

Причинность и нелокальные квантовые корреляции

(Обновлено 08.11.2008)

1. Введение

В настоящее время распространено убеждение, что теория относительности запрещает скорость физического взаимодействия, превышающую скорость света в вакууме. Поскольку из квантовой механики (КМ) следует возможность “мгновенной” корреляции на сколь угодно больших расстояниях (парадокс Эйнштейна-Подольского-Розена), и это многократно подтверждено экспериментами, то КМ оказывается в непреодолимом конфликте с теорией относительности (ТО). Как отметил в 1990 г. Дж. Белл в своем докладе [Bell, 1990] (перевод мой – М.Х.Ш.):

Мы имеем дело со статистическими предсказаниями квантовой механики, и они кажутся верными. Эти корреляции прямо-таки вопиют об объяснении, а мы не можем его дать.

Далее Белл высказывает надежду:

...здесь, как мне кажется, мы имеем временное затруднение. Ему, правда, шестьдесят лет, но в масштабах длительности существования человечества это очень небольшое время. Я думаю, что проблемы и загадки, с которыми мы здесь встречаемся, будут решены, и мы снова сможем смотреть на них с тем же чувством превосходства, или наши потомки будут смотреть на них с тем же чувством превосходства, с которым мы смотрим на людей конца девятнадцатого века, которые волновались по поводу эфира. А опыт Майкельсона-Морли ..., загадки казалась им неразрешимыми. И вот в тысяча девятьсот пятом году пришел Эйнштейн, и теперь каждый школьник изучает это и чувствует ... свое превосходство над этими тогдашними парнями. Сейчас я чувствую, что все эти дела с действием на расстоянии и отсутствием действия на расстоянии разрешатся сходным образом. Кто-то придет с ответом, с подходящей точкой зрения на эти вещи. Если удача нам улыбнется, это станет новым большим шагом типа теории относительности. Может быть, кто-то просто укажет нам на наше недомыслие, и это не приведет к новым прорывам. Но, так или иначе, я верю, что вопрос будет решен.

Литература, содержащая описание, интерпретации и попытки преодоления ЭПР-парадокса, не поддается перечислению (см., например, современный обзор [Gisin, 2005]). И, во всяком случае, очевидно, что логическое решение должно содержать некоторое *фундаментальное* утверждение, касающееся либо ТО, либо КМ, либо их обеих. Ниже предлагается одно из возможных решений, связанных с уточнением концепции причинности в ТО.

2. Стандартная концепция причинности в теории относительности

Без потери общности можно свести современную концепцию релятивистской причинности к утверждению о том, что передача сигнала и энергии со скоростью, большей скорости света в вакууме, невозможна. В свою очередь это утверждение может быть рассмотрено на примере перемещения свободно движущейся частицы с массой покоя m из точки 1 в точку 2. Сразу

переходя к релятивистскому описанию, будем говорить о паре четырехмерных событий 1 и 2, между которыми таким образом устанавливается причинная связь, т.е. имеет место передача (в простейшем случае – однобитового) сигнала и энергии $E = mc^2$.

Сопоставим этой паре событий (упорядоченных во времени и/или в пространстве) в жизни вышеупомянутой частицы релятивистски инвариантное выражение для действия:

$$S_{12} = - mc \int_1^2 ds = - mc^2 \int_1^2 d\tau = - mc^2 T_{12}$$

где ds – элемент 4-мерного интервала, $d\tau$ – дифференциал *собственного* времени (т.е. времени в системе отсчета, в которой частица покоится), T_{12} – собственное время между событиями 1 и 2.

Примечание 1: Из этого выражения сразу следует, что для цепочки последовательных переходов частицы из точки 1 в точки 2, 3, ..., N суммарное действие будет равно сумме парциальных вкладов: $S_{1N} = S_{12} + S_{23} + \dots + S_{N-1, N}$.

Примечание 2: Если изменить знак выражения, то это будет соответствовать *обращению* времени, т.е. передаче сигнала и энергии из точки 2 в точку 1.

