниям физики в Сингапуре высказал предположение, что преодоление парадоксов квантовой физики лежит на путях развития того общего реляционного подхода, который потребовался в свое время для преодоления парадоксов релятивистской физики (лоренцевского сокращения длин и т.п.). Интересно сравнить специальную теорию относительности (СТО) с квантовой механикой (КМ) и посмотреть, насколько успешным может быть приложение общего реляционного подхода к проблемам интерпретации квантовой теории.

С этой целью постараемся проследить, что потребовалось в интерпретации специальной теории относительности для уяснения кинематической природы релятивистских эффектов и устранения на этой основе их кажущейся парадоксальности. Одновременно будем задаваться вопросом, что подобного может быть найдено в основаниях квантовой физики, способного пролить свет на ее парадоксы. Хорошо известно, что уже в первые годы дискуссий с Эйнштейном Бор постоянно подчеркивал черты аналогии в этих столь разных теориях.

Целесообразно начать с уяснения ключевых положений в основаниях теории относительности.

Одновременно будем обращаться к основаниям квантовой механики и попытаемся проследить более детально ту общую, подмеченную классиками новой физики, аналогию СТО и КМ буквально по узловым пунктам их содержания, каждый раз спрашивая себя, что подобного каждому из выделяемых пунктов в теории относительности может быть поставлено в соответствие в квантовой механике. Поразительно, что при столь существенном *содержательном* различии двух этих фундаментальных теорий современной физики в их основаниях действительно прослеживаются замечательные черты сходства и аналогии (табл. 1). На основании этой таблицы можно сделать промежуточные выводы:

1. В сущности все, что мы познаем в природе — это *отношения*, и всякое наше знание сводится в конечном счете к знанию отношений. Всевозможные "элементы"- "объекты", которые мы вводим в картину природы, в конце концов тоже оказываются лишь некоторыми "узлами" в отношениях и на сети отношений. Или же эти элементы-объекты, первоначально вводимые как неопределяемые, в конечном счете находят свою определенность через всю совокупность отношений с ними связанных (идея бутстрапа и т.п.). В этом и состоит суть *реляционного* подхода в физике.

2. Принятие квантовой теории означает, что в конечном счете мир существует как неделимая целостность, а не множество. Это удивительное квантовое свойство мира как неделимой единицы порождает импликативную структуру потенциальных возможностей квантовых систем.

Итак, несомненно, предлагаемый реляционный подход позволяет увидеть известные черты сходства и даже аналогии в основаниях теории относительности и квантовой

¹ Термин "целостность" чрезвычайно избит, однако в квантовом контексте он имеет совершенно точный, хотя и непривычный смысл: целое как *не-множество*, т.е. такая предельная степень единства, которая просто означает конечную неразложимость состояния на элементы и множества, а значит, и неприменимость этих терминов к его описанию. Только такое предельное свойство целостности или единства может быть естественным источником свойства несепабельности (буквально, как раз неотделимости) частиц, описываемых единой нефакторизуемой ψ -функцией.

И.З. Цехмистро. Харьковский Национальный университет им. В.Н. Каразина
61077 Харьков-77, пл. Свободы 4, Украина
E-mail: Ivan.Z.Tsekhmistro@univer.kharkov.ua

Статья поступила 22 января 2001 г.

Таблица 1. Сравнение специальной теории относительности и квантовой механики (черты сходства и аналогии)

Специальная теория относительности	Квантовая механика
1. Формальный источник теории: введение константы c как предельной скорости распространения физических сигналов, накладывающей известные ограничения на измерительные процедуры по установлению пространственно-временных отношений.	1. Формальный источник теории: введение константы $\hbar$ как предельно малой порции величины действия, накладывающей известные ограничения на физические операции по детализации состояний физической системы.
2. Отказ от абсолютного пространства и времени.	2. Отказ от универсальности и абсолютности понятий множества (и элемент) в описании физической реальности, поскольку верификация (проверка) этих понятий в эксперименте ограничена конечным значением $\hbar$.
3. Релятивизация понятий "одновременность", "длина", "время" и др. на базе осознания их операциональной природы и учета конечной скорости распространения физических сигналов в физических процедурах по их определению.	3. Релятивизация понятий "отдельный объект", "элемент", "множество элементов" в описании физической реальности на базе осознания их операциональной природы и учета конечного значения константы $\hbar$ в физических процедурах по их определению.
4. Появление нового инварианта — четырехмерного интервала в пространстве-времени.	4. Появление ячейки $\hbar^N$ (здесь N — число измерений системы) как абсолютного инварианта в фазовом пространстве системы.
5. Предмет описания в СТО: пространственно-временные отношения на множествах объектов, обладающих конечной массой покоя. Конкретное сечение ("срез") пространственно-временных отношений задается определенным выбором системы отсчета.	5. Предмет описания в КМ: наборы потенциальных возможностей системы, возникающих в силу неполной разложимости ее на элементы и множества. Конкретный набор потенциальных возможностей системы задается ее актуально-множественной структурой (определенное значение импульса, энергии, суммарного спина, координаты или разности координат, составляющих систему частиц и т.п.), которая, в свою очередь, формируется конкретными макроскопическими условиями существования системы.
6. В переходах от одной системы отсчета к другой релятивистский инвариант — четырехмерный пространственно-временной интервал — выступает в качестве своеобразного "управляющего фактора", задающего точные соотношения различных сечений-проекции единого пространства-времени в зависимости от выбора системы отсчета.	6. В переходах от одного заданного макроскопическими условиями актуально-множественного состояния системы к другому в результате акта измерения или физического взаимодействия ячейка $\hbar^N$, всегда оставаясь целой и неделимой, действует как "управляющий фактор", преобразующий одни наборы потенциальных возможностей в другие сообразно изменениям, происходящим в актуально-множественной структуре системы.
7. В итоге, лоренцевское преобразование механических величин оказывается чисто <i>кинематическим</i> эффектом, обусловленным <i>изменениями в пространственно-временных отношениях</i> , порождаемым переходом от одной системы отсчета к другой.	7. В итоге, редукция ψ -функции и квантово-корреляционные эффекты имеют <i>не физически-причинную</i> и вообще не субстанциальную, а чисто <i>реляционную</i> природу: эти эффекты оказываются естественным следствием изменений в структуре отношений взаимно-дополнительных сторон — макроскопически заданной актуально-множественной стороны и неразрывно связанной с нею и вполне определенной для нее системы потенциальных возможностей, порождаемых физической невозможностью исчерпывающего разложения системы на элементы и множества.

Таблица 2. Сравнение специальной теории относительности и квантовой механики (существенные различия)

Специальная теория относительности	Квантовая механика
1. Полный детерминизм.	1. Принципиально статистический характер.
2. Континуальность математического аппарата и непрерывность преобразований от одной системы отсчета к другой: скорость движения систем отсчета изменяется в пределах континуума от 0 до c .	2. Неустраняемая взаимная дополнительность двух сторон в состоянии квантовой системы: а) актуально-множественная, заданная макроскопическими условиями и физически-верифицируемая сторона; б) соответствующий этой множественной стороне набор потенциальных возможностей в структуре квантовой системы, управляемый присущим ей феноменом квантовой целостности, что наглядно и ярко проявляется в редукции волновой функции и квантово-корреляционных эффектах.

механики. Вместе с тем, имеется, конечно, и существенное различие в основах двух этих областей знания, которое нужно здесь подчеркнуть (табл. 2)

2. Природа вероятностей в квантовой механике

Специфика КМ заслуживает отдельного рассмотрения: актуально-множественное и потенциально-возможное — это

две противоположные, хотя и взаимно дополняющие друг друга и неразрывно связанные стороны мира. Отсюда — неустраняемые скачки и разрывы во взаимопереходах от одной стороны к другой:

а) переход от потенциально возможного к актуально-множественному — всегда скачок в силу противоположности между потенциальным и реальным;

б) ввиду этого физик "руками рвет" ψ -функцию в акте редукции, но, разумеется, только потому, что стрелка прибора после взаимодействия уже указывает на соответствующий скачок (и разрыв) в самой природе, в состоянии системы. Этот скачок и его результат изначально и неустранимо вероятностен.

