

ЭПР в реляционной квантовой механике

Ф. Лаудиза.

Аннотация

Показано, что в реляционной интерпретации квантовой механики Ровелли, в которой отвергаются понятия абсолютного наблюдателя или независимого состояния, традиционная аргументация ЭПР перестаёт быть независимой от наблюдателя. Реляционный подход предлагает адекватное рассмотрение с новой интерпретацией квантовой механики. Кратко обсуждаются последствия этого рассмотрения – "мирное сосуществование" квантовой механики и специальной теории относительности.

1. Введение

Противоречивый характер процедуры наблюдения в квантовой механике оказался в центре дискуссий по основам теории с первых дней её возникновения. В отличие от ситуации с классической теорией в квантовой механике возник вопрос о том, *где и как определить границу между наблюдаемой и наблюдающей системами*, причём не только в чисто практической плоскости, но и в концептуальном смысле: есть ли какие-то фундаментальные различия между этими двумя классами систем? Акцент на соответствующий контекст наблюдения был определён Бором как результат размышлений по поводу оснований квантовой теории. Интерпретация Бора вполне состоялась на своём уровне описания и была унаследована в определённой степени даже на ситуации, которые находились за пределами копенгагенской точки зрения.

Хотя продолжающиеся споры и касаются в основном давно изученных проблем измерения, однако возникла естественная необходимость обратить более пристальное внимание на роль наблюдателя и на возможности предложить новые направления в решении проблемы нелокальности. Известная аргументация Эйнштейна, Розена, Подольского (ЭПР) о *неполноте* квантовой механики превращается по сути в обсуждение возможности для наблюдателя предсказывать результаты измерений, выполненных в области пространства-времени, изолированной от области локализации наблюдателя. Описанию квантовой механикой типичного ЭПР-состояния препятствует интерпретация результата измерения как простому нахождению заведомо *предсуществующего* состояния, так что для развязки спора предоставляется **альтернатива между полнотой и локальностью**¹⁾, а квантовые предсказания *данного наблюдателя* в рамках реляционной интерпретации должны заметно влиять на структуру и логику принятия ЭПР-альтернативы.

Парадокс ЭПР обычно рассматривается в нерелятивистской квантовой механике, симметрии движения в которой образуются полугруппой Галилея. Поэтому, очевидно, способы наблюдения и вся конструкция ЭПР-альтернативы должны быть встроены в пространство-время специальной теории относительности. Можно показать, что релятивистская аргументация к ЭПР парадоксу работает должным образом и как следствие, события, относящиеся к квантовой системе, могут зависеть от событий, относящихся к другим квантовым системам, разделённых пространственноподобными интервалами²⁾. В принятии релятивистской ЭПР-альтернативы особое внимание должно быть уделено ограничениям, связанным с обобщением и присвоением свойствам составной системы атрибутов подсистем: суть корректности здесь заключается в том, что следует с осторожностью принимать допущения о том, что наблюдатель заведомо знает о типе квантовомеханического события, происходящего в совершенно другом месте, отстоящим от самого наблюдателя. Такая зависимость от наблюдателя определяется в основном пространственноподобными интервалами, разделяющими области измерений и наблюдений, и

¹⁾ Очевидно, что оба варианта возможны, пока мы ограничиваем внимание на ЭПР-аргументах. Но после теоремы Белла, существует широко распространённое мнение, что единственным жизнеспособным вариантом для обычной квантовой механики является на самом деле первый. В дальнейшем под ЭПР-альтернативой подразумевается возможность выбора альтернативы между нелокальностью и неполнотой квантовой механики; под ЭПР-аргументацией – её эйнштейновский выбор неполноты. *Прим. редактора.*

²⁾ Нет единого мнения о том, что разумная интерпретация этой "зависимости" может иметь место. Тщательное обсуждение этого вопроса выходит за рамки данной статьи.

предотвращает использование атрибутивных свойств без их классификации по этому признаку; анализ таких ограничений показывает, что *релятивистская ЭПР-альтернатива не поддерживает широко распространённого мнения о том, что нелокальность подразумевает мгновенное распространение свойств на расстоянии*³⁾. Необходимо подчеркнуть, что реляционная аргументация не подразумевает существования таких *влияний в физическом мире*: она включает только необходимость логической совместимости между идеей действия на расстоянии и релятивистским учётом пространственно-временной структуры. В более общем плане реляционная аргументация означает необходимость перехода к релятивистскому описанию для того, чтобы тщательно оценить, насколько заявленные требования о метафизических последствиях *ЭПР-аргументации* реального согласуются с физикой пространства-времени.

Согласно реляционной интерпретации квантовой механике, недавно выдвинутой Карло Ровелли^[14], чтобы определить в фундаментальном виде зависимость от наблюдателя, не требуется переход к полностью релятивистской квантовой теории. В реляционной трактовке само понятие состояния физической системы должно считаться бессмысленной, если она не соотносится с другой физической системой, которая временно играет роль наблюдателя: при работе с конкретной физической системой необходимо задействовать роль наблюдателя, что и позволит определить состояние системы относительно этого наблюдателя. В определённой степени, с реляционной точки зрения, выбор такого наблюдателя в квантовой теории аналогичен выбору системы отсчёта в теории относительности. В следующем разделе будет уточнена реляционная интерпретация.

В разделе 3 реляционный анализ (релятивистский) ЭПР-альтернативы позволит показать, что вывод о неполноте или нелокальности квантовой механика относительно наблюдателя зависит от системы отсчёта последнего.

В заключительном разделе мы кратко рассмотрим последствия этого анализа для так называемого "мирного сосуществования тезисов", касающихся квантовой теории и теории относительности.

2. Реляционная квантовая механика и зависимость состояния от наблюдателя

При реляционной интерпретации квантовой механики различие в предсказаниях наблюдателей релятивистских систем отсчёта является не единственным источником зависимости от наблюдателей: фундаментальная зависимость от наблюдателя обнаруживается уже в *нерелятивистской* квантовой механике и касается определения самого физического состояния. В реляционной интерпретации квантовой механики понятия абсолютного наблюдателя или абсолютного состояния отвергаются: здесь не имеет никакого смысла говорить о состоянии физической системы без ссылки на наблюдателя, относительно которого это состояние определяется^[14]. Это утверждение отчасти напоминает эйнштейновскую операциональную критику абсолютного понимания одновременности для удалённых наблюдателей. При реляционном подходе выдвигается идея, лежащая в основе интерпретации измерений: анализ результатов, получаемых разными наблюдателями в одинаковых последовательностях событий типичного процесса квантового измерения.

