

**РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
ИНСТИТУТ НАУЧНОЙ ИНФОРМАЦИИ  
ПО ОБЩЕСТВЕННЫМ НАУКАМ**

---

**В.Д.ЭРЕКАЕВ**

**«ЗАПУТАННЫЕ» СОСТОЯНИЯ:  
(ФИЛОСОФСКИЕ АСПЕКТЫ КВАНТОВОЙ  
МЕХАНИКИ)**

**Аналитический обзор**

**Москва. 2003**

ББК 87.2

Э76

Серия  
«Проблемы философии»

*Центр гуманитарных научно-информационных  
исследований*

Отдел философии

Автор – *В.Д.Эрекаев*, канд. филос. наук  
Ответственный редактор – *А.И.Панченко*,  
д-р филос. наук

Эрекаев В.Д.

Э76

«Запутанные» состояния: (философские аспекты квантовой механики): АО/РАН. ИНИОН. Отд. Философии; Отв. ред. Панченко А.И. – М., 2003. – 80 с. – (Сер.: Пробл. философии).

ISBN 5-248-00189-7

Впервые анализ «запутанных» состояний был предпринят А.Эйнштейном и Э.Шрёдингером в 1935 г. в связи с исследованием концептуальных оснований квантовой теории: проблемы квантовой реальности, нелокальности и др. До 70-х годов XX в. эти состояния не исследовались из-за отсутствия экспериментальных возможностей и теоретической базы. Сегодня ситуация изменилась: в руках исследователей оказался мощный «нелокальный квантовый ресурс».

В обзоре рассматриваются история открытия запутанных состояний и развитие представлений о них; раскрываются их онтологические аспекты; анализируются методологические особенности теоретического и экспериментального исследования запутанных состояний; представляются возможные применения запутанных состояний в различных областях физики.

Обзор подготовлен при поддержке Российского гуманитарного научного фонда (РГНФ). Грант 03-03-00028а.

ББК 87.2

ISBN 5-248-00189-7  
2003

© ИНИОН РАН,

## ***СОДЕРЖАНИЕ***

1. Краткая история исследований запутанных состояний .....	5
2. Статья А.Эйнштейна, Б.Подольского и Н.Розена и ее современные обсуждения .....	7
3. Что такое запутанные состояния .....	17
4. Многообразие запутанных состояний .....	27
5. Некоторые направления исследований запутанных состояний .....	34
6. Квантовые компьютеры, телепортация и криптография .....	42
7. Проблема природы квантовых корреляций .....	49
8. Нелокальность и несепарабельность .....	56
9. Метафизика квантовой запутанности .....	65
Список литературы .....	75

## 1. КРАТКАЯ ИСТОРИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ЗАПУТАННЫХ СОСТОЯНИЙ

Каждая идея и каждое открытие имеют свою характерную историю. Понятие «запутанного» (entangled) квантового состояния (далее – ЗС) также имеет собственную историю, состоящую из четырех основных этапов. Рождением самой идеи можно считать появление в 1935 г. знаменитой статьи Эйнштейна – Подольского – Розена (далее ЭПР-статья) «Можно ли считать полным квантовомеханическое описание реальности?» (18). Сразу же после ее появления состоялись бурные обсуждения (второй этап) затронутых в этой статье проблем с Н.Бором. Бор сумел отстоять идеологию квантовой механики (КМ), но не убедил Эйнштейна в ее полноте. Однако «безусловного экспериментального разрешения этого концептуального спора до сих пор не получено» (49). В том же 1935 г. вышла работа Э.Шрёдингера, также посвященная обсуждению свойств запутанных состояний. Третий этап можно отнести к 1964 г., когда Дж.Белл (21) вывел свои неравенства, которые придали новый импульс исследованиям в этой области, а также позволили сформулировать ЭПР-парадокс в простой и наглядной форме (9, с.632). Следует также отметить, что большой вклад в осмысление и трактовку этих неравенств внесли Дж.Клаузер, С.Фридман, Р.Хольт, А.Шимони, Г.Стэпп, Д.Ховард и др. Неравенства Белла породили целое направление особого типа экспериментов, которые в честь первооткрывателя этих неравенств, которые лежат в основе этих экспериментов, так и называются – белловскими экспериментами. Последние, в свою

очередь, дали жизнь, по-видимому, очень нетривиальной, перспективной и самостоятельной области исследований – так называемой «экспериментальной метафизики» (Experimental metaphysics: Quantum mechanical studies for Abner Shimony. – Dordrecht etc., 1997. – Vol.1). Наконец, четвертый этап связывается с бурным прогрессом в области исследований, связанных с квантовой информацией, в том числе с развитием квантовой криптографии, идеей квантовых компьютеров, а также, судя по всему, с качественно новым уровнем квантовых измерений.

Существенно отметить, что «новые приложения, объединенные термином «квантовая информация», возникли не столько при исследовании концептуальных проблем квантовой механики, сколько при анализе специфики квантовой теории по сравнению с классической» (9, с. 632). При этом характерна следующая оценка соотношения прикладных и концептуальных составляющих современной физики, высказываемая некоторыми физиками: «При желании вполне можно сказать, что работа над новыми экспериментами и новыми приложениями — это настоящая и притом очень интересная физика, тогда как парадоксы КМ — всего лишь философская (концептуальная, метафизическая) надстройка над ней» (9, с. 632). Другие же физики считают, что после появления статьи ЭПР «запутанные состояния вот уже несколько десятилетий неразрывно связаны с обсуждением основ КМ» (1, с. 632). И действительно, появление представлений о запутанных состояниях возникло, фактически, еще в период становления квантовой механики (КМ) и касалось, прежде всего, обсуждения основоположений этой теории.

При этом в настоящее время, по-видимому, большинство физиков считают, что «запутанные состояния являются основным объектом, позволяющим сделать выбор в пользу квантовой теории» (1, с.625). Становится все более привычным взгляд на запутанные состояния как на особый *нелокальный квантовый ресурс*, которому есть множество применений (1, с. 625). В такой ситуации естественным становится вопрос о способах практического получения и хранения этого нового ресурса. С другой стороны, остаются в силе вопро-

сы, связанные с изучением свойств запутанных состояний и их специфики, роль запутанных состояний в основаниях квантовой теории.

## 2. СТАТЬЯ А.ЭЙНШТЕЙНА, Б.ПОДОЛЬСКОГО И Н.РОЗЕНА И ЕЕ СОВРЕМЕННЫЕ ОБСУЖДЕНИЯ

Судьба статьи, написанной А.Эйнштейном, Б.Подольским и Н.Розеном, уникальна. Во-первых, она стала одной из самых бурно обсуждаемых физических работ. Во-вторых, есть сведения, что Эйнштейн был не совсем доволен тем, как была написана статья. Вероятно, он задумывал ее совсем иначе. В-третьих, одна из самых активно обсуждаемых физических статей, по факту, явилась ошибочной. По крайней мере, так ее формально воспринимают после экспериментальных доказательств нарушения неравенств Белла. Наконец, несмотря на все это, по-видимому, всегда будут существовать исследователи, которые будут пытаться найти в ЭПР-парадоксе нечто принципиально новое. Фактически, они стоят на стороне Эйнштейна, Шрёдингера, де Бройля и др. физиков по вопросу о завершенности КМ. Другими словами, эта статья, которую для краткости нередко стали называть ЭПР-статьей, затронула такие концептуальные основы квантовой реальности, которые вряд ли получат быстрое исчерпывающее объяснение.

Еще одна уникальная история связана с этой работой. Авторы отправили статью в редакцию «*Physical review*». Но не успели ее опубликовать, как произошло сенсационное для того времени событие. В газете «*New York Times*» 4 мая 1935 г. появилась статья, в которой уже обсуждалась работа трех авторов. В «*Physical review*» же ЭПР-статья появилась только 15 мая 1935 г. До этого момента еще никогда научная статья не обсуждалась в широкой прессе до опубликования в научном журнале. Небезынтересно также отметить, что термин «ЭПР-парадокс» был впервые предложен Шрёдингером в том же 1935 г. В своем докладе Королевскому обществу он сообщил, что не намерен разрешить ЭПР-парадокс, а скорее предложить новый.

Эта статья важна тем, что именно в ней впервые был предложен мысленный эксперимент, в котором в ответ на сформулированное противоречие сторонники копенгагенской парадигмы *были вынуждены* ввести представление о понятиях, которые сегодня лежат на переднем концептуальном плане КМ. В первую очередь это касается понятия целостности квантово-механической системы (события), первоначальный смысл которого расширился после введения в квантовую физику понятий несепарабельности, нелокальности, квантовых корреляций и факторизуемости (см. ниже). Такая «вынужденность» оказалась, с одной стороны, эвристической, а с другой – методологическим своеобразием развития квантовой теории и новым уровнем понимания квантово-механических закономерностей. По некоторым подсчетам (А.А.Белокуров), уже сегодня число публикаций по ЭПР-парадоксу достигает нескольких миллионов.

На наш взгляд, можно выделить, по крайней мере, три сложившиеся к настоящему времени позиции в отношении ЭПР-парадокса.

1. Никакого парадокса на самом деле не существует. Фактически, эту позицию отстаивают все «копенгагенцы»; в явном виде ее сформулировал, например, А. Пайс: «Я считаю необходимым подчеркнуть, что эта работа не содержит ни парадокса, ни какого-либо логического изъяна. В ней просто сделан вывод, что понятие «объективная реальность» несовместимо с предположением о полноте КМ. Этот вывод никак не повлиял на дальнейшее развитие физики, и сомневаюсь, что он окажет какое-нибудь влияние в будущем» (11, с.439). Последние утверждения, несомненно, следует считать личной точкой зрения А.Пайса.

2. Никакого парадокса нет, но есть уникальное свойство квантовых корреляций, которое порождает эффект нелокальности и феномен запутанных состояний. По отношению к природе квантовых корреляций также существуют две ярко выраженные позиции:

а) в рамках методологической парадигмы ортодоксальной КМ не имеет смысла пытаться искать природу квантовых корреляций; она просто фиксируется (как квантовые скачки в атоме) и эффектив-

но используется. Этой точки зрения придерживается, например, А.Файн (36);

б) природа квантовых корреляций – фундаментальная проблема КМ.

3. Парадокс существует. Он доказывает неполноту и ограниченность КМ. Следует, прежде всего, разобраться в концептуальных основаниях КМ.

В зависимости от выбранной позиции, исследователи и сегодня, спустя почти 70 лет, продолжают активно обсуждать ЭПР-проблему. Рассмотрим некоторые подходы.

*Современные обсуждения ЭПР-парадокса.* Противоречивая природа наблюдений находится в центре дискуссий по основаниям КТ. В отличие от классических теорий, проблема того, как и где мы располагаем границу между системами, которые осуществляют наблюдения, и системами, которые наблюдаются, не является чисто практической. Существует ли какое-то фундаментальное различие между этими двумя классами систем? Может ли более глубокий взгляд на роль наблюдателя дать новое понимание нелокальности? Федерико Лаудиза (43) рассматривает ЭПР-проблему в рамках недавно выдвинутой С.Ровелли реляционной интерпретации КМ (Rovelli S. Relational quantum mechanics // Intern. j. of theoretical physics. – 1996. – Vol.35. – P.1637–1678).

Согласно этой интерпретации, для обнаружения формы зависимости описания квантовых событий от системы отсчета наблюдателя нет необходимости смещаться в строго релятивистскую квантовую теорию. В этой интерпретации само понятие состояния физической системы должно рассматриваться как бессмысленное до тех пор, пока оно не определено по отношению к другой физической системе, которая временно играет роль наблюдателя, который и приписывает системе некоторое состояние. При этом понятие абсолютного или не зависящего от наблюдателя состояния системы полностью исключается. «Это утверждение отчасти напоминает эйнштейновскую операциональную критику абсолютного понимания одновременности для удаленных наблюдателей» (43, с. 5). Прежде всего, автор показывает, что два наблюдателя будут по-разному описывать



даже такие простые квантово-механические процессы, как измерение только одной физической величины. При этом реляционная интерпретация дает следующие два предположения относительно универсальности и полноты КМ.

*1. Все физические системы эквивалентны.* Нельзя сделать никакого специального предположения в отношении систем, которые, по предположению, действуют как наблюдатели, за исключением того, что они должны удовлетворять законам КМ. Быть наблюдателем не является свойством, фиксированным раз и навсегда для всех привилегированных физических систем, которые могут идентифицироваться как «системы наблюдения». Не может быть безоговорочно допущено, что такие наблюдательные системы являются мыслящими сущностями (сущностями с сознанием – *conscious entities*).

*2. Реляционная КМ является полной физической теорией.* Тот факт, что различные наблюдатели могут прийти к различным оценкам одних и тех же процессов, не является признаком фундаментальной неполноты КМ, а является следствием реляционного метапредположения, согласно которому не существует абсолютной точки зрения или точки зрения «извне», исходя из которой можно оценить состояние физической системы или значение величин, которые могут быть измерены у этой системы. «КМ может поэтому рассматриваться как теория о состояниях систем и значений физических величин в отношении к другим системам... Если понятие описания мира независимо от наблюдателя является нефизическим, то полное описание мира исчерпывается подходящей информацией, которую заключают в себе составляющие мир системы» (43, с. 8).

Рассмотрим двух наблюдателей  $O$  и  $O'$ , описывающих измерение физической величины  $Q$  некоторой физической системы  $S$ . Пусть при этом проводить измерение будет наблюдатель  $O$ , тогда наблюдатель  $O'$  может описывать уже только сложную систему  $S+O$ . Анализ показывает, что они будут давать различные оценки наблюдаемых событий. Можно попытаться трактовать этот феномен, исходя из того, что различие между наблюдателями состоит в том, что наблюдатель  $O$  знает в момент времени  $t_2$  сразу после измерения, каково состояние системы  $S$ , а наблюдатель  $O'$  не знает, и

именно по этой причине  $O'$  приписывает  $S$  состояние суперпозиции, т.е. информационно «неполное» состояние. Однако при таком описании неявно предполагается существование «абсолютной» точки зрения, которую реляционная интерпретация как раз и предлагает элиминировать. Можно провести общее различие между *описанием* и *наблюдением* системы  $S$  наблюдателем  $O$ : «описание»  $S$  не включает взаимодействие между  $O$  и  $S$  в моменты времени, в которые  $O$  описывает  $S$ . С другой стороны, мы можем сказать, что  $O$  «наблюдает»  $S$ , когда  $O$  в действительности измеряет некоторую физическую величину на  $S$ . В этом случае существует взаимодействие между  $S$  и  $O$ , когда  $O$  «наблюдает»  $S$  (43, с. 8).

Можно трактовать «описание», которое, в свою очередь, дает наблюдатель  $O'$ , в терминах корреляции совместной системы  $O+S$  как максимального количества информации, которая доступна для  $O'$  в отсутствие взаимодействия в момент времени после измерения, между  $O'$  и композитной системой  $O+S$ . Предполагается, что  $O'$  не выполняет измерения во временном интервале  $[t_1, t_2]$  ( $t_1$  – момент измерения наблюдателем  $O$ ;  $t_2$  – момент измерения наблюдателем  $O'$ ;  $t_1 < t_2$ ) и поэтому может «описывать» состояние  $S$  в момент  $t_2$  только посредством некоторой наблюдаемой  $C_{(O,S)}$ , которая тестирует, корректно ли наблюдатель  $O$  записал результат измерения на  $S$ . Собственные значения  $C_{(O,S)}$  являются просто 1 (запись правильна) или 0 (запись неверна). Условие совместимости двух описаний может выглядеть как требование коррелированности для наблюдателя  $O'$  результатов  $C_{(O,S)}$ -измерения и  $Q$ -измерения.

В чем же состоит реляционный анализ ЭПР-аргументации? Как известно, ЭПР-парадокс приводит к альтернативе между полнотой и локальностью КМ: допуская полноту, мы должны отказаться от локальности и наоборот. Ф.Лаудиза считает важным исследовать вопрос о том, будут ли и до какой степени предсказания данного наблюдателя в КМ влиять на структуру и значимость ЭПР-аргументации.

Обычное рассмотрение ЭПР-проблемы формулируется в нерелятивистской КМ, симметрии которой содержат галилееву полугруппу. Поэтому форма зависимости от наблюдателя, которая может

быть принята во внимание, должна быть зависимостью от выбора систем отсчета. Такая зависимость от системы отсчета наблюдения существенно связана с существованием пространственно-подобного интервала между двумя измерениями физической системы и ограничивает, как считает автор, саму возможность приписывать свойства квантовым процессам и объектам. Прежде всего, Ф.Лаудиза полагает, что необходимо скорректировать понятия реальности, полноты, локальности и адекватности, обычно применяемые при анализе ЭПР-эксперимента следующим образом.

### **1. РЕАЛЬНОСТЬ\***

Если наблюдатель  $O$  без взаимодействия с физической системой  $S$  может предсказать с определенностью в момент времени  $t$  значение  $q$  физической величины  $Q$  измеримой на  $S$  в состоянии  $s$ , то в момент  $t'$ , сразу же после  $t$ ,  $q$  соответствует свойству  $S$ , которое является объективным относительно  $O$ .

### **2. ПОЛНОТА\***

Любая физическая теория  $T$ , описывающая физическую систему  $S$ , объясняет каждое свойство  $S$ , которое является объективным относительно некоторого наблюдателя.

### **3. P-ЛОКАЛЬНОСТЬ\* (Реляционная локальность)**

Свойство физической системы  $S$ , которое является объективным относительно некоторого наблюдателя, не может быть подвержено воздействию при проведении измерения на другой физической системе, выполняемого в пространственно-подобно разделенных областях. Условие P-локальности гарантирует, что не существует свойства, которое является необъективным (понимаемому по отношению к данному наблюдателю), которое может превратиться в объективное посредством операций, выполненных в пространственно-подобно разделенных областях.