Главное отличие КМ от СТО состоит в принципиально вероятностном поведении квантовых объектов, в наличии неустраняемых наборов потенциальных возможностей, входящих в структуру квантовой системы. Что же является объективным источником вероятностного поведения квантовых систем?

В принципе, существуют два способа получить вероятностное поведение объекта. Первый — классический — у нас имеется вполне определенный *отдельный объект*, но ведущий себя вероятностным образом, скажем, кубик с шестью гранями. Бросаем его достаточно большое число раз и получаем — в зависимости от правильности кубика, расположения его центра тяжести и т.п. — то или иное распределение вероятностей выпадения различных его граней. Здесь требуется обычная — колмогоровская — теория вероятностей. При определении вероятности выпадения двух или большего числа случайных событий (граней) их вероятности просто складываются, ибо это вероятности различных, никак не связанных между собой независимых событий.

Но этот подход как раз и является недостаточным в области квантовых явлений. Он не дает ответа на главные вопросы: почему вероятности, представленные ψ -функцией, во-первых, принципиально неустраняемы, а во-вторых, будучи даже распределенными по всему бесконечному пространству, интерферируемы, т.е. взаимно согласованы и взаимно скоррелированы, что ярко проявляется в квантово-корреляционных эффектах? Иными словами: почему в квантовой механике складываются амплитуды вероятностей, а не сами вероятности?

Второй — истинно квантовый — способ получения вероятностного описания является принципиально другим. В силу принимаемого тезиса об относительности и неуниверсальности понятия элемент (или множество) в описании физической реальности и фундаментального свойства целостности и конечной неразложимости мира на элементы и множества у нас *нет* кубика-объекта как *отдельного элемента* (события), хотя бы и ведущего себя случайным образом. Имеются лишь определенные *возможности* выделения (формирования) в эксперименте той или другой величины — характеристики объекта, но всегда лишь относительно выделяемой из целостной и в конечном счете неразложимой на элементы и множества физической ситуации. Какая-то одна величина проявляется лишь за счет стирания (растворения, исчезновения) других канонически сопряженных, но некоммутирующих с нею величин. Так что они никогда не существуют как совместно определенные: ведь квантового объекта нет как отдельного и вполне определенного элемента (вроде кубика), а есть *только вероятности* формирования тех или иных его характеристик-величин, задаваемые определенными макроусловиями. Причем, поскольку возникающие здесь вероятности относятся к возможностям выделения тех или иных элементов из целостного и единого, в конечном счете неразложимого на элементы состояния, то они оказываются естественным образом взаимосогласованными и взаимно скоррелированными самим этим фактом принадлежности их единому и неделимому целостному состоянию. Это означает, что интерференцию вероятностей можно наблюдать *только* для вероятностей присущих *одному* событию, а не для двух разных событий, формируемых в

двух разных экспериментах или в разных актах воспроизведения события в одном эксперименте.

Действительно, как предсказывает теория и показывает эксперимент Р.Л. Пфлигора и Л. Мандела [2], фотон интерферирует только с самим собою и никогда не интерферирует с другим фотоном, рожденным в другом акте испускания.

Итак, в силу фундаментального свойства целостности и неделимости (формально выражаемого ячейкой h^N в фазовом пространстве системы) квантовая система *не* есть набор (множество) каких-то сущностей, а есть система *отношений* между макроскопически задаваемыми (макроскопически обусловленными) элементами (например, определенное значение импульса, координаты, суммарного спина и т.п.) и — в силу неполной разложимости системы на элементы и множества — присущими этому состоянию наборами потенциальных возможностей выделения (определения) соответствующих сопряженных величин (элементов). Так, двухчастичной системе с суммарным спином равным 0 присущи определенные наборы потенциальных возможностей значений спинов составляющих ее частиц, каждый из которых, в свою очередь, предстает как суперпозиция вероятностей определенных значений проекций спинов по трем взаимно перпендикулярным осям. Важно подчеркнуть, что взаимная дополнительность актуально-множественной (но лишь относительно выделяемой) стороны и соответствующего ей набора потенциальных возможностей имеет в своей основе фундаментальное свойство целостности и конечной неделимости и неразложимости квантовой системы на какие-либо множества элементов.

Завершая сопоставление СТО и КМ, у нас есть основания сказать, что действительно все парадоксы квантовой физики требуют развития того подхода, который оказался необходимым для преодоления парадоксов релятивистской физики: как только было осознано, что релятивистские эффекты имеют кинематическую природу и, следовательно, происходят из изменений в отношениях, вызываемых переходом от одной системы отсчета к другой, так сразу все стало на свои места, и релятивистская механика перестала быть "непонятной".

Аналогичный шаг требуется в развитии оснований квантовой физики с тем существенным различием, что если релятивистская механика оперирует наборами пространственно-временных отношений, которые могут быть актуально заданными и совместно сосуществующими (с точки зрения актуально выбранных и сосуществующих систем отсчета), то квантовая механика описывает взаимные отношения в некотором смысле противоположных и взаимно дополнительных миров: актуально заданного физическими условиями наблюдения (или измерения) множественного мира и, — в силу неполной сводимости его к элементам и множествам, — потенциально возможного и вероятностного мира как неотделимого от первого и неразрывно связанного с ним. Такими *отношениями* двух этих миров, или, вернее, двух этих противоположных сторон одного и того же единого и, в конечном счете, неделимого и неразложимого на множества мира и исчерпываются все мистерии квантовой механики.

Предельно детализированное (чистое) состояние физической системы, заданное ее ψ -функцией, соответствует определенной конфигурации ее актуально множественного аспекта, задаваемого макроскопическими условиями и представленными определенными значениями наблюдаемых. Оно включает в себя суперпозицию ее возможных состояний (или проявлений) в мире элементов и множеств — так называемые потенциальные возможности квантовой системы. Любые актуально осуществляющиеся изменения

в реальном множественном аспекте системы (например, в результате произведенного измерения, физического взаимодействия и т.п.), реализующие те или иные потенциальные возможности исходного состояния и создающие новые значения наблюдаемых, естественно, создают новую картину *взаимного соотношения* актуально множественного аспекта системы и соответствующего этому новому состоянию нового набора ее потенциальных возможностей. Это и означает, что старая волновая функция должна быть зачеркнута и взамен нее записана новая, соответствующая новому значению наблюдаемой (или новой актуализировавшейся наблюдаемой).

С этой точки зрения и редукция волновой функции, и квантово-корреляционные эффекты, конечно, не есть физические процессы, а есть именно изменения во взаимных *отношениях* двух сторон в состояниях физических систем: актуально-множественной (и физически верифицируемой) стороны и в силу неполной разложимости любого физического состояния на множества и элементы, набора потенциальных возможностей системы, представленного для каждого конкретного максимально детализированного состояния ее соответствующей волновой функцией. И ничего больше. Думается, что так понимаемая концепция целостности в интерпретации квантовой механики в состоянии удовлетворить самого хладнокровного и трезво мыслящего физика. Единственное, что здесь требуется, это развитие боровской феноменологической концепции целостности до ее логического конца — отказа от применимости понятия множества там, где это понятие объективно теряет всякую свою осмысленную применимость.

Тогда "акт смотря" наблюдателя и "осознание" им показаний прибора есть только способ приведения наблюдателем своего знания о состоянии системы в соответствие с объективно происшедшими в структуре внутренних отношений изменениями. Ответственность за редукцию потенциальных возможностей и квантово-корреляционные эффекты в системе падает на феномен целостности системы как на объективную основу взаимной связанности и взаимной соотношенности актуально множественного аспекта системы и соответствующего ему набора потенциальных возможностей в ней.

