1. Введение:
ЭПР - парадокс и гипотеза А. Эйнштейна

(a) Исторически проблема скрытых параметров связана с мысленным экспериментом, который предложили Эйнштейн, Подольский и Розен [*1*], пытаясь пересмотреть некоторые положения квантовой механики.

ЭПР - эксперимент (по фамилиям авторов идеи) в простейшем виде состоит в следующем. Квантовая система разделяется на две подсистемы в таком процессе, где сохраняется некоторая *суммарная* величина, например, общий угловой момент (спин). Подсистемы удаляются друг от друга на произвольно большое расстояние. Если измерить сохраняющуюся величину для одной подсистемы, то - при подходящем выборе измерительного базиса - результат такого же измерения для второй подсистемы становится однозначным.

Профессор Джон Крамер из университета штата Вашингтон, Сиэтл (США), предлагает, на мой взгляд, лучшее из имеющихся описаний парадокса и соответствующего эксперимента в его современной постановке [*2*]:

«Этот вид нелокальности демонстрируется экспериментом Freedman-Clauser (1972). Здесь возбужденные атомы кальция проходят атомный каскад 0^+ к 1^- к 0^- и испускают пару фотонов. Предполагается, что они испускаются "спина к спине", что соответствует состоянию нулевого углового момента L=0. По причине сохранения углового импульса эти фотоны должны иметь одинаковые спиральности [helicities] или их линейные комбинации, то есть они должны быть в одинаковых состояниях круговой или линейной поляризации. В этом смысле ВС [вектор состояния] системы двух фотонов допускает, чтобы фотоны были в любом состоянии поляризации, но оба должны быть в одинаковом состоянии. Для эксперимента это означает, что если фотоны проходят через идеальные поляризационные фильтры до регистрации, они должны быть пропущены со 100-процентной вероятностью, если фильтры выделяют соответствующие состояния, и 0-процентной, если фильтры выделяют ортогональные состояния, независимо от ориентации или поляризационной селективности фильтров.

Эксперимент Фридмана - Клаузера (ФК) применяет фильтры линейной поляризации и измеряет количественный выход совпадающей передачи двух детекторов фотонов, когда основные оси двух фильтров установлены на углы Q_A и Q_B, изменяемые независимо. КМ предсказывает, что

экспериментально наблюдаемый выход будет зависеть только от относительного угла $Q_{rel} = Q_A - Q_B$ между основными осями, и что для идеальных фильтров выход будет иметь нормальную угловую зависимость:

$$R[Q_{rel}] = \mathrm{Cos}^2(Q_{rel}) \quad (1)»$$

(б) С точки зрения авторов [1], появление таких корреляций в предсказаниях стандартной квантовой механики выглядело подозрительным. Поэтому авторы [1] предположили: либо эти предсказания неверны, либо квантовая механика неполна. Эксперимент Фридмена - Клаузера демонстрирует, что такие корреляции действительно существуют, то есть квантовая теория верна.

Понятие "полноты" теории по А. Эйнштейну достаточно сложно и мы его касаться не будем. Физическая проблема, на мой взгляд, состоит в том, что стандартная квантовая механика никак *не объясняет* поведение квантовых объектов, а лишь *предсказывает* амплитуды вероятностей элементарных процессов. Квантовые системы в принципе не имеют непрерывных траекторий, поэтому неясно, *как именно* осуществляется переход из начального состояния в конечное.

Также теория не объясняет, *почему* и *как* спины произвольно удаленных частиц оказываются коррелированными. Здесь важно понять (Джон Крамер подробно останавливается на этом), что в принципе нельзя утверждать, будто коррелированные величины "существуют" непосредственно после разлета частей системы, "просто мы их не знаем". В том-то и проблема, что каждая из подсистем принимает каждое свое значение данной величины только *в момент* ее детектирования измерительным прибором.

(в) Нелокальная корреляция, как в эксперименте Фридмена - Клаузера, *не противоречит* принципам теории относительности формально, но, как высказывается Дж. Пенроуз [3], противоречит его *духу*.

С целью *объяснить* такие нелокальные корреляции, и, по существу, с целью *явно описать* процесс перехода квантовой системы из одного состояния в другое, А. Эйнштейн ввел гипотезу «скрытых параметров». Непрерывная и детерминированная эволюция скрытых параметров должна была, по А. Эйнштейну, давать "на выходе" наблюдаемые значения физических величин.

Считается, что эксперименты по теореме Белла (см. ниже) исключают возможность существования в Природе скрытых параметров.