Схема рассуждений в реляционном варианте анализа ЭПР-аргументации выглядит следующим образом. В качестве экспериментальной ситуации рассматривается корреляционный эксперимент ЭПР–Бома. Он включает в себя систему из двух частиц со спином  $\frac{1}{2}$ , которые разлетаются в противоположных направлениях, причем обе подсистемы строго коррелированы. Изначально в источнике (момент

времени  $t_0$ ) наблюдатель  $O_1$  воспринимает состояние системы как запутанное, т.е. такое, которое не может быть разделено на два чистых. После этого в момент времени  $t_1$  он проводит измерение состояния одной из пространственно-подобно удаленных частиц (подсистемы  $S_1$ ) и получает значение проекции спина на выбранную ось, скажем, равное  $-1$ . Согласно *принципу адекватности* за счет наличия свойства антикоррелированности, наблюдатель  $O_1$  может предсказать значение проекции спина для пространственно-подобно удаленной частицы  $S_2$ , равное  $+1$ . Согласно *принципу локальности*, проследив это состояние назад во времени вплоть до момента  $t_0$ , он обнаружит, что вместо запутанного состояния должно быть чистое состояние проекции спина, равное  $-1$ , что и порождает вывод о наличии ЭПР-парадокса. Но до тех пор пока наблюдатель  $O_2$  не проведет свои измерения, он должен приписывать подсистемам  $S_1$  и  $S_2$  наличие запутанности. При этом «не должно возникать проблемы относительно того, который из наблюдателей «прав». До тех пор пока  $O_2$  не выполнит измерение, он может описывать измерение, выполненное  $O_1$ , как установление наличия корреляции между наблюдателем  $O_1$  и системой  $S_1$ » (43, с.15). «Вывод, который может быть сделан, состоит в том, что вопрос о том, *когда наблюдатель может утверждать на основании ЭПР-аргументации, что квантовая механика либо неполна, либо нелокальна*, имеет ответ, зависящий от системы отсчета» (43, с.15). По-видимому, важный для дальнейших исследований вывод может состоять также и в том, что, как считает автор, ЭПР-аргументация представляет собой зависимость между двумя результатами измерения, которая встроена в корреляции, являющиеся внутренне присущими ЭПР запутанным состояниям. Поэтому до тех пор, пока оба наблюдателя не вступят между собой во взаимодействие, они не смогут сравнить свои описания состояний и до этого момента могут описывать ЭПР-парадокс только относительно своей системы отсчета. Этот вывод обеспечивает «мирное сосуществование» КМ и специальной теории относительности (СТО).

Х.Хальфорсон и Р.Клифтон (38) поднимают вопрос о необходимости пересмотра и уточнения ответа Н.Бора на ЭПР-аргументацию. Последние несколько десятилетий, отмечают авторы,

ознаменовались значительным продвижением в понимании интерпретаций КМ. И хотя не следует питать особую надежду на быструю конвергенцию различных точек зрения, физика добилась более глубокого понимания технических и концептуальных проблем. Авторы считают возможным использовать эти достижения для того, чтобы «пролить новый свет на великие эпизоды в концептуальном развитии КМ» (38, с.1). Одним из таких эпизодов является дискуссия между Бором и Эйнштейном (а также Подольским и Розеном) относительно полноты КМ. Хотя предполагается, что ответ Бора на ЭПР аргументацию является водоразделом в развитии его философии квантовой теории, тем не менее, трудно обнаружить явную (ясную) формулировку (утверждение – statement) философского смысла (сути – point) его ответа. Возвращения к этой дискуссии, как считают авторы, актуализируют некоторые недавние статьи, утверждающие, в частности, как это делают А.Файн и М.Беллер, что ответ Бора на ЭПР-аргументацию является ошибочным.

Более того, некоторые утверждают, что суть состоит просто в том, что Бор являлся радикальным позитивистом. Авторы показывают, что такое утверждение не обосновано. В частности, они дают математически строгую реконструкцию ответа Бора на изначальную ЭПР-аргументацию, которая вносит ясность в его логическую структуру и которая показывает, что он не покоится на сомнительных философских предположениях. Скорее ответ Бора был продиктован его обязательством (commitment) обеспечить «классическое» и «объективное» описание экспериментальных явлений.

В ЭПР-статье рассматривается система из пары частиц, разлетевшихся от источника на пространственно-подобное расстояние. Эйнштейн с соавторами приводят аргументы в пользу неполноты КМ. Так, исходя из ЭПР-критерия реальности следует, что если определить положение одной частицы в строго коррелированном состоянии, то следует заключить, что вторая частица также должна иметь определенное положение. То же относится и к моменту частицы. ЭПР-предположение состоит также еще и в том, что элемент реальности для второй частицы должен быть независимым от измерения, произведенного над второй частицей. Согласно же Бору,

ЭПР-аргументация не учитывает точку зрения относительно природы квантово-механического описания. Для выяснения ряда утверждений оппонентов авторы статьи реконструируют ответы Бора.

Прежде всего, они подчеркивают, что Бор не придерживался «гиперпозитивистской» позиции, согласно которой неизмеряемой системе не может быть приписаны некоторые свойства или элементы реальности. Бор согласен с ЭПР в том, что раз положение одной из частиц измерено, то положение второй частицы является элементом реальности, независимо от того, измерено ли реально ее положение. Но, согласно Бору, все определяется самим контекстом эксперимента. Авторы отмечают, что при всем при этом, защитники позиции Бора «спотыкаются» относительно того, *как* измерение над одной системой может влиять на то, что является реальным для пространственно удаленной частицы. К сожалению, констатируют авторы, утверждения самого Бора по этому поводу являются слишком краткими и неясными.

Существуют два препятствия (трудности), с которыми сталкиваются при попытке реконструировать ответ Бора на первоначальную ЭПР-аргументацию. Первое связано с тем, что «в терминах стандартного математического формализма КМ, ЭПР-состояние не существует» (38, с.14), а второе — с тем, что не существует приемлемых смешанных состояний для соответствующего контекста измерений. Авторы предлагают преодолеть эти трудности с помощью расширения состояния пространства состояний квантовой системы до состояния, которое включает собственные состояния для непрерывного спектра наблюдаемых.

Философские и методологические выводы статьи состоят в следующем. Авторы показывают, что ответ Бора на доводы ЭПР является логическим следствием следующих четырех требований: 1) *эмпирической адекватности*: при измерении наблюдаемой последняя обладает некоторым значением в соответствии с вероятностями, определяемыми квантовым состоянием; 2) *классического описания*: свойства  $P$  и  $P'$  могут быть одновременно реальными в квантовом состоянии, только если это состояние может быть представлено в качестве совместного распределения классической вероятности над

Р и Р'; 3) *объективности*: элементы реальности должны быть инвариантами таких симметрий, которые сохраняют определенные черты контекста измерений; 4) *максимальности*: описание должно быть максимальным, подчиняющимся первым трем требованиям. Очевидно, что эти требования никак не нарушают критерий верифицируемости значимости или других основных доктрин позитивизма. Поэтому ответ Бора на ЭПР-аргументацию не содержит сдвиг в направлении позитивизма.

Тем не менее, реконструкция ответа Бора, осуществленная авторами, не конституирует (не составляет) доказательство превосходства точки зрения Бора над более «реалистической» точкой зрения ЭПР, которая отвергает утверждение о том, что реальность системы может быть конституирована «на расстоянии» (from a distance). Однако авторы подчеркивают, что Бор не слишком интересовался тем, существует ли истинная реальность для удаленных систем, а интересовался вопросом о том, что может служить нам оправданием при утверждении относительно удаленных систем с точки зрения классического описания. В частности, Бор доказывает, что в определенных измерительных контекстах мы можем быть гарантированы в правомочности приписывания определенных элементов реальности для удаленных (неизмеримых) систем. Он также утверждал, однако, что если мы попытаемся осуществлять контекстуально независимое приписывание реальности этим удаленным системам, то мы придем в конфликт с экспериментальными фактами (данными).

Более того, как сам Бор мог бы утверждать, подобный тип контекстуальной зависимости возникает уже в специальной теории относительности. В частности, наблюдатель, находящийся в инерциальном движении, может гарантированно говорить, что любые два события, которые являются ортогональными для его мировой линии, являются одновременными. Однако если мы попытаемся осуществить контекстуально независимое приписывание одновременности для удаленных событий (для которых «контекстуальность» устанавливается системой отсчета наблюдателя), то мы придем к противоречию с экспериментальными данными. Авторы считают, что «предоставили достаточно оснований для утверждения о том, что ответ Бора

ЭПР и его философия квантовой теории в целом заслуживают более беспристрастной трактовки, чем это было сделано до сих пор» (38, с. 22).

### 3. ЧТО ТАКОЕ ЗАПУТАННЫЕ СОСТОЯНИЯ?

В современной литературе ЗС обсуждаются в основном с точки зрения их практического использования. Вероятно, большинство исследователей считают, что принципиальных проблем в этом вопросе не существует. «Для людей, профессионально работающих с квантово-механическим формализмом (т.е. для большинства физиков) нет ничего парадоксального ни в ЭПР-парах, ни даже в очень сложных запутанных состояниях с большим числом слагаемых и большим числом факторов в каждом слагаемом» (9, с.636). В связи с этим физическая природа этих состояний почти не обсуждается, а практически полностью сводится к специфике КМ. Тем не менее, при внимательном чтении соответствующей литературы возникает много вопросов, которые не получили достаточного обоснования. Более того, складывается впечатление, что само существование запутанных состояний и успехи в их практическом использовании подтверждают и даже усиливают точку зрения, высказанную Р.Фейнманом о том, что мы можем успешно применять квантовую механику, но совершенно не понимаем ее.

Что же представляют собой запутанные состояния? Как они определяются в современной физике? Из стандартного курса КМ известны три основных состояния квантовых систем. Это чистое, смешанное и собственное состояния.

«*Чистое состояние* — состояние квантово-механической системы, которое можно описать волновой функцией или суперпозицией волновых функций. Обычно чистое состояние называют просто квантово-механическим состоянием. Чистое состояние соответствует полной, максимально возможной информации о квантово-механической системе. Оно определяется полным набором независимых физических величин, которые могут иметь одновременно определенные значения. Собственные значения операторов, соответст-



вующих этому полному набору, называются квантовыми числами. Так, например, состояние свободной частицы полностью определено, если заданы значения трех проекций ее импульса и проекция спина на выбранное направление. Чистое состояние электрона в атоме водорода может быть задано четырьмя квантовыми числами. Волновая функция чистого состояния позволяет вычислить средние значения физических величин в этом состоянии» (15, с.463).

В КМ существуют состояния, которые невозможно описать волновой функцией. Это – смешанные состояния. «Смешанное состояние (смесь состояний) – состояние квантово-механической системы, которое описывается не волновой функцией, как чистое состояние, а матрицей плотности, называемой также статистическим оператором. В смешанном состоянии, в отличие от чистого состояния, не задан максимально полный набор независимых физических величин, определяющих состояние системы, а определены лишь вероятности  $w_1, w_2, \dots$  обнаружить систему в различных квантовых состояниях, описываемых волновыми функциями  $\psi_1, \psi_2, \dots$ » (15, с.382). Смешанное состояние можно еще определить и следующим образом: «Ансамбль  $E$ , полученный путем комбинирования всех элементов отдельных подансамблей  $E_\alpha$  является смесью, хотя, как мы увидим, это утверждение не является общим определением этого понятия» (30, с.44). «Среднее значение  $\bar{A}$  какой-либо физической величины  $A$ , которой соответствует оператор  $\hat{A}$ , определяется как сумма произведений вероятностей (статистических весов)  $w_i$  на среднее значение  $\bar{A}_i$  величины  $A$  в чистых состояниях  $\psi_i$ :

$$\bar{A} = \sum_i w_i \bar{A}_i,$$

где  $\bar{A}_i = \int \psi_i^*(x) \hat{A} \psi_i(x) dx$ , а  $\psi_i(x)$  – волновая функция в координатном представлении, \* означает операцию комплексного сопряжения (полная вероятность  $\sum_i w_i = 1$ ). Это правило вычисления средних есть определение смешанного состояния. В частном случае, когда лишь одно из  $w_i$ , например  $w_k$ , отлично от нуля, т.е. (вследствие нормировки вероятности)  $w_k = 1$ , а все остальные  $w_i$  ( $i \neq k$ ) равны нулю, смешан-

ное состояние совпадает с чистым состоянием, описываемым волновой функцией  $\psi_k$ .

В смешанном состоянии, в отличие от суперпозиции чистых состояний, различные квантовые состояния между собой не интерферируют (т.е. при определении средних складываются не волновые функции, а средние значения). Примером системы, находящейся в смешанном состоянии, может служить неполяризованный пучок частиц, газ в термостате. Понятие смешанного состояния играет большую роль в квантовой статистике и теории измерений в КМ» (15, с.382).

Бурное развитие исследований запутанных состояний позволяет говорить о расширении списка фундаментальных квантовых состояний. Причем, как будет видно из дальнейшего, запутанные состояния могут быть как чистыми, так и смешанными. Сразу же отметим методологическую специфику определения понятия запутанных состояний: в подавляющем большинстве случаев они определяются через математические формулы, т.е. формально. Так, например, состояние квантовой системы без запутывания определяется с помощью выражения вида  $|\Psi\rangle = |\psi\rangle|\phi\rangle$ , где  $|\psi\rangle$  и  $|\phi\rangle$  — состояния соответствующих подсистем. Подобное состояние называется факторизованным и фактически описывает автономность и определенность каждой из подсистем данной квантовой системы. Их автономность определяется тем, что дает возможность работать с совместимыми вероятностями, которые необходимы для расчетов в КМ конкретных значений соответствующих физических величин.

Простейшее запутанное состояние имеет вид:

$$|\Psi\rangle = 1/\sqrt{2}(|\psi_1\rangle|\phi_1\rangle + |\psi_2\rangle|\phi_2\rangle) \quad (1)$$

Если полная система находится в состоянии (1), то состояние каждой из подсистем не является определенным. «Существует лишь корреляция, которую можно охарактеризовать так: если первая система находится в состоянии  $|\psi_i\rangle$  ( $i = 1, 2$ ), то вторая — в состоянии  $|\phi_i\rangle$ » (9, с.633). Другими словами, у запутанных состояний «общая волновая функция частиц не разлагается на произведение частных функций. Будучи разделены, они, тем не менее, действуют согласо-

ванно» (10, с.443). В более общем случае запутанное состояние имеет вид:  $|\Psi\rangle = (1/\sqrt{n})\sum |\psi_i\rangle|\phi_i\rangle$ , т. е. содержит более двух компонент и может быть даже непрерывным.

Понятие корреляции играет, фактически, определяющую роль для понимания запутанных состояний. В большинстве случаев запутанные состояния определяются именно как состояния с квантовой корреляцией. Например, Б.М.Менский пишет: «Квантовая корреляция или запутанные (entangled) состояния (иначе, ЭПР-состояния) могут возникать в такой системе, которая состоит из двух (или более) взаимодействующих подсистем» (9, с.633). Из процитированных слов можно сделать вывод, что соединяющий союз «или» указывает на тождественность (или, по крайней мере, на равнозначимость) этих понятий. Авторы статьи (1, с.627) также отмечают, что «*запутанность* (entanglement) есть всего лишь особая квантовая форма корреляций». Однако следует отметить, что существуют два разных вида корреляций: квантовая и классическая. При этом они имеют ряд существенных отличий друг от друга. Оказалось, что квантовые корреляции невозможно описать, исходя из классических представлений, и это вызывает дополнительные трудности их понимания. В частности, оказывается, что понятие реальности (элемента реальности) в квантовой теории радикально отличается от классических представлений, которые отстаивал Эйнштейн.

Обычно в качестве примера, при рассмотрении которого наиболее удобно провести различия этих типов корреляций, выбирают так называемую ЭПР-пару: систему, состоящую из двух частиц со спином  $\frac{1}{2}$  в изначальном состоянии с полным спином равным нулю. В честь авторов указанной выше статьи, в которой впервые и были рассмотрены запутанные состояния, аналогичным образом называются ЭПР-состояния и ЭПР-корреляции. Физический смысл системы, состоящей из ЭПР-пары, довольно прост: первоначально имеется частица с нулевым спином, которая распадается на две частицы со спином  $\frac{1}{2}$ , которые затем разлетаются на достаточно большие расстояния вплоть до пространственно-подобных.

«В других работах, наоборот, делается упор на специфической нелокальной природе запутанных состояний, что даже привело к оп-

ределенной их мистификации. Так, сочетание необычных (по классическим меркам) свойств запутанных состояний с проекционным постулатом КМ привело к спекуляциям о «действии на расстоянии», вступающем в противоречие с постулатами специальной теории относительности. Хотя поверхностные утверждения такого рода логически необоснованны, более детальный анализ этой проблематики, учитывающий ограничения специальной теории относительности, вполне может быть предметом серьезного обсуждения» (1, с.625).

Можно сделать еще замечание лингвистического плана. «Термин *запутанный* относится к коррелированности физических систем, находящихся в таких квантовых состояниях, — их некоторой взаимозависимости и «переплетенности». Интересно, что в русском языке слово «запутанный» несет также значение путаницы и неразберихи, что отчасти символично, так как именно такое впечатление часто создается при первом знакомстве с этой «модной» областью физики» (1, с.627).

Э.Сантос предлагает новый подход к пониманию квантовых запутанных состояний (54). Свой анализ автор строит на исследовании различных состояний света. Прежде всего, его интересует вопрос о том, какие состояния света являются действительными.

Состояния, формирующие базис для квантово-оптического описания светового поля и служащие для решения уравнений Максвелла для электромагнитного поля, являются фоковскими состояниями. В представлении гильбертова пространства электрическое и магнитное поля излучения раскладываются по нормальным модам, причем коэффициенты являются операторами рождения и уничтожения фотонов. В вигнеровском представлении эти операторы становятся амплитудами мод, которые являются случайными переменными с распределением, даваемым вигнеровской функцией. Функция Вигнера в нерелятивистской КМ играет роль распределения псевдовероятности; ее маргиналы (marginals) по отношению к положению и импульсу отдельно дают квантовые вероятности для каждой из этих переменных, но сама функция не является положительно определенной. Существуют большие трудности при интерпретации вигнеровской функции как распределения истинной вероятности в КМ. «Тем

не менее, я предполагаю, что для светового поля функция Вигнера может рассматриваться как положительная для всех физически реализуемых состояний» (54, с.3). Во всех экспериментах, в которых обычная квантовая интерпретация учитывает отрицательные значения функции Вигнера для состояния света, учет всех источников шума и других факторов неидеальности приведет к рассмотрению чисто положительного значения функции Вигнера.