Рассмотрим систему S и физическую величину Q , которая может быть измерена над S . Предположим, что возможными результатами измерения могут быть только два: q_1 и q_2 . Для простоты предположим, что спектр значений Q является простым и невырожденным. Пред'измеряемое состояния S в момент времени t_1 можно представить в виде: $a_1\Phi_{q_1} + a_2\Phi_{q_2}$, где Φ_{q_1} и Φ_{q_2} – собственные вектора Q , принадлежащие собственным значениям q_1 и q_2 ; a_1, a_2 – комплексные числа, удовлетворяющие условию $|\alpha_1|^2 + |\alpha_2|^2 = 1$. Если предположить, что измерение уже выполнено с результатом q_2 , то, следуя квантовой механике, в пост'измеряемый момент времени t_2 состояние S будет описываться вектором Φ_{q_2} .

Пусть O – наблюдатель, осуществляющий измерение. Описанную последовательность действий наблюдателя O можно представить так:

$$\underbrace{a_1\Phi_{q_1} + a_2\Phi_{q_2}}_{t_1} \Rightarrow \underbrace{\Phi_{q_2}}_{t_2}. \quad (1)$$

Теперь рассмотрим как второй наблюдатель O' может описать эту процедуру, но уже над

³⁾ см. ([8], [9]); для анализа значимости этого факта и о статусе сверхсветовой причинности в квантовой механике см.[11].

составной системой $O + S$. Обозначим через ψ_{init} пред'измеряемое состояние $O + S$ для O' (состояние системы S в среде O), а через ψ_{q_1} и ψ_{q_2} , соответственно, собственные вектора наблюдаемой, а именно состояний, которые соответствуют Q -измерению результатов q_1 и q_2 . Пред'измеряемое состояние системы $O + S$ в момент t_1 , представляется прямым произведением $\mathcal{H}_O \otimes \mathcal{H}_S$ гильбертовых пространств \mathcal{H}_O и \mathcal{H}_S , связанным с O и S , соответственно, и выражается как⁴⁾

$$\psi_{init} \otimes (\alpha_1 \Phi_{q_1} + \alpha_2 \Phi_{q_2}); \quad (2)$$

если O' не производит измерений, то для момента времени $t < t_2$ получаем⁵⁾

$$\tilde{\alpha}_1 \psi_{q_1} \otimes \Phi_{q_1} + \tilde{\alpha}_2 \psi_{q_2} \otimes \Phi_{q_2}. \quad (3)$$

Тогда процесс измерения O над S наблюдателем O' описывается последовательностью:

$$\underbrace{\psi_{init} \otimes (\alpha_1 \Phi_{q_1} + \alpha_2 \Phi_{q_2})}_{t_1} \Rightarrow \underbrace{\tilde{\alpha}_1 \psi_{q_1} \otimes \Phi_{q_1} + \tilde{\alpha}_2 \psi_{q_2} \otimes \Phi_{q_2}}_{t < t_2}. \quad (4)$$

До сих пор можно только утверждать, что состояние S и состояние O каким-то образом коррелируют. Но предположим теперь, что O' в момент $t_3 > t_2$ выполняет измерение Q над S . Поскольку мы имеем дело с двумя различными наблюдателями O и O' , естественно задаться вопросом: какое условие непротиворечивости необходимо предложить, чтобы описания разных наблюдателей O и O' могли бы представить общий измерительный процесс?

В данной ситуации таким условием может быть следующее: если S в момент t находится в собственном состоянии Φ_q наблюдаемой Q относительно O , то наблюдатель O' , который измеряет Q на S при $t' > t$ (без промежуточных измерений между t и t' наблюдаемых несовместных с Q) найдёт собственное значение, принадлежащее ψ_q . Поэтому S будет находиться также в состоянии ψ_q относительно O' (позже мы вернёмся к общему виду предполагаемого условия для такой последовательности). Поэтому состояние $S + O$ в момент $t_3 > t_2$ по отношению к O' будет описываться вектором $\psi_{q_2} \otimes \Phi_{q_2}$, поскольку на момент t_2 состояние S относительно O было уже редуцировано до Φ_{q_2} .

Если сравнить (1) и (4), можно увидеть, что O и O' дадут разные результаты для одной и той же последовательности событий вышеприведённого измерения: на момент времени t_2 атрибуты состояния S для O описываются Φ_{q_2} , а для O' , как для наблюдателя подсистемы $S + O$, атрибуты S будут описываться вектором $\alpha_1 \Phi_{q_1} + \alpha_2 \Phi_{q_2}$, — просто O' ещё не производил измерения.

Наиболее общее предложение реляционной интерпретации квантовой механики может быть сформулировано следующим образом: существуют различные способы, с помощью которых даже простой квантово-механический процесс измерения, может быть описан с помощью разных наблюдателей, Утверждается, что этот реляционный аспект не просто эпизод, а есть фундаментальное свойство квантовой механики. В дополнение к этому, реляционная интерпретация даёт ещё два дополнительных предположения, касающиеся универсальности и полноты квантовой механики.

1. Все физические системы эквивалентны.

Не существует специальных предположений относительно систем, которые могут выступать в качестве наблюдающих, за исключением того, что должны соблюдаться законы квантовой механики: быть наблюдающей — это не закреплённое раз и навсегда свойство привилегированных систем, постоянно идентифицируемых как системы наблюдения и чётко

⁴⁾ Операцию прямого произведения, обозначаемую символом \otimes , необходимо понимать как выбор всех пар из множителей, стоящих по обе стороны от обозначенной этим символом операции (то есть, установить бинарное отношение). *Прим. редактора*

⁵⁾ Поскольку логически (3) невыводимо, к его "правдоподобности" можно интуитивно прийти следующим образом. Как и в предыдущем случае, пред'измеряемое состояние S в момент времени $t < t_2$ с точки зрения наблюдателя O' можно представить в виде: $\beta_1 \psi_{q_1} + \beta_2 \psi_{q_2}$, где ψ_{q_1} и ψ_{q_2} — собственные вектора Q , принадлежащие собственным значениям q_1 и q_2 ; β_1, β_2 — комплексные числа, удовлетворяющие условию $|\beta_1|^2 + |\beta_2|^2 = 1$. Тогда состояние системы S можно выразить соотношением $(\alpha_1 \Phi_{q_1} + \alpha_2 \Phi_{q_2}) \otimes (\beta_1 \psi_{q_1} + \beta_2 \psi_{q_2}) = \alpha_1 \Phi_{q_1} \otimes \beta_1 \psi_{q_1} + \alpha_2 \Phi_{q_2} \otimes \beta_2 \psi_{q_2} = \tilde{\alpha}_1 \psi_{q_1} \otimes \Phi_{q_1} + \tilde{\alpha}_2 \psi_{q_2} \otimes \Phi_{q_2}$. Связь между Φ_{q_i} и ψ_{q_j} такова, что $\Phi_{q_i} \otimes \psi_{q_j} = \emptyset$ при $i \neq j$. *Прим. редактора*

отделяемых от остальных физических систем ([14], стр. 1644). Не предполагается также и то, что системы наблюдения являются разумными сущностями.