2. Теорема Белла

(а) Приведем формулировку теоремы Белла согласно классической работе [4]. Видимо, формулировку надо пересказать достаточно подробно, ибо в одном

авторитетном физическом журнале рецензент упрекнул меня в искажении формулировки и сути теоремы.

В частности, по мнению рецензента, "Замечание авторов о том, что авторы [4] считают, что информация о частицах и о коррелированной величине (поляризации) локализована в частицах не соответствует действительности, поскольку рассмотрение в [4] не ведется в терминах частиц, данное понятие даже определить четко нельзя".

Итак, цитирую: "Рассмотрим ансамбль коррелированных пар частиц, движущихся так, что одна из них попадает в измерительное устройство **I***a*, а вторая - в **I***b*, где ***a*** и ***b*** настраиваемые параметры данных устройств. В каждом устройстве частица должна выбрать один из двух возможных каналов помеченных +1 и -1. Будем обозначать результаты измерений соответственно A(*a*) и B(*b*), предполагая, что эти величины могут принимать значения +/-1 каждое, в зависимости от того, какой канал выбрала соответствующая частица.

Примем теперь, что статистическая корреляция величин A(*a*) и B(*b*) связана с информацией, локализованной в каждой из частиц, а также с тем, что в некоторый момент времени в прошлом частицы составляющие пару были в контакте и обменивались этой информацией".

Далее авторы [*4*] переходят к формулировке того, что представляют собой в обобщенном виде различные предлагаемые теории скрытых параметров.

"Информация [о корреляции], которая суть существенно не квантово-механическое понятие [сейчас, в эпоху бурного развития теории квантовой информации, мы вправе не согласится с авторами], содержится [неким образом] в наборе скрытых переменных, которые совокупно обозначим λ. Тогда результаты измерений будут детерминированными функциями A(a, λ) и B(b, λ). Принцип локальности с необходимостью требует, чтобы A(a, λ) не зависела от b, аналогично B(b, λ) не зависела от a, так как оба выбора могут произойти произвольно далеко друг от друга.

Наконец, так как пара частиц испускается источником в общем случае физически независимо от настраиваемых параметров ***a*** и ***b***, мы примем, что нормализованное распределение $\rho(\lambda)$, характеризующее ансамбль, не зависит от

a и *b*."

Исходя из сделанных допущений, выводится ряд неравенств, накладываемый на статистические характеристики ансамбля измерений над коррелированными частицами. Эти неравенства называются неравенствами Белла и их точный вид для нас несущественен. Выполнение неравенств Белла в эксперименте *не противоречило бы* существованию скрытых параметров. В то же время, нарушение этих неравенств с неизбежностью налагает запрет на существование скрытых параметров.

В данном эксперименте неравенства Белла нарушаются.

(б) Был предложен еще один, усовершенствованный эксперимент [5], который тоже стал классическим. Основное усовершенствование, предложенное авторами по сравнению с предыдущим экспериментом, как видно из названия работы - использовать детекторы фотонов с меняющимися во времени параметрами *a* и *b*, фигурирующими в теореме Белла. Главные оси поляризационных кристаллов переключались случайно с характерным временем переключения 10 ns, в то время как свету требовалось 40 ns, чтобы преодолеть расстояние от одного детектора до другого.

Таким образом, возможность для детекторов обмениваться сигналами исключалась. При этом условии корреляция (1) также выполнялась, в то время как неравенства Белла нарушались.

3. Фундаментальная процедура измерения физического времени

(а) На мой взгляд, упущение теоремы состоит в неявном использовании интуитивного допущения о равномерном течении времени как некоего абстрактного потока, на фоне которого разворачиваются все события. Я утверждаю, что это допущение противоречит специальной теории относительности (СТО) и квантовой природе элементарных событий.

В СТО *явно* оговаривается, что расстояние измеряется "линейкой", то есть прямолинейным твердотельным объектом. А вот *чем* измеряется время? Для этого А. Эйнштейн ввел понятие "часов", но четко его не определил.

В области применимости классической теории мы можем понимать под часами любой достаточно устойчивый колебательный процесс. При этом, поскольку мы *всегда* имеем дело с затухающими колебаниями, то мы всегда имеем дело с *диссипативными* осцилляторами с внешним поступлением энергии. Например, обычные настенные часы снабжаются энергией от гирьки, а наручные часы – от пружинки или батарейки.

Если мы измеряем достаточно большие (классические) времена, то мы можем различать дольные времена (т.е., использовать неполные повороты

"стрелки" часов). Насколько точно мы можем измерять время, то есть, насколько мелкие доли полного "поворота" стрелки мы можем различать?

