

© М.Х.Шульман, 2008 (shulman@dol.ru)

Путь к пониманию ЭПР-нелокальности

Предлагается интерпретация нелокальности ЭПР-феномена, основанная на заимствовании модели “кота Шредингера”, отождествлении пространственного размера этой системы с ее характерной длины волны и возможности “сверхсветового” туннелирования частицы на расстояние порядка ее комптоновской длины волны

Введение

Начиная со знаменитой статьи [EPR, 1935], у физиков возникло известное беспокойство по поводу “мгновенной” корреляции между физическими событиями, разделенными пространственно-подобным интервалом. После работы [Bell, 1964] постепенно укрепилось всеобщее убеждение в наличии фундаментального противоречия между квантовой механикой (КМ), которая предсказывает именно нелокальную взаимосвязь между явлениями, и специальной теорией относительности (СТО), которая ограничивает взаимодействия скоростью света в вакууме.

Опыты по проверке квантовой нелокальности фотонов обычно проводятся либо по схеме ЭПР-Бома, когда пара когерентных фотонов разлетается от общего источника к двум поляризаторам, либо в опытах с интерферометрами (см. обзор [Belinskii and Klyshko, 1993]). В этих экспериментах специально предусматривается быстрое изменение конфигурации эксперимента уже после разлета когерентных фотонов, но еще до достижения ими детекторов (поляризаторов). Было экспериментально подтверждено, что значение имеет лишь окончательная (но не начальная) конфигурация, как и предсказывает квантовая механика.

Данный факт представляется *парадоксальным*, поскольку в момент переключения расстояние от фотона до детектора оказывается *меньше*, чем остаточное время полета, умноженное на скорость света, так что никакая информация, как кажется, не могла бы опередить летящий к детектору фотон.

Так, в ЭПР-экспериментах группы Аспека расстояние L двумя переключателями составляло 13 м. Поскольку неравные интервалы переключения конфигурации (6.7 нс и 13.3 нс), как и задержка между испусканием двух фотонов пары (среднее значение – 5 нс), были малы в сравнении с L/c (43 нс), то детектируемое событие и место соответствующего изменения ориентации были разделены пространственно-подобным интервалом [Aspect, 2000]. В ЭПР-экспериментах группы Цайлингера расстояние L между событиями составляло 400 м, а длительность измерения выбиралась заведомо меньше, чем время полета фотонов L/c (1.3 мкс) [Weihs et al., 1998]. В совсем недавних экспериментах с интерферометром по схеме с отложенным выбором длина оптического пути L была равна 48 м, что соответствует времени распространения света 160 нс. При переключении конфигурации подбор времен гарантировал, что любая информация относительно выбора конфигурации должна распространяться в 4 раза быстрее света, чтобы иметь возможность повлиять на поведение фотона на входе [Jacques et al., 2008].

Следует заметить, что речь может идти не только о “сверхсветовых” корреляциях в ЭПР-экспериментах, но и о сверхсветовых скоростях распространения фотонов (см., например, [Chiao et al., 1995], [Cialdi et al., 2008]).

Преодоление светового барьера

Недавно в работе [Wang and Xiong, 2005] была теоретически рассмотрена возможность для частицы преодолеть пространственно-подобный интервал. Согласно специальной теории относительности (СТО) это кажется невозможным, однако авторы отмечают, что по поводу подобного сверхсветового перемещения существует множество разногласий. В частности, и теоретические, и экспериментальные исследования привели к согласованному выводу, что фотоны внутри малого волновода распространяются со сверхсветовой скоростью. Сверхсветовое поведение частиц может быть объяснено на основе переформулирования СТО с использованием квантовой механики (КМ) взамен классической. Правильная квантово-механическая версия СТО должна давать те же самые результаты, что и релятивистская КМ (как, например, квантовая теория поля).

В рамках выполнения этой программы авторам работы удалось прийти к заключению о том, что *частица может преодолевать пространственно-подобный интервал порядка половины ее комптоновской длины волны*, это обусловлено соотношением неопределенности Гейзенберга и согласуется с квантовой теорией поля. Более того, такая частица ведет себя аналогично частице, туннелирующей сквозь потенциальный барьер.

В обычных условиях комптоновская длина волны крайне мала. Однако можно предположить, что в ЭПР-явлениях *эта длина оказывается равной как раз расстоянию между когерентными частицами ЭПР-пары*, т.е. характерному размеру системы (напомним, что частицы продолжают интерферировать). Если это принципиально важное допущение справедливо, то результаты работы [Wang and Xiong, 2005] могут быть распространены и на ЭПР-феномен. Некоторый дополнительный анализ приведен в следующем разделе.