2. Реляционная квантовая механика является полной физической теорией.

Общей причиной, которая заставит нас различать наблюдателей, может стать различное описание процессов наблюдения, что, однако, не означает фундаментальной неполноты квантовой механики, а является просто следствием реляционного метапредположения, согласно которому не существует абсолютной внешней точки зрения, с помощью которой мы могли бы оценить состояние физической системы и собственные значения этих состояний с точки зрения *как оно есть на самом деле*. "Квантовая механика должна рассматриваться поэтому в качестве теории о состояниях систем и значений физических величин относительно других систем... Если независимое от наблюдателя описание мира не физично, то полное описание мира исчерпывается только соответствующей информацией всех систем друг о друге." ([14], стр. 1650).

Может возникнуть соблазн описать приведённую выше ситуацию просто говоря, что разница между O и O' состоит в том, что O знает состояние S в момент t_2 , а O' не знает и именно по той причине, что O' -атрибуты системы S находятся в суперпозиции, то есть в информационно "неполном" состоянии. Некорректность этой позицией заключается в том, что неявно предполагается существование "абсолютной" точки зрения на состояния физических систем. Реляционная интерпретация призывает отбросить именно эту точку зрения как несостоятельную.

Кроме того, на основании приведённых рассуждений уместно провести общее различие между *описанием* и *наблюдением* системы S наблюдателем O :

в первом случае, "описание" S не предполагает никакого воздействия на систему S со стороны наблюдателя, хотя, очевидно, *когда O описывает S* , то и в этом случае будет присутствовать некоторое предварительное взаимодействие между S и другими системами;

во втором случае, мы можем сказать, что O "наблюдает" S , когда фактически измеряются соответствующие физические величины S . Очевидно, что в этом случае происходит взаимодействие между S и O и происходит именно тогда, когда наблюдатель O "получает" результаты наблюдения от S .

Если вернуться к нашему конкретному примеру, мы могли бы рассматривать "описание" S , которое может дать O' *при заданном t* в терминах корреляционных свойств системы $O + S$ как максимальный объём информации для процедуры измерения, включающим информацию и об S , и об O , которая доступна O' в отсутствие взаимодействия *в момент t* между O' и составной системой $O + S$.

Уточним последовательность событий (4). Предполагалось, что O' не выполняет измерения во временном интервале $[t_1, t_2]$ и поэтому "описать" им состояние S на момент t_2 можно только через некоторую наблюдаемую $C_{(O,S)}$ (определённую на $\mathcal{H}_S \otimes \mathcal{H}_O$), которая позволяет отразить корректность записи наблюдателем O результатов измерения над S . Собственными значениями $C_{(O,S)}$ могут быть только 1 и 0. Для состояний $\psi_{q_1} \otimes \Phi_{q_1}, \psi_{q_2} \otimes \Phi_{q_2}$, возвращается собственное значение 1, что означает корректность записи, тогда как для состояний $\psi_{q_1} \otimes \Phi_{q_2}, \psi_{q_2} \otimes \Phi_{q_1}$, возвращается 0, означает некорректность, а именно:

$$\begin{aligned} C_{(O,S)}\psi_{q_1} \otimes \Phi_{q_1} &= \psi_{q_1} \otimes \Phi_{q_1}, & C_{(O,S)}\psi_{q_1} \otimes \Phi_{q_2} &= 0 \\ C_{(O,S)}\psi_{q_2} \otimes \Phi_{q_2} &= \psi_{q_2} \otimes \Phi_{q_2}, & C_{(O,S)}\psi_{q_2} \otimes \Phi_{q_1} &= 0 \end{aligned}$$

На основании вышеизложенных рассуждений и, что касается отношения между различными описаниями одного и того же события для различных наблюдателей, последовательность требований, которые мы упоминали ранее, выглядит довольно естественно: это может быть выражено как требование, заключающееся в том, что, если единственной информацией, доступной O' , является то, что измерено Q на S , но результат неизвестен, то результатом O' будет являться выполнение $C_{(O,S)}$ -измерения, а Q -измерение должно быть коррелировано ([14], pp. 1650-2).

3. Реляционный анализ ЭПР-альтернативы

Идеальным местом для того, чтобы наглядно увидеть как реляционный подход может изменить взгляд на понятие "абсолютного" квантовомеханического состояния является та система наблюдения, в которой обычно рассматривается ЭПР-альтернатива ([7], [2]).

Физические системы, общие для всех вариантов ЭПР-альтернативы предполагают обсуждение двухчастичных систем, чьи подсистемы взаимодействуют в течение короткого времени и затем разделяются. Оригинальная постановка ЭПР-эксперимента рассматривает пары величин для каждой частицы таких, что эти величины для каждой частицы являются взаимно несовместимыми. Мы будем рассматривать аргументацию обычной нерелятивистской версии, сформулированной для эксперимента со спиновой корреляцией в упрощённом виде, имеющим дело только с одной величиной для каждой частицы ([13]).

Некоторые предложения, представленные ниже, слегка изменены по сравнению с распространёнными формулировками, но это есть только несущественное перефразирование:

1. Реальность

Если при отсутствии взаимодействия с физической системой S можно достоверно предсказать результат q измерения величины Q , выполненного в момент t на S , тогда и в момент t' , следующим сразу за t , существует то же свойство, ассоциированное с q , обозначаемое $[q]$, которое является *объективным* свойством S .

2. Полнота

Любая физическая теория T , описывающая физическую систему S имеет дело с объективными свойствами S .

3. Локальность

Необъективность свойств у физической системы S в состоянии s может быть вызвана влиянием измерений, выполняемых на расстоянии другой физической системой.

4. Адекватность

Статистические предсказания квантовой механики верны.