Поскольку каждый, самый маленький поворот "стрелки" часов сопровождается поглощением энергии, то ответ на последний вопрос становится очевидным. Энергия квантуется, значит, квантуется и измерение времени. Таким образом, в каждом конкретном эксперименте время измеряется количеством поглощенных квантов энергии.

С точностью до нормирующего множителя, обусловленного конфигурацией конкретного эксперимента, время, прошедшее в данной точке, **есть** количество поглощенных квантов энергии в данной точке.

Важно признать, что количество поглощенных квантов не просто *один возможный способ* измерить время, это в принципе *единственный способ*. Все остальные сводятся к этому.

(б) Предлагается ввести в теорию фундаментальную процедуру измерения физического времени, аналогично фундаментальной процедуре синхронизации удаленных часов по А. Эйнштейну. Другими словами, надо рассматривать не только одновременность, но и само время, в операциональных терминах.

Рассмотрим простой, конкретный процесс. Определим, сколько времени проходит от излучения фотона атомом до поглощения его другим атомом. Иными словами, мы опишем, как *в принципе* измеряется время "полета" фотона, и, следовательно, какой *экспериментальный* смысл мы вкладываем в понятие "скорости" света.

Принципиальная схема измерения времени полета фотона приведена на рис. 3-1. В точности посередине между атомом-источником **S**1 и атомом-детектором **D**1 находится еще один источник **S**0, который мы условно назовем "кнопкой".

```
                                  (S2)
                                    |
                                    |
                                    |
    |<---------(S0)-------->|_V_
(S1)|----------------------->(D1)
```

Рис. 3-1
Фундаментальная процедура измерения физического времени

Источник-"кнопка" одновременно испускает два световых сигнала в противоположных направлениях. Сигналы приходят к источнику и детектору *одновременно* в строго релятивистском смысле этого слова. При этом источник испускает фотон.

С другой стороны, *в этот же момент* времени открывается задвижка, прикрывающая детектор от света лазера **S**2, настроенного на частоту атомного перехода. Детектор начинает принимать фотоны от лазера.

Будем везде считать, что все фотоны, которые мы рассматриваем и учитываем, имеют одну и ту же энергию. Примем также, что после каждого акта поглощения фотона мы успеваем, тем или иным способом, вернуть атом-детектор в исходное, невозбужденное состояние.

Отметим, что *принципиально* мы в состоянии отличить фотон, пришедший в детектор из лазера **S**2, от фотона, пришедшего из источника **S**1. Дело в том, что детектор испытывает при поглощении отдачу, которую, в пределах соотношения неопределенностей, мы можем измерить. В зависимости от того, продольное или поперечное направление имеет импульс, приобретаемый детектором, мы можем быть уверены, что фотон пришел из лазера **S**2 или от атома **S**1.

Таким образом, детектор начинает отсчет времени, то есть, количества фотонов от лазера, *одновременно* с вылетом фотона из источника. Как только детектор принимает фотон от источника, отсчет фотонов от лазера. заканчивается. Время "полета" фотона равно числу принятых квантов света от лазера.

Важно отметить, что предлагаемая процедура не привязана жестко к детектору **D**1. Счетчик квантов может находиться в любом другом месте, но тогда детектор **D**1 должен переизлучить фотон от атома **S**1 и "направить" его на введенный нами второй детектор, чтобы тот "узнал", когда надо прекратить отсчет. Разумеется, при этом надо делать поправку на то время, которое нужно кванту света, чтобы преодолеть расстояние от **D**1 до второго детектора.

(в) Отметим, что первым предложил использовать стабильную линию лазера для измерения времени Л. Бриллюэн, один из создателей квантовой теории, в книге "Relativity reexamined" [*6*].

Но Л. Бриллюэн не уточнил, что является минимальным квантом времени в таких часах. Видимо, предполагалось, что это период излучения. Но это предполагает *классический* характер поглощения света, описываемый классическими уравнениями Максвелла. Если учесть существенно *квантовый* характер поглощения света, то такое определение кванта времени не годится.

4. Концепция "внутреннего времени" теории

Теперь у нас достаточно сведений, чтобы ясно увидеть и сформулировать главное узкое место в теореме Белла, накладывающей запрет на использование скрытых параметров. Дело в том, что допущение "распределение $\rho(\lambda)$, характеризующее ансамбль, не зависит от a и b", хотя и представляется физически очевидным, на самом деле накладывает ограничение на использование только очень ограниченного класса теорий.