Далее, можно предположить, считает автор, что «фоковские состояния» не соответствуют физически реализуемым состояниям, хотя все они необходимы для представления каждого реального физического состояния поля излучения. Эта гипотеза противоречит обычным интерпретациям экспериментов в терминах однофотонных состояний. В действительности, экспериментальная ситуация, в которой сообщается об однофотонном состоянии, должна с необходимостью включать наблюдения волновых пакетов, а не одномодовых сигналов. Последнее, наполняющее все пространство и время, совсем не является физическим объектом. Функция Вигнера не является положительной. Однако необходимо помнить, что не существует способа контролировать момент, при котором волновой пакет излучается в ситуации атомных каскадов, используемых для соответствующих экспериментов. Это может быть принято во внимание при формировании смеси состояний волновых пакетов. «Можно показать, что однофотонное состояние становится смесью при положительной функции Вигнера» (54, с.5). Сантос не разделяет точку зрения, согласно которой все операторы плотности представляют физически реализуемые состояния. Он считает, что могут быть реализованы только те состояния, которые имеют положительное значение функции Вигнера. Известно, что если функция Вигнера положительна, то она является гауссовой. Поэтому в дальнейшем автор рассматривает именно такие функции.

Сначала для простоты автор рассматривает идеальную (нефизическую) ситуацию, в которой только синглетная мода поля содержит фотоны. Полная функция Вигнера будет задана произведением одномодовых функций. Наиболее общая одномодовая гауссова функция Вигнера может быть записана в терминах двух действительных

параметров  $A$  и  $B$  и одного комплексного параметра  $a$ . Для чистых состояний случай  $A=B$  называется когерентным состоянием, которое является идеализированной моделью функционирования лазера с непрерывным излучением, если  $a=0$  (и представляет вакуум, если  $a \neq 0$ ). Случай  $A \neq B$  называется сжатым (squeezed) состоянием. Эти два состояния являются единственными чистыми одномодовыми квантовыми состояниями, которые реалистичны согласно предложенному критерию положительности.

Если все действительные состояния света имеют положительную функцию Вигнера, то эту функцию можно интерпретировать как действительное распределение вероятности амплитуд излучательных мод. Поэтому квантовая оптика становится «замаскированной» (disguised) стохастической теорией, в которой состояния света являются распределениями вероятности, определенными на множестве возможных реализаций ЭМ поля. Сантос предлагает называть стохастические интерпретации квантовой оптики, полученные из функции Вигнера, *стохастической оптикой*. В то же время стохастическая интерпретация представляет явную теорию со скрытыми переменными, в которой и амплитуды ЭМ поля являются скрытыми!

Наиболее впечатляющее следствие такой стохастической теории состоит в том, что вакуум не является больше пустым, а наполнен случайным ЭМ излучением, имеющим энергию  $1/2\hbar\omega$  в среднем на радиационную моду. Это приводит к тому, что пространство теперь содержит случайный фон ЭМ волн, который мы будем называть полем нулевой точки (zeropoint field) (ПНТ).

Является ли эта теория классической — это дело проверки. При этом фотоны являются в точности волновыми пакетами, локализованными на ПНТ «в форме острия иглы» (54, с.7). Тем не менее, теория отклоняется (depart) от классической оптики в допущении, что существует фундаментальный шум — ПНТ, который не может быть элиминирован даже при нуле Кельвина. «Я предпочитаю оставаться ближе к современной терминологии и говорить, что *стохастическая оптика не является классической теорией*» (54, с.7).

ПНТ обычно напрямую не наблюдается, хотя опосредованно оно может производить наблюдаемые эффекты. Наблюдаемые сигналы состоят из дополнительного излучения поверх «моря» ПНТ. Критичным для стохастической интерпретации является предположение о том, что ПНТ имеет ту же природу, что и сигналы. Поэтому объяснение того, почему ПНТ прямо не наблюдаются, т.е. запуск (firing) фотонного детектора является нетривиальной проблемой.

Формализм гильбертова пространства для анализа процесса детектирования основан на нормальном упорядочивании, которое предполагает расположение операторов рождения слева, а операторов уничтожения — справа. Полученное уравнение для точечно-подобного детектора может быть интерпретировано в качестве утверждения о том, что детектор имеет порог, детектируя только ту часть поля, которая выше среднего ПНТ, т.е. детектор выключает (remove) ПНТ. Проблема состоит не в огромном значении энергии нулевой точки (интенсивность ПНТ — свыше  $10^5$  Вт/см<sup>2</sup> в видимом диапазоне), потому что пороговая интенсивность полностью (precisely) аннулирует (cancel) эту интенсивность. Проблема связана с флуктуациями интенсивности.

Автор выделяет классические и неклассические состояния света. Тот факт, что неклассичность возникает из существования ПНТ, дает критерий для классификации состояний поля излучения. Автор предлагает называть классическими (неклассическими) те состояния, в которых ПНТ учитывается (не учитывается). Более конкретно, он рассматривает состояние в качестве классического, если полное ЭМ поле  $E(\mathbf{r}, t)$  может быть декомпозировано на две независимые части:  $E_0(\mathbf{r}, t)$  и  $E_1(\mathbf{r}, t)$ , представляющие ПНТ и сигнал, соответственно. Когда это так, все оптические явления ассоциируются только с сигналом, а ПНТ в целом (altogether) может быть игнорировано, как это имеет место в классической оптике. Независимость полей означает, что соответствующие амплитуды являются независимыми случайными переменными.

Известно, что функция Вигнера состояния света может быть получена посредством свертки (convolution) глауберовской Р-функции. Если идентифицировать функцию Вигнера и Глауберу

функцию, то декомпозиция стохастического поля  $E(r, t)$  на две независимые части потребует, чтобы  $P$ -функция являлась необходимым и достаточным условием для того, чтобы иметь возможность декомпозировать поле на независимый сигнал и ПНТ-часть. «Это наш критерий для классического состояния света, и он находится в точном соответствии со стандартным квантово-оптическим определением классического состояния» (54, с.10).

Существует только одно классическое «чистое» состояние, а именно, — когерентное состояние (вакуумное состояние представляет собой частный случай). Это приводит к интерпретации, согласно которой когерентное состояние представляет собой детерминированный (не случайный) сигнал, наложенный на ПНТ. Важный тип классического «смешанного» состояния представляет хаотический свет. Особый случай хаотического света — тепловой свет, где зависимость среднего числа фотонов от частоты дается законом Планка.

В чем же состоит природа квантовой запутанности? Для реальных состояний света, представляющих собой два волновых пакета, функция Вигнера классического состояния имеет, с точки зрения автора, хорошую интерпретацию в предлагаемом им подходе. Соответствующее распределение вероятности состоит из двух частей, представляющих сигнал и ПНТ. В сигнале существует корреляция между двумя модами. Напротив, в ПНТ все моды некоррелированы (распределение есть произведение одномодовых членов). «В итоге мы имеем корреляцию, включающую сигнал, но не ПНТ. Это должно быть названо *классической корреляцией*» (54, с.12). «Я буду называть *запутанным* любое состояние двух мод, которое не является классическим, но имеет классические маргиналы» (там же). Такие состояния включают корреляцию между двумя модами, которая больше, чем корреляция любых классических состояний. В запутанном состоянии коррелированы сигнал и ПНТ, или «квантовые вакуумные флуктуации».

«Двухфотонная запутанность», подобная такой запутанности (хотя и включает много мод), имеет место в процессе параметрического понижающего преобразования. Фактически свет, полученный таким способом, состоит из двух отдельных пучков, чьи функ-



ции Вигнера являются гауссовыми, но полное состояние — не классическое. Т.е. каждый отдельный пучок состоит из хаотического света, но два пучка запутаны. Запутанность становится меньше, когда интенсивность  $n$  (среднее число фотонов) большая, поскольку большое  $n$  соответствует классическому пределу.

В настоящее время отсутствует согласие в отношении определения запутанности для смешанных квантовых состояний. Модным (fashionable) критерием является нарушение неравенства Белла. Однако в реальных экспериментах проверяемые неравенства никогда не были истинными белловскими неравенствами, полученными с использованием только общих свойств локальных скрытых переменных; всегда использовались неравенства, включающие дополнительные предположения. Нарушение одного из таких неравенств не означает отказ от локального реализма. Фактически оно должно квалифицироваться как «существование петель (loopholes)». Тем не менее, можно рассматривать эксперименты как обоснованные (valid) проверки запутанности.

Фактически, запутанность — это нелокальность свойств (1, с.631). Именно это и будет являться основным для нас. На самом деле проблема запутанных состояний усугубилась тем, что было введено несколько понятий, которые подменяют друг друга, не привнося в понимание ничего концептуально нового. Возможно, в чисто практическом плане они дают некоторое удобство, но не более того. И действительно, запутанность, нелокальность, корреляции и несепарабельность отражают, фактически, одно и то же квантовое свойство.

Но если микромир принципиально нелокален (несепарабелен), то, следовательно, все микрообъекты должны находиться в запутанных состояниях, поскольку и в ЭПР-эффекте нет никаких особенностей по приготовлению начального состояния.

Но может быть, как считают некоторые физики (9), запутанное состояние готовится исключительно локально, как в ЭПР-проблеме, и в этом его принципиальная особенность? Допустим, но что это тогда означает? Почему корреляции возникают именно локально и затем сохраняются даже пространственно-подобно?

Но могут ли корреляции, представляющие физическую основу запутанных состояний, формироваться и на удаленных друг от друга квантовых объектах? В принципе, именно так и должно быть, поскольку КМ несепарабельна и, следовательно, квантовые объекты всегда *локальны* по отношению друг к другу. Подчеркивание же локального характера просто означает тот факт, что макронаблюдатель *не может* практически готовить корреляции на пространственно-подобных интервалах. С другой стороны, в ряде работ подчеркивается, что запутанные состояния не могут быть приготовлены локально (1).

Следует отметить, что запутанные состояния понимают и трактуют достаточно широко и плюралистично. Так, У.Люкк и П.Наттерман определяют запутанные состояния как «нефакторизуемые начальные условия» (44). В то же время квантовая «запутанность» — одно из названий «соотношения неопределенностей» и «суперпозиции».

#### 4. МНОГООБРАЗИЕ ЗАПУТАННЫХ СОСТОЯНИЙ

Исследования последних двух десятилетий показали, что существуют различные типы запутанных состояний, причем, судя по имеющимся тенденциям, их количество в дальнейшем будет продолжать расти. Сначала приведем формулировки запутанных состояний для уже упоминавшихся чистого и смешанного состояния.

##### *Чистые запутанные состояния*

«*Чистым запутанным состоянием* называется такое состояние составной квантовой системы  $Q=A+B+\dots$ , волновую функцию которого нельзя представить в виде тензорного произведения волновых функций составляющих ее частей» (1, с.628):

$$\Psi_Q \neq \Psi_A \Psi_B \dots \quad (2)$$

Волновые функции, которые можно представить в виде произведения (2), называются *факторизуемыми* и не содержат никаких корреляций. Методологическим критерием наличия корреляций

здесь может служить операция усреднения операторов квантовой теории: если применить эту операцию к факторизуемому состоянию, то усреднение будет производиться для каждой части составной системы независимо. Естественно, что при этом между частями отсутствуют корреляции. Поскольку наличие квантовой коррелированности ассоциируется с наличием запутанности, отсюда следует вывод о том, что факторизуемые состояния не могут быть и запутанными. Следует также отметить, что невозможность представить это состояние в виде тензорного произведения следует из его инвариантности относительно любых вращений системы координат. Однако оказывается, что между чистыми состояниями могут существовать корреляции и, следовательно, запутанность.

Таким образом, «чистые квантовые состояния бывают либо квантово-коррелированными (запутанными), либо вообще некоррелированными» (1, с.628). Примером чистого запутанного состояния является ЭПР-состояние. Особенностью ЭПР-состояния является то, что оно не просто запутанно, т.е. коррелированно, но еще и *максимально запутано*. Последнее означает, что для двухсоставной квантовой системы в запутанном состоянии частичная матрица плотности чистого состояния пропорциональна единичной матрице. Частичная матрица плотности представляет собой матрицу плотности, которая получается после частичного усреднения (на математическом языке – взятия частичного следа) по переменным любой из составляющих частей квантовой системы. Оказывается, что полученные в результате подобных операций матрицы плотности обладают способностью описывать состояния частей квантовой системы по отдельности.

Имеется существенное отличие частичных матриц плотности запутанных состояний от просто чистых квантовых состояний. Это отличие связано с энтропией системы: если для запутанных состояний частичные матрицы плотности обладают отличной от нуля квантовой энтропией, тогда как энтропия чистого состояния составной квантовой системы равна нулю. Это отражает наличие взаимосвязи между флуктуациями отдельных частей составной квантовой системы. «При этом степень их корреляции тем больше, чем более случайными они являются по отдельности, поскольку флуктуации в обеих независимо рассматриваемых частях составной системы обусловле-

ны единым источником — чисто квантовыми флуктуациями в составной системе» (1, с.628). Последнее можно трактовать как переход (при независимом рассмотрении отдельных частей системы) чисто квантовых флуктуаций, отвечающих чистому запутанному состоянию составной квантовой системы, в классические флуктуации соответствующих частичных распределений вероятности (т.е. частичных матриц плотности). При этом такие флуктуации описываются энтропией этих распределений.

Степень запутанности двухсоставных чистых состояний можно количественно охарактеризовать с помощью некоторой меры запутанности, которая выражается в данном случае с помощью энтропии соответствующей части системы или через частичный след матрицы плотности. Другими словами, единица меры запутанности определяется основанием логарифма, входящего в формулу энтропии по аналогии с единицами измерения информации. Для двоичного логарифма употребляется понятие «один бит запутанности» или e-bit (entanglement bit).

Важно, чтобы определения запутанных состояний и меры запутанности носили непротиворечивый характер. Для этого необходимо выполнение «ряда условий, отвечающих смыслу запутанных состояний как нелокального квантового ресурса» (1, с. 628–629). Так, определения и свойства должны сохраняться при выполнении локальных квантовых операций и обмена классической информацией — LQCC-операции (local quantum [operations] and classical communication).

Суть LQCC-операций состоит в следующем. Пусть два пространственно удаленных друг от друга человека, скажем, Алиса и Боб, обладают разными частями запутанного состояния двухсоставной системы. Ими могут быть, например, спины ЭПР-пары. Алиса и Боб не имеют возможности осуществлять прямое когерентное взаимодействие между частями составной квантовой системы или передавать их друг другу. Общаться они могут только с помощью классических средств, например, передать информацию по почте или, наконец, позвонить друг другу по телефону.

Алиса и Боб могут производить над своими частями составной квантовой системы любые квантовые операции, т.е. унитарные или супероператорные преобразования (4), а также квантовые измерения (в том числе неортогональные) (Busch P., Lahti P.J., Mittelstaedt P. The quantum theory of measurement. — В., 1996). Полученной информацией они могут обмениваться только с помощью классических средств коммуникации. «Математическая структура определенных таким образом LQCC-операций очень сложна, но с практической точки зрения она представляется наиболее оправданной» (1, с.629).

В результате проведения LQCC-операций мера запутанности заданного состояния в среднем может лишь уменьшаться. Это означает, что запутанность нельзя создавать только с помощью локальных средств. Это «как раз и определяет смысл запутанных состояний как нелокального квантового ресурса» (1, с.629).

Запутанность чистых состояний можно «разбавлять» или «концентрировать». Под этим подразумевается следующее. Предположим, что между Алисой и Бобом распределено  $N$  копий двухсоставных квантовых систем (например, пар спинов  $\frac{1}{2}$ ), каждая из которых находится в запутанном состоянии, так что суммарная запутанность становится равной  $N$ -кратной мере запутанности. Тогда существуют такие LQCC-операции, которые позволяют из исходных двухсоставных систем получить  $M$  двухсоставных систем, каждая из которых будет обладать волновой функцией  $|\psi'\rangle$ , причем в пределе  $N \rightarrow \infty$  суммарная запутанность новых  $M$ -систем останется прежней.

«Таким образом, в асимптотике бесконечного числа исходных объектов запутанность можно *асимптотически обратимо* преобразовывать ... в более или менее запутанные состояния. В частности, исходные физические объекты, находящиеся в не максимально запутанных состояниях, можно с сохранением общего количества запутанности преобразовывать в меньшее число объектов, которые находятся в максимально запутанных состояниях и, таким образом, наиболее полезны для практических приложений» (1, с.629).

### *Многосоставные запутанные квантовые системы*

Изучение свойств многосоставных квантовых систем нетривиально и нередко неоднозначно. Наиболее широкую известность полу-

чили исследования ГХЦ-состояния – запутанного состояния трехсоставной квантовой системы, получившего название по первым буквам фамилий трех авторов, впервые рассмотревших его (Гринбергер, Хорн, Цайлингер). В общем случае роль запутанных состояний многосоставных квантовых систем играют состояния типа «шрёдингеровского кота». Примером подобного состояния может служить состояние

$$|\Psi_{\text{cat}}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|000\dots 0\rangle + |111\dots 1\rangle) \quad (3)$$

$\underbrace{\hspace{1.5cm}}_N \qquad \underbrace{\hspace{1.5cm}}_N$

Ввиду большого количества  $N$  входящих в них частиц состояния  $|000\dots 0\rangle$  и  $|111\dots 1\rangle$  должны описывать состояния макроскопических объектов. «Соответственно, состояние (3) описывает когерентную суперпозицию макроскопически различных состояний больших объектов подобно суперпозиции живого и мертвого состояний кота» (1, с. 629). В последнее время появились возможности экспериментальной работы с аналогичными состояниями, состоящими, правда, из сравнительно небольшого числа частиц.