Одно замечание к формулировке условия Реальности. Вполне ожидаемо, что понятие объективного свойства $[q]$ системы S эквивалентно суждению о системе S , имеющей характеристики $[q]$, независимо от того, измеряется Q на S или нет. На самом деле, S может иметь и "необъективные характеристики" обусловленные, например, корреляционными процессами: некоторые значения величины, например R , измеряемые на S , могут коррелироваться возможными значениями параметров, касающихся измеряемой аппаратуры, которые по предположению относятся к измерению R на S . Очевидно, что нельзя утверждать независимость измерений Q от присутствия подобных факторов (в той или иной мере реальных).

Рассматриваемая экспериментальная ситуация, часто называемая ЭПР-корреляционным экспериментом по версии Боба, включает рассмотрение системы $S_1 + S_2$ из двух частиц в синглетном состоянии со спинами $1/2$, приготовленных одним источником. Если сосредоточиться на спиновой части поведения частиц, то вектор состояния системы $S_1 + S_2$ в направлении оси x можно представить в виде⁶⁾

$$\frac{1}{\sqrt{2}} [\Phi_{1,x}(+) \otimes \Phi_{2,x}(-) - \Phi_{1,x}(-) \otimes \Phi_{2,x}(+)], \quad (5)$$

где

- $\Phi_{i,x}(\pm)$ – собственный вектор оператора $\sigma_{i,x}$, представляющий спин "вверх" или "вниз" вдоль направления x для частицы $i = 1, 2$;
- $\Phi_{1,x}(+) \otimes \Phi_{2,x}(-)$ и $\Phi_{1,x}(-) \otimes \Phi_{2,x}(+)$ – вектора, принадлежащие прямому произведению $\mathcal{H}_1 \otimes \mathcal{H}_2$ гильбертовых пространств \mathcal{H}_1 и \mathcal{H}_2 , связанных с подсистемами S_1 и S_2 .

⁶⁾ представление в спиновом 4-пространстве векторов состояний - пространстве, полученным из прямого произведения спиновых 2-пространств двух частиц. В (5) сохранена определённость индивидуальности частиц и если относительно наблюдателя одна частица имеет состояние "+", то другая однозначно имеет состояние "-". Однако в результате самой операции (анти)симметризации индивидуальность частиц исчезает. Фактически (5) представляет собой описание целостного 4-объекта, как спутанной суперпозиции 2-состояний двух частиц. *Прим. редактора*

Предполагается, что S_1 и S_2 разлетаются в противоположных направлениях. Измерения спинов должны выполняться в достаточно разделённых пространственно-временных областях R_1 и R_2 , соответственно. Из (5) и принципа Адекватности следует, что если при измерении спина частицы S_1 , мы находим ориентацию спина "вверх" вдоль направления x , то вероятность найти спин "вниз" этого же направления x для частицы S_2 равна 1. В этом случае обычно говорят, что S_1 и S_2 строго антикоррелируют.

Предположим теперь, что при измерении $\sigma_{1,z}$ для направления z в момент времени t_1 получено значение -1 . Принцип Адекватности позволяет (через антикоррелированность) предсказать с вероятностью единица результат измерения $\sigma_{2,z}$ в момент времени t_2 сразу после момента t_1 , а именно: $+1$. Затем, согласно принципу Реальности, заключаем, что существует объективное свойство $[+1]$ у системы S_2 в момент времени t_2 . Согласно принципу Локальности, объективным свойством $[+1]$ система S_2 обладала и в момент времени $t_0 < t_1$, поскольку в противном случае оно было бы "сотворено" мгновенно в момент измерения спина системы S_1 .

Однако в момент времени t_0 состояние S_2 являлось *смесью*, а именно: $\frac{1}{2}[P_{\phi_{2,x}}(+)+P_{\phi_{2,x}}(-)]$, поскольку *запутанное* состояние (5) хотя и представляется как комбинация *чистых* состояний системы $S_1 + S_2$, состояние S_2 , однозначно определяется как смесь состояний подсистем S_1 и S_2 ⁷⁾. Таким образом S_2 удовлетворяет свойству объективности в состоянии, отличном от собственного состояния $\sigma_{2,z}$. Однако всё, что квантовая механика может предсказывать – это удовлетворение свойств, таких как $[+1]$ только в собственных состояниях $\sigma_{2,z}$. Тогда получается, что квантовая механика оказывается неполной, поскольку существуют объективные свойства, которые доказуемо удовлетворяются системой, описываемой квантовой механикой, но не могут быть описаны в квантово-механических терминах. С точки зрения строгой логики этот вывод можно сформулировать словами: сочетание приведённых принципов Реальности, Полноты, Локальности и Адекватности приводит к противоречию.

В рамках обычной квантовой механики принципы Реальности и Адекватности не могут вызывать сомнений: в то время как принцип Адекватности просто-напросто предполагает, что вероятностные высказывания квантовой механики надёжны, без принципа Реальности описание квантовой системы не могло бы удовлетворить объективным свойствам, даже такому как иметь определённое значение данной величине, подлежащей измерению, когда система уже приготовлена в собственном состоянии и имеет в качестве характеристики это собственное значение⁸⁾. В этом случае альтернатива выбора сводится к выбору между Полнотой и Локальностью: предполагая Полноту, мы направляем ЭПР-обсуждение в сторону обсуждения (не) Локальности. Релятивистская формулировка этого аргумента может быть представлена так: хотя другая геометрия пространства-времени и должна быть принята во внимание, однако единственным обобщением может быть адаптация условия Локальности в том, что объективные свойства физических систем не могут испытывать влияние измерений, проводимых в других физических системах, в областях разделённых пространственноподобными интервалами^[8].

Обратимся теперь к реляционному анализу. В реляционном подходе к разрешению ЭПР-альтернативы, мы должны изменить соответственно его основные принципы (принцип Адекватности очевиден), в основном релятивизируя объективность свойств, получаемых наблюдателями. В новой версии это могло бы выглядеть следующим образом:

1'. Реальность *

Если наблюдатель O , не взаимодействуя с физической системой S , может предсказать с определённостью (или, по крайней мере, с вероятностью) в момент времени t значение q физической величины Q измеряемой на S в состоянии s , то в момент времени t' , немедленно следующим за t , q соответствует свойству S и является объективным по отношению к O .

⁷⁾ Изначально, согласно условию, система описывается как целостный объект пары частиц вектором спинового 4-пространства (5). При этом S_2 находится в среде S_1 , а описание её состояния как отдельной частицы, может рассматриваться как "вектор", представляющий собой "2-проекцию" 4-вектора (5), что, однако, должно быть описано как *смесь* в терминах матрицы плотности спинового 2-пространства; именно поэтому слова "вектор" и "проекция" взяты в кавычки *Прим. редактора*

⁸⁾ Четкое обсуждение объективных и необъективных свойств в квантовой механике см., например, в [3].