Как показано выше, физическое время не есть абстрактный и равномерный поток "чего-то", во что мы "помещаем" элементарные события. Время (точнее, пространство-время) само состоит из этих событий, измеряется их количеством и ничем иным. Можно сказать, что время дискретно, поскольку дискретны элементарные события.

Поэтому, мы вправе ввести в теорию совокупность переменных λ, которые не являются физически наблюдаемыми величинами (в этом смысле это доподлинно "скрытые параметры"), они входят только в *математический аппарат* теории. Эти переменные эволюционируют в так называемом "внутреннем времени теории", которое не тождественно времени физическому и также является лишь *математическим* понятием. При этом элементарные события (такие, как поглощение фотона атомом) являются "точками сшивки" внутреннего времени и физического времени.

В теории такого класса мы вправе использовать любые сигналы, которыми обмениваются детекторы между собой и источником *во внутреннем времени*, то есть "между" событиями испускания и поглощения. Поскольку распространение этих сигналов протекает не в физическом времени, бессмысленно говорить об их скорости.

Если сигналы *таких* скрытых переменных несколько раз перемещаются от источника к детектору и обратно (во внутреннем времени!), то, очевидно, их статистические распределения вполне могут зависеть от настраиваемых параметров детекторов (a и b), что не противоречит ни принципу локальности, ни принципу причинности, ни ограниченной скорости *физических* сигналов.

5. Возможная принципиальная модель излучательных процессов

(а) Рассмотрим сначала случай одного фотона. Излучение фотона источником и его поглощение детектором происходит в результате трех проходов сигнала скрытых переменных от источника к детектору и обратно (рис. 5-1):

(D2) <---------- **(S)** ----------> **(D1)**

(D2) ~~~~~~~~~~~~~~~~~> **(S)** <~~~~~~~~~~~ **(D1)**

(D2) <********** **(S)** ----------> **(D1)**

Рис. 5-1 Возможная принципиальная модель излучательных процессов.

1 сначала источник *S* посылает т.н. *сигналы поиска* по всем направлениям в пространстве (это происходит во внутреннем времени);
2 все потенциальные детекторы, получившие *сигнал поиска*, посылают источнику свои *сигналы запроса* на получение фотона;
3 только один атом-детектор получает *сигнал подтверждения*, остальные получают *сигнал отказа*.

(б) На рис. 5-1 все выглядит так, будто источник ***S*** сам осуществляет лотерею. На самом деле надо учесть, что настоящая картинка трехмерна, сигналы распространяется с расширением в пространстве, осуществляя "деление" в узлах пространственной решетки (Рис. 5-2). Поэтому при движении *сигналов запроса* (они движутся строго по тем же ребрам, что и сигналы поиска, но в обратном направлении) от потенциальных детекторов они конкурируют в каждом узле. Выбор осуществляет ни много, ни мало все пространство, *вся Вселенная*, причем во внутреннем времени.

На рис. 5-2 схематически изображена одна возможная схема движения сигналов поиска и запроса. Конкуренция сигналов запроса осуществляется в каждом узле «внутреннего» пространства - времени, через который ранее уже прошли сигналы поиска. Правила конкуренции просты: в каждом узле выживает ровно один входящий сигнал запроса, после чего этот сигнал копируется во все ребра «вниз», то есть в ребра с входящим сигналом поиска.

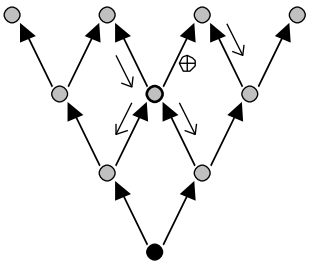

Рис. 5-2 Конкуренция детекторов. В каждом узле выживает ровно один сигнал запроса от (какого-то) детектора.

Какой бы сложной и запутанной не была динамика движения сигналов запроса «вниз» (от детекторов к источнику), правило выживания только одного входящего запроса в каждом узле *гарантирует*, что в итоге останется ровно одна «дорожка» от источника к единственному детектору. Этот детектор и получает «приз» - регистрирует испущенный фотон.

Отметим, что в каждом внутреннем узле решетки входящий сигнал запроса может ждать сколько угодно долго, пока подойдут сигналы от его конкурентов, не заботясь о том, чтобы куда-то «успеть», поскольку это ожидание происходит во внутреннем времени и никак не связано с физическим временем.

(в) Любопытно, что рис. 5-2 сильно напоминает формулировку квантовой механики по Р. Фейнману, когда амплитуда вероятности перехода частицы вычисляется суммированием некоторого интеграла вдоль всех возможных путей из начального состояния частицы в конечное.