3. Квантовый холизм как теория имплицативных структур вероятностей в квантовых системах

Сама возможность формулировки знаменитых неравенств Белла, которые привели к экспериментальной проверке квантово-корреляционных эффектов, предполагает, что физические объекты существуют как реальные элементы и множества, вполне определенные, существуют как бы сами по себе. Поэтому и свойства, в отношении которых формулируется какое-то из неравенств Белла, характеризуют объект *сам по себе*. Соответственно в множестве таких объектов исключается какая-либо связь между ними, что находит свое отражение в свойствах "локальности" и "сепарабельности" множеств таких объектов. Это означает, что система, для которой справедливы неравенства Белла, может и должна быть исчерпывающим образом представлена как актуальное *множество* некоторых объектов-элементов, которые характеризуются актуально присущими им *самим по себе* соответствующими свойствами.

Поясним сказанное выводом какого-либо примера неравенств Белла (см. [3]). Пусть имеется объект, характеризующийся тремя величинами A, B, C , принимающими значения ± 1 . Если мы исходим из того, что каждая частица существует как вполне определенный элемент множества таких объектов, то это означает, что каждая из частиц актуально обладает вполне определенными одновременными значе-

ниями всех этих трех параметров A, B, C . Обозначим случай, когда A принимает значение $+1$ через A^+ и A^- , если A принимает значение -1 . Аналогично и для B, C . Тогда для любого ансамбля таких частиц с произвольными значениями ABC будет справедливо равенство:

$$N(A^+B^-) = N(A^+B^-C^+) + N(A^+B^-C^-),$$

где N — число частиц с соответствующими свойствами. Выпишем и другие подобные равенства:

$$N(B^-C^+) = N(A^+B^-C^+) + N(A^-B^-C^+),$$

$$N(A^+C^-) = N(A^+B^+C^-) + N(A^+B^-C^-).$$

Из двух последних равенств, очевидно, следует

$$N(A^+B^-) \leq N(B^-C^+) + N(A^+C^-).$$

Это и есть одно из неравенств Белла. Подчеркнем еще раз, — и это очевидно на данном примере вывода неравенств Белла, — сама возможность их формулировки предполагает, что объекты, в отношении которых справедливы эти неравенства, существуют как вполне определенные элементы, актуально заданные и актуально характеризующиеся указанными свойствами, сами по себе. В множествах таких объектов исключается какая-либо связь и зависимость между ними. На таком абстрактном множестве актуально заданных и независимых один от другого объектов исчерпывающим образом реализуется алгебра наблюдаемых с коммутативностью, что составляет существо математической схемы классической механики (см. [4]).

Вместо величин A, B, C можно говорить о трех взаимно перпендикулярных проекциях спинов частиц, которые для фотонов как раз и принимают значения $+1$ или -1 . Остается в реальном эксперименте проверить такие неравенства Белла на реальном распределении значений проекций спинов фотонов, рождающихся в результате распада некоторого единого квантового состояния по схеме известного ЭПР-эксперимента. Такие эксперименты были поставлены и они опровергли неравенства Белла! Тем самым эксперимент возвращает нас к такому представлению, согласно которому свойства, описываемые некоммутирующими операторами, суть *отношения* к приборам и не "существуют сами по себе" [3].

Предположим, мы имеем квантовую систему, состоящую из двух частиц, с общим спином, равным нулю. Система находится в предельно детализированном так называемом чистом квантовом состоянии, описываемом единой волновой функцией. Поскольку в этом состоянии система далее недетализируема (т.е. неразложима на элементы и множества) и существует как неделимое целое, мы вынуждены говорить о частицах, из которых она состоит, в терминах вероятностей их (частиц) выделения. Это означает, что структура системы в этом состоянии сформирована наборами потенциальных возможностей состояний ее отдельных частиц. Ни одно из этих состояний не является реальным, и в то же время каждое из них как возможное вносит свой вклад в вероятностную структуру общей системы. Актуально и в конечном счете здесь существуют только наборы вероятностей выделения таких сущностей, как первая или вторая частица, но не сами по себе эти частицы.

Существование мира не как множества, но как в конечном счете неделимой *целостности*, является наиболее значимым, наиболее реальным и достоверным объективным фактом. Этот факт выражает в некотором смысле абсолютную реальность.

Эта целостность формально вводится в квантовую механику через посредство постоянной Планка $\hbar$. Для

каждой физической системы эта целостность проявляется через существование в ее фазовом пространстве неделимой ячейки h^N . Поскольку пространство любого реального физического опыта-измерения всегда оказывается только частным сечением фазового пространства, то существование всегда целой и неделимой ячейки h^N в фазовом пространстве делает, очевидно, недостижимым получение точных и исчерпывающих результатов любого реального физического измерения. Целостность и конечная неразложимость квантовой системы на элементы и множества, задаваемая ячейкой h^N , вынуждает нас описывать ее структуру в терминах вероятностей разложения ее на те или иные элементы в эксперименте.

Отсюда следует знаменательный вывод: вероятности являются первичными (и неустраняемыми) в наблюдении. Но на самом деле по отношению к принципиально ненаблюдаемому лишь логически постижимому и абсолютно объективному феномену целостности эти вероятности являются вторичными, поскольку они проистекают из него (из свойства конечной неразложимости квантовых систем на элементы и множества).

Фундаментальное свойство целостности квантовой реальности, являясь источником потенциальных возможностей квантовых систем, в то же самое время обеспечивает их взаимную согласованность и скоррелированность. Измерение проекции спина одной из частиц после распада исходной системы одновременно означает преобразование ψ -функции для второй частицы в состояние с соответствующим (и строго определенным) ожидаемым результатом измерения аналогичной проекции спина у этой (второй) частицы, вытекающим из исходного значения суммарного спина и полученного на первой фазе эксперимента определенного значения проекции спина для первой частицы.

Эта квантовая корреляция состояний частиц (демонстрируемая в ЭПР-эксперименте) является тривиальным следствием имплицитивно-логической организации вероятностной структуры исходного чистого состояния первичной общей системы, проистекающей из квантового свойства ее целостности и конечной неразложимости на множества каких бы то ни было элементов. В то же самое время эти квантовые корреляции, которые появляются в ответ на наш свободный выбор в измерении той или другой наблюдаемой, демонстрируют замечательную управляющую роль феномена целостности системы. Это указывает на то, что даже после распада системы частицы не являются абсолютно отделенными одна от другой. В субквантовом уровне обе частицы, выделившиеся из исходного состояния, и весь мир вместе с ними существуют как неделимая единица².

В приведенном обсуждении в целях большей наглядности использовано полуклассическое приближение, опирающееся на понятия фазового пространства системы и ячейки h^N в фазовом пространстве системы. Существующие сегодня математические формализмы квантовой механики далеко ушли от подобных представлений. Однако полученные здесь принципиальные выводы об *относительности* предельно абстрактного понятия множества в описании квантовых систем, свойстве целостности и конечной неразложимости квантовых систем на элементы и множества как источнике неустраняемых вероятностей в их описании полностью сохраняют свое значение, являясь абсолютно независимыми от выбора той или иной математической схемы

квантовой механики. В равной же мере это касается и имплицитивно-логической организации этих вероятностей в чистых квантовых состояниях и вытекающем из нее имплицитивно-логическом "механизме" квантовокорреляционных эффектов.

В наиболее общем виде математическую схему квантовой механики можно представить как физическую реализацию одной из алгебр со свойством некоммутативности [4]. В этом случае из одного только абстрактного свойства некоммутативности наблюдаемых (и некоммутативности соответствующих операторов) естественным путем получают все характерные черты квантовой механики: первичность и неустраняемость вероятностного описания наблюдаемых, соотношения неопределенностей, дискретность значений наблюдаемых, наблюдаемые, одновременно неизмеримые и одновременно не имеющие определенных значений (а значит, и свойство дополненности) и т.д. И что замечательно, идя таким путем, мы получаем, наконец, некоторую постоянную, значение которой находят из опыта (это и есть постоянная Планка!). В этом, весьма общем, алгебраическом представлении математическая схема квантовой механики отличается от соответствующей математической схемы классической механики единственным свойством — свойством некоммутативности. Следовательно, можно сказать, что вся специфика квантовой механики в формально-алгебраическом смысле кроется в свойстве некоммутативности.