2'. Полнота *

В любой физической теории T , описывающей физическую систему S , предполагается, что каждое свойство S объективно относительно какого-либо наблюдателя.

3'. R – Локальность *

На свойства физической системы S , которые являются объективными относительно какого-либо наблюдателя, не могут влиять измерения, проводимые в области, отделённой пространственноподобным интервалом другой физической системы.

При сформулированной объективности в слабом смысле, определение Полноты* – это чуть больше, чем просто перефразирование, поскольку R-Локальность* не гарантирует того, что необъективное свойство (в слабом смысле относительно данного наблюдателя) может быть обращено в объективное (также в слабом смысле) просто посредством операций, выполняемых в пространственноподобной области. На данном этапе ЭПР-обсуждения принимается уже релятивистский вариант условия Локальности*.

Итак, в реляционную версию ЭПР введены уточнённые условия. **Но являются ли они достаточными, чтобы получить тот же вывод, что и при изначальной аргументации?**

Нас интересуют состояния систем S_1, S_2 и значения спинов в этих состояниях, когда S_1 и S_2 , изначально провзаимодействовав в течение короткого времени и разлетевшись в противоположных направлениях, локализовались в областях R_1 и R_2 , разделённых пространственноподобными интервалами. Согласно же реляционной интерпретации, ссылки на состояние физической системы имеют смысл только относительно некоторого наблюдателя.

Пусть O_1 и O_2 наблюдают за системами S_1 и S_2 . Наблюдатели, находясь в области взаимодействия частиц, то есть в общей пространственно-временной области источника частиц, затем оказываются во взаимно изолированных областях. Таким образом, в начальный момент времени t_0 , частицы с точек зрения O_1 и O_2 находились в состоянии согласно (5), но покинув источник, S_1 и S_2 частицы становятся затем объектами наблюдений из взаимно изолированных пространственно-временных областей.

Теперь предположим, что для данного направления оси z наблюдатель O_1 измеряет $\sigma_{1,z}$ частицы S_1 в момент времени $t_1 > t_0$ и получает -1 . Строгая антикоррелированность спинов в состоянии (5) позволяет O_1 предсказать с полной определённости без взаимодействия значение спина для O_2 . Именно принцип Адекватности позволяет O_1 предсказать с вероятностью равной единице значение $\sigma_{2,z}$ для S_2 в любой момент времени t_2 немедленно после t_1 , а именно: $+1$.

Согласно принципу Реальности*, существует свойство $[+1]$ частицы S_2 , которое объективно *относительно* O_1 в момент t_2 . Согласно же принципу R-локальности*, объективное свойство S_2 относительно O_1 существовало также в моменты времени $t_0 < t_1$, поскольку в противном случае оно должно "возникнуть" в акте выполнения спинового измерения частицы S_1 , то есть в области, отделённой пространственноподобным интервалом.

Таким образом, наблюдатель O_1 , вернувшись к моменту времени t_0 "обнаружил" объективное свойство $[+1]$ или, что то же самое *чистое* состоянию $\Phi_{2,z}(+)$. Нереляционная же аргументация говорит, указывая, что при t_0 состояние S_2 , как это определено (5) было смесью $\frac{1}{2}(P_{\Phi_{2,z}(+)} + P_{\Phi_{2,z}(-)})$. Поскольку состояние такого типа не может отразить свойство подобное $[+1]$, следует вывод о неполноте квантовой механике.

С реляционной точки зрения, однако, такого вывода *не* следует. На самом деле, мы сравниваем два состояния по отношению к *различным* наблюдателям. Поскольку области измерений R_1 и R_2 пространственно разделены, оставаясь пространственноподобными каждая, в них могут существовать *системы отсчёта*, в которых последовательности измерений во времени, выполняемые O_1 и O_2 , могут меняться на обратные, как событий, связанных времениподобным интервалом.

Предположим, что O_1 выполняет измерение спина S_1 вдоль направления z в момент времени t_1 и получает значение -1 . Тогда в момент времени t_2 немедленно после t_1 , S_1 переходит в состояние $\Phi_{1,z}(-)$ относительно O_1 , а S_2 получает атрибуты чистого состояния $\Phi_{2,z}(+)$, соответствующие значению спина $+1$.

Таким образом, свойство [+1] для S_2 является объективным по отношению к O_1 . Следовательно, согласно R-Локальности*, можно утверждать, что и при $t_0 < t_1$, система S_2 находится в состоянии $\Phi_{2,z}(+)$ и обладает свойством [+1]. Однако в этом случае следует вывод о неполноте, поскольку в этот момент состоянием S_2 является смесь. Поскольку же в момент времени t_0 наблюдатель O_2 ещё не выполнил измерение спина он еще может считать атрибутами S_1 и S_2 только состояния смесей $\frac{1}{2}(P_{\Phi_{1,x}(+)} + P_{\Phi_{1,x}(-)})$ и $\frac{1}{2}(P_{\Phi_{2,x}(+)} + P_{\Phi_{2,x}(-)})$, соответственно, и нет оснований для решения – какой наблюдатель прав. Пока O_2 не выполнит измерения, он может описывать измерение O_1 просто как установление связи между O_1 и S_1 .

При выводе возникает вопрос: *когда наблюдатель сможет утверждать посредством выбора ЭПР-альтернативы, что квантовая механика либо неполна, либо нелокальна?* Ответ имеется и он находится в рамках реляционной зависимости.

Обозначим через $M_O^t(\sigma, S, \rho, R)$ событие, заключающееся в том, что наблюдатель O выполняет в момент времени t измерение физической величины σ над системой S в состоянии ρ в области R . Если положить

$$M_R := M_{O_1}^{t_R}(\sigma_{1,x}, S_1, \frac{1}{2}(P_{\Phi_{1,x}(+)} + P_{\Phi_{1,x}(-)}), R_1),$$

$$M_L := M_{O_2}^{t_L}(\sigma_{2,x}, S_2, \frac{1}{2}(P_{\Phi_{2,x}(+)} + P_{\Phi_{2,x}(-)}), R_2),$$

возможны три ситуации:

- (а) M_R предшествует M_L ;
- (б) M_R следует за M_L ;
- (с) M_R и M_L являются одновременными.

В случае (а) ЭПР-альтернатива работает для O_1 , но не для O_2 , а именно: квантовая механика либо неполна, либо нелокальна относительно O_1 но не относительно O_2 . Ситуация (б) – обратная к случаю (а). Наконец, в случае (с) ЭПР-альтернатива ничего не подразумевает, кроме зависимости "исход-исход", построенной на корреляционных свойствах запутанных состояний ЭПР [15]. Однако пока O_1 и O_2 не взаимодействуют, они не могут сравнивать атрибуты своих состояний, так что до взаимодействия каждый наблюдатель может претендовать на заключение о неполноте или нелокальности квантовой механики только по отношению к самому себе.