В предложенной на рис. 5-2 принципиальной схеме сигналы поиска также достигают каждого из детекторов всеми возможными путями.

(г) Сделаем еще ряд допущений:

4 Примем, что в мире "внутреннего времени" понятие одновременности является ньютоновским, то есть абсолютным для всего пространства.

5 Примем, что во "внутреннем времени" все сигналы движутся с одной скоростью, которую условно приравняем к обычной скорости света.

6 Примем также, что детектор ставит поступающие к нему сигналы поиска от различных источников в очередь (рис. 7.1).

7 Каждый сигнал поиска в очереди "обрабатывается" детектором (детектор посылает соответствующий сигнал запроса) только после того, как полностью "обработан" предыдущий сигнал поиска (получен сигнал подтверждения, или, напротив, проигрыша) - рис. 5-3.

Эти правила необходимы для "сшивания" внутреннего времени и физического времени. Вспомним введенную выше принципиальную процедуру измерения времени. Пока сигнал поиска движется от источника к детектору, последний принимает и ставит в очередь аналогичные сигналы от лазера. "Когда" приходит сигнал от источника, он также ставится в очередь.

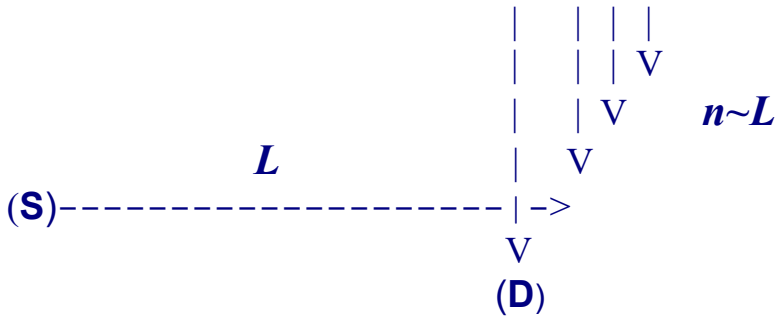

Рис. 5-3
Время полета фотона пропорционально расстоянию от источника до детектора

Из геометрии всей конфигурации (рис. 5-3) видно, что количество сигналов в очереди *перед* нашим сигналом (т.е. сигналом от нашего источника) пропорционально расстоянию от источника до детектора. Это обусловлено тем, что, во-первых, постановка в очередь сигналов поиска от лазера началась *одновременно* с вылетом сигнала поиска от источника; во-вторых, сигналы запроса движутся с одинаковыми скоростями.

Если теперь вспомнить правило (7), то ясно, что акт поглощения "нашего" фотона в физическом времени произойдет *после* поглощения детектором такого числа ***n*** фотонов из лазера, которое пропорционально расстоянию между источником и детектором.

(д) С точки зрения концепции внутреннего времени модель ЭПР - явления принципиально сводится к той же схеме на рис. 5-1. "Согласование" спинов (поляризаций) двух фотонов происходит, когда сигналы запроса от двух детекторов встречаются в точке излучения.

Здесь находится серьезный подводный камень. Далеко не праздный вопрос: в какой именно точке пространства - времени происходит "согласование" поляризаций? В случае одиночного фотона этот вопрос будет звучать так: в какой точке пространства - времени происходит окончательный выбор того или иного детектора? Пока отложим рассмотрение этого вопроса.

6. "Скрытое время" и ТИКМ Джона Крамера

(а) Как известно, уравнения Максвелла допускают решения не только в виде запаздывающих потенциалов $A(r, t) \sim f(t - x/c)$, но и опережающих, когда $A(r, t) \sim f(t + x/c)$. Опережающие потенциалы, в отличие от запаздывающих, принято считать нефизичным решением, поскольку они соответствуют обратному по времени распространению сигналов (из будущего), и их обычно отбрасывают.

Но в 1945 г. Р. Фейнман и Дж. Уилер высказали гипотезу [7], что и сигналы из будущего могут быть реальностью, надо просто правильно учесть их интерференцию.

Эта гипотеза понадобилась Р. Фейнману и Дж. Уилеру, чтобы разрешить парадокс бесконечной энергии самовоздействия излучающего электрона. Позже они отказались от этой идеи.

Профессор Джон Крамер использовал идею Р. Фейнмана и Дж. Уилера довольно необычным образом [2]. Не претендуя на создание новой теории, Джон Крамер построил некую *объясняющую схему* для квантовых излучательных процессов. По его собственным словам, эта схема - только интерпретация квантовой механики, призванная облегчить восприятие квантовых парадоксов, включая ЭПР - парадокс, описанный выше.