Важным свойством многосоставных квантовых систем является невозможность сведения  $n$ -частичной запутанности к запутанности более низкого порядка. Это означает, что не существует обратимого преобразования друг в друга, например, двух ГХЦ-триплетов в три ЭПР-пары с помощью LQCC-операций даже в асимптотике большого числа их копий. Состояния типа шрёдингеровского кота как раз и являются примером таких неприводимых многочастичных запутанных состояний.

### *Смешанные запутанные состояния*

В отличие от чистых состояний, в которых любые корреляции являются квантовыми, смешанные состояния, описываемые матрицами плотности, в определенной степени являются аналогами классических статистических ансамблей, так как они могут включать в себя и классические корреляции. Для разделения корреляций на классические и квантовые, вводят представление о сепарабельных

(т.е. классически-коррелированных) квантовых состояниях. Их можно записать в виде суммы тензорных произведений матриц плотности составных частей рассматриваемой квантовой системы. Каждое слагаемое подобной суммы описывает статистически независимые (мультипликативные) состояния подсистем  $A, B, \dots$  сложной квантовой системы, а само суммирование (некогерентное смешивание) определяет наличие классических корреляций.

Такие матрицы плотности «можно приготовить локально, т.е. используя локальные квантовые операции и обмен классической информацией, не обладая изначально никакими запутанными состояниями. Именно в этом смысле они не являются квантово-коррелированными» (1, с. 630). Несепарабельными или *смешанными запутанными* состояниями называются состояния, которые нельзя представить в виде такой суммы.

Для смешанных запутанных состояний двухсоставных систем можно определить несколько различных мер запутанности. Каждая из них полезна в том или ином случае, но свести их, как в случае чистых состояний, к какой-нибудь одной мере, не удастся. С практической точки зрения важными являются *запутанность формирования* (entanglement of formation) и *дистиллируемая запутанность* (distillable entanglement). Запутанность формирования можно определить как минимальную усредненную запутанность ансамблей чистых состояний, реализующих данное смешанное состояние. Другими словами, запутанность формирования есть минимальное количество «чистой» запутанности, необходимое для того, чтобы создать данное состояние с помощью локальных квантовых операций и обмена классической информацией. Состояния с нулевой запутанностью формирования сепарабельны и наоборот.

Дистиллируемая запутанность определяется как количество чистой запутанности, которое можно извлечь (дистиллировать) из заданного смешанного состояния с помощью произвольных LQCC-операций в асимптотике большого числа копий исходного состояния. Процесс выделения чистой запутанности из смешанной называется «очищением запутанности» (entanglement purification). Так как определение дистиллируемой запутанности опирается на некоторый гипо-

тетический оптимальный способ очищения запутанности, то математической формулы для этой меры пока не существует.

Вышеприведенные меры запутанности ориентируются на практические методы создания и использования смешанных квантово-коррелированных состояний. Совсем другой подход используется, когда сначала постулируются некоторые аксиоматические свойства, которым должна удовлетворять любая мера запутанности, а уже потом подбирается подходящая функция. Аналогично мере запутанности чистых состояний любая мера запутанности смешанных состояний должна удовлетворять условиям, определяющим смысл запутанности как нелокального ресурса (Bennett C.H. et al. // Phys. rev. — 1996. — Vol. 53A. — P. 2046):

- мера запутанности равна нулю для сепарабельных состояний и мера запутанности больше или равна нулю в остальных случаях;
- все меры запутанности инвариантны относительно проведения локальных унитарных операций;
- никакая мера запутанности не может в среднем увеличиваться в результате проведения любых физически реализуемых (т.е. супероператорных) локальных операций и, следовательно, произвольных LQCC-операций.

Уже эти условия накладывают ограничения на возможные меры запутанности. Если же к ним присовокупить другие нетривиальные требования, то можно получить новые интересные теоретические результаты. Так, с добавлением условий асимптотической аддитивности и непрерывности дистиллируемой запутанности было показано, что все «хорошие» меры запутанности должны быть ограничены сверху запутанностью формирования, а снизу — дистиллируемой запутанностью.

Помимо поиска адекватных мер запутанности смешанных состояний идет также поиск критериев несепарабельности (запутанность формирования больше нуля) и дистиллируемости (дистиллируемая запутанность больше нуля) смешанных состояний  $p$ . Особый интерес представляет структура *состояний со связанной запутанностью* (bound entangled states), для которых запутанность формирования больше нуля, но дистиллируемая запутанность равна нулю (55).



К настоящему моменту в этой области получено довольно много интересных результатов (Lewenstein M. et al. // J. modern optics. — 2000. — Vol. 47. — P. 2841), но окончательных ответов пока нет.

Таким образом, проблема адекватных мер и критериев запутанности для смешанных состояний остается пока неразрешенной. Кроме того, положение осложняется в случае попыток обобщения упомянутых выше систем, например, при изучении запутанных состояний систем с непрерывным спектром или запутанных состояний многосоставных систем (32). Другим нетривиальным обобщением является недавно возникшая проблема описания нелокальных свойств (запутанности) *квантовых операций* (28).

## 5. НЕКОТОРЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ЗАПУТАННЫХ СОСТОЯНИЙ

Идеология запутанных состояний применяется для исследования физических основ КМ, метрологических исследований, в физике квантовой информации. Обычно источниками запутанных состояний являются процессы каскадного распада атомных возбуждений и спонтанного параметрического рассеяния света в нелинейных кристаллах. В этих процессах образуются фотонные пары с запутанными состояниями поляризации, которыми управляют зеркалами и поляризаторами. К сожалению, подобные источники обладают определенными недостатками, в частности, распространение фотонных пар со скоростью света затрудняет их локализацию и сохранение для последующего применения. Поэтому в последнее время активно разрабатываются так называемые детерминистические методы создания запутанных состояний массивных частиц — атомов и ионов, захваченных в специальных ловушках. Под детерминистическими методами понимается возможность сформировать нужное запутанное состояние заданных частиц в любой момент времени.

Как подчеркивают авторы (1, с. 631), первым серьезным приложением запутанных состояний стала экспериментальная проверка неравенств Белла. После выхода в свет статьи Эйнштейна, Подольского и Розена (18) и знаменитой дискуссии Эйнштейна с Бором ста-

ли очевидны расхождения между классической и квантовой механиками относительно понятия физической реальности и локальности физических взаимодействий. Лишь спустя тридцать лет Беллу удалось сформулировать это отличие математически в виде неравенств, которые позволяют проверить условие слабой нелокальности в КМ. Это условие говорит о том, что два эксперимента, выполненные даже на пространственно-подобном расстоянии, могут оказывать физическое влияние друг на друга. Выполненные многочисленные эксперименты подтвердили наличие подобного свойства. В частности, были экспериментально зарегистрированы корреляции, соответствующие ГХЦ-состояниям (Bouwmeester D. et al. // Phys. rev. letters. – 1999. – Vol. 82. – P. 1345).

Следует, однако, отметить, что в реальных экспериментах (особенно с атомами) обычно удается создать только смешанные запутанные состояния, которые лишь приближенно отражают свойства чистых состояний, поэтому неравенства Белла трудно использовать для тестирования нелокальных корреляций. Более перспективными оказываются экспериментальные измерения средних значений специальных операторов, называемых «свидетелями запутанности» (entanglement witnesses). «Можно показать, что для любого несепарабельного состояния существует соответствующий свидетель запутанности, детектирующий его..., а также что любому свидетелю запутанности соответствует некоторое неравенство Белла, которое можно проверить экспериментально, исключая тем самым определенный класс теорий локальных скрытых переменных...»(1, с. 632).

С понятием запутанного состояния самым тесным образом связано понятие декогеренции. Декогеренцией называют процесс потери когерентности квантовых суперпозиций при взаимодействии квантовой системы с окружающей средой. Декогеренция системы ведет к появлению у нее классических черт, в соответствии с информацией, записанной в окружении. Другими словами, декогеренция – это запутывание системы при ее взаимодействии с окружением. В результате такого запутывания исходная система из первоначального запутанного состояния переходит в незапутанное смешанное состояние. Если не контролируются все степени свободы, декогеренция приводит к

неотличимости предсказаний квантовой теории для макроскопических состояний от предсказаний классической теории. Только при рассмотрении открытых систем декогеренция практически полностью объясняет процесс взаимодействия с окружением и возникновение смеси, эквивалентной распределению по различным состояниям со своими вероятностями.

В связи с этим теории декогеренции удалось получить результат, который имеет большое концептуальное значение. Дело в том, что до недавнего времени считался справедливым так называемый постулат редукции волновой функции. Именно им объяснялся однозначный вид окружающей реальности, и предполагалось, что все остальные альтернативные члены суперпозиции коллапсируют, исчезают. Говоря простым языком, весь вопрос сводился к тому, существует ли одновременно множество «картин» реальности, и мы, в принципе, способны переключаться между ними, или все они «схлопываются» в одну – ту, которую мы видим, а другие увидеть никогда не сможем. Теория декогеренции показывает, что редукции волновой функции не происходит, а также объясняет, почему постулат редукции приводит к правильным предсказаниям, тем самым не устранив его, а меняя его статус (5).

Именно благодаря эффекту декогеренции мы не встречаем в природе суперпозиции мертвых и живых котов. Однако эксперименты по созданию небольших объектов – «шрёдингеровских котят», состоящих из нескольких фотонов или атомов, вполне возможны (Sackett C.A. et al. // Nature. – 2000. – Vol. 404. P. 256). Теория предсказывает, что время жизни «шрёдингеровских котят» убывает экспоненциально с их размером, а экспоненциальная зависимость приводит к тому, что время жизни когерентных суперпозиций макроскопически различных состояний объектов, соразмерных с реальными котами, должно быть чрезвычайно мало. Кроме того, распространена точка зрения о том, что запутанность проявляется только в системах, состоящих из небольшого числа квантовых частиц. В одном недавно опубликованном препринте сообщается о том, что авторам удалось экспериментально реализовать запутанное состояние двух объектов («газовых образцов» атомов цезия), каждый из которых

содержал примерно  $10^{12}$  атомов. Этого удалось достигнуть воздействием на образцы светового импульса, который осуществлял нелокальное белловское измерение коллективных спинов образцов. При этом запутанное спиновое состояние существовало в течение 0,5 миллисекунды, что позволяет опровергнуть утверждения о почти мгновенном распаде запутанного состояния макроскопических объектов (33).

Вообще говоря, существуют надежды на то, что декогеренция может являться основным процессом, определяющим степень классичности или квантованности поведения данного физического объекта, а кроме того, и решить проблему квантового измерения в целом (см. работы W.H.Zurek).

Б.Резник предпринимает попытку связать природу запутанных состояний с вакуумным состоянием (52). Он исследует запутанность вакуума релятивистского поля при условии возможности для пары причинно разделенных пробных частиц взаимодействовать с полем. Он обнаружил, что, даже когда пробные частицы изначально не запутаны, они могут достичь конечного запутанного состояния. Это означает, что запутанность продолжает сохраняться между изолированными областями в вакууме. Однако пробная запутанность, в отличие от корреляций, исчезает из областей, которые становятся сепарабельными.

Исследования показали, что гильбертово пространство двух подсистем содержит подкласс запутанных состояний, которые проявляют уникальные квантово-механические свойства. Еще Беллом было показано, что корреляции между наблюдаемыми, измеренными отдельно для каждой подсистемы, могут быть «сильнее», чем корреляции, предсказанные любыми локальными классическими моделями.

Имея каузальную структуру и встроенную локальность, релятивистская теория поля, как считает автор, представляет собой естественную основу для исследования запутанности. Известно, что наблюдаемые поля в пространственно-подобных точках в вакууме коррелированы. Для безмассовых полей в (3+1)-мерии эти корреляции распадаются на расстоянии  $L$  между двумя точками как  $1/L^2$ . Сами

эти корреляции, однако, не означают существования квантовой запутанности, потому что они могут, в принципе, возникать как классические корреляции. Однако многочисленные исследования дают основания для утверждения о том, что вакуум, действительно, запутан. В риндлеровском квантовании происходит запутывание (span) гильбертова пространства свободных полей с помощью прямого произведения состояний числа риндлеровских частиц  $||n,1\rangle$  и  $|n,2\rangle$  внутри двух дополнительных пространственно-подобных интервалов  $x < -|t|$  и  $x > t$ , соответственно. Оказалось, что состояние вакуума Минковского может быть выражено как запутанное состояние, подобное ЭПР-состоянию  $\sim \sum_n \alpha^n |n,1\rangle |n,2\rangle$  для каждой моды. В рамках алгебраической квантовой теории поля было доказано, что наблюдаемые локального поля запутаны в произвольных двух пространственно-подобно разделенных областях.

Б.Резник анализирует мысленный эксперимент с участием пробной запутанности, которая не чувствительна для малых масштабов (cutoff). Она представляет собой пару пробных объектов – точечно-подобных двухуровневых систем, которые связаны с полем в течение короткого промежутка времени. Процесс имеет место в двух причинно не связанных областях. Поскольку пробные объекты были взяты изначально незапутанными, и поскольку запутанность не может быть продуцирована локально, присутствие (наличие) запутанности в конечном состоянии пробных объектов рассматривается в качестве меры для вакуумной запутанности.

Резник исследует соотношение между энтропией, корреляциями и запутанностью. Состояние запутано, если нет локальных унитарных преобразований, которые могут преобразовать состояние в прямое синглетное произведение состояний. Другими словами, запутанное состояние существует, если и только если существуют корреляции между локальными наблюдаемыми.

Существование корреляций означает, что некоторая информация сохраняется в комбинированном состоянии, но ее невозможно отследить, исследуя одну часть системы. Подсистема тогда ведет себя как смесь. Энтропия фон Ньюмана (или Шеннона) показывает эту потерю информации при исследовании отдельной подсистемы.

Для чистых состояний равенство энтропий подсистем имеет место, если и только если состояние запутано. Поэтому энтропия может быть рассмотрена в качестве количественной меры запутанности. Сюрприз, возможно, в том, что для ансамбля тождественных состояний — это, фактически, уникальная мера запутанности. Резник приходит к выводу о том, что для случая чистых состояний энтропия, корреляции и запутанность являются эквивалентным описанием одного и того же физического явления.

Ситуация разительно отличается для случая смешанного состояния. Во-первых, как можно определить запутанность смешанного состояния? Автор предлагает определять запутанность условием, что оператор плотности не запутан. Оператор плотности не запутан, если мы можем найти базис, из которого можно вывести сепарабельную форму для суммы локальных операторов плотности. Полученный оператор плотности проявляет нетривиальные корреляционные свойства, но, тем не менее, он не запутан и описывает классические корреляции. Подобно этому, функция энтропии не исчезает для незапутанного смешанного оператора плотности.

Б.Резник приходит к выводу, что для смеси корреляции не эквивалентны запутанности. Поэтому корреляции не обязательно означают запутанность, а энтропия фон Неймана не является подходящей мерой запутанности.

Расчеты автора позволили ему сделать вывод о том, что в эффекте Унру запутанность сохраняется даже тогда, когда области разделены конечным расстоянием. Тем не менее, когда разделение становится слишком большим, выделенная запутанность уменьшается до нуля, тогда как классический тип корреляций нет.

Автор подчеркивает, что энтропия не является больше хорошей мерой запутанности, если состояние не является чистым, когда, например, две области разделены. Черная дыра естественным образом делит пространство на внутреннюю и внешнюю дополнительные области с комбинированным чистым состоянием. В этом случае энтропия фон Ньомана совпадает с мерой запутанности. Как мы можем ренормализовать эту энтропию запутанности? Наивное обрезание не удовлетворительно, потому что при этом будут также обре-

заться (truncate) ультравысокие моды, которые необходимы в хоккингском выводе излучения черной дыры. С другой стороны, если мы разделим внутреннюю и внешнюю области (эффективно выполняемое путем введения физических пробных частиц), то энтропия становится действительно конечной, но больше не будет мерой запутанности, а корреляции станут классическими. Для атомоподобных систем вакуумная запутанность становится физически операциональной величиной. Действуя локально на ансамбль таких генерированных пар, можно «очистить» величину запутанности и, редуцируя число пар, постепенно достигнуть совершенно чистой ЭПР-бумовской пары.

Д.Ан с коллегами (41) обсуждают вопрос о том, инвариантна ли запутанность в специальной теории относительности (СТО)? Выдвигается предположение о том, что микроскопическое происхождение энтропии черных дыр связано с запутанностью хоккингских частиц внутри и вне горизонта событий. Большинство существующих схем квантовых вычислений и обработки квантовой информации основаны на положении о том, что запутанность является инвариантной. В целом предполагается, что полная запутанность между всеми степенями свободы для полной волновой функции является инвариантной в различных лоренцевых системах отсчета. Авторы показывают, что квантовая запутанность не является инвариантной в СТО, когда каждая из составляющих систему частиц не имеет определенного импульса. Это означает, что релятивистские эффекты будут оказывать существенное влияние почти на все схемы процессов обработки квантовой информации. Например, процедуры, основанные на очищении и кодировании, будут зависеть от системы отсчета. Неинвариантность запутанности будет также влиять на обобщенные измерения. Должен существовать определенный дополнительный протокол для компенсации вариаций запутанности, как это имеет место для коррекции квантовых ошибок при декогеренции.

Расширение обсуждения по запутанности за нерелятивистскую теорию приносит новые вопросы, на которые необходимо найти удовлетворительные ответы: 1) что представляет собой ковариантные состояния, соответствующие двухчастичным ЗС; 2) является ли полная запутанность инвариантной, и сохраняется ли точность воспроизведения запутанности в СТО? Мы бы добавили, что, в принци-

пе, в духе Эйнштейна возникает также вопрос и относительно того, полна ли сама нерелятивистская КМ без учета СТО. Как известно, Эйнштейн считал, что полную теорию квантово-механических процессов можно будет построить только на основе расширения теории относительности. В принципе, стандартную квантовую механику вполне можно считать полной в любом виде, но лишь при условии, что этот конкретный вид будет рассматриваться только в качестве определенного приближения. Однако, на наш взгляд, ни одна физическая теория не может быть полной и полностью замкнутой даже в пределах той области, в которой она считается адекватной. Это своего рода аналог неполноты арифметики. Но поскольку физика, естественные природные процессы менее идеальны и, в известном понимании, менее «точные», то неполнота любой физической теории тем более не должна вызывать сомнений.