4. Заключение

Как отмечалось выше, незавершённость ЭПР-аргументации для обычной квантовой механики превращается в аргумент нелокальности, что угрожает взаимной совместимости на фундаментальном уровне квантовой теории и теории относительности. Наше рассмотрение показало, что на самом деле нелокальность не настолько фундаментальна для конфликта, а сам конфликт не настолько глубок как кажется. Фактически, возможно "мирное сосуществование" между двумя теориями, поскольку локальность в квантовой механике могла бы быть восстановлена на статистическом уровне и в любом случае, что аргументировано⁹⁾ – нелокальные корреляции являясь неконтролируемыми, что в принципе может разрушить сверхсветовую передачу данных.

Такой взгляд, однако, имеет ряд недостатков. Первый, прежде всего, заключается в том, что он основан на весьма спорных понятиях, таких как "контролируемость" или "неконтролируемость" информации: неопределённость установления того факта, когда "возмущение" становится точно битом информации, запрещение теорией относительности сверхсветового обмена информацией, сверхсветовое распространение возмущений и подобные тонкости. С другой стороны, та самая неприменимость обычной ЭПР-аргументации в реляционной квантовой механике упреждает такого рода противоречия и придаёт новый смысл для интерпретации тезиса "мирного сосуществования". Просто кроме реляционной интерпретации нет других убедительных аргументов перед выбором между полнотой и локальностью в разрешении ЭПР-альтернативы, что могло бы быть достигнуто независимостью от систем

⁹⁾ См., например, [6], [10] и [15]. Противоположные взгляды, можно увидеть в [5] и [12].

наблюдения. Зависимость от наблюдателя, которая влияет на разрешение ЭПР-альтернативы при реляционном подходе к квантовой механике также может подразумевать свой подход к проблеме *скрытых переменных*. Рассмотрение же большинства скрытых переменных преследует по сути две цели:

- ☞ во-первых, на основе ЭПР-аргументации делается вывод о неполноте квантовой механики в качестве отправной точки;
- ☞ во-вторых, вводится гипотеза о полном наборе состояний по классическому образцу, усреднение по которому даёт возможность к предсказаниям, которые должны согласовываться с квантовомеханическим описанием (см., например, ^{[4], [13]}).

Реляционный подход к квантовой механике при введении условий Реальности *, Полноты *, R – локальности * и Адекватности ведёт не к столкновению одной системы наблюдения с другой, а к попытке показать, что завершение квантовой механики введением скрытых переменных оказывается немотивированной с реляционной точки зрения, так же как и при рассмотрении любых других аргументов нелокальности в качестве предпосылок. Более того, гипотетическая полнота состояний скрытых переменных теории задумана как обеспечение наблюдательной независимости так, чтобы абсолютное представление состояний физической системы было восстановлено, пусть даже и на уровне скрытых переменных.

Изучению вопроса о том – представляет ли распространение статистических корреляций через области, разделённые пространственноподобными интервалами, угрозу для "мирного сосуществования" квантовой механики и теории относительности уделяется всё большее и большее внимание, включая и алгебраические методы квантовой теории поля (AQFT). Подходящая форма неравенства Белла – неравенства, которое в различных формулировках было тщательно изучено в связи с проблемой нелокальности в нерелятивистской механике^[1] – показала также его нарушение и в AQFT (см., например, ^[18] и ^[17]). Появляются вопросы о том, может ли быть продвинута реляционная интерпретация квантовой механики и что можно было бы сказать о нарушении неравенств Белла в AQFT. Эти вопросы заслуживают изучения по нескольким причинам:

- ☞ во-первых, представление абсолютных квантовых состояний в AQFT в принципе исключается. В основе алгебраической квантовой теории поля локальные алгебры аксиоматически связаны со специфическими областями (открытыми, связными) пространства-времени Минковского: элементы алгебры представляются как наблюдаемые, которые могут быть измерены в той области пространства-времени, которая связана с алгеброй. Состояния, представлены как удобные ожидаемые функционалы на данной алгебре, кодирующие статистики всех возможных измерений наблюдаемых в алгебре наследуются и определяются не глобально, а применительно к конкретной области пространства-времени;
- ☞ во-вторых, вывод соответствующих неравенств Белла и анализ нарушения относятся не к неуказанным скрытым переменным, не к необходимости их введения;
- ☞ наконец, локальность, которая нарушает подходящее неравенство Белла, могла бы вызвать сомнение непосредственно на почве релятивистских ограничений и это не есть гипотетическое условие, удовлетворяемое только скрытыми переменными, введёнными сверх теории по сути нелокальной, такой как обычная квантовая механика.

Благодарности

Я глубоко благодарен Карло Ровелли за интересную переписку при подготовке более ранней версии этого документа. Его пронизательные замечания существенно помогли мне уточнить ряд существенных моментов, хотя, конечно, ответственность за аргументы, представленные здесь, лежит на мне. Эта работа была завершена во время посещений кафедры истории и философии науки им. Этвеша в Будапеште. Я хотел бы поблагодарить, в частности, Miklós Rédei и László Szabó за их поддержку и гостеприимство. Работа выполнена при поддержке NATO CNR Outreach Fellowship.