В вышеприведенном выражении в соответствии со стандартным пониманием принципа причинности подразумевается, что действие S_{12} является действительной величиной, а интервал собственного времени T_{12} – времениподобный, т.е. что энергия $E = mc^2$ не может распространяться со сверхсветовой скоростью.

3. Рубим гордиев узел

Мы сейчас предпримем попытку разрубить гордиев узел конфликта между ТО и КМ за счет подходящего уточнения принципа релятивистской причинности, которое не нарушает, но расширяет основные аспекты его сложившегося понимания. В то же время это расширение позволит, с моей точки зрения, глубже осознать основные представления КМ.

Как известно, в интерпретации КМ де Бройля – Бома предполагается, что движение частицы управляется чем-то вроде волны-пилота. Ясно, что соответствующий “квантовый потенциал”, если он существует, может распространяться со сверхсветовой скоростью (возможно, с бесконечно большой скоростью¹). Наконец, очевидно, что понятие “нелокальность”, в конце концов, равнозначно утверждению о возможности сколь угодно больших скоростей если не *взаимодействия*, то, по крайней мере, некоторого *взаимовлияния*, сущность которого нуждается в явном и ясном физическом описании.

В работе [Dragan, 2008] высказывается предложение рассматривать в качестве физически допустимых все системы отсчета, а не только движущиеся с досветовыми скоростями. Хотя многие интересные идеи этой работы не представляются мне бесспорными, наиболее важные утверждения заставляют задуматься. В частности, там отмечается, что хотя “досветовые” и “сверхсветовые” системы должны существенно различаться между собой, однако

¹ В только что появившейся публикации [Salart et al., 2008] экспериментально показано, что нижняя оценка для скорости распространения “квантовой информации” более чем в 10000 раз превышает скорость света.

если некоторый физический процесс или событие имеет место в одной инерциальной системе, он также будет иметь место в любой другой инерциальной системе.

Итак, согласимся с возможностью сверхсветового движения частицы и рассмотрим, что из этого следует. При сверхсветовом движении интервал T в выражении для действия $S = -mc^2T$ окажется *мнимым*, таким образом и действие S окажется *мнимым*. Можно ли указать физический смысл для этой ситуации?

Мнимые времена, координаты и другие физические величины используются в работах по физике уже в течение долгого времени (см., например, обзор по инстантонам [Vainshtein et al., 1982]). Некоторые авторы (например, [Wu, 1995]) пытаются обосновать на этом пути результаты опытов [Chiao et al., 1995] по сверхсветовому распространению частиц через потенциальный барьер. Авторы работы [Wang and Xiong, 2007] показывают, что квантовая частица может преодолеть пространственноподобный интервал порядка ее комптоновской длины волны. Более общий, с моей точки зрения, подход связан с расширением классической механики на множество *комплексных* значений энергии и позволяет, в частности, составить не только качественное, но и количественное представление о поведении частицы в классически запрещенных областях различных типов [Bender et al., 2008].

В моих работах, начиная с книги [Shulman, 2004] (см. также статью [Shulman, 2008]), в КМ *мнимые* мощность, энергия и действие интерпретируются как соответствующие *реактивные* составляющие колебательных процессов². Таким образом, в случае мнимого действия S мы получаем некоторый периодический процесс, с которым связан обмен *реактивной* энергией³ между точками 1 и 2. Необратимой передачи энергии и информации в данном случае нет, *среднее значение* передаваемой в любую сторону энергии *равно нулю*, что в полной мере соответствует требованиям принципа релятивистской причинности. Это и есть то необходимое обобщение принципа причинности, которое позволяет добиться совместимости ТО с КМ. Как мы сейчас увидим, однако, этим последствия предлагаемого обобщения далеко не исчерпываются.