Свою транзакционную интерпретацию квантовой механики (ТИКМ) Джон Крамер использует в учебном процессе при преподавании квантовой механики.

(б) Основная идея ТИКМ состоит в том, что каждый элементарный акт излучения можно *представить* как своего рода "одновременное" появление в пространстве - времени прямой по времени волны от источника и обратной волны от детектора. Дж. Крамер называет это "вневременным 4-мерным описанием". Прямую волну от источника Дж. Крамер называет "волной - предложением", а обратную волну от детектора "волной - подтверждением" (рис. 6-1).

Амплитуды как прямой, так и обратной волн равны 1/2 от амплитуды обычной (прямой) волны излучения от источника к детектору, наблюдаемой в эксперименте. При этом фазы волн согласованы так, что до момента излучения в источнике и после момента поглощения в детекторе электромагнитное поле излучения отсутствует: волны интерферируют так, что их сумма равна нулю в этих областях. В то же время, в промежутке между актами излучения и поглощения они интерферируют так, что в сумме дают обычную волну, - ту, что наблюдается в эксперименте.

Как видим, Дж. Крамер использует ту же идею, что Р. Фейнман и Дж. Уилер. Для чего же нужны 2 волны, почему нельзя обойтись одной, обычной? Две волны позволяют осуществить согласование граничных условий и объяснить корреляции наподобие ЭПР.

Ведь, на самом деле, ЭПР - парадокс не единственный в своем роде. Позже было предложено еще несколько парадоксальных мысленных экспериментов (согласующихся с предсказаниями квантовой механики). В частности, это так называемый эксперимент Рёнингера с отрицательным результатом (когда важно *непопадание* частицы в детектор) и мысленный эксперимент Уилера с отложенным выбором.

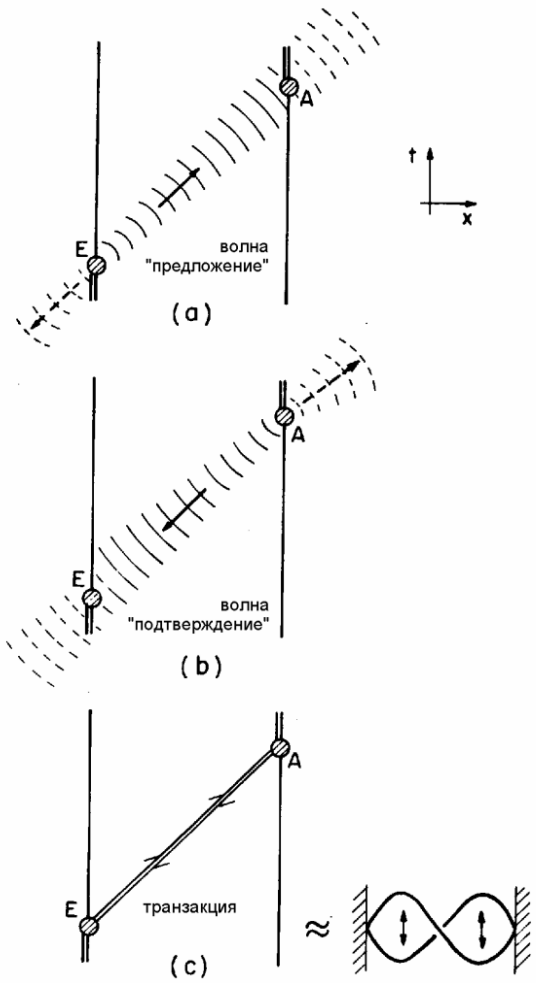

Рис. 6-1 Транзакционная интерпретация Джона Крамера

Парадокс отложенного выбора Уилера состоит в модификации классического опыта по интерференции электрона на двух щелях. Электрон может попасть, как обычно, в фотоэмульсию. Но эмульсию можно убрать с пути электрона, причем до того, как он в нее попал, но после того, как электрон уже "должен был" пролететь через экран с щелями. При этом электрон попадает в один из двух узко коллимированных детекторов, каждый из которых настроен в точности на одну из щелей.

В эксперименте Уилера складывается парадоксальная ситуация, противоречащая здравому смыслу: мы можем заставить электрон пройти в точности через одну щель, причем уже после того, как он "должен был" пройти через обе. Становится совершенно непонятно, когда же электрон принимает решение о типе своего движения.