Ссылки

- [1] Bell J.S., *Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics*, Cambridge University Press, Cambridge 1987.
- [2] Bohm D., *Quantum Theory*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs 1951.
- [3] Busch P., Lahti P., Mittelstaedt P., *The Quantum Theory of Measurement*, Springer, Berlin 1991.
- [4] Clauser J., Shimony A., 'Bell's Theorem: Experimental Tests and Implications', *Reports on Progress in Physics* 41 (1978), pp. 1881-1927.
- [5] Clifton R.K., Jones M., 'Against Experimental Metaphysics', in P. French, T. Uehling, H. Wettstein (eds.), *Midwest Studies in Philosophy*, vol. 18, Notre Dame, University of Notre Dame Press (1993), pp. 295-316.
- [6] Eberhard P., 'Bell's Theorem and the Different Concepts of Locality', *Nuovo Cimento* 46B (1978), pp. 392-419.
- [7] Einstein A., Podolsky B., Rosen N., 'Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?', *Physical Review* 47 (1935), pp. 777-780.
- [8] Ghirardi G.C., Grassi R., 'Outcome Predictions and Property Attribution: the EPR Argument Reconsidered', *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 25 (1994), pp. 397-423.
- [9] Ghirardi G.C., 'Properties and Events in a Relativistic Context: Revisiting the Dynamical Reduction Program', *Foundations of Physics Letters* 9 (1996), pp. 313-355.
- [10] Ghirardi G.C., Rimini A., Weber T., 'A General Argument against Superluminal Transmission through the Quantum Mechanical Measurement Process', *Lettere al Nuovo Cimento* 27 (1980), pp. 293-298.
- [11] Laudisa F., 'A Note on Nonlocality, Causation and Lorentz Invariance', *Philosophy of Science* 66 (Proceedings) (1999), pp. S72-S81.
- [12] Muller F.A., 'The Locality Scandal of Quantum Mechanics', in M.L. Dalla Chiara, R. Giuntini, F. Laudisa (eds.), *Language, Quantum, Music*, Dordrecht, Kluwer (1999), pp. 241-248.
- [13] Redhead M., *Incompleteness, Nonlocality and Realism*, Oxford, Clarendon Press (1987).
- [14] Rovelli C., 'Relational Quantum Mechanics', *International Journal of Theoretical Physics* 35 (1996), pp. 1637-1678.
- [15] Shimony A., 'Controllable and Uncontrollable Non-Locality', in S. Kamefuchi et al. (eds.), *Proceedings of the International Physical Society of Japan, Tokyo* (1983), pp. 225-230.
- [16] Shimony A., 'Events and Processes in the Quantum World', in R. Penrose, C. Isham (eds.), *Quantum Concepts in Space and Time*, Oxford, Oxford University Press 1986, pp. 182-203.
- [17] Summers S.J., 'Bell's Inequalities and Algebraic Structure', in S. Doplicher, R. Longo, J.E. Roberts, L. Zsidó (eds.), *Operator Algebras and Quantum Field Theory*, International Press, Cambridge (MA.), 1997.
- [18] Summers S.J., Werner R., 'Bell's Inequalities and Quantum Field Theory. I. General Setting', *Journal of Mathematical Physics* 28 (1987), pp. 2440-2447.

Исходный текст

[19] Federico Laudisa.

arXiv:quant-ph/0011016v1 3 Nov 2000. *The EPR Argument in a Relational Interpretation of Quantum Mechanics* Federico Laudisa. Department of Philosophy, University of Florence, Via Bolognese 52, 50139 Florence, Italy
<https://www.dropbox.com/s/efs1ekkie4rxqko/Laudisa.pdf?dl=0>

Дополнительная литература

- 1. Джон Х. Конвей и Симон Кохен. *sFWT-теорема (сильный вариант)*. Cohen-Rus.pdf
- 2. Bi-Heng Liu, Xiao-Min Hu, Jiang-Shan Chen, Yun-Feng Huang, Yong-Jian Han, Chuan-Feng Li, Guang-Can Guo and | d'an abello. *Экспериментальная проверка FWT-теоремы*. Heng.pdf
- 3. Бас ван Фраассен. *Мир Ровелли*. RovelliWorld-Rus.pdf
- Касимов ВА.
- 4. *Некоторые топологические парадоксы СТО (ЭПР)*. Polarization.pdf
- 5. *Некоторые топологические парадоксы СТО (ЭПР) - II*. EPR3.pdf
- 6. Ещё раз о квантовой "спутанности". EPR2.pdf

Дополнение по результатам on-line обсуждения

1. В формуле (3) у автора и у вас в примечании 5) для одного и того же объекта вводятся разные волновые функции. Но объект-то один! В чём "сермяжный" смысл этого?

Состояние квантовой системы описывается лучом гильбертова пространства. Приведение лучей к одинаковой "длине" (нормировка) позволяет сократить неопределённость описания с точностью до множителя по модулю 1. Однако комплексность этого множителя оставляет фазовую неопределённость вектора состояния. И дело именно в фазе этого вектора. Поскольку наблюдатели разные и независимые, их фазовые множители ничем не регламентируются. В целом волновые функции будут отличаться. Кстати, фазовые множители двух и более объектов отвечают за когерентность и декогерентность этих объектов. Когерентность — базовое понятие в описании феномена спутанности

2. А можно неформально и более физично об операторе $C_{(O,S)}$ на стр. 4?

Оператор $C_{(O,S)}$, определяемый на тензорном произведении гильбертовых пространств первого и второго наблюдателей, представляет наблюдаемую, описывающую корреляционное воздействие измерения первым наблюдателем на результаты измерения вторым, причём собственный вектор с собственным значением 1 описывает полную корреляцию между результатами измерений первым и вторым наблюдателями, а собственный вектор с собственным значением 0 — отсутствие корреляции между результатами измерений.

Кстати, Вы можете задавать вопросы непосредственно прямо автору на сайте academia.edu. Он охотно вступает в диалог.

3. Суперпозиция (5) представляет собой вектор чистого квантового состояния. Однако далее рассматривается смесь состояний, которая не представима в виде векторов. В чем дело?

Суперпозиция (5) описывает состояние двухчастичной системы как целого в 4- гильбертовом пространстве (по два параметра на каждую частицу). Согласно общим принципам квантовой механики квантовые систем описываются с помощью векторов гильбертова пространства. Именно это состояние и описывается суперпозицией (5).

Состояние частицы как отдельного объекта также можно описать в 2-пространстве (спин "вверх", спин "вниз"). Однако описать пару частиц уже нельзя в виде суперпозиции наподобие (5). И здесь говорят о смешанных состояниях, поскольку каждая частица находится в среде другой. "Смесь" и "суперпозиция" - разные понятия по своей сути. "Суперпозиция" превращается в "смесь" при уменьшении размерности гильбертова пространства. Подробнее см. примечание б) на стр. 5 или ещё подробнее в работе *)

Коротко: каждая из частиц находится в среде другой. И в этом случае уже нельзя описать каждую частицу с помощью векторов состояния, поэтому и представить её состояние системы в виде суперпозиции. Однако состояние двухчастичной системы можно представить в виде "смеси" частиц или их состояний, в которой состояния смешиваются между частицами.

*) Ещё раз о квантовой "спутанности".

<https://www.dropbox.com/s/jfd0fv155q4bqj7/EPR2.pdf?dl=0>

<https://cloud.mail.ru/public/75DU/9mmhxivqL>

<https://www.academia.edu/32427335/>

4. Правильно ли я понял логическое противоречие?