Что же скрывается за таким предельно общим свойством, как свойство некоммутативности некоторых элементов: $AB - BA \neq 0$, или что то же самое: $AB - BA = C$ (здесь C — некоторая постоянная).

Тут можно сказать следующее.

Первое: свойство некоммутативности вводит некоторую неустраняемую, незлиминируемую или невыбираемую с помощью каких-либо множественных "механизмов" (с помощью дополнительных множеств, "скрытых параметров" и т.п.) связь между элементами A и B . В противном случае эти элементы перешли бы в разряд классических объектов, описываемых коммутативной алгеброй.

Второе: эта связь является настолько тесной, что элементы A и B не только неотделимы один от другого, но сама их индивидуальность именно как элементов неизбежно приобретает *относительный* смысл, так что приращение одному из них смысла актуально существующего и актуально определенного элемента достигается лишь за счет полной потери всякой определенности относительно сопряженного элемента.

Это означает, что свойство некоммутативности необходимо влечет за собой неустраняемо вероятностное описание соответствующих элементов, так что в общем случае некоммутирующие элементы $AB - BA \neq 0$ должны описываться вероятностным образом: в терминах вероятностей (их получения или определения).

Третье: ненулевой коммутатор, являясь в определенных условиях константой, обеспечивает нормировку, взаимную согласованность и взаимную скоррелированность вероятностных распределений для возможных значений некоммутирующих элементов A и B . То есть выполняет ту же функцию "управляющего фактора" в организации взаимной скоррелированности вероятностей для элементов A и B , которая была нами рассмотрена на примере ячейки h^N в полуклассическом приближении.

В том же случае, когда в ходе дальнейших измерений в эксперименте элементы A и B приобретают вполне определенные значения, происходит разрушение чистого квантового состояния и между этими элементами теряется специфически квантовая связь (обозначаемая как "недели-

² Другим примером имплицитивных структур являются структуры мышления и сознания, которые управляют феноменом целостности, присущим психике или сознанию. Отсюда многочисленные апелляции к сознанию в поисках решения квантовых парадоксов.

мость", "неотделимость", "несепарабельность" и т.п.). В результате такие элементы переходят в разряд классических описываемых объектов, т.е. становятся элементами коммутативной алгебры или "белловскими объектами", на множествах которых выполняются неравенства Белла.

4. Квантовый холизм и многомировая интерпретация квантовой механики

Будущие историки физики в качестве примера наиболее экзотического способа интерпретации квантовой механики, несомненно, назовут многомировую интерпретацию Эверетта–Уилера. По уровню присущей ей фантастичности эта интерпретация значительно превосходит концепции абсолютно упругого эфира, предшествовавшие появлению СТО, но необходимость в которых тот час же отпала (вместе с эфиром), как только Эйнштейн обратился к операциональному анализу реальных пространственно-временных отношений в духе реляционного подхода. То же самое ожидает и многомировую интерпретацию КМ, нынешняя популярность которой объясняется ее крайней наглядностью. Эта концепция является настолько последовательно наглядной, что в ней центральная проблема, ради которой она была изобретена — проблема редукции волновой функции — решается путем элементарного отказа от самого феномена редукции волновой функции! А именно, принимается, что функция, описывающая некоторое исходное состояние, представленное суперпозицией:

$$\Psi(x) = c_1\psi_1(x) + c_2\psi_2(x) + \dots + c_k\psi_k(x),$$

сразу описывает множество актуально существующих бесконечных миров, подобных нашему. То есть каждый из членов этой суперпозиции имеет по своему собственному целому миру, включающему и измеряемую подсистему, и приборы, и наблюдателя: словом, всем сестрам по серьгам и каждому члену суперпозиции по своей вселенной. Строго говоря, эту концепцию следует именовать концепцией много- (или даже бесконечно-) мировых ветвящихся вселенных, ибо ведь каждый акт измерения рождает свой пласт новых вселенных, соответствующих новой суперпозиции получаемой новой ψ -функции и т.д. *ad absurdum*.

Поскольку каждый раз имеется столько миров, сколько альтернатив результата измерения, и все миры одинаково реальны, то проблема измерения сводится просто к вопросу о "попадании" данного наблюдателя в "свой", т.е. реально наблюдаемый им мир.

В итоге, хотя в этой концепции нет вопроса о "механизме" редукции волновой функции, зато в ней появляется вопрос: "Как данный наблюдатель оказался именно в данном эвереттовском мире?" Слабость этой концепции тот час же проявляется в полной мере, как только мы попытаемся на ее основе объяснить квантово-корреляционные эксперименты. Для этого придется "размазать" с определенными вероятностными весами каждого из наблюдателей по всем мирам, представленным в исходной суперпозиции (в том числе в определенных случаях и по бесконечному множеству их!). При этом в ЭПР-эксперименте с задержкой выбора измерения нужно объяснить, каким образом наблюдатель в Париже, "въехавший" в результате произвольно выбранного им измерения в мир с определенной X -проекцией спина измеряемой частицы, умудрился при этом уже явно после разлета частиц "перевести стрелки въезда" для "спаренного" с ним наблюдателя в Токио только в одном и строго определенном направлении — в мир с вполне определенной X -проекцией спина токийского фотона, предзаданной полученным в Париже результатом измерения.

Никто из многочисленных поклонников Эверетта–Уилера так и не показал до сих пор, что же происходит с наблюдателями, если уж, по их мнению, миры предзаданы и с мирами ничего не происходит.

Короче говоря, проблема состоит в том, что хотя миры все и предзаданы, но наблюдатель в Париже по своему усмотрению и уже явно после разлета частиц ЭПР-пары может переориентировать свою аппаратуру и померить X -, Y - или Z -проекцию спина своего фотона и соответственно "въехать" в мир с определенным значением X -, Y - или Z -проекции спина, мгновенно переводят тем самым "стрелки" для наблюдателя в Токио, находящегося в фатальной и необъяснимой зависимости от произвола в Париже. В конце концов, как показано в статье М.Б. Менского [5], и эта концепция, как и любая другая из существующих, в конечном счете нуждается в апелляции к сознанию наблюдателя. Сам М.Б. Менский чрезвычайно упростил неустрашимую апелляцию в интерпретации квантовой механики к сознанию, просто отождествив сознание с... выбором одной из альтернатив результата измерения! Следует честно признать, что неизбежность обращения к сознанию в любой мало-мальски последовательной и развитой интерпретации квантовой механики, сама по себе является замечательным историческим фактом. Достаточно вспомнить в связи с этим остающиеся во многом ценными и актуальными обращения к этой теме Н. Бора, В. Паули, Дж. фон Неймана, Э. Шрёдингера, Д. Бома и многих других. Все это свидетельствует, что между квантовой механикой и функционированием сознания, несомненно, имеется глубокая связь. Это позволяет М.Б. Менскому говорить о двух нерешенных фундаментальных проблемах: 1) как происходит выбор одной альтернативы в квантовом измерении и 2) как функционирует сознание. На самом деле, первая проблема поставлена им нечетко. Квантовая теория является изначально и фундаментально вероятностной. С этим на сегодня уже все смирились. А в рамках квантового холизма она является изначально вероятностной в силу относительности понятия "элемент" в описании физической реальности. Поэтому ответ на первый вопрос в формулировке М.Б. Менского был и остается стандартно квантовомеханическим: "выбор альтернативы в квантовом измерении является случайным". И, как мы теперь понимаем, неустраимо и фундаментально или изначально случайным.