## 6. КВАНТОВЫЕ КОМПЬЮТЕРЫ, ТЕЛЕПОРТАЦИЯ И КРИПТОГРАФИЯ

Важнейшей областью применения запутанных состояний является квантовая информация. Собственно говоря, благодаря активному развитию этой сферы в конце XX столетия теория запутанных состояний получила как бы второе рождение. В теории и практике квантовой информации наибольшее развитие получили следующие три: квантовые компьютеры, квантовая криптография и квантовая телепортация. О них написано огромное количество статей, и их число продолжает быстро расти.

Пожалуй, наиболее интригующей областью применения запутанных состояний является квантовая телепортация. Целью процедуры квантовой телепортации является передача из одной точки в другую определенного квантового состояния, что осуществляется с помощью квантовых корреляций. «По своей физической сути квантовая телепортация является переносом квантового состояния с одного физического объекта на другой без прямого взаимодействия между ними» (1, с. 633). Вообще говоря, термин «телепортация»



употребляется в научно-фантастической литературе, а также в древних и в современных духовных практиках для обозначения процесса, при котором телепортируемый объект или личность исчезает в одном месте и мгновенно оказывается в другом месте, причем расстояние при этом не имеет значения. В современных работах по квантовой телепортации чаще всего обсуждаются два механизма этого процесса: 1) объект или личность «рассыпаются» (6, с. 124) в одном месте, а полная информация об их структуре передается в некоторое отдаленное место, где собираются их точные копии; 2) с помощью телепортации может осуществляться только передача информации. Добавим, что в древних знаниях предполагается еще один механизм телепортации: объект «не рассыпаясь» полностью исчезает в одном месте и целостно появляется в другом.

Идея возможности квантовой телепортации была высказана еще до Второй мировой войны, но первую принципиальную схему эксперимента по реализации такого взаимодействия предложили только в 1993 г. Это удалось группе специалистов исследовательского центра ИВМ, возглавляемого Ч.Беннетом, которые предложили использовать процедуру квантовой телепортации для переноса информации. Тогда же ими был выдвинут и термин «квантовая телепортация». Сегодня феномен квантовой телепортации находится в центре внимания физиков.

В современных теоретических и экспериментальных работах по квантовой телепортации рассматривалась телепортация только одного квантового бита (кубита) информации. Общая схема процесса квантовой телепортации, о которой можно достаточно обоснованно говорить на современном уровне знаний, состоит в следующем.

На первом этапе «приготавливается» ЭПР-пара тождественных частиц А и В со спином  $\frac{1}{2}$  (корреляционная линия). Одна из частиц (например, частица А) остается у того, кто хочет отправить (телепортировать) информацию (скажем, у Алисы), а вторая (частица В) находится у получателя этой информации (у Боба). При этом Алиса и Боб могут быть разделены значительным расстоянием.

Предположим (6, с. 124), что Алиса хочет телепортировать Бобу некоторую третью частицу С в некотором неизвестном ни Бобу,

ни Алисе состоянии. Для этого на первом этапе нужно создать корреляционную линию – ЭПР-пару. На втором этапе осуществляется совместное измерение спина в двухсоставной системе – первого партнера ЭПР-пары и третьей частицы, т.е. измеряется состояние системы из частиц А и С.

В момент измерения состояния системы А+С квантовая часть информации мгновенно телепортируется частице В, которая находится у получателя Боба, и она мгновенно изменяет свое состояние. После измерения ни кубит А, ни кубит С не может находиться в определенном состоянии: образуется запутанное состояние кубитов А и С. Специфика квантовой информации состоит, в частности, в том, что «при квантовой телепортации произвольное (и заранее не известное) состояние кубита А разрушается, однако возникает идентичное состояние кубита В в другой точке» (9, с. 635). Такое измерение может иметь четыре различных результата (состояния).

На третьем этапе отправитель (Алиса) должен переслать результат своего измерения получателю (Бобу) для восстановления состояния телепортированного кубита по обычному классическому каналу связи. Например, она может просто позвонить Бобу по телефону. Поскольку число полученных состояний равно четырем, то необходимая для Боба классическая информация должна содержать два бита. Эта информация подскажет Бобу, в какой системе координат находящаяся у него частица (второй партнер ЭПР-пары) приобретает новое состояние. «Разумеется, при таком процессе два кубита классической информации теряются и превращаются в тепло. Теряется также та информация, которая содержалась в ЭПР-паре» (6, с. 127). Передача классической информации происходит со скоростью меньше скорости света. «По существу, на этом этапе процедуры квантовой телепортации ключевая информация о телепортируемом состоянии оказывается зашифрованной в классическом сообщении, передаваемом по обычному классическому информационному каналу» (1, с. 633).

Боб как получатель информации не может знать, какой из четырех альтернативных результатов измерения получен, поэтому ему неизвестно, произошла ли после измерения деформация состояния

при телепортации. Если она произошла, то требуется выполнить корректирующее преобразование. На четвертом этапе, получив от Алисы классическую часть информации, Боб может построить новое состояние «простым поворотом прибора вокруг осей  $x$ ,  $y$ ,  $z$  относительно имеющегося у него второго партнера ЭПР-пары. В результате Боб получает точную информацию о состоянии третьей частицы  $C$ .

Какие же достижения существуют в плане экспериментальной реализации квантовой телепортации? Вскоре после формулировки реалистической схемы такого процесса Беннеттом и др. он был осуществлен экспериментально с запутанными фотонными парами: в конце 1997 г. А.Цайлингер с коллегами осуществили телепортацию квантового состояния (Bouwmeester D. et al. // Nature. — 1997. — Vol. 390. — P. 575). Недостатком этих первых работ была низкая вероятность успешной телепортации (25%). Повысить вероятность удалось за счет усовершенствования методики проведения эксперимента, однако при этом значительно уменьшалась эффективность измерений (до  $10^{-10}$ ). Проблема состоит в том, что для проведения полного измерения белловских состояний фотонов необходима нелинейная оптика, но она приводит к низкой эффективности. Использование линейной оптики приводит к неполному измерению, в результате чего получается малая вероятность правильного определения характеристик телепортируемого кубита. В перспективе можно телепортировать не кубиты, а непрерывные переменные. Но и у этого метода есть свои недостатки: во-первых, трудно подготовить максимально запутанное состояние, т.е. сжатые состояния световых пучков, а во-вторых, с ростом расстояния телепортирования растут потери. Группой Гисина с коллегами в Швейцарии была осуществлена телепортация кубитов на расстояние 10,8 км (34).

Интересным обобщением квантовой телепортации является *перенос запутанности* (entanglement swapping), цель которого — создать запутанное состояние двух частиц без прямого взаимодействия между ними — путем специальных манипуляций над квантовыми корреляциями, уже существующими в системе. Перенос запутанности уже был осуществлен экспериментально для поляризационных состояний фотонов. Существует своеобразный антипод квантовой

телепортации — *плотное квантовое кодирование*, позволяющее передавать большее количество классической информации через квантовый канал при наличии заранее приготовленного запутанного состояния (1).

Первые успешные теоретические и экспериментальные работы по квантовой телепортации вызвали к жизни очень смелые, а то и полужантастические интерпретации. Высказывались суждения о возможности в будущем путешествовать посредством телепортации, исчезая в одном месте и воспроизводясь в другом. К сожалению, современное понимание природы квантовой телепортации не обещает перспективу перемещения материального объекта.

Чтобы «телепортировать» материальное тело, нужно иметь в месте назначения необходимый «строительный материал» — набор атомов, идентичный тому, из которого состоит тело перед телепортацией. Но, даже предположив, что нам удалось собрать это огромное количество частиц, нужно суметь построить искомый образ телепортируемого тела, т.е. передать им квантовое состояние изначального предмета. Что означает квантовое состояние макроскопического тела, на сегодняшний день еще не очень понятно, а некоторые исследователи и вовсе подвергают сомнению саму возможность использования квантовой теории в макромире.

Кроме того, считалось, что запутанность проявляется только в системах, состоящих из малого количества микрочастиц. Б.Юлсгарду с коллегами удалось экспериментально реализовать запутанное состояние двух многочастичных газообразных объектов, каждый из которых содержал  $\sim 10^{12}$  атомов цезия (33). Этот результат удалось достичь с помощью облучения «образцов» световым импульсом, который воспроизводил нелокальное белловское измерение коллективных спинов объектов. Чрезвычайно важный результат состоял также в том, что запутанное спиновое состояние существовало в течение 0,5 миллисекунды. Дело в том, что до выполнения этого эксперимента преобладала точка зрения, что запутанное состояние макроскопических объектов должно распадаться почти мгновенно.

С квантовой телепортацией связаны некоторые особые процессы с квантовой запутанностью. Одним из них является так называемый *перенос запутанности* (entanglement swapping). «В этом процессе создается запутанное состояние двух частиц без прямого взаимодействия между ними — путем специальных манипуляций над квантовыми корреляциями, уже существующими в системе. Таким образом, перенос запутанности близок к идее «телепортации запутанности», но все же его следует отличать от прямой телепортации запутанных состояний. Перенос запутанности уже реализован экспериментально для поляризационных состояний фотонов» (1, с. 633). Другим своеобразным процессом является плотное квантовое кодирование, которое является своеобразным антиподом квантовой телепортации. Используя заранее подготовленное запутанное состояние, эта процедура позволяет передать большее количество классической информации через квантовый канал.

В перспективе квантовая телепортация может играть значительную роль в будущих системных каналах передачи информации. В этом случае можно будет телепортировать данные в любых цифровых системах. Преимущество телепортационного способа передачи информации состоит в том, что из одной точки пространства в другую переносится точная копия состояния. При этом появится возможность передавать информацию практически без потерь, фактически, со 100-процентной эффективностью, поскольку процедура квантовой телепортации является бесшумным квантовым каналом. Именно перспектива создания принципиально новых систем связи и определяет нынешний научный ажиотаж вокруг феномена квантовой телепортации. Теперь рассмотрим, каким образом запутанные квантовые состояния работают в квантовых компьютерах и в квантовой криптографии.

*Квантовый компьютер.* Не менее впечатляющими и перспективными являются подходы, связанные с попытками использования запутанных состояний для создания квантового компьютера и в криптографии. На практике появляется все больше задач, для решения которых мощности обычных компьютеров уже не хватает. В последнее время появилась надежда на создание квантовых компьюте-

ров — компьютеров, в которых реализуется «квантовый параллелизм», позволяющий осуществлять вычисления, недоступные для классического компьютера. Это новое поколение компьютеров позволит реализовывать преимущества квантовых алгоритмов над классическими. «Задачи, которые могут быть решены на классическом компьютере за экспоненциально большое (т.е. на практике бесконечное) время, на квантовом компьютере могут решаться за полиномиально большое время (которое для ряда практически важных задач вполне достижимо)» (9, с. 636). И хотя, согласно некоторым оценкам, создание полноценных квантовых компьютеров вряд ли может быть достигнуто в ближайшее десятилетие, огромные успехи последних лет позволяют надеяться на решение проблемы.

Одна из ключевых идей создания квантового компьютера связана с существованием суперпозиции квантовых состояний. Так же как и в обычном компьютере, в кубите квантового компьютера кодируются числа 0 и 1. Цепочка из  $N$  кубитов, каждый из которых находится в одном из базовых состояний, кодирующих цифры 0 и 1, позволяет закодировать соответственно  $N$ -значное двоичное число длины  $N$ . Выполнение с такой цепочкой кубитов серии унитарных преобразований будет соответствовать определенной процедуре обработки информации в двоичных числах. При этом будут параллельно обрабатываться сразу все  $2^N$  вариантов входных данных (9, с. 636).

Состояние квантового компьютера — это сложное запутанное состояние, состоящее из сумм огромного числа слагаемых, которые являются произведениями возможных состояний кубитов. После унитарных преобразований измеряется полученное состояние, что и является конечной целью вычислений. Квантовый компьютер позволил бы, например, разложить на множители очень большое число, что дало бы возможность легко расшифровывать коды, которые обычные компьютеры выполняют недопустимо долгое время (Килин С.Я. Успехи физ. наук. — 1999. — Т. 169. — С. 507).

*Квантовая криптография.* С практической точки зрения не менее важным и перспективным является использование запутанных состояний в квантовой криптографии. Один из первых методов квантовой криптографии был предложен в 1982 г. (Bennett С.Н., Brassard

G. // Proc. IEEE Int. conf. on computers, systems, and signal processing. — N.Y., 1985). В ее основе лежит невозможность клонирования квантового состояния. Одним из следствий общей теоремы о невозможности клонирования квантового состояния является разрушение состояния кубита в исходной точке при телепортации квантового состояния. Эта теорема является следствием линейности КМ. «Квантовое криптографическое устройство пересылает вдоль волновода один за другим множество фотонов, причем в поляризациях последовательных фотонов закодирована некоторая информация. Если бы клонирование было возможно, то можно было бы подключиться к волноводу и переписать информацию (скажем, создать точно такую же последовательность фотонов), не нарушая состояния тех фотонов, которые движутся в волноводе. Но ввиду невозможности клонирования каждая попытка получить информацию (подслушать пересылаемое сообщение) с необходимостью приводит к искажению состояний фотонов, движущихся в волноводе. Разработаны специальные процедуры обработки информации, которые позволяют по этим искажениям обнаружить факт подслушивания с любой желаемой вероятностью» (9, с. 636). В принципе, это дает возможность построить секретные линии связи с любой степенью надежности от прослушивания.

## 7. ПРОБЛЕМА ПРИРОДЫ КВАНТОВЫХ КОРРЕЛЯЦИЙ

По-видимому, одним из наиболее интересных свойств запутанных состояний является наличие нелокальных корреляций. То, что КМ является нелокальной теорией и квантовые корреляции имеют сверхсветовой характер распространения, было, например, по мнению Б.Б.Кадомцева, четко показано в опытах Аспека, Далибарда и Роджера (18) и в эксперименте по схеме Дж.Д.Франсона (Franson J.D. // Phys. rev. letters. — 1989. — Vol. 62. — P.2205). С другой стороны, и в известной книге самого Б.Б.Кадомцева (6), и в дру-

гих работах признание нелокального характера распространения информации (сигнала, корреляций) нередко используется в связке пары не совсем тождественных понятий. А именно иногда говорится о сверхсветовой, а иногда о мгновенной скорости распространения информации или корреляций (6). Вообще говоря, нахождение некоего предельного или даже фиксированного значения сверхсветовой скорости распространения информации, сигнала, взаимодействия или корреляций могло бы, по-видимому, иметь принципиальное значение и привести к созданию новой фундаментальной теории. Последние эксперименты группы Гисина в Женеве показали, что нижняя граница скорости распространения корреляций («скорости квантовой информации») имеет величины, превышающие скорость света в  $2/3 \cdot 10^7$  раз в системе отсчета Женевы и в  $3/2 \cdot 10^4$  раз в системе отсчета фоновой радиации (34).

В настоящее время практически все авторы, пишущие о запутанных состояниях и квантовой телепортации, сходятся во мнении, что, скажем, при квантовой телепортации «квантовая часть» информации о состоянии квантовой системы мгновенно передается от отправителя к получателю за счет квантовых корреляций (9, с. 635). Однако в этой же работе далее делается следующий вывод: «Однако экспериментатор, находящийся в точке В (т.е. получатель телепортируемой информации. — В.Э.), не может знать, какой из четырех альтернативных результатов измерения в точке А (т.е. в точке отправления информации. — В.Э.) получен, поэтому каждый раз в момент измерения остается неизвестным, произошла ли при телепортации деформация состояния, которая требует корректирующего преобразования. В итоге мы вынуждены заключить, что сверхсветовая телепортация невозможна даже при заранее подготовленной корреляционной линии» (9, с. 635). Из текста следует, что вывод о невозможности сверхсветовой телепортации связывается со знанием экспериментатора о деформации состояния при телепортации.

Б.Б.Кадомцев подчеркивает, что если состояния коррелированы, то каждое из них не определено, т.е. перепутано. Как только осуществляется измерение одного состояния, второе состояние мгновенно приобретает противоположное состояние. Некоторой класси-



ческой аналогией этого процесса может быть следующий мысленный эксперимент (6, с. 357). Пусть в коробке лежат два шара: белый и черный. Предположим далее, что мы имеем возможность их квантово «запутать», т.е. перевести в такое состояние, когда черный и белый цвета становятся перепутанно коррелированы. Это означает, что невозможно с определенностью приписать ни одному из шаров либо только белый, либо только черный цвет, как это имеет место в обычном классическом случае. Допустим затем, что мы имеем такую перегородку, которая могла бы разделить эти шары внутри коробки. Затем две половины коробки с одним из шаров в каждой удаляются друг от друга. При этом они все еще остаются в запутанном состоянии, а состояние каждого из них в отдельности не определено. Далее, как только мы осуществим измерение цвета (наблюдение цвета), посмотрев на шар в одной из половинок коробки (пусть этот шар окажется белым), то второй шар, находящийся даже на большом удалении, мгновенно «окрасится» в черный цвет, которого до этого с определенностью не имел. «Здесь-то мы и встречаемся с нелокальностью» (6, с. 357). Далее в этой же книге Б.Б.Кадамцев приводит следующие интересные утверждения: «Поскольку окрашивание шаров происходит при «измерении», т.е. при соприкосновении одного из шаров (или их обоих) с внешним миром, то следует считать, что внешний мир нелокален. Волновые функции внешнего мира опутаны нитями квантовых корреляций, которые мгновенно «срабатывают» при коллапсах волновых функций. Случайность таких процессов позволяет сохранить релятивистскую каузальность, но факт нелокальности следует признать реальным»(6, с. 357). Другими словами, согласно Б.Б.Кадамцеву, квантовая частица, только сталкиваясь с внешним миром, приобретает нелокальные свойства. Здесь, по-видимому, еще предстоит более внимательно проанализировать вопрос о том, что может являться внешним миром для квантовой частицы. Интересна также мысль о том, что внешний мир опутан нитями квантовых корреляций, однако, это, по-видимому, трудно согласовать с макроскопическим опытом. Таким образом, квантовая нелокальность остается важнейшей проблемой, которую еще предстоит изучать в рамках квантовой теории.