С точки зрения ТИКМ, нет никакого парадокса, просто реализуется та или иная из возможных транзакций между источником электрона и одним из

детекторов. Сам Уилер предложил такую формулировку: "Ни один феномен не является феноменом до тех пор, пока это не наблюдаемый феномен." То есть, пока электрон не зарегистрирован, бессмысленно говорить о том, что электрон "уже пролетел через экран с щелями". Экран и щели - только одна из составляющих граничных условий транзакции, то есть всего эксперимента *в целом*, в смысле его 4-мерной картины.

Все это звучит, безусловно, красиво и логически стройно, но не добавляет понимания, *как именно* осуществляется выбор одной из возможных транзакций. ТИКМ уходит от этого вопроса.

(в) Где и когда осуществляется выбор? Это ключевой вопрос, который мешает ТИКМ стать *моделью*, а не интерпретацией. Если прямая и обратная волны, в самом деле, существуют непосредственно в момент излучения, то, например, в случае ЭПР - эксперимента это означает, что каждый из излученных фотонов *уже* обладает определенной поляризацией. Другими словами, коллапс волновых функций происходит не в момент детектирования фотонов, а сразу после их разделения. Такая гипотеза носит название модификации Ферри

Джон Крамер объясняет, почему это предположение неверно:

"...мы можем имитировать модификацию Ферри в ФК [Фридмен - Клаузер] эксперименте путем помещения рядом с источником дополнительной пары взаимно выровненных фильтров линейной поляризации, которые быстро и случайно сменяются. Согласно этому механизму, каждая пара фотонов, истекающая из источника, будет помещена в определенные и идентичные, но последовательно случайные состояния линейной поляризации, так как фотоны проходят через эти фильтры рядом с источником. ...предсказание КМ для этого случая может быть легко получено путем вычисления предсказанной интенсивности регистрации обоих фотонов для конкретного угла ориентации рандомизирующих фильтров, и затем, усреднением по всем возможным величинам угла. Результат этого вычисления:

$$R_f[q_{rel}] = (1/8)[1 + 2\ \mathrm{Cos}^2(q_{rel})]\quad (2)"$$

(г) Концепция внутреннего времени использует ту же базовую идею, объясняющую корреляционные эффекты: несколько проходов волн. Но движение этих волн перенесено из физического времени во внутреннее. Поэтому отпадает необходимость в непонятном "обратном по времени"

распространении. Внутреннее время - очень простая вещь, оно течет только вперед.

Кроме этого, в предложенной модели окончательный выбор в принципе происходит во внутреннем времени, причем, в общем случае, в такой момент, который не соответствует никакому физическому моменту времени. Это позволяет освободить идею нескольких волн "туда - сюда" от нежелательных последствий, которые появляются в ТИКМ, *если* рассматривать её как модель, а не как интерпретацию.

7. "Скрытое время" и "теория элементарных волн" Льюиса Литтла

(а) Еще один родственный подход, использующий *обратные* сигналы от детектора к источнику, под названием «теория обратных волн», развивает профессор Льюис Литтл [8]. По идее профессора Литтла, сигналы от детектора к источнику движутся не в скрытом времени, и не «из будущего», а третьим, совершенно неожиданным способом - в обычном физическом времени.

При этом волны из каждого детектора распространяются к источнику всеми возможными путями, и интерферируют между собой на источнике. Источник, таким образом, получает сигналы ото всех потенциальных детекторов. С вероятностью, пропорциональной квадрату амплитуды одной из пришедших волн, источник генерирует частицу в состоянии, соответствующей попаданию в источник – победитель.

(б) Моя критика теории элементарных волн (ТЭВ) кратко сводится к следующему.

1. ТЭВ предполагает, что частица движется в реальном физическом времени от источника к детектору. Это предполагает, что выбор физически уже существует в момент испускания. В предыдущем разделе уже было показано, что это предположение, в случае перепутанных фотонов, не согласуется с экспериментом. *Выбор в скрытом времени корректно решает эту проблему*.
2. В классическом эксперименте по дифракции на 2-х щелях частица проходит через одну щель (по Л. Литтлу, все равно какую), в реальном физическом времени. Классический разбор этого предположения принадлежит Р. Фейнману. Если частица проходит через конкретную щель, ее можно «поймать» поблизости от щели, и это (в эксперименте) приводит к разрушению интерференционной картины. Но, согласно ТЭВ, нет никаких причин для разрушения интерференции. *При движении*

частицы через одну конкретную щель, но в скрытом времени, описание становится корректным.