Далее М.Б. Менский, чувствуя причастность проблемы сознания к проблеме измерения, решает вопрос об их взаимосвязи достаточно прямолинейно, он просто объясняет, что выбор альтернативы — это и есть работа сознания, понимая под выбором *осознание* того, что же происходит в реальности. Однако этот путь уже был пройден Дж. фон Нейманом в гораздо более тонком и изящном анализе, когда он показал, что последовательный анализ проблемы измерения неизбежно ведет к сознанию (именно акту осознания показания прибора) как последней инстанции, на которую падает ответственность за *редукцию* волновой функции [6].

Подчеркнем существенное различие между позицией Дж. фон Неймана и М.Б. Менского. Дж. фон Нейман, очевидно, принимает стандартную копенгагенскую интерпретацию квантовой механики с исходной и (как теперь это подтверждено всей историей развития квантовой механики) *п р а в л ь н о й* идеей первичности вероятностей. Поэтому у него нет того вопроса, который ставит М.Б. Менский: "1) как происходит выбор одной альтернативы при квантовом измерении". Ответ очевиден — случайно (с теми или иными весовыми коэффициентами для разных альтернатив).

Реальным является совершенно другой вопрос, обсуждаемый Дж. фон Нейманом: что происходит в акте измерения с остальными членами суперпозиции исходного состояния, т.е. с другими альтернативами. Это и есть знаменитый вопрос о редукции Ψ -функции: каков механизм редукции Ψ -функции? Поэтому правильная постановка вопросов поднятых М.Б. Менским звучит иначе: 1) каков механизм редукции волновой функции? Или — что то же самое — в более общем виде: каков механизм квантово-корреляционных эффектов (например, в ЭПР-экспериментах)? 2) Этот вопрос остается тем же: как функционирует сознание?

Ответ на эти вопросы содержится в концепции имплицативной структуры вероятностей, представленных нефакторизуемой волновой функцией. А именно, в суперпозиции

$$\Psi(x) = c_1\psi_1(x) + c_2\psi_2(x) + \dots + c_k\psi_k(x)$$

все члены суперпозиции как потенциально возможные состояния являются одинаково реальными. Поскольку их источником является свойство конечной неделимости и неразложимости исходного состояния, то в силу этого потенциальные возможности изначально формируются как взаимно связанные и взаимно согласованные, что формально находит отражение в условии нормировки коэффициентов при членах суперпозиции.

Теперь в акте измерения случайная реализация одного из возможных состояний означает, что коэффициент для этого состояния скачком переходит в единицу с мгновенным свертыванием к нулю коэффициентов при всех остальных членах суперпозиции в силу имплицативной связи всего их набора. Это и есть процесс редукции волновой функции, имплицативно-логический по своей природе как развертывающийся в мире потенциальных возможностей, но столь же объективно реальный, как и обычный причинный процесс в мире физических тел и вещей. Точно так же и механизм квантовых корреляций, имеет не физически-причинную, а имплицативно-логическую природу.

Таким образом, следует признать, что в самом фундаменте природы, в существенно квантовой области, там, где понятия элемент и множество теряют свою применимость, на смену им приходит мир потенциальных возможностей выделения тех или иных элементов и множеств. В этом мире потенциальных возможностей вступает в действие и соответствующий их природе механизм имплицативно-логической связи и зависимости, что в частности и проявляется в эффектах редукции Ψ -функции, квантовых корреляциях по типу ЭПР-связи и т.п. Как только мы это признаем, так тот час же становится ясной и связь квантовой механики с сознанием, о чем уже немало сказано.

Действительно, все структуры сознания имеют в своей основе как раз имплицативные (а не причинные) связи и зависимости. Это хорошо известно психологам. Например, создатель генетической психологии Ж. Пиже в основу своей концепции логико-алгебраических структур интеллекта положил идею имплицативных связей и зависимостей в сознании. По его мнению, "ни одно из понятий, выражающих физическую причинность... не применимо к пониманию связей в мире сознания" [7, с. 19]. Таким образом, хотя от проблемы квантового измерения до проблемы сознания дистанция огромная, но проблема квантового измерения вскрывает тот новый и непривычный аспект связей и зависимостей в природе, который по своим свойствам напоминает свойства сознания и без наличия которого в природе невозможным было бы и появление сознания. Однако прояснение всех этих обстоятельств — дело будущего.

5. Выводы

Основная идея квантовой механики, будь то в форме постоянной Планка или требования некоммутативности некоторых наблюдаемых, должна быть доведена до осознания относительности и неуниверсальности абстрактного понятия *множества* в описании квантовых систем.

Это влечет необходимо вероятностное описание квантовых систем: раз квантовая система в конечном счете неразложима на какие-либо элементы и множества, мы по необходимости вынуждены описывать ее в терминах вероятностей лишь относительного выделения в ее структуре тех или иных элементов и множеств. Возникающие таким путем потенциальные возможности квантовых систем в актуально заданной физической ситуации и отображающие их вероятности имеют совершенно реальный онтологический статус, как и другие виды физически верифицируемых отношений.

Таким образом, квантовые потенциальные возможности (и вероятности как их мера) не менее объективно реальны, чем та привычная нам реальность, которую мы отождествляем с непосредственно физически верифицируемыми элементами, частицами и т.п. Как некогда заметил А. Эйнштейн, "поле для современного физика столь же реально, как и стул, на котором он сидит".

Это замечание полностью сохраняет свой смысл и по отношению к квантовому полю, описываемому нефакторизуемой волновой функцией, т.е. по отношению к распределению вероятностей, присущих чистому квантовому состоянию. Действительно, это распределение вероятностей столь же объективно-реально и столь же неподатливо-противодействующее нам, как и стул, стены комнаты и все другое физически-непосредственно противостоящее нам.

Однако эти вероятности, представленные в чистом квантовом состоянии, обладают еще замечательным свойством, которое невозможно представить в мире стульев или тому подобных макроскопических вещей: в чистом квантовом состоянии вероятности выделения тех или иных элементов из предельно детализированного состояния системы оказываются взаимно скоординированными и взаимно скоррелированными феноменом целостности системы и образуют *имплицативно-логическую структуру*, управляемую этим феноменом целостности.

Эта идея имплицативно-логической организации вероятностной структуры квантовой системы в так называемом чистом (недетализируемом) состоянии и управляющая роль феномена целостности (в перераспределении вероятностей в зависимости от характера того или иного развития реального эксперимента) находится в хорошем согласии с результатами квантово-корреляционных экспериментов (например, экспериментов А. Аспекта, Н. Гизина и др.).

Список литературы

1. Kochan S "A new interpretation of quantum mechanics", in *Symposium of the Foundations of Modern Physics: 50 Years of the Einstein-Podolsky-Rosen Gedankenexperiment* (Singapore: World Scientific, 1985) p. 151
2. Pilegor R L, Mandel L J. *Opt. Soc. Am.* **58** 946 (1968)
3. Гриб А А *УФН* **142** 619 (1984)
4. Пастур Л А *Математическая схема квантовой механики* (Харьков: Харьковский госуниверситет, 1985)
5. Менский М Б *УФН* **170** 631 (2000)
6. Нейман фон Дж *Математические основы квантовой механики* (М.: Наука, 1964)
7. Пиже Ж *Избранные психологические труды* (М.: 1969)

Квантовое измерение: декогеренция и сознание

М.Б. Менский

Письма в редакцию, пришедшие как отклики на мою статью в *УФН* [1] и опубликованные в настоящем номере, различны по характеру и целям. Кроме замечаний по поводу статьи, в них содержатся собственные предложения авторов писем по развитию квантовой теории. О том, насколько ценны эти предложения, читатель может судить сам. В настоящей заметке я прокомментирую лишь замечания в мой адрес, сделанные в трех из этих писем. Эти замечания касаются вопросов, которые сложны сами по себе или изложены в моей статье слишком кратко. Надеюсь, что непростые темы, поднятые в этой статье, получают при этом дополнительное освещение. Чтобы не снижать уровня дискуссии, я позволю себе не отвечать здесь на замечания, сделанные в остальных письмах, на которые, по моему мнению, достаточно ясный ответ имеется в самой статье.