Оригинальный подход к пониманию природы корреляций развивает И.Пригожин (13). Он предлагает рассмотреть следующий опыт. «Возьмем разреженный газ и проследим за его эволюцией во времени. При  $t = t_0$  обратим скорости всех молекул газа. Газ вернется в начальное состояние. Мы уже обращали внимание на то, что для воспроизведения своего прошлого газу необходимо некое хранилище информации — своего рода «память». Такой памятью являются *корреляции между частицами*» (13, с. 247).

Рассмотрим облако частиц, движущихся к мишени (тяжелой неподвижной частице). В прошлом корреляций между частицами не было. Рассеяние приводит к двум эффектам: оно «разбрасывает» частицы (делает распределение скоростей более симметричным) и, кроме того, порождает корреляции между рассеянными частицами и рассеивателем. Корреляции станут заметными, если обратить скорости (например, с помощью сферического зеркала). Таким образом, роль рассеяния сводится к следующему. При прямом рассеянии распределение скоростей становится более симметричным и возникают корреляции между частицами. При обратном рассеянии распределение скоростей становится менее симметричным, а корреляции исчезают. Таким образом, учет корреляций приводит к основному различию между прямым и обратным рассеянием. Можно ли, исходя из этого, утверждать, что повышение симметрии вызывает появление корреляций? Здесь, на наш взгляд, остается неясным все тот же вопрос о том, что производит корреляции, если не сам факт столкновения или, другими словами, изначальное взаимодействие как в ЭПР-схеме? Другими словами, какова же природа этих корреляций: столкновения, симметрии?

Нетрудно заметить, что прямой и обратный процессы отличаются последовательностью столкновений и корреляций во времени. Можно говорить о предстолкновительных и после-столкновительных корреляциях. История системы делится на два этапа. На первом этапе столкновения трансформируются в корреляции, на втором этапе происходит обратное превращение корреляций в столкновения, при этом полная информация, которая описывается динамикой системы, остается постоянной. В больцмановском описании эволюция от про-

шлого к моменту разворачивания процесса на обратный соответствует обычному убыванию  $H$ -функции, а далее «эволюция протекала бы аномально:  $H$ -функция возрастала бы, а энтропия убывала. Но это означало бы, что можно придумать эксперименты, как лабораторные, так и численные, в которых нарушалось бы второе начало!» (13, с. 249).

Проблема, считает Пригожин, устраняется, если перейти к новому, развиваемому им «термодинамическому представлению», в рамках которого динамика становится вероятностным процессом. Следует также учесть, что обращение — процесс, который требует поступления к молекулам «информации». «Для того чтобы обратить скорости, необходимо существо, аналогичное демону Максвелла, а за демона Максвелла приходится «платить» ... При нашем подходе (в отличие от больцмановского) эффект корреляций при переопределении  $H$ -функции сохраняется. Следовательно, в точке обращения скоростей  $t_0$  функция  $H$  должна претерпевать скачок, поскольку мы внезапно создаем в этой точке аномальные предстолкновительные корреляции, которые должны нарушиться позднее. Скачок  $H$ -функции соответствует энтропии, или информационной цене, которую нам приходится платить» (13а, с. 249).

Это отражает аналогию с макроскопическим описанием второго начала. «Тепло и механическая энергия эквивалентны с точки зрения сохранения энергии..., но отнюдь не второго начала. Кратко говоря, механическая энергия более «высокого сорта» (более когерентна), чем тепло, и всегда может быть превращена в тепло. Обратное неверно. Аналогичное различие существует на микро-скопическом уровне между столкновениями и корреляциями. С точки зрения динамики столкновения и корреляции эквивалентны. Столкновения порождают корреляции, а корреляции могут разрушать последствия столкновений. Но между столкновениями и корреляциями имеется существенное различие. Мы можем управлять столкновениями и порождать корреляции, но мы не в состоянии так управлять корреляциями, чтобы уничтожить последствия, вызванные столкновениями в системе. Этого существенного различия недостает в динамике, но его можно учесть в термодинамике» (13, с. 250). При этом термодинами-

ка не вступает в противоречие с динамикой. А вот А.Файн основной акцент делает на то, что квантовые корреляции «являются вероятностными картинами двух последовательностей событий» (36, с. 191).

На наш взгляд, уже в отношении простейшего запутанного состояния  $|\Psi\rangle = 1/\sqrt{2}(|\psi_1\rangle|\phi_1\rangle + |\psi_2\rangle|\phi_2\rangle)$  возникает ряд вопросов, имеющих принципиальный характер. В этом выражении, действительно, проявляется некоторая запутанность двух состояний в смысле их нефакторизуемости. Однако, на наш взгляд, в нем нет никаких *физических* следов явного присутствия нелокальности. В связи с этим возникает ряд вопросов.

1. Можно ли показать присутствие нелокальности в этом выражении в явном виде? В принципе, например, И.В.Баргатин и др. отмечают, что из факта «обращения в нуль полного спина системы также следует антикоррелированность проекций отдельных спинов на любые другие направления в пространстве, в частности на оси  $x$  и  $y$  выбранной декартовой системы координат» (1, с. 627). Формально этого вполне достаточно, однако физика здесь еще прописана явно недостаточно. Собственно говоря, из-за подобной «непрописанности» ряда положений и возникает концептуальная неудовлетворенность квантовой механикой.

2. Может быть, нелокальность является некоторой дополнительной гипотезой, напрямую не связанной с выражением для запутанного состояния?

3. Можно ли считать, что запутаны (скрыты) сами квантовые корреляции, поскольку в запутанном состоянии нельзя сказать ничего определенного относительно каждого из состояний, то, следовательно, нельзя сказать ничего определенного и относительно коррелирующих между ними?

4. Можно ли нелокальные квантовые корреляции считать одной из форм взаимосвязи между двумя вполне сепарабельными (по крайней мере, пространственно) объектами (состояниями) — взаимосвязи, которая осуществляется посредством некоторого физического посредника? Возможно, это могут быть связи с нематериальным носителем типа реляционных структур — искривления или кручения пространства-времени. В противном случае (при отсутствии физиче-

ского посредника) с физической точки зрения эта связь становится немного мистической (в смысле нефизической). Если это проявление некоторой целостности, то корреляции, обеспечивающие эту целостность, также должны иметь какую-то физическую природу.

Представляет интерес следующее утверждение: «При этом степень их корреляции тем больше, чем более случайными они являются по отдельности, поскольку флуктуации в обеих независимо рассматриваемых частях составной системы обусловлены единым источником — чисто квантовыми флуктуациями в составной системе» (1, с. 628). Какая физика стоит за такой зависимостью: «Корреляции тем больше, чем более случайными они являются по отдельности»? Откуда может следовать вывод о том, что флуктуации в частях обусловлены флуктуациями в целостной системе, но не наоборот? Повидимому, этот момент может быть существенным для понимания природы квантовых корреляций.

Вообще говоря, квантовые корреляции связаны с когерентными суперпозиционными состояниями составных квантовых систем. Специфика запутанности возникает, «когда мы начинаем применять для описания ЭПР-корреляций законы КМ — операторное представление физических величин, которое вводит некоммутативные физические переменные, и соответствующую формулу для средних значений» (1, с. 627).

Далее интерпретация природы квантовых корреляций может быть представлена, например, следующим образом. Формально «квантовость» корреляций, проявляемых системой в ЭПР-состоянии, определяется недиагональными элементами матрицы плотности, которые делают соответствующее состояние когерентным. Если перейти на язык квантовой оптики и рассматривать совместное состояние двух двухуровневых атомов, то квантовый характер соответствующих корреляций можно прокомментировать иным образом. Условие для тензорного произведения матриц Паули для некоторой выбранной оси означает антикоррелированность диагональных элементов матриц плотности атомов, т.е. населенностей, а условие для матриц Паули для разных осей — антикоррелированность недиагональных элементов матриц плотности, т.е. так назы-

ваемых когерентностей, ответственных за явления квантовой интерференции. «Таким образом, операторный закон усреднения КМ... и все соотношения КМ, связанные с операторным представлением физических величин, приводят к тому, что мы вынуждены описывать некоторые коррелированные состояния составных квантовых систем с помощью квантовых когерентных суперпозиций, не имеющих классического аналога» (1, с. 627–628).

## 8. НЕЛОКАЛЬНОСТЬ И НЕСЕПАРАБЕЛЬНОСТЬ

Мысленный эксперимент ЭПР и теорема Белла привели к представлениям о запутанных состояниях, а также о свойствах квантовой нелокальности, несепарабельности и феномене квантовых корреляций. Что является первичным и определяющим из этих понятий? Можно ли вообще ставить так вопрос? По-видимому, можно утверждать, что в современной физике ответы на эти вопросы совершенно не ясны. Тем не менее, для полноты картины имеет смысл рассмотреть также свойства нелокальности и несепарабельности. Четкий обзор существующих достижений в осмыслении этих нетривиальных свойств дан в работах А.И.Панченко. В данном разделе нас будут интересовать, прежде всего, понятия нелокальности и несепарабельности. Эти понятия возникли в результате анализа различными исследователями представлений о физической реальности и локальности прежде всего в ЭПР-статье, в работах Эйнштейна, а также при анализе теоремы Белла. Наиболее интересны результаты, полученные А.Файном, Д.Ховардом, Дж.Джарретом и П.Теллером.

На основе сопоставления результатов Белла и позиции Эйнштейна А.Файн приходит к выводу о существовании целых трех условий локальности. Он характеризует их следующим образом: «...белловская локальность, или утверждение о том, что «результаты измерения определенных квантовомеханических наблюдаемых одной системы не подвержены непосредственному влиянию видов измерений, производимых непосредственно над второй системой, которая достаточно отделена от первой в пространстве»; 2) условие факторизуемости, или «кондициональной стохастической независимости»,

означающее, что «для каждой спаренной системы (или для каждой скрытой переменной») в корреляционном эксперименте с разделенными частями вероятность пары результатов одновременных измерений может быть представлена произведением отдельных результатов» (37, с. 63). Файн выделяет еще и третье условие локальности, или эйнштейновский принцип локальности, которое отличается от первого (белловского) условия тем, что в нем речь идет не о результатах измерения, а о «реальных физических состояниях».

Дальнейшие уточнения в анализ теоремы Белла внесли Д.Ховард и Дж.Джаррет. Эти уточнения также появились в контексте сопоставления теоремы и эйнштейновской критики квантовой теории. Джаррет показал, что условие факторизуемости совместных вероятностей одновременных измерений (или, в его терминологии, условие «сильной локальности» распадается на два независимых условия – условие «полноты» и условие «слабой локальности». «Слабая локальность» эквивалентна требованию релятивистской локальности, а «полнота» – факторизуемости скрытых состояний (Jarrett J.P. On the physical significance of the locality in the Bell arguments // *Nous.* – 1984. – Vol. 18, N3). В свою очередь, Ховард назвал условие факторизуемости скрытых состояний условием сепарабельности (или делимости). Он подчеркнул важность различения принципов локальности и сепарабельности: «...сепарабельность означает, что пространственно разделенные системы обладают отдельными реальными состояниями, а локальность – что состояние системы может быть изменено только локальными эффектами, эффектами, распространяющимися с конечными, досветовыми скоростями. Между этими принципами нет необходимой связи, хотя они и представлялись часто как одно и то же... Квантовая механика – это ... несепарабельная локальная теория» (Howard D. Einstein on locality and separability // *Stud. hist. phil. sci.* – 1985. – Vol. 16, N3). Поскольку же Файн показал, что «сильная локальность» есть необходимое и достаточное условие выполнения неравенств Белла, постольку отсюда следует, что «все теории со скрытыми параметрами, предсказания которых удовлетворяют неравенствам Белла, являются одновременно сепарабельными и локальными».

Если резюмировать изложенное выше об исторических достижениях в анализе теоремы Белла и ее приложений, то они заключаются в следующем: 1) была выяснена сложная структура принципа локальности; оказалось, что этот принцип расщепляется на ряд составляющих – условие «слабой локальности», отвечающее по своему содержанию принципу близкодействия; условие локальности в смысле факторизуемости совместных вероятностей результатов одновременных измерений, требующее, по сути дела, редукции квантовой вероятности к бездисперсионным мерам классической статистики; локальность в смысле факторизуемости или сепарабельности, «реальных физических состояний» (или эйнштейновский принцип локальности, который также имеет названия принципа сепарабельности и принципа реальности); 2) благодаря этому выяснилась важность различения принципов локальности и сепарабельности...

Особенность квантовой запутанности, так же как и несепарабельности как целостности, проявляется в том, что знание состояния полной системы нельзя в общем случае определить состояние ее частей по отдельности. Несепарабельность в этом смысле «отражает синхронный аспект квантовой причинности» (12, с. 142).

Что можно сегодня сказать о природе несепарабельности? В частности, следующее: «Новый акцент в содержании понятия квантовой целостности, выясненный в процессе анализа теоремы Белла и ее приложений, связан с переосмыслением этого понятия как онтологически исходного и как объясняющего принципа. Возможно, что фоковские «внесиловые» взаимодействия или «обменные силы» Паули являются некоторой интуицией квантовой «несепарабельности» (12, с. 145).

В исследованиях феноменов нелокальности микромира существенный момент состоит в том, что эти явления неоднократно наблюдались экспериментально. По крайней мере, до настоящего времени соответствующие процессы именно так трактовались. Одним из первых симптомов нелокальности квантового мира был заложен в экспериментально проверяемом эффекте Ааронова – Бома. Впервые на возможность влияния внешнего электромагнитного поля, сосредоточенного в области, недоступной для заряженной частицы, на ее



квантовое состояние указали в 1949 г. У.Эренберг (W.Ehrenberg) и Р.Э.Сайди (R.E.Siday). В дальнейшем подробное теоретическое изучение эффекта было осуществлено в 1959 г. Я.Аароновым и Д.Бомом. Они указали на его тесную связь с фундаментальными положениями квантовой теории. Их исследования привлекли внимание к особой роли электромагнитных потенциалов в квантовой теории. В результате этот эффект получил их имя.

Формальная возможность этого эффекта заложена уже в самом уравнении Шрёдингера для волновой функции заряженной частицы во внешнем электромагнитном поле, поскольку содержит потенциал этого поля. Этот потенциал определяет фазу волновой функции и при соответствующем выборе геометрии опыта приводит к эффекту интерференции, который можно наблюдать даже при отсутствии прямого силового воздействия поля на частицу. Этот эффект обусловлен разницей фаз вдоль различных возможных путей движения частицы. Эффект Ааронова – Бома обнаружен как для скалярного, так и для векторного потенциала электромагнитного поля.

«Эксперименты по наблюдению эффекта Ааронова – Бома при рассеянии *электронов* магнитным полем проводились начиная с 60-х годов. Пучок монохроматических электронов разделялся на два когерентных пучка, обтекавших рассеиватель – тонкую нить (0 – 1 мкм) из магнитного материала или миниатюрный соленоид (0 ~ 14 мкм), магнитным потоком которого можно было управлять. Затем когерентные пучки вновь соединялись, образуя интерференционную картину, зависящую от величины охватываемого магнитного потока, в хорошем согласии с теоретическим расчетом эффекта Ааронова – Бома. Однако при анализе этих экспериментов необходимо учитывать искажения интерференционной картины, вызванные рассеянным магнитным полем, возникающим из-за неоднородного намагничивания нити и конечных продольных размеров рассеивателя. Современные эксперименты с тороидальным магнитом, а также со сверхпроводящими квантовыми интерферометрами, свободные от этих недостатков, надежно подтверждают существование эффекта» (16).

В связи с эффектом Ааронова – Бома отметим следующее существенное обстоятельство: в этом эффекте природа нелокальности непосредственным образом связывается с потенциалом поля, а также с разницей фаз вдоль различных траекторий частицы. С одной стороны, сделан шаг в направлении выяснения природы нелокальности, с другой – одна проблема сменилась другой: нужно понять, чем физически фундаментален для нелокальности потенциал поля? В бомовской КМ квантовый потенциал также играет важную роль, являясь при этом нелинейным. Поскольку нелокальность, с одной стороны, по-видимому, самым непосредственным образом связана с квантовыми корреляциями, а с другой – с потенциалом, то возникает вопрос о том, каким образом связаны потенциал, нелокальность и корреляции? В частности, можно ли говорить о том, что эффект Ааронова – Бома демонстрирует наличие нелокальности без корреляций? Исследования запутанных состояний последних лет, по-видимому, достаточно уверенно убеждают в том, что природа нелокальности определяется наличием квантовых корреляций. Но при этом корреляциям не придается какого-либо полевого и вообще субстанционального характера. Их наличие фиксируется как факт и позитивистски используется. Но существует ли верхняя граница на скорость установления или появления корреляций? Если такая скорость будет установлена и окажется сверхсветовой и конечной, то это приведет к радикальному пересмотру многих физических оснований. Напомним, что в экспериментах группы Гисина получены верхние пределы на существование такой скорости (34).

Для работы с понятиями локальности и нелокальности, на наш взгляд, необходимо сделать существенные методологические уточнения. Дело в том, что, когда один из терминов приобретает несколько значений, это приводит к очевидным трудностям. По-видимому, наибольшие осложнения подобная ситуация, подобная терминологическая неоднозначность может вызвать в науке, идеалами которой по многим аспектам остаются в том числе точность и однозначность. Многозначные понятия в современном научном знании не редкость. В рамках рассматриваемой в обзоре проблематики мы и хотели бы

ввести дополнительные уточнения в использование указанных выше понятий.