4. Квантовые корреляции

Означает ли отсутствие необратимого переноса энергии автоматическое отсутствие какой-либо корреляции между событиями 1 и 2? Напротив, если эти события (скорее, состояния) *физически* связаны *сверхсветовым* процессом, то обеспечивается реальная когерентность состояний, которая может проявляться в виде интерференции между ними. Со своей стороны, интерференция описывается недиагональными членами в матрице плотности и, соответственно, энергиями и частотами перехода между состояниями. Таким образом, *действующее значение* энергии обмена отлично от нуля, несмотря на равенство нулю среднего значения.

Указанный факт удивительным образом⁴ приводит нас к выводу о том, что допущение сверхсветовых процессов не только *согласуется* с невозможностью сверхсветовой скорости передачи информации, но и влечет необходимость использования квантовомеханических представлений. Действительно, пока не осуществлено измерение системы, *находящейся в суперпозиции состояний*, происходят периодические обмены энергией между парами состояний, причем

² Прекрасной иллюстрацией этого является теория электрических цепей переменного тока.

³ См. Приложение

⁴ К сходным выводам приходит и автор работы [Dragan, 2008].

действующее значение энергии обмена однозначно характеризуется частотой перехода. Это верно для системы, части которой локализованы в непосредственной близости одна от другой, такие системы традиционно описываются квантовой механикой, и вопрос о скорости взаимодействия между их частями исторически не возникал. Но это же верно и для систем типа ЭПР, которые разделены пространственноподобным интервалом!

Сочетание корреляции с отсутствием (стандартно понимаемой) причинности объясняется тем, что имеется “скрытый параметр” – фаза периодического процесса, которая не известна наблюдателю и не может им контролироваться. Именно этой точки зрения, насколько мне известно, придерживались де Бройль и Бом. Допущение сколь угодно большой скорости обмена *реактивной* энергией снимает требование локальности, выдвинутое Беллом в качестве предпосылки к своей теореме.

Отметим, что измерение в общем случае нарушает когерентность частей системы и прерывает квантовый сверхсветовой периодический процесс обмена энергией.

5. О возможном механизме корреляции в ЭПР-опыте

Позволю себе добавить несколько слов о возможном механизме обмена информацией без обмена энергией. Когда мы рассматриваем классический периодический процесс (например, переменный электрический ток), то даже при отсутствии активных потерь говорить о нулевой передаче энергии можно лишь в среднем и притом за время, кратное числу периодов. Если же рассматривается время меньшее, чем период процесса, то количественная мера переданной энергии всегда может быть не только определена теоретически, но и измерена практически.

Однако ситуация становится принципиально иной, когда мы переходим в существенно квантовую область и рассматриваем так называемые “нулевые” колебания поля. Средняя энергия этих колебаний действительно равна нулю, тогда как действующее ее значение отлично от нуля и проявляется косвенным образом, например, в эффекте Лэмба. Вместе с тем энергия этих “нулевых” колебаний вакуума не может быть извлечена непосредственно (например, в акте измерения), поскольку отвечает состоянию с наименьшей возможной энергией. Таким образом, в данном случае *отличный от нуля* обмен энергией оказывается принципиально невозможным.

Что же происходит в ЭПР-опыте? Я полагаю, что при разлете пары когерентных частиц между ними возникает область *сфазированных* “нулевых” колебаний вакуума. В силу случайных факторов измерение над одной из частиц происходит (в лабораторной системе отсчета) чуть раньше, и ее поляризация (или спин) приобретает определенное значение. В то же мгновение *вся* область когерентных колебаний вакуума, возникшая между ними на этапе разлета, *одновременно* приобретает некоторую фазу (подобно тому, как группа людей, тесно лежащих на полу, может перевернуться на другой бок только одновременно). Заметим, что в отличие от амплитуды и частоты, фаза колебаний является *безразмерным* параметром, и ее трансляция вдоль области не обязана быть связана с передачей энергии. Таким образом, в момент измерения над второй частицей ей оказывается доступной информация о фазе в месте измерения первой частицы.

