

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 порождаемых 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 порождаемых 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.

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-проекций 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 соотносительности 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)