Выше уже были представлены содержательные разновидности понятий локальности и нелокальности. Когда в тексте появляются эти два термина, не всегда ясно, какую смысловую нагрузку они несут. Так, утверждение Ховарда о том, что «КМ — это несепарабельная локальная теория», может быть достаточно противоречивым в зависимости от того, какой смысл вкладывать в термины «несепарабельная» и «локальная». Кроме того, путаницу, особенно у начинающих знакомиться с квантовой проблематикой, может вызвать один лишь термин «локальность», который как выяснилось, имеет три различных значения; когда в тексте встречается термин «локальность», то не всегда ясен его смысл. Кроме того, по-видимому, пока не существует работ, в которых бы анализировались смысловые коммуникации между различными физическими значениями этого термина. В целях устранения некоторых возникающих экспликативных затруднений введем следующие обозначения.

В отношении термина «локальность»:

- 1) к-локальность (локальность как конечность);
- 2) б-локальность (локальность как близкодействие);
- 3) ф-локальность (локальность как факторизуемость).

Сепарабельность в этом смысле является частным случаем или свойством к-локальности для двух и более физических объектов и событий.

Далее.

- 1) ц-нелокальность (как целостность). Здесь может быть еще один равновеликий вариант: х-нелокальность (как холизм);
- 2) д-нелокальность (как дальнодействие);
- 3) п-нелокальность (как пространственная масштабность).

Далее.

Несепарабельность имеет, по крайней мере, два основных конструктивных значения.

- 1) н-несепарабельность (как неотделимость);
- 2) ц-несепарабельность (как целостность) (вариант — х-несепарабельность — как холизм).

На наш взгляд, употребление в естественно-научных и философско-методологических текстах этих уточнений внесет ясность и, соответственно, породит определенные эвристические потенциалы.

В работе (49) рассматривается статус белловских экспериментов в современной физике. Белловскими называются эксперименты по проверке неравенств Белла, а соответственно и принципа локальности. Автор приходит к выводу, что, несмотря на то, что тридцатилетние усилия так и не продемонстрировали четких экспериментальных подтверждений слабой нелокальности в смысле Белла, такие эксперименты проводить необходимо. Эта необходимость связана, с одной стороны, с тем, смогут ли новые достижения в квантовой информации элиминировать необходимость применения «ухищрений» (loopholes) при детектировании. При этом, согласно Я.Персивалю, может существовать два сценария.

**ИЛИ:**

1. Неравенства Белла не могут быть нарушены. Должен существовать новый закон природы, который совместим с современной квантовой теорией, но ограничивает доступные состояния материи теми, для которых господствует локальность, а в отношении локальности законов природы Эйнштейн был прав.

**ИЛИ:**

2. Неравенства могут быть нарушены. Некий «заговор» природы, а фактически, некоторая скрытая причина, которая не позволяет осуществить однозначное экспериментальное подтверждение нелокальности Белла, имеет место благодаря практическим трудностям, которые не могут быть преодолены. Будущие эксперименты должны элиминировать ухищрение детектирования. Это будет значительный прорыв на пути к квантовым вычислениям. Одновременное закрытие и ухищрения детектирования, и ухищрения локальности подтвердили бы общую точку зрения, что законы природы являются слабо нелокальными и что Эйнштейн ошибался. Но этот вопрос может быть разрешен только экспериментом. Вот почему так важны белловские эксперименты (49).

Во-первых, интересна сама схема осуществления эксперимента по выявлению наличия слабой нелокальности, т.е. эксперимента Белла.

Установка состоит из классических входа и выхода, а также квантовой системы между ними, находящейся в запутанном состоянии. Именно это состояние и реализует нелокальную передачу информации. Подчеркнем несколько интересных моментов, связанных с такой схемой установки, с такой схемой физической реализации нелокальности. Во-первых, зададим себе вопрос: каким образом нелокальность можно создать между двумя классическими терминалами, между двумя классическими объектами-процессами? С одной стороны, по факту можно констатировать, что такой процесс имеет место независимо от того, какова природа этих процессов. Просто такой процесс существует. Задача состоит в том, чтобы найти физическую природу такого процесса. С другой стороны, мы должны сделать вывод о том, что нелокальность можно сужать до неопределенно малых размеров, до неопределенно узких рамок. Причем не только в пространственном выражении, но и в качественном: нелокальность может быть ограничена двумя классическими объектами. Нелокальность не есть нечто действующее на очень больших и даже пространственно-подобных расстояниях. Она проявляется на любых интервалах. Почему это примечательно?

На наш взгляд, существуют граничные условия для реализации нелокальности, за которые она не выходит. Она определяется рамками квантово-микроскопической системы. Другими словами, в случае белловского эксперимента такими границами служат макроскопические входы и выходы, т.е. макроскопические объекты и процессы. По-видимому, процесс, который должен осуществляться на границе «запутанная квантовая система — макроскопический объект» или «микроскопическая запутанная система — макроскопическая система», должен быть процессом декогеренции на выходе, т.е. переход квантовой системы в макроскопическое состояние, так и обратный процесс *рекогеренции*, т.е. восстановления когеренции, который должен идти от макроскопической системы на входе к запутанному состоянию и далее к макроскопической системе на выходе.

Существенно, во-первых, наличие границ квантовых корреляций (нелокальности), а во-вторых, эти границы представляют собой макроскопические объекты. Дело в том, что, согласно одной из

фундаментальных интерпретаций КМ, свойства квантовых объектов, да и сами микрочастицы актуально не существуют до проведения измерения. В рамках этого подхода, следовательно, нельзя говорить о существовании квантовых корреляций, нелокальности и запутанности между самими микрообъектами. Только при появлении макрообъекта включаются квантовые корреляции.

Интересен также и следующий момент. Ведь нелокальные взаимодействия – это взаимодействия или перенос информации со скоростью, превышающей скорость света или даже мгновенно. Если принять точку зрения тех исследователей, которые отстаивают реальность существования нелокальности, которая также имеет право на существование, то возникает нетривиальный вопрос относительно того, каким образом стартует, креацируется мгновенная скорость передачи информации и как она аннигилирует до обычных скоростей или даже до нуля? По существу, в этом процессе даже скорость приращения скорости, т.е. ускорение, переходит световой порог. Согласно СТО, не предполагается материально-вещественных или полевых переносов сигнала. Тем не менее, зафиксируем необходимость наличия таких переходов скоростей. Ясно, что такое состояние внутри «микроскопической-макроскопической» системы осуществляет запутанное состояние. Другими словами, при запутанном состоянии создается некоторая область пространства-времени, в котором реализуется сверхсветовая передача информации. Весь вопрос в том, каковы свойства этой области? Меняются ли и насколько свойства пространства-времени в этой области?

Вообще говоря, так и остается неясной физическая природа той информации, которая передается на сверхсветовых скоростях. Если она явно не физическая, то о чем здесь речь? При чем здесь физика? В связи с этим встает довольно интересный вопрос: можно ли считать, что раз фактически происходит перенос квантового состояния, то фактически же в белловских экспериментах сверхсветовой или мгновенной является скорость переноса волновой функции, скорость распространения волновой функции? Ведь волновую функцию иногда так и формулируют как информацию (2, с. 113). С другой стороны создается впечатление, что информация получает на границе

входной классической системы и запутанной квантовой некое «суперускорение» и начинает мгновенно распространяться со сверхсветовой скоростью. Назовем это ускорение *квантовым ускорением*. Фактически оно бесконечно. Информация, получая подобные перегрузки, явно не может быть физической (материальной) в обычном смысле.

Характерно, что внутреннюю квантовую часть эксперимента Белла Персиваль в своей статье метко охарактеризовал как черный ящик. И действительно, совершенно не ясно, что там происходит, но мы знаем, что получается на выходе при данных условиях на входе. Персиваль пишет, что в принципе, можно не интересоваться тем, что находится внутри. Экспериментируя с информацией на входе и анализируя то, что получается на выходе, можно кое-что узнать о самой квантовой системе. Несомненно, что методологически и операционально подобный подход допустим. Однако это не означает, что мы не должны пытаться узнать, что находится внутри системы, какова природа «квантовой начинки» черного ящика.

## 9. МЕТАФИЗИКА КВАНТОВОЙ ЗАПУТАННОСТИ

Почему именно *метафизика* запутанности? Метафизику можно определить, например, как «некий лежащий за уровнем его (явления. — В.Э.) материальной предметности уровень, который выступает как определяющий для физического мира, ибо содержит в себе причины проявленных в нем событий и вещей» (14, с. 5). Конечно, «истинная» метафизика ищет первопричины в сферах бытия, лежащих *вне* физической реальности, вне физической объектности, процессуальности и событийности. Однако в последнее время, в первую очередь, в квантовой эпистемологии сложились интересные традиции именовать некоторые очень глубокие квантовые проблемы метафизическими. Так, в различных работах говорится о квантовой метафизике, квантовой онтологии, квантовом сознании, участии сознания в выборе одного из эвереттовских миров и даже, как уже отмечалось выше, — об экспериментальной метафизике. Не нарушая существенно никаких основоположений и принципов, эта терминология

обладает своей особой эпистемологической привлекательностью и, на наш взгляд, даже определенной эвристической энергетикой, поэтому мы считаем ее употребление вполне разумным.

Соответственно, метафизика запутанных состояний, или метафизика запутанности, означает поиск первопричин, лежащих в основании феномена запутанности. При этом, как исследовательский вариант, такая метафизика может быть «факторизована» на несколько составляющих. Например, на метафизику корреляций и метафизику нелокальности. Какие же идеи появились в последнее время в этой связи? Не претендуя на полноту освещения этого вопроса, рассмотрим некоторые направления мысли.

По-видимому, метафизика квантовой запутанности заключена в природе квантовых корреляций. Достаточно ли для выяснения этой природы чисто научных средств или потребуется нечто большее? Лежит ли эта природа в той реальности, которую уже успешно описывает стандартная КМ или требуется выход за ее рамки?

На наш взгляд, квантовые корреляции представляют собой феномен, который выводит исследователя за рамки стандартной КМ. Являются ли квантовые корреляции «внутренне присущим» свойством КМ? Да, несомненно, и об этом говорят сторонники разных интерпретаций этой теории. Следует ли изучать это качественно новое свойство микромира? Нужно ли, да и можно ли искать объяснения физической природы квантовых корреляций? Одна из статей А.Файна (36), фактически, так и называется, и он дает отрицательный ответ, на наш взгляд, основываясь, прежде всего, на традиционном методологическом принципе стандартной КМ: если на данный момент нельзя объяснить, то надо смело вводить и использовать, а потом разберемся или... аксиоматизируем. «Поиск влияний или общих причин является мероприятием внешним для квантовой теории» (36, с. 192). Цель таких исследований состоит в том, чтобы дополнить теорию таким образом, чтобы удовлетворить определенным требованиям по объяснительной адекватности. Среди этих требований должно быть сформулировано некоторое объяснение, которое трактовало бы существование этих корреляций в пространстве и времени.



«В свете этого требования запутанные корреляции квантовой теории могут казаться аномальными и даже мистическими» (36, с. 192).

Хорошо известно, что всегда полезно возвращаться к истокам. Поскольку представление о запутанных состояниях исторически, концептуально и теоретически связаны с ЭПР-статьей, то хотелось бы обсудить несколько, на наш взгляд, примечательных нюансов, касающихся этой работы, хотя, казалось бы, все в этой работе обсуждалось уже много раз. Важной особенностью этой статьи является то, что она является не только чисто физико-теоретической, но и содержит ряд концептуальных философско-методологических аспектов. На наш взгляд, вполне обоснованно попытаться еще раз поискать (метафизические) основания существования запутанности или ее отрицания, прежде всего, в концептуальных идеях первой части ЭПР-статьи и в первую очередь в представлениях авторов о физической реальности.

Одним из краеугольных вопросов всей статьи является проблема трактовки физической реальности. Сейчас считается, что определение реальности, данное авторами ЭПР-статьи, было скорее упрощенным и соответствовало в большей степени макроскопическому классическому описанию. На наш взгляд, трудно, да и методологически фаллибилистично пытаться давать конкретные определения в отношении всей, в том числе физической, реальности. Открытие ее новых качественных уровней, скорее всего, будут и впредь радикально и разрушительно для ортодоксального физического сознания менять о ней представления. Каждый уровень реальности имеет характерные качественно нередуцируемые особенности, для отражения которых должна быть создана соответствующая теоретическая конструкция. Рассмотрим определение реальности физической величины, даваемое в этой статье.

«Достаточным условием реальности той или иной физической величины является возможность предсказания ее с достоверностью, не нарушая системы» (18, с. 604). В принципе это определение, а именно, возможность предсказания с достоверностью при условии ненарушения системы, соответствует классическому эталону научности, рациональности как таковой. Однако если макро- и мегаскопи-

ческий уровни реальности можно изучать не нарушая системы, то микроскопический уровень реальности невозможно исследовать без такого нарушения. Это утверждение является одним из фундаментальных утверждений копенгагенской интерпретации. Предсказывать с достоверностью также возможно только с определенным приближением. Вообще говоря, вся физика есть наука приближений. Поэтому предсказание с достоверностью является предсказанием с некоторой степенью точности, достаточной для конкретного исторического уровня исследований (познания). Последний учитывает уровень развития приборной базы (в частности, степень точности этих приборов), требования практики и т.д. Но тогда в соответствии с определением, которое дают ЭПР, элемент физической реальности также должен быть реальным с той же степенью приближения. Отсюда следует вывод, уходящий из-под «точной определенности», требуемой в статье. А вместе с ним приближенно реальной должна быть и вся физическая реальность. Более того, сейчас становится все более понятным, что вся физическая реальность, а не только КМ с ее соотношением неопределенности, является по своей природе, по своей сути неопределенной, и только в некоторой определенной системе отсчета мы можем с некоторой степенью точности давать ей *некоторую определенность*.

Рассмотрим следующее принципиальное положение КМ, приводимое в ЭПР-статье. «В КМ в случае двух физических величин, описываемых некоммутирующими операторами, знание одной из этих величин делает невозможным знание другой» (18, с. 604). Какой еще физический смысл может существовать для этой альтернативной возможности (ситуации) кроме копенгагенской интерпретации? Что значит, что знание одной величины делает невозможным знание другой? Можно ли все это отнести к возможностям наблюдателя, к той конкретной системе отсчета, из которой ведутся наблюдения? Ведь если трактовать эту цитату чисто эпистемологически, то, фактически, получается, что наблюдатель может знать одну физическую величину, но теряет знание о другой — это означает, что его возможности таковы, что он не знает состояние другой частицы, хотя оно существует. Вся мера вещей связана как раз с наблюдателем. Пере-

фразировав знаменитое изречение Протагора, можно сказать, что «наблюдатель есть мера всех физических процессов и событий». Все зависит от природы наблюдателя (и соответственно от природы соответствующей системы отсчета) и его возможностей (в самом широком смысле) осуществлять наблюдения. Если бы эти два основных фактора наблюдения принципиально отличались от существующих возможностей макроскопического наблюдателя, то вполне возможно, что он смог бы воспринимать и обе эти величины. На наш взгляд, абсолютная невозможность восприятия любых двух существующих физических величин представляется нефизической.

Поэтому, если быть более последовательными, то мы, по-видимому, должны сделать следующие два предположения: 1) объективная реальность должна быть однозначной и должна быть предсказуема с достоверностью и однозначно на любом уровне познания; 2) объективная реальность не является однозначной. Она является многоплановой и многомерной, в общем плане неопределенной в каждой своей точке, и наблюдатель из любой системы отсчета может вносить только относительную определенность элементов (кусков) этой реальности относительно своей системы отсчета, относительно своих возможностей наблюдения.

Рассмотрим следующее третье предложение этой статьи. «Тогда: 1) описание реальности в КМ с помощью волновой функции является неполным; 2) эти две физические величины не могут одновременно обладать реальностью» (18, с. 604). По-видимому, возможность обладания реальностью на самом деле еще не связана однозначно с возможностью предсказания с достоверностью тех или иных физических величин, соответствующих этой реальности даже при условии ненарушения системы.

Принципиальным моментом является то обстоятельство, что любое предсказание неотделимо от знания. Предположим, что обе физические величины обладают реальностью, но об одной наблюдатель может знать и с достоверностью предсказывать ее, а о другой этого сделать не может. Рассмотрим, например, электрон. Наблюдатель может с достоверностью определить, скажем, его местоположение, но не может определять некоторые его свойства, которые в

принципе недоступны существующим в данный момент средствам и методам наблюдения и измерения. Допустим, что электрон — это некоторое многомерное образование, и мы наблюдаем только три пространственные и одну временную проекцию на наш мир, т.е. на мир доступный нам как наблюдателям. Это довольно реально физически и соответствует физическому смыслу в современном его понимании. Так, в теории Калуцы — Клейна, утверждается, что электрический заряд электрона представляет собой компактифицированное пятое измерение пространства, которое наблюдать непосредственно мы принципиально не можем, и возможно даже, не сможем никогда. Кроме того, с философской точки зрения, мы должны отдавать себе отчет в том, что физическая величина может обладать реальностью, даже если мы никогда не сможем узнать об этом элементе реальности. Собственно наука — это познание возможного с помощью доступных средств в данной системе отсчета. И не более того. Хотя, конечно, в этом смысле вопрос о границах расширения возможностей познания из единственно возможной системы отсчета стоит особо, и он очень интересен.

Имеется и следующее утверждение: «Какой бы смысл ни вкладывался в термин «полное описание», от всякой полной теории, как нам кажется, необходимо требовать следующее: *каждый элемент физической реальности должен иметь отражение в физической теории*. Мы будем называть это условием полноты» (18, с. 605). Прежде всего, мы бы добавили здесь, что «каждый элемент физической реальности» не может «иметь отражение в физической теории» принципиально, поскольку любая теория ограничена, а физическая реальность (если под ней понимать нечто большее, чем сумму физических представлений о ней на данный исторический момент) *качественно континуальна*. Поэтому мы бы предложили уточнить это утверждение следующим образом: «каждый элемент той области физической реальности, который описывается квантовой механикой».