6. Заключение

Использование представления о мнимой (реактивной) энергии, как отмечено выше, позволяет успешно интерпретировать весь спектр “неклассических” задач – поведение частицы в потенциальной яме, туннелирование через потенциальный барьер и др. Во всех этих случаях нет нарушения принципа релятивистской причинности, но при этом возникают реальные корреляции вследствие циркуляции реактивной энергии. Более того, эти представления позволяют более ясно представить себе, что такое “нулевые” колебания вакуума, поскольку и для вакуума среднее значение интенсивности колебаний равно нулю, однако действующие значения колебаний отличны от нуля.

Дж. Белл [Bell, 1990] так высказался относительно аргументации А. Эйнштейна по поводу *неполноты* КМ:

в 1935 году он придумал чрезвычайно сильный аргумент для занимаемой им позиции, основанный на другой гипотезе, которую большинство людей, ранее не имевшим дела с этим феноменом, ранее принимали; это – гипотеза близкодействия (no action at a distance), которое иногда называют локальной причинностью (local causality) или просто локальностью (locality). И он заявил, что имеются ситуации, где из этой гипотезы следует детерминизм. Так что его аргумент в пользу детерминизма перестал быть гипотезой, а стал теоремой, следующей из аксиомы локальности.

Сам Белл открыл нарушение подобной аксиомы локальности именно в процессе исследования полноты (под которой в данном случае подразумевается детерминированность) КМ. Таким образом, если признавать результаты многочисленных опытов и быть последовательным, то необходимо безоговорочно принять тезис о *мгновенном* распространении волновой функции (но с ограничением скорости передачи *активной* энергии и информации скоростью распространения света в вакууме) и приступить к исследованию конкретного формализма, позволяющего корректно и адекватно это описывать.

Работы, в которых авторы ставят перед собой именно такие задачи, существуют. Например, в работе [Grössing, 2008] предлагается диффузионно-волновая модель на основе уравнения параболического типа для тепловых полей в вакууме, при этом скорость распространения квантового потенциала полагается бесконечно большой. Хотя предлагаемая модель вызывает ряд вопросов, характерно, что ее авторы в заключение отмечают, что одним из самых жгучих является вопрос о том, как это примирить с релятивистским описанием.

Приложение

Об активной и реактивной энергии

Часто говорят, что законы физики Ньютона обратимы. При этом предполагается, что, например, второй закон Ньютона записывается в виде

$$mq'' = F(t)$$

где m – масса тела, q'' – вторая производная по времени от перемещения, $F(t)$ – внешняя сила, приложенная к телу.

Однако нет никаких причин, препятствующих распространению этого соотношения на более общий случай, который учитывал бы упругие, диссипативные и иные процессы. Например, для линейного механического или электрического осциллятора справедливо соотношение

$$A_0q + A_1q' + A_2q'' = F(t)$$

где A_i – коэффициенты (первое слагаемое отвечает силе упругости, второе – силе трения).

Более того, в некоторых физических процессах (при так называемом радиационном трении или в сложных колебательных системах) в левой части появляются производные и более высоких порядков, так что в достаточно общем виде мы имеем право записать

$$A_0q + A_1q' + A_2q'' + \dots + A_nq^{(n)} + \dots = F(t)$$

где левая часть описывает характерные свойства системы.

Очевидно, что слагаемые левой части меняют или не меняют свой знак при обращении времени в соответствии с тем, какой индекс им соответствует – нечетный или четный. Именно нечетные индексы отвечают необратимым, т.е. диссипативным процессам, именно они связаны с передачей во внешнюю среду так называемой активной энергии и, возможно, с передачей информации в другие системы, т.е. с *причинностью*. При обращении времени эти слагаемые оказались бы необратимыми *источниками* энергии, а причины и следствия поменялись бы местами.

Напротив, все четные индексы отвечают (колебательной) реактивной энергии, при этом член с нулевым индексом соответствует *потенциальной* энергии (зависящей от положения частицы). Все прочие члены с четными индексами зависят от производных по времени от перемещения частицы, поэтому их следует рассматривать как компоненты *кинетической* энергии.