Статья [1] четко делится на две части, которые совершенно различны по характеру обсуждаемого предмета. В первой (большей) части рассматриваются особенности запутанных (entangled) состояний квантовой системы и связанное с этими особенностями явление декогеренции. Теория декогеренции позволяет объяснить, как происходит квантовое измерение. Она разрешает парадоксы квантовой механики, если ограничиться рассмотрением лишь открытых систем и не пытаться найти механизм выбора (селекции) одного из возможных альтернативных результатов измерения. Этого вполне достаточно для ответов на все вопросы, которые можно корректно задать в рамках физики. С точки зрения физика вопрос о селекции можно считать некорректным или излишним, а любая реальная система является открытой, абсолютно замкнута лишь вся Вселенная.

Во второй части статьи рассматриваются концептуальные проблемы, возникающие, если выйти за рамки физики и задаться вопросом о механизме селекции. На этом, более глубоком уровне анализа, парадоксальность квантовой механики сохраняется, а описание квантового измерения оказывается невозможным без явного рассмотрения сознания наблюдателя. Для решения проблемы селекции на этом уровне рассмотрения предлагается отождествить два понятия: 1) селекция альтернативы квантового измерения и 2) осознание наблюдателем результата измерения.

Как и следовало ожидать, наиболее интересные вопросы и возражения возникли в связи со второй частью статьи, посвященной селекции и сознанию. Ниже (в пункте 2) я отвечу на эти вопросы. Но начну с недоразумения, которое возникло в одном из писем в связи с теорией декогеренции. Надеюсь, что при этом удастся сделать более ясными некоторые положения, которые в силу недостатка места не получили в статье [1] подробного разъяснения.

1. В письме А.И. Липкина [2] статья [1] критикуется за то, что она якобы основана на постулате редукции фон Неймана. В самом начале письма Липкин пишет:

"Ключевым, исходным и очевидным понятием для идущей от Дж. Неймана традиции, которой придерживается и М.Б. Менский, является постулат о существовании при измерении в квантовой механике явления "редукции волновой функции".

Это, конечно, заблуждение. Для тех концепций квантового измерения, которые обсуждаются в моей статье (это явление декогеренции и эвереттовские миры), постулат редукции не является не только ключевым, но даже необходимым. Наоборот, эти концепции, и прежде всего декогеренция, позволяют избавиться от необходимости постулировать редукцию состояния (коллапс волновой функции). Именно для этого они и были предложены.

Липкин пытается исключить постулат редукции, опираясь на весьма странное (если не сказать больше) утверждение, что "ВСЮ измерительную часть, включающую процедуру сравнения с эталоном, включить в теорию ПРИНЦИПИАЛЬНО НЕЛЬЗЯ. Мы утверждаем, что процедура измерения содержит часть (сравнение с эталоном), которая не может быть описана в рамках того раздела физики, в котором она используется (скорее всего, верно еще более жесткое утверждение: процедура сравнения с эталоном не может без остатка рассматриваться никаким разделом физики в принципе). Аналогичным качеством обладают и процедуры приготовления". (Выделение прописными буквами и полужирным шрифтом введено автором этого высказывания — А.И. Липкиным.)

Этот странный тезис и другие формальные построения Липкина, такие, как его "ядро раздела науки", нисколько не проясняют вопрос о редукции (коллапсе). Этого, впрочем, и не требуется, так как теория декогеренции обеспечивает ясный физический анализ этого вопроса.

Теория декогеренции и, в частности, обсуждение ее в моей статье показывает, как самый обычный квантово-механический анализ измеряемой системы, взаимодействующей со своим окружением (прибором или измеряющей средой), приводит к тем же предсказаниям, которые можно получить, применяя постулат редукции. При этом не предполагается, что редукция (коллапс) волновой функции реально происходит. Декогеренция объясняет, почему постулат редукции приводит к правильным предсказаниям, хотя на самом деле никакой редукции не бывает.

Ключевым в этом объяснении является понятие запутанного (entangled) состояния. В статье [1] нет полной теории декогеренции, а лишь излагается ее главная идея и даются ссылки на работы, содержащие более детальное изложение. Читатель, желающий познакомиться с деталями, должен обратиться к цитированной литературе. В частности, отношение между постулатом редукции и декогеренцией детально обсуждается в [3] и [4] (первая из этих работ процитирована в письме Липкина, но также, по видимому, понята превратно).

Хотя теория декогеренции дает физическое объяснение того, что феноменологически описывается редукцией, сам постулат редукции при этом не лишается смысла, но меняется его статус. Редукция остается простым и изящным вычислительным приемом в том случае, если требуется рассчитать поведение системы после того, как произошло измерение, и при этом известно, какой результат дало это измерение. В частности, картина редукции полезна для расчета результатов двух или нескольких измерений, следующих друг за другом.

Таким образом, возникает возможность описывать квантовое измерение на различных уровнях: постулат редукции дает феноменологический уровень описания, теория декогеренции — более глубокий "микрофизический" уровень. Существует еще более глубокий уровень

М.Б. Менский. Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, 117924 Москва, Ленинский просп. 53, Российская Федерация
E-mail: mensky@sci.lebedev.ru

Статья поступила 24 января 2001 г.

описания квантового измерения, выводящий, однако, за рамки физики и включающий сознание. Речь о нем пойдет ниже. Одной из целей статьи [1] и книги [4] — показать, что различные подходы к квантовому измерению, которые иногда воспринимаются как несовместимые, на самом деле являются лишь различными уровнями описания, каждый из которых корректен, если его правильно применять.

Кроме постулата редукции, есть и другие способы расчета результатов повторных квантовых измерений. Например, вместо того, чтобы использовать редукцию состояния (коллапс волновой функции) после каждого измерения, можно получить правильные предсказания, вычисляя корреляцию между результатами различных измерений. Этот путь проанализирован в работе Д.Н. Клышко [5], на которую ссылается Липкин в своем письме.

2. Перейдем теперь к более сложному вопросу о роли сознания в теории квантовых измерений. Этот вопрос затрагивается в письме А.Д. Панова [6].

Роль сознания обсуждалась во многих работах различных авторов, начиная с фон Неймана. К той литературе по этому вопросу, которая цитировалась в [1], следует добавить статью Дитера Цее [7], в которой имеется хороший обзор и концептуальный анализ проблемы. Заметим, что обсуждение этого вопроса в [1] ни в коей мере не претендует на полноту, а напротив, отражает лишь субъективную точку зрения автора.

В связи с письмом Панова прежде всего приходится заметить, что возникла некоторая путаница в терминологии. В своей статье [1] я обозначал термином "сознание" известное явление из области психологии, являющееся, по видимому, функцией мозга. Чтобы подчеркнуть, что это именно явление, процесс, я иногда использовал слово "осознание". Панов в своем письме обозначает термином "сознание" некий *материальный объект*, существование которого обеспечивает это явление. Я бы назвал такой объект (может быть, это мозг или какие-то структуры в мозгу) "носителем сознания". В статье [1] носитель сознания прямым образом не рассматривался, поэтому анализ, который предлагает Панов, хорошо дополняет эту статью. Панов описывает декогеренцию материального носителя сознания, происходящую одновременно с декогеренцией измеряемой системы. Это полезно для того, чтобы прояснить, что происходит при квантовом измерении. И хотя Панов полемизирует со статьей [1], на самом деле его анализ, как будет показано, подтверждает и дополнительно иллюстрирует выводы этой статьи.