3. Волны в реальном времени, в принципе, хорошо описывают эксперименты со статической конфигурацией. Но описание динамических экспериментов вроде отложенного выбора (Уилер) или [5] становится неочевидным. *Сигналы в скрытом времени решают эту проблему*.
4. Волновую функцию одиночной частицы, в самом деле, вполне разумно трактовать как *реальную*, физическую волну (неважно, движущуюся от детектора к источнику или наоборот). Но, как хорошо известно, двухчастичные амплитуды, да еще с суммой перекрестных членов (для тождественных частиц) вида $\psi(x_1, x_2) = \varphi_1(x_1) \cdot \varphi_2(x_2) \pm \varphi_1(x_2) \cdot \varphi_2(x_1)$, крайне затруднительно представить в виде физической волны, поскольку величина такого «поля» должна быть связана не с одной точкой в пространстве-времени, а с двумя (или больше). *Сигналы в скрытом времени, сами по себе не тождественные волновой функции, позволяют осуществлять распределенное вычисление такой амплитуды*.

(в) На самом деле, я вовсе не склонен выносить «окончательный приговор» волнам подобного рода. Скорее, я за то, чтобы «квантовое» научное сообщество поскорее перешло к обсуждению давно назревшей проблемы. Наличие на сегодняшний день уже целых 3-х различных, но родственных концепций, *объясняющих* квантовые явления – это серьезный показатель.

8. Заключение

(а) Хочу повторить главный тезис данной работы: теорема Белла запрещает использование только одного, вполне конкретного класса теорий со скрытыми параметрами, не более того. Теории с параметрами, эволюционирующими во «внутреннем времени», не попадают под действие этой теоремы.

(б) Использование концепции «внутреннего времени» таит в себе колоссальные возможности, которых нет в стандартной квантовой теории. В частности, предлагаемая концепция позволяет подойти конструктивно и с единых позиций к природе электрического заряда и вакуума.

Заряд - это то, что генерирует сигналы поиска, запроса, подтверждения и отказа. Кроме этого, заряд осуществляет лотерею. Введенные в модель внутренние узлы пространства также осуществляют лотерею. Но, в отличие от зарядов («реальных» узлов пространства), внутренние узлы не являются источниками сигналов, а только их проводниками. Полагаю, что в рамках данного подхода можно так сконструировать внутренний узел, что он будет составлен из двух физических узлов - «зарядов» с разными знаками.

Это дает основания соотнести внутренние узлы с виртуальными электрон-позитронными парами. Кроме этого, сама суть модели - использование всех возможных траекторий, замечательно соответствует фейнмановской формулировке КМ. Все это делает модель очень правдоподобной.

В итоге, есть надежда, что можно будет связать заряд электрона e, скорость света c и постоянную Планка h в едином, *конструктивном* смысле. Например, заряд электрона может отвечать за генерацию сигналов и осуществление лотерей, скорость света - за пропускание сигналов узлами, постоянная Планка - за пространственную плотность узлов.

То есть, по сути, предлагается программа вычисления безразмерной постоянной тонкой структуры $\alpha = \frac{e^2}{\hbar c} \approx \frac{1}{137}$. Как отмечали Макс Планк, Ричард Фейнман, полная квантовая теория должна уметь вычислять эту постоянную, а не брать её из эксперимента.

Литература

1. *Einstein, A., B. Podolsky, and N. Rosen*, 1935, Phys. Rev. 47, 777.
2. *J. Cramer*. “Transactional Interpretation of Quantum Mechanics”. Reviews of Modern Physics 58, 647-688, June 1986. (Электронный вариант: http://physfac.bspu.secna.ru/books/tiqm/)
3. *Р. Пенроуз.* "Новый ум короля". М. УРСС ,2003.
4. *John F. Clauser, Michael A. Horne, Abner Shimony, Richard A. Holt.* "Proposed experiment to test local hidden-variables theories". Physical Review Letters, Vol. 23, No. 15, 13 October 1969.
5. *Alain Aspect, Jean Dalibard, and Gerard Roger.* "Experimental Test of Bell's Inequalities Using Time-Varying Analyzers". Physical Review Letters, Vol. 49, No 25, 20 December 1982.
6. *Л. Бриллюэн.* "Новый взгляд на теорию относительности", М. Мир, 1972.
7. *J. A. Wheeler and R. P. Feynman*, Rev. Mod. Phys. 17, 157 (1945).
8. *Lewis E. Little.* Theory of Elementary Waves. Physical Essays, vol. 9, No. 1, 1996. (Электронный вариант: http://www.yankee.us.com/TEW/)