Ссылки:

- [Bell, 1990]** J.S. Bell. “Indeterminism and nonlocality”, <http://www.quantumphil.org/Bell-indeterminism-and-nonlocality.pdf> (the talk presented on 22 January 1990 at CERN on invitation of the Center for Quantum Philosophy, Geneva). Русский перевод “Индетерминизм и нелокальность” доступен по ссылке http://www.timeorigin21.narod.ru/rus_translation/Bell-indeterminism-and-nonlocality.pdf
- [Bender et al., 2008]** Carl M Bender, Dorje C Brody, and Daniel W Hook. Quantum effects in classical systems having complex energy. arXiv:0804.4169v1 [hep-th] 25 Apr 2008. Русский перевод “Квантовые эффекты в классических системах с комплексной энергией” доступен по ссылке http://www.timeorigin21.narod.ru/rus_translation/Complex_power.pdf
- [Chiao et al., 1995]** Raymond Y. Chiao, Paul G. Kwiat and Aephraim M. Steinberg. Quantum Nonlocality in Two-Photon Experiments at Berkeley. arXiv:quant-ph/9501016v1 18 Jan 1995. Сокращенный русский перевод “Сверхсветовое туннелирование фотонов” доступен по ссылке http://www.timeorigin21.narod.ru/rus_translation/Tunneling_experiments.pdf
- [Dragan, 2008]** Andrzej Dragan. Why devil plays dice? arXiv:0806.4875v1 [quant-ph] 30 Jun 2008. Русский перевод “Почему дьявол играет в кости?” доступен по ссылке

http://www.timeorigin21.narod.ru/rus_translation/Devil.pdf

[Gisin, 2005] Gisin N. Can relativity be considered complete? From Newtonian nonlocality to quantum nonlocality and beyond. quant-ph/0512168v1. Русский перевод “Может ли теория относительности считаться полной?” доступен по ссылке

http://www.timeorigin21.narod.ru/rus_translation/Gizin.pdf

[Grössing, 2008] Gerhard Grössing. On the Thermodynamic Origin of the Quantum Potential. [arXiv:0808.3539v1](https://arxiv.org/abs/0808.3539v1) [quant-ph]. Реферат на русском языке доступен по

ссылке: http://www.timeorigin21.narod.ru/rus_translation/Bom_thermodynamics.pdf

[Salart et al., 2008] D. Salart, A. Baas, C. Branciard, N. Gisin, and H. Zbinden. Testing spooky action at a distance arXiv:0808.3316v1 [quant-ph] 25 Aug 2008

[Shulman, 2004] Шульман М.Х. Вариации на темы квантовой теории. Москва, Едиториал УРСС, 2004. Доступно по ссылке:

http://www.timeorigin21.narod.ru/rus_quantum/Variations.pdf

[Shulman, 2008] Шульман М.Х. Как перейти от классической механики к квантовой. Доступно по ссылке:

http://www.timeorigin21.narod.ru/rus_quantum/How_to_transit_rus.pdf

[Vainshtein et al., 1982] А. И. Вайнштейн, В. И. Захаров, В. А. Новиков, Л. А. Шифман. Инстантонная азбука. УФН, Апрель 1982, т. 136, вып. 4, с. 553-591

[Wang and Xiong, 2007] Zhi-Yong Wang, Cai-Dong Xiong. Quantum-mechanical Lorentz transformation and superluminal phenomenon.

<http://lanl.arxiv.org/ftp/arxiv/papers/0705/0705.2951.pdf>

Русский перевод “Квантово-механическое преобразование Лоренца и сверхсветовой феномен” доступен по ссылке

http://www.timeorigin21.narod.ru/rus_translation/rus_superluminal.pdf

[Wu, 1995] Wu Zhong Chao. The Imaginary Time in the Tunneling Process. arXiv:0804.0210v1 [quant-ph] 1 Apr 2008. Русский перевод “Мнимое время в процессах туннелирования” доступен по ссылке

http://www.timeorigin21.narod.ru/rus_translation/Im_time_1.pdf