Обозначая через S , D , M и E соответственно измеряемую систему, измерительный прибор (детектор), носитель сознания (мозг) и окружение (резервуар), Панов рассматривает унитарную эволюцию, происходящую в результате взаимодействия этих объектов и приводящую к следующему изменению состояния полной системы:

$$\begin{aligned} & (\alpha|S_\alpha\rangle + \beta|S_\beta\rangle)|D_0\rangle|M_0\rangle|E_0\rangle \rightarrow \\ & \rightarrow \alpha|S_\alpha\rangle|D_\alpha\rangle|M_\alpha\rangle|E_\alpha\rangle + \beta|S_\beta\rangle|D_\beta\rangle|M_\beta\rangle|E_\beta\rangle. \end{aligned} \quad (1)$$

От рассмотрения в статье [1] это отличается лишь тем, что выделяются степени свободы M , интерпретируемые как носитель сознания. Совершенно так же, как в [1], легко показать, что хотя конечное состояние полной системы после взаимодействия остается чистым, но состояние каждой из подсистем становится смешанным — возникает декогеренция. Так, состояние измеряемой системы описывается теперь (редуцированной) матрицей плотности

$$\rho_S = |\alpha|^2|S_\alpha\rangle\langle S_\alpha| + |\beta|^2|S_\beta\rangle\langle S_\beta|. \quad (2)$$

Эта формула эквивалентна формуле (5) из [1] и описывает декогеренцию измеряемой системы S . Панов задает вопрос и о состоянии носителя сознания M после взаимодействия. Оно описывается матрицей плотности, редуцированной к подсистеме M :

$$\rho_M = |\alpha|^2|M_\alpha\rangle\langle M_\alpha| + |\beta|^2|M_\beta\rangle\langle M_\beta|. \quad (3)$$

Это значит, что носитель сознания находится (с соответствующими вероятностями) либо в состоянии $|M_\alpha\rangle$, либо в состоянии $|M_\beta\rangle$, но не в суперпозиции этих состояний. Следовательно, процесс взаимодействия всех указанных объектов приводит к декогеренции не только измеряемой системы S , но и носителя сознания M .

Заметим в скобках, что матрица плотности ρ_M вида (3) получается при более слабых предположениях, чем те, которые принимает Панов. При наличии макроскопического окружения (резервуара) E матрица плотности ρ_M всегда имеет вид (3) в силу ортогональности состояний $|E_\alpha\rangle$ и $|E_\beta\rangle$. Если же состояния детектора $|D_\alpha\rangle$ и $|D_\beta\rangle$ ортогональны друг другу (как часто бывает в реальной ситуации), то уже одно это обеспечивает вид (3) для матрицы ρ_M , и это справедливо даже в отсутствие макроскопического окружения.

Более существенным является следующее замечание. Панов считает, что формула (3) решает проблему выбора (селекции) сознанием одного из альтернативных результатов измерения. Он пишет: "Точно так же, как в статистической механике нет проблемы выбора одного из классических состояний (p, q) для состояния, заданного распределением $\rho(p, q)$, так и здесь проблемы выбора состояния сознания уже нет".

На самом деле проблема выбора (селекции) альтернативы не решается формулой (3). Аналогия со статистической механикой, использованная Пановым, показывает лишь, что перед физиком эта проблема обычно вообще не возникает. Если перечислены альтернативы и соответствующие им вероятности, то ничего больше не требуется, чтобы ответить на любой вопрос, который может поставить физик. Именно это я имел в виду, когда в своей статье утверждал, что в рамках теории декогеренции открытых систем (состояния которых описываются матрицами плотности) не возникает никаких парадоксов или логических трудностей и результирующая теория может считаться вполне удовлетворительной, пока мы ограничиваем себя тем уровнем рассмотрения, который характерен для физики.

Проблема появляется лишь в том случае, если мы считаем необходимым не только перечислить альтернативы и соответствующие им вероятности, но и явно описать механизм выбора одной из этих альтернатив. Это значит, что мы задаем вопросы, которых физики обычно не задают, т.е. переходим на уровень метафизики. В этом случае, на этом, более глубоком уровне анализа, матрица плотности вида (3) нас уже не удовлетворяет. Эта матрица плотности, описывающая декогеренцию носителя сознания, не решает проблему селекции так же, как не решает ее матрица плотности (2), которая (в других обозначениях) обсуждалась в статье [1] и которая описывает декогеренцию измеряемой системы.

Для того чтобы на самом деле решить проблему селекции, необходимо сделать следующий, более радикальный шаг. Разные авторы делают его по-разному, однако наиболее интересные (с моей точки зрения) решения опираются на многомировую интерпретацию квантовой механики, предложенную Эвереттом. Согласно концепции Эверетта, реализуются все альтернативные результаты кван-

тового измерения, но реализуются они в разных мирах. Миры эти совершенно тождественны, за исключением того, что данное измерение приводит в них к различным результатам (разумеется, при каждом следующем измерении каждый из миров опять расщепляется). В каждом из миров имеется наблюдатель (или наблюдатели), и наблюдатели в разных мирах не отличаются друг от друга ничем, кроме того, что видят различные результаты измерения.

Кажется, что проблемы выбора (селекции) результата измерения теперь не существует, так как все альтернативы (все эвереттовские миры) одинаково реальны. Однако из опыта мы знаем: в сознании любого реального наблюдателя измерение дает один определенный результат. И при описании сознания (психики) данного конкретного наблюдателя необходимо указать лишь один результат измерения, именно тот, который будет наблюдаться данным наблюдателем. Следовательно, выбор (селекция) одной альтернативы из всех возможных все еще необходим. Проблема селекции не исчезает, но переносится из области физики в область психологии (в теорию сознания индивидуального наблюдателя) или, точнее, в область метафизики (потому что источник проблемы, возникающей в психологии, связан с квантовой физикой).

Можно ли теперь решить проблему селекции, которая стала субъективной? Можно ли "объяснить", как в сознании индивидуального наблюдателя происходит выбор альтернативы или, другими словами, выбор того эвереттовского мира, в котором данный наблюдатель себя обнаруживает (осознает)?

Конечно, ответ зависит от того, что понимается под словом "объяснить". В некоторых случаях объяснение — это сближение понятий, которые до объяснения кажутся далекими. Одно объясняется в терминах другого. В статье [1] предлагалось *отождествить понятие селекции, возникающее в квантовой физике, с тем, что в психологии называется осознанием*. На вопрос: что такое селекция, предлагается отвечать — это осознание. Селекция (альтернативного результата измерения) происходит тогда, когда данный конкретный наблюдатель осознает, в каком из эвереттовских миров он оказался. И обратно, на вопрос: что такое осознание (т.е. переход от состояния, когда нечто не осознано, к состоянию, когда оно осознано), предлагается отвечать — это выбор одного из множества альтернативных эвереттовских миров.

Разумеется, нечто близкое всегда говорится в связи с эвереттовскими мирами. Нечто близкое говорил и сам Эверетт, и все его последователи. В статье [1] делается попытка максимально упростить формулировку, отсечь все лишнее, выделить главное. Вместо формулы: "Сознание наблюдателя выбирает одну из альтернатив" предлагается другая: "Сознание (осознание) — это и есть выбор альтернативы". Возможно, что некоторые авторы именно это и имели в виду, хотя мне не попадались формулировки, которые выражали бы эту мысль недвусмысленно.

Вот, например, в письме И.З. Цехмистро [8] в связи с предложенным мной решением проблемы выбора говорится: "Однако этот путь уже был пройден Дж. фон Нейманом в гораздо более тонком и изящном анализе, когда он показал, что последовательный анализ проблемы измерения неизбежно ведет к сознанию (именно акту осознания показания прибора) как последней инстанции, на которую падает ответственность за *редукцию* волновой функции". Однако, обратившись к цитированной в этой связи книге фон Неймана, мы обнаружим, что он лишь обосновывает необходимость явно рассматривать сознание наблюдателя, но не более. Вслед за фон Нейманом к этой необходимости приходили многие авторы, что я и

отмечал в своей статье. Но это лишь постановка вопроса, но не его решение. Решения, в котором сознание и селекция *отождествляются*, я не встречал.