На наш взгляд, КМ не противоречит этому сформулированному ЭПР требованию, поскольку каждый элемент физической реальности имеет отражение в КМ. Другое дело, что сама физическая реальность такова, что могут существовать *определенные усло-*

вия качественного порядка, в которых этот элемент не может наблюдаться. Но невозможность наблюдения может привести исследователя к выводу о том, что его не существует. Существует ли данный элемент объективной реальности, т.е. существует независимо от выполнения наблюдения в системе отсчета физика или не существует, — это уже умозаключение, которое следует из осмысления многих факторов. Можно говорить, что он существует, но недоступен наблюдению, либо *пока* недоступен наблюдению, либо он не существует в принципе. Яркие примеры проблемы существования в современной физике: проблема наблюдения тахионов, свободных кварков, минувселенных в Метагалактике инфляционной космологии. Еще раз подчеркнем, что строго точно мы пока знаем только тот факт, что, согласно стандартной интерпретации КМ, экспериментальные наблюдения не могут быть проведены таким образом, чтобы в данной системе отсчета, с данным набором приборов, имеющих серьезный исторический аспект своего наличествования, данный наблюдатель мог одновременно наблюдать физические величины, которые являются некоммутирующими или дуальными. Например, все те же положение и импульс квантовой частицы.

К сожалению, на наш взгляд, все эти требования и определения имеют некий оттенок статичности. Причем не механистической, а, скажем, *онтологической статичности, статичности качеств*. Дело в том, что физическую реальность вообще нельзя рассматривать изолированно, жестко, конечно. Она континуальна, бесконечно размыта и т.д. Но поскольку наука связана с конкретной определенностью именно на каждом конкретном уровне познания, то естественно, можно и нужно создавать теории, которые будут некоторыми приближениями (собственно, как и вся физика) и которые будут давать некоторые определенные результаты, величины и понятия. В данном случае статья ЭПР, на наш взгляд, дает такие понятия в классическо-статическом варианте. На наш взгляд, КМ дает концептуально, онтологически более подвижный концепт реальности, связанный с неопределенностью, вероятностью и т.д. Но несомненно, что в этом случае теряется та определенность и точность, которая была характерна для классической науки, для эталона научности

вообще. И тем не менее, вопрос о полноте описания квантовой реальности еще не закрыт. Наоборот, появляются все новые работы, в которых предпринимаются попытки постичь онтологию квантового мира (Hodson P. Realism and quantum mechanics. // Intern. studies in the philosophy of science. — 1997. — Vol. 11, N1. — P. 53—65).

Интересно также следующее утверждение: «Таким образом, в состоянии, которое определяется уравнением (2) (выражение для волновой функции через импульс и координату. — В.Э.), количество движения имеет с достоверностью значение  $p_0$ . Значит, в этом случае имеет смысл говорить, что количество движения частицы в состоянии  $\psi$  реально» (18, с. 606).

Представляются чрезвычайно важными слова о том, что «реальность P и Q ставится в зависимость от процесса измерения, производимого над первой системой, хотя этот процесс никоим образом не влияет на вторую систему» (18, с. 610—611). Хорошо известно, что в КМ, как и во всей физике, фундаментальную и определяющую роль играют измерения. Анализ этой роли посвящено огромное количество статей. В последнее десятилетие появились работы, отражающие новые аспекты квантовых измерений. Так, в статьях Л.Вайдмана предлагается рассматривать измерения без взаимодействия (*interaction-free measurement*) (62, 63). В работах М.Б.Менского исследуются процедура непрерывных измерений (45) и т.д. В то же время существуют подходы, в которых процессу измерения не придается какой-то концептуальной роли, оставляя за ними лишь операцию сравнения с эталоном (8). На наш взгляд, уже сам выбор эталона, да и сама *возможность* этого выбора, а также процедура приготовления измерения, а в квантовом случае еще более сложная процедура *приготовления состояния* квантовой системы, представляют собой далеко не тривиальные в концептуальном отношении проблемы.

На наш взгляд, процессы измерения не только в квантовой физике, но и в классической макроскопической физике еще далеко не исследованы. Так, например, аналогичный феномен некоммутируемости присутствует и в классической физике макромира (естественно в своеобразной видоизмененной форме) при определенном приготовлении системы для измерения. Рассмотрим, например, фи-

зический объект (или в терминах КМ – физическую систему) – кусок металла. Предположим, что мы хотим измерить его свойства. Совокупность всех свойств куска металла будет составлять состояние этого физического объекта. Предположим далее, что мы хотим определить некоторое свойство этого металла. Естественно, мы должны *приготовить* его к измерению. Подчеркнем, что в данном случае рассматривается чисто классическая ситуация. Металл может находиться как в кристаллическом, так и в аморфном (расплавленном) состоянии. Но в расплавленном состоянии мы не можем измерить кристаллические свойства металла, а в кристаллическом состоянии – его свойства жидкого расплава. Очевидна дополнительность и дуальность свойств макрообъекта при измерении. В принципе, в чисто измерительном аспекте они аналогичны рассуждениям об измерении координаты и импульса в КМ. И в том, и в другом случае мы не в состоянии измерить с точностью (или даже принципиально!) одновременно оба свойства. Мы можем выбрать только одно или другое. Таким образом, в зависимости от процедуры *приготовления* одного и того же физического тела оно уже в классическом случае обладает свойствами дуальности, дополнительности, неопределенности и некоторой некоммутативности ряда своих свойств. Но это должно означать, что КМ не обладает исключительным правом на дополнительность, дуальность свойств, неопределенность и некоммутативность.

Таким образом, достаточно отчетливо просматривается аналогия квантовой и классической механик. Но эта аналогия не означает, что обе механики следует отождествить или рассматривать в духе дурной механистической бесконечности одинаковых свойств. Естественно, что у КМ, отражающей своеобразные свойства микромира, должна быть своя специфика. Что можно сказать об этой специфике, кроме того, что уже говорит стандартная КМ? Собственно, надежда на построение некоторой более полной квантовой теории и заканчивается знаменитая ЭПР-статья.

Кратко сформулируем еще некоторые вопросы, которые, на наш взгляд, требуют дальнейшего обсуждения.

1. Почему при неконтролируемом возмущении системы нельзя считать, что данная физическая величина не обладает реальностью? На первый взгляд ответ прост: потому, что мы не можем с достоверностью, с абсолютной точностью (является ли это тождественным?) предсказывать значение этой физической величины. Но, с другой стороны, наличие принципа неопределенности лишает возможности говорить более определенно об этих величинах либо лишает определенности саму физическую реальность. Неопределенными становятся сами элементы физической реальности.

2. Что можно сказать об элементе реальности при наличии нелокальности, может быть, слабой нелокальности и несепарабельности?

3. Можно ли вообще говорить об элементе реальности? А в каком смысле и с какой определенностью можно говорить об элементе физической реальности?

4. Наконец, такой нетривиальный вопрос: что вообще можно понимать под *элементом* (физической) реальности?

В заключение приведем фразу, которую выделяет в ЭПР-статье А.Пайса, которая, по его мнению, «совершенно необходима для понимания взглядов Эйнштейна..: «Здесь [т.е. при одновременном предсказании] реальность  $p_2$  и  $q_2$  ставится в зависимость от процесса измерения, производимого над первой системой, хотя этот процесс никоим образом не влияет на вторую систему. *Никакое разумное определение реальности не должно допускать этого* (курсив А.Пайса. — В.Э.).

Единственные слова этой статьи, которые, по-моему, будут справедливы всегда, это последняя фраза, где так четко резюмировано отношение Эйнштейна к КМ в последние годы его жизни» (11, с. 438—439).



## Список литературы

1. Баргатин И.В., Гришанин Б.А., Задков В.Н. Запутанные квантовые состояния атомных систем // Успехи физ. наук. – М., 2001. – Т.171, вып. 6. – С. 625–647.
2. Блохинцев Д.И. Принципиальные вопросы квантовой механики. – М., 1987. – 151 с.
3. Гриб А.А. Нарушение неравенств Белла и проблема интерпретации квантовой теории // Философские исследования оснований КМ: К 25-летию неравенств Белла. – М., 1990. – С.11–22.
4. Гришанин Б.А. Квантовая электродинамика для радиофизиков. – М., 1981. – 127 с.
5. Доронин с. Магия запутанных состояний и современная физика // <http://www.n-t.org/tp/ng/mzs02.htm>
6. Кадомцев Б.Б. Динамика и информация. – М., 2000. – 413 с.
7. Квантовая телепортация и голография / Соколов И.В., еще 2-х авт. Гатти А., Колобов М.И., и др. // Успехи физ. наук. – М., 2001. – Т.171, вып.11. – С.1264–1267.
8. Липкин А.И. Основания современного естествознания. – М., 2001. – 299 с.
9. Менский Б.М. Квантовая механика: Новые эксперименты, новые приложения и новые формулировки старых вопросов // Успехи физ. наук. – М., 2000. – Т. 170, вып. 6. – С. 631–648.
10. Нахмансон Р.С. Физическая интерпретация КМ // Успехи физ. наук. – М., 2001. – Т.171, вып.4. – С.441–444.
11. Пайс А. Научная деятельность и жизнь Альберта Эйнштейна. – М., 1989. – 567 с.
12. Панченко А.И. Вклад квантовой физики в развитие понятия физической реальности // 100 лет квантовой теории: История. Физика. Философия: Труды Международной конференции, Москва, 2000. – М., 2002. – С. 138–145.
13. Пригожин И., Стенгерс И. Порядок из хаоса. – М., 2003. – 310 с.
14. Самохвалова В.И. Метафизика глобализации: От утопии к антиутопии // Материалы постоянно действующего междисциплинарного семинара клуба ученых «Глобальный мир». – М., 2002. – Вып. 11. – С. 5–50.
15. Физика микромира / Под ред. Ширкова Д.В. – М., 1980. – 527 с.
16. Физическая энциклопедия // <http://phys.web.ru/db/author.htm?id=1002931>
17. Цехмистро И.З. Импликативно-логическая природа квантовых корреляций // Успехи физ. наук. – М., 2001. – Т. 171, вып. 4. – С. 452–458.
18. Эйнштейн А., Подольский Б., Розен Н. Можно ли считать квантовомеханическое описание физической реальности полным? // Эйнштейн А. Собр. науч. тр.: В 4 т. – М., 1966. – Т.3. – С. 604–611.
19. Aspect A., Dalibard Y., Roger G. Experimental test of Bell's inequalities using time-varying analyzers // Phys. rev. letters. – N.Y., 1982. – Vol. 49. – P. 1804–1807.
20. Azuma H. Interaction-free generation of entanglement // <http://ArXiv:quant-ph/0304031>. – (4 Apr 2003. – Vol.1).

21. Bell J.S. Speakable and unspeakable in quantum mechanics. – Cambridge, 1987. – 212 p.
22. Bene G. On the solution of the EPR paradox and the explanation of the violation of Bell's inequality // <http://arXiv:quant-ph/9708045> – (27 Aug 1997).
23. Bohm D., Hiley B.J. Nonlocality in quantum theory understood in terms of Einstein's nonlinear approach. // *Found. of physics.* – N.Y.; L., 1981. – Vol. 11, N.7/8. – P. 529–546.
24. Bona P. Comment on no-signaling condition and quantum dynamics // <http://arXiv:quant-ph/0201002>. – (1 Jan 2002. – Vol.1).
25. Bracken A.J. Entangled subspaces and quantum symmetries // <http://arXiv:quant-ph/0304132>. – (21 Apr 2003. – Vol.1).
26. Clifton R., Pope D. On the nonlocality of the quantum channel in the standard teleportation protocol // <http://arXiv:quant-ph/0103075> – (14 Mar 2001).
27. Collins D., Linden N., Popescu S. The non-local content of quantum operations // <http://arXiv:quant-ph/0005102>. – (24 May 2000. – Vol. 1).
28. Collins D., Popescu S. Violations of local realism by two entangled qubits // <http://arXiv:quant-ph/0106156>. – (30 Jul 2001. – Vol. 2).
29. Concentrating partial entanglement by local operations / Bennett C.H., Bernstein H.J., Popescu S. et al. // *Phys. rev.* – N.Y., 1996. – Vol.53A. – P. 2046–2052.
30. d'Espagnat B. *Conceptual foundations of quantum mechanics.* – 2nd ed. – L., 1976. – 301 p.
31. Enk S.J., Rudolph T. On continuous-variable entanglement with and without phase references // <http://arXiv:quant-ph/0303096>. – (14 Mar 2003. – Vol.1).
32. Exact and asymptotic measures of multipartite pure-state entanglement / Bennet C.H., Popescu S., Rohrlich D. et al. // *Phys.rev. A.* – N.Y., 2001. – Vol. 63. – P. 012307–012319.
33. Experimental long-lived entanglement of two macroscopic objects / Julsgaard B., Kozhekin A., Polzik E.S. // <http://xxx.lanl.gov/abs/quant-ph/0106057> – (9 Jun 2001).
34. Experimental test of relativistic quantum state collapse with moving reference frames / Zbinden H. et al. // <http://xxx.lanl.gov/arXiv:quant-ph/0002031>. – (5 Jul 2000. – Vol.3).
35. Filip R., Rehacek J., Ducek M. Entanglement of coherent states and decoherence // <http://arXiv:quant-ph/0011006>. – (1 Nov 2000).
36. Fine A. Do correlations need to be explained? // *Philosophical consequences of quantum theory.* – Notre Dame (Ind.), 1989. – P. 175–194.
37. Fine A. *The shaky game: Einstein Realism a. quantum theory.* – Chicago; L., 1988. – 186 p.
38. Halvorson H., Clifton R. Reconsidering Bohr's replay to EPR // <http://arXiv:quant-ph/0110107>. – (19 Dec 2001. – Vol. 1.).
39. Holger F. Hofmann causality in quantum teleportation: Information extraction a. noise effects in entanglement distribution // <http://arXiv/quant-ph/0203128>. – (23 May 2002. – Vol.1).

40. Horodecki R., Horodecki M., Horodecki P. Teleportation, Bell's inequalities and inseparability // <http://arXiv:quant-ph/9606027>. – (25 Jun 1996. – Vol. 1).
41. Is quantum entanglement invariant in special relativity? / Ahn D. et al. // <http://arXiv:quant-ph/0304119> – (17 Apr 2003)
42. Kauffman L.H., Lomonaco S.J.-jr. Entanglement criteria – quantum and topological // <http://arXiv:quant-ph/0304091>. – (12 Apr 2003 – Vol. 1).
43. Laudisa F. The EPR Argument in a relational interpretation of quantum mechanics // <http://arXiv:quant-ph/0011016> – (3 Nov 2000).
44. Lucke W., Nattermann P. Nonlinear quantum mechanics and locality // <http://arXiv:quant-ph/9707055>. – (30 Jul 1997. – Vol. 1).
45. Mensky M.B. Quantum measurements and decoherence: Models a. phenomenology. – Dordrecht, 2000. – 226 p.
46. Mermin N.D. What do correlations know about reality&nonlocality and the absurd // <http://arXiv:quant-ph/9807055>. – (20 Jul 1998. – Vol. 1).
47. Mor T., Horodecki P. Teleportation via generalized measurements, and conclusive teleportation // <http://arXiv:quant-ph/9906039>. – (14 Jun 1999. – Vol.1).
48. Mor T. «TelePOVM» – more faces of teleportation // <http://arXiv:quant-ph/9608005>. – (5 Aug 1996. – Vol.1).
49. Percival I.C. Why do Bell experiments? // <http://xxx.itep.ru/quant-ph/0008097>. – (23 Aug 2000).
50. Perspectives on quantum reality: Non-relativistic, relativistic, a. field-theoretic / Ed. by Clifton R. – Dordrecht., 1996. – 243 p.
51. Qureshi T. Popper's experiment, Copenhagen interpretation and nonlocality // <http://arXiv:quant-ph/0301123>. – (27 Jan 2003. – Vol. 2).
52. Reznik B. Entanglement from the vacuum // *Found. of physics.* – N.Y.; L., 2003. – Vol. 33, N 1. – P. 167–176.
53. Ruza J. On reality of EPR paradox // <http://arXiv:quant-ph/0304014>. – (2 Apr 2003. – Vol. 1).
54. Santos E. What is entanglement? // <http://arXiv:quant-ph/0204020>. – (4 Apr 2002. – Vol 1).
55. Smolin J.A. A four-party unlockable bound-entangled state // <http://arXiv:quant-ph/0001001> – (3 Jan 2000. – Vol. 1).
56. Song D. Post-measurement nonlocal gates // <http://arXiv:quant-ph/0303147>. – (24 Mar 2003. – Vol. 1).
57. Stapp H.P. A Bell-type theorem without hidden variables // <http://arXiv:quant-ph/0205096> – (21 March 2002).
58. Szabo L.E. On an attempt to resolve the EPR-Bell paradox via Reichenbachian concept of common cause // <http://arXiv:quant-ph/9806074> – (23 Jun 1998. – Vol. 1).
59. Szabo L.E. On Fine's resolution of the EPR-Bell problem // <http://arXiv:quant-ph/0002030> – (9 Dec 2000. – Vol. 4).
60. Teleporting an unknown quantum state via dual classical and Einstein-Podolsky-Rosen channels / Bennett C.H. et al. // *Phys. rev. letters.* – N.Y., 1993. – Vol. 70. – P. 1895–1899.

61. Tucci R.R. Entanglement of formation and conditional information transmission // <http://arXiv:quant-ph/0010041>. – (10 Oct 2000).
62. Vaidman L. Are interaction-free measurements interaction free? // <http://arXiv:quant-ph/0006077>. – (25 Apr 2001. – Vol. 1).
63. Vaidman L. The meaning of the interaction-free measurements // <http://arXiv:quant-ph/0103081>. – (20 Jun 2001. – Vol. 1).
64. Zanardi P. Entanglement of quantum evolutions // <http://arXiv:quant-ph/0010074>. – (23 Oct 2000. – Vol. 2).
65. Zanardi P., Lloyd S. Topological protection and quantum noiseless subsystems // <http://arXiv:quant-ph/0208132>. – (21 Aug 2002. – Vol. 1).
66. Zhang C.-W., Li C.-F., Guo G.-C. Conditions for manipulation of a set of entangled pure states // <http://ArXiv:quant-ph/0002068>. – (24 Febr. 2000).