С одной стороны, после измерения первой частицы и, получив значение спина "вверх", согласно антикоррелированности частиц, делаем заключение о том, что спин второй частицы имеет направление "вниз", то есть вторая частица находится в чистом и определённом состоянии с известным квантовым числом.

С другой стороны, изначально эта частица находилась в смешанном состоянии с неопределённой спиновой наблюдаемой. Налицо - нарушение принципа Реальности.

Точно так. Только здесь надо расставить акценты на соблюдения и нарушения принципов, перечисленных автором для того, чтобы выйти на ЭПР-альтернативу - "неполнота" или "нелокальность" ... но об этом в тексте.

Здесь же надо отметить, что то, что произошло в двухчастичной системе после измерения первым наблюдателем можно объяснить либо нелокальностью, либо неполнотой квантовой механики.

5. Локальность - достаточно "мутное" понятие, можно как-то попроще?

Приведу и другие - не совсем строгие, но более широкие. Перед этим уточню два момента:

ЭПР-альтернатива: неполнота - нелокальность.

ЭПР-аргументация: эйнштейновское решение альтернативы в пользу неполноты квантовой механики.

Терминология

Локальность — топологическое понятие, обеспечивающее понимание пространственно-временной близости событий.

Полнота — понятие, утверждающее исчерпывающее описание реальности с помощью теории.

Скрытые переменные: Эйнштейн считал необходимым ввод скрытых переменных для разрешения ЭПР-альтернативы в пользу неполноты квантовой механики в её традиционной форме.

6. Какова положительная "роль" от реляционной интерпретации КМ в решении ЭПР-альтернативы по результатам экспериментов А. Аспека, то есть в "примирении" СТО и КМ?

Ответ содержится в конце раздела 3.

Пусть первый наблюдатель измеряет спин прилетевшей частицы. Затем второй наблюдатель делает аналогичное измерение. Наблюдатели, разделённые пространственноподобной областью, находятся в совершенно симметричных условиях. Однако заключения по результатам измерений получаются совершенно противоположными. Поскольку всё это происходит по отношению к какой-либо определённой системе отсчёта, возможно изменение порядка измерений на обратный при выборе другой системы отсчёта так, что порядок в последовательности пары измерений становится не существенным. Остаётся неопределённость в ответе на вопрос — чьё заключение считать истинным?

Обозначим через $M_O^t(\sigma, S, \rho, R)$ событие, заключающееся в том, что наблюдатель O выполняет в момент времени t измерение физической величины σ над системой S в состоянии ρ в области R . Если положить

$$M_R := M_{O_1}^{tR}(\sigma_{1,x}, S_1, \frac{1}{2}(P_{\Phi_{1,x(+)} + P_{\Phi_{1,x(-)}}), R_1)$$

$$M_L := M_{O_2}^{tL}(\sigma_{2,x}, S_2, \frac{1}{2}(P_{\Phi_{2,x(+)} + P_{\Phi_{2,x(-)}}), R_2),$$

возможны три ситуации:

- (a) M_R предшествует M_L ;
- (b) M_R следует за M_L ;
- (c) M_R и M_L являются одновременными.

В случае (a) ЭПР-альтернатива работает для O_1 , но не для O_2 , а именно: квантовая механика либо неполна, либо нелокальна относительно O_1 но не относительно O_2 . Ситуация (б) — обратная к случаю (a). Наконец, в случае (c) ЭПР-альтернатива ничего не подразумевает, кроме зависимости "исход-исход", построенной на корреляционных свойствах запутанных состояний ЭПР ^[15]. Однако пока O_1 и O_2 не взаимодействуют, они не могут сравнивать атрибуты своих состояний, так что до взаимодействия каждый наблюдатель может претендовать на заключение о неполноте или нелокальности квантовой механики только по отношению к самому себе.

В "сухом остатке": реляционная модель "выводи за скобки" вопрос о механизме распространения влияния измерений одного наблюдателя на результаты другого, поскольку сами параметры оказываются несоизмеримыми. Этот тезис значительно усиливается доказательством *sFWT*-теоремы (*) и получает дальнейшее продвижение в результатах (**)

(*) *sFWT*-теорема (сильный вариант).

<https://www.dropbox.com/s/97k57ywxakn85he/Cohen-Rus.pdf?dl=0> <https://cloud.mail.ru/public/9PNA/P3v3QFCsv>
<https://www.academia.edu/32443435/>

(**) Мысленные эксперименты с отложенным выбором и их реализации.

<https://www.dropbox.com/s/3n1udz7hxqgvhz7/Delayed-Rus.pdf?dl=0> <https://cloud.mail.ru/public/BL2d/zXEqr2NpY>
<https://www.academia.edu/32443340/>

7. А в каком направлении?

Поскольку реляционная модель "выводит за скобки" рассмотрение механизма распространения влияния измерений одного наблюдателя на результаты другого, встает неотложный вопрос о причинности. В традиционной парадигме причинности центральную роль играет непрерывность пространственно-временных отношений.

Первое. Традиционный механизм причинности допускает описание целостного процесса с соблюдением "генетического" средства элементов процесса. Как производная этих отношений возникает понятие скорости передачи возмущения или превращения причины в следствие. Как уже было сказано, реляционная интерпретация не касается этих вопросов, тем самым давая шанс помирить квантовую механику с теорией относительности. Однако, *sFWT*-теорема и её экспериментальное подтверждение похоже лишили нас некоторых иллюзий!

Результат работы (*) можно обобщить словами: *отклик квантовой частицы не является функцией влияния ближайшего пространственно-временного окружения*. Это означает, что пространственно-временная непрерывность не может играть роль средства установления генетического средства в установлении пространственно-временной целостности процесса для каких-либо носителей взаимодействия.

Второе. Корпускулярно-волновой дуализм позволяет ввести в рассмотрение переменную с двумя значениями: *волна / частица*. "Носителями" этой информации являются так называемые *синглы*, природа которых неизвестна. Скорость же "распространения" синглов (если можно говорить о распространении в пространственно-временном смысле) физически ничем не регламентируется. Известно, что синглы не могут служить носителями реальной информации и на этот счёт существует ряд запретных теорем. Однако то, что они могут являться некими конструктами для информации вселяет надежду на возможность их технологического применения. Подробности возможных экспериментов изложены в работе (**).

Для связи:

quadrica-m@mail.ru

<http://orcid.org/0000-0002-1435-9220>

Авторский семинар

<http://my.mail.ru/community/physiks.principis/?ref=cat>

<http://quadrica.ucoz.net/>

<https://independent.academia.edu/KasimovVladimir>

<https://vk.com/public128913510>

<https://www.facebook.com/quadrica.m>