Еще раз повторю: правомерна точка зрения, согласно которой проблемы вообще нет. Цехмистро пишет далее:

"Подчеркнем существенное различие между позицией Дж. фон Неймана и М.Б. Менского. Дж. фон Нейман, очевидно, принимает стандартную копенгагенскую интерпретацию квантовой механики с исходной и (как теперь это подтверждено всей историей развития квантовой механики) правильной идеей первичности вероятностей. Поэтому у него нет вопроса, который ставит М.Б. Менский: "1) как происходит выбор одной альтернативы при квантовом измерении". Ответ очевиден — случайно".

Ну, конечно, все так. Такой вопрос не возникает в рамках физики. Для физика вполне достаточно вероятностных предсказаний и случайный выбор той или иной альтернативы само собой разумеется. Приходится еще раз повторить: вопрос о *механизме* выбора альтернативы возникает лишь на метафизическом уровне рассмотрения. Никто не обязан рассматривать вопрос на этом уровне. Обычный физический уровень рассмотрения вполне достаточен для решения всех практических вопросов. Получающаяся теория логически замкнута, ее можно проверить экспериментально, и при этом она великолепно подтверждается.

Переход на метафизический уровень и постановка дополнительных вопросов для многих кажется ненужной игрой, и эта точка зрения вполне допустима, а со многих точек зрения имеет огромные преимущества. То, что я пытался сказать во второй части своей статьи, было сформулировано весьма осторожно: если мы по тем или иным причинам (в конце концов, просто из любопытства или в качестве интеллектуальной игры) перейдем на метафизический уровень и позволим себе задавать "нефизические" вопросы, то одним из них будет вопрос о механизме выбора альтернативы, а одним из решений этого вопроса (на мой взгляд, — красивым) является отождествление сознания и селекции.

Конечно, такое решение проблемы селекции является чисто словесным и потому с точки зрения физика может вообще не представлять ценности. Однако для метафизики характерны именно словесные решения. В данном же случае решение представляется красивым, потому что оно решает (сближает между собой) две трудные концептуальные проблемы из совершенно разных областей науки: 1) что означает понятие селекции в квантовой физике и 2) что означает понятие или явление осознания в психологии. Мы получаем объяснение (или описание) трудного понятия из области психологии в терминах, характерных для физики, и наоборот.

Кроме всего прочего, такая постановка вопроса делает очень естественной гипотезу о существовании активного сознания, способного изменить для данного наблюдателя вероятности различных альтернатив. Эта гипотеза обсуждается (впрочем, весьма предварительно) в статье [1], однако здесь мы не будем ее касаться. Заметим только, что она корректна лишь в случае, если число эвереттовских миров бесконечно (это замечание было дополнительно включено в английский перевод статьи [1]).

Возвращаясь к вопросу о редукции (коллапсе) волновой функции, мы должны заключить, что так же, как теория декогеренции, эвереттовская квантовая механика тоже не предполагает реального коллапса. Ведь коллапс или редукция означает исчезновение всех альтернатив, кроме одной. А в эвереттовской квантовой механике все альтернативы остаются одинаково реальными, только существуют в

различных мирах. И лишь в сознании каждого индивидуального наблюдателя возникает *иллюзия*, будто существует лишь один из этих миров, т.е. лишь одна альтернатива. Никакого коллапса нет, но индивидуальному наблюдателю кажется, что он происходит.

Кстати сказать, именно это делает понятие коллапса полезным в практических вычислениях. Ведь для данного конкретного наблюдателя существует лишь тот эвереттовский мир, в котором он себя осознает. А в этом мире реализуется лишь одна альтернатива. То, что в других мирах (где находятся "двойники" этого наблюдателя) реализуются другие альтернативы, он может игнорировать без всякого ущерба. Следовательно, он может принять, что в момент измерения происходит коллапс, после которого остается лишь одна альтернатива. Вычисления, основанные на этом предположении, дадут правильный ответ для того эвереттовского мира, в котором живет данный наблюдатель.

3. В конце письма Панова [6] обсуждается статус такой квантовой теории, которая решает проблему измерения при помощи концепции декогеренции. Панов согласен с выводом, сделанным в статье [1], что никаких логических трудностей не возникает в квантовой теории открытой системы, если явление декогеренции, вызванное влиянием окружения, учитывается феноменологически. Однако он считает, что такая теория "может вызывать неудовлетворенность на том основании, что наряду с фундаментальным динамическим законом (уравнение Шрёдингера) в теорию вводится феноменология, которая имеет столь же фундаментальный характер, как и сами динамические законы. Эта феноменология фундаментальна в том смысле, что она должна считаться в принципе ниоткуда не выводимой (в отличие, например, от термодинамики, которая выводима из статистической физики)".

Это замечание совершенно справедливо. На него, однако, можно ответить, что по крайней мере один способ феноменологического описания декогеренции обладает нужными свойствами. Это феноменология непрерывных квантовых измерений (т.е. непрерывной декогеренции), основанная на ограниченных интегралах по путям или,

эквивалентно, на комплексных гамильтонианах [3, 4]. Она фундаментальна по построению.

Эта феноменология ниоткуда не выводится и фактически составляет часть квантовой механики. Это становится очевидным, если воспользоваться формулировкой квантовой механики в терминах фейнмановских интегралов по путям. Тогда эволюция замкнутой системы описывается интегралом по всем возможным путям, а для открытой непрерывно измеряемой системы следует ограничить интегрирование на некоторое подмножество путей. Именно, следует включить в интеграл лишь те пути, которые согласуются с информацией, полученной в процессе измерения (и "записанной" в окружающей среде). В результате как замкнутая, так и открытая система описывается уравнением Шрёдингера, но в случае открытой системы гамильтониан содержит мнимую часть [3, 4].

Другим указанием на фундаментальность именно этой феноменологии является то, что в ней становится очевидной динамическая роль информации: влияние окружения некоторой подсистемы на ее динамику зависит только от того, какая информация в подсистеме остается в окружении. Все эти вопросы подробно обсуждаются в книге [4].

Таким образом, Панов совершенно справедливо замечает, что феноменология в теории открытых систем должна иметь фундаментальный характер. Однако теория ограниченных интегралов по путям фундаментальна по своей природе. Поэтому построенная на ее основе теория открытых систем вполне удовлетворительна.

Список литературы

1. Менский М Б *УФН* **170** 631 (2000) [*Phys. Usp.* **43** 585 (2000)]
2. Липкин А И *УФН* **171** 437 (2001)
3. Менский М Б *УФН* **168** 1017 (1998) [*Phys. Usp.* **41** 923 (1998)]
4. Mensky M B *Quantum Measurements and Decoherence. Models and Phenomenology* (Dordrecht: Kluwer Acad. Publ., 2000)
5. Клышко Д Н *УФН* **168** 975 (1998)
6. Панов А Д *УФН* **171** 447 (2001)
7. Zeh H D *Found. Phys. Lett.* **13** 221 (2000)
8. Цехмистро И З *УФН* **171** 452 (2001)

Reader response to M B Menskii's paper "Quantum mechanics: new experiments, new applications, and new formulations of old problems"

Editorial Note. At the time the interpretation and, more generally, foundations of quantum theory are undergoing yet another period of discussion within the worldwide physics community, the Russian language literature fails to give a proper coverage to the subject. A step to remedy this is a review paper by M B Menskii, "Quantum mechanics: new experiments, new applications, and new formulations of old problems", recently published in our journal (*Phys. – Usp.* **170** (6) 631 (2000)). In the editorial preface to the paper we committed ourselves to publishing our readers' letters on the subject. Some papers have already been received and are offered below. It should be noted however that, to secure the freedom of discussion, the papers were not peer reviewed and the editorial board has therefore no responsibility for their content — an approach which, within limits, seems to be reasonable at this point of time.

PACS number: 03.65.Bz