Использование модели “кота Шредингера” для ЭПР-пары

В ходе ЭПР-опытов происходит генерация двух *когерентных* частиц, которые затем взаимно удаляются друг от друга. При этом вплоть до момента измерения состояния хотя бы одной из частиц их когерентность сохраняется, т.е. они продолжают находиться в состоянии суперпозиции, *интерферируя* между собой (в отличие от некогерентных экземпляров таких же частиц). “Мгновенная фотография” такой конфигурации для *пары частиц* оказывается *похожей* на модель “кота Шредингера” – суперпозиции двух состояний *одиночной* частицы. В работе [Zurek, 2002] приводится описание этой модели и рассматривается эволюция ее состояния с течением времени.

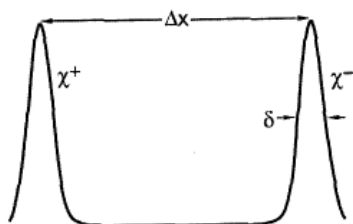


Рис. 1 [Zurek, 2002]. “Кот Шредингера”, или когерентная суперпозиция. Это состояние $\psi(x)$, когерентная суперпозиция двух гауссовых волновых пакетов, может описывать частицу в суперпозиции положений внутри прибора Штерна-Герлаха или в ходе двухщелевого эксперимента. Фазовый сдвиг между компонентами выбран нулевым.

Модель оперирует с матрицей плотности волнового пакета, которая строится с помощью волновой функции. Матрица плотности имеет то преимущество, что в ней явно присутствуют *недиагональные* члены, ответственные за интерференцию различных базисных состояний, т.е. за состояние суперпозиции как таковое. Поэтому переход от состояния квантовой суперпозиции к классической смеси состояний трактуется как переход к новой матрице, в которой остаются только диагональные члены.

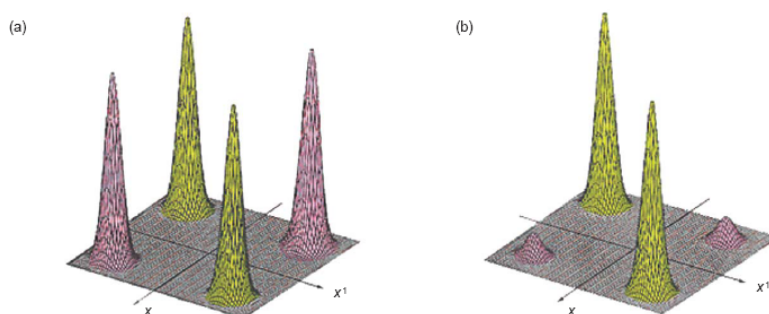


Рис. 2 [Zurek, 2002]. Эволюция матрицы плотности

(а) Этот рисунок показывает матрицу плотности для состояния кота Шредингера в положении, отвечающем $\rho(x, x') = \psi(x) \psi^*(x')$. Диагональные пики (желто-зеленые) отвечают двум возможным локализациям частицы. Недиагональные пики (фиолетовые) обусловлены квантовой когеренцией. Их существование и размер демонстрируют, что частица не локализуется целиком в двух местах, а представляет собой когерентную суперпозицию этих состояний.

(б) Обусловленная влиянием среды декогеренция приводит к уменьшению недиагональных пиков $\rho(x, x')$. Здесь исходная матрица плотности, показанная на рис. (а), является уже частично декогерентной. Следовательно, некогерентная часть должна быть обусловлена только диагональными пиками. Она может рассматриваться как классическое распределение вероятности с эквивалентной вероятностью найти частицу в соответствующих местах, отвечающее гауссовому распределению.

Недиагональные члены матрицы плотности быстро уменьшаются (см. рис. 2) с течением времени вследствие процесса декогеренции – хаотического взаимодействия с *окружающей средой*. Скорость декогеренции обусловлена массой исходной частицы и температурой взаимодействия, т.е. средней энергией поля или хаотического движения частиц окружающей среды. При обычных условиях когерентность утрачивается за время менее 10^{-20} с. Однако, *если взаимодействие со средой отсутствует* (как в ЭПР-опыте до момента измерения), *то когерентное состояние при надлежащих условиях теоретически может сохраняться сколь угодно долго*.

Заключение

Таким образом, предлагаемая трактовка сути нелокальности в экспериментах типа ЭПР основана, во-первых, на представлении о паре когерентных частиц, разлетающихся из их общего источника, как о запутанном квантовом состоянии, обладающим существенной пространственной протяженностью. Эта протяженность физически проявляется в факте *интерференции* между двумя парциальными

субсостояниями, что, по моему мнению, свидетельствует о наличии некоего обменного взаимодействия и поля обменных сил. Математическим выражением этого факта должно быть участие *расстояния* между частицами пары в качестве характерного квантового параметра, подобно тому, как это имеет место для *ширины потенциальной ямы* в хорошо известной задаче КМ. При этом нас не должно смущать некоторое отличие данного случая, похожего на систему из двух солитонов, от вида типовых волновых функций в КМ.

Во-вторых, мы должны признать, что в квантово-механической версии теории относительности *принципиально возможны* сверхсветовые скорости распространения в пределах *характерного физического размера* системы. Обычно этот размер (комптоновская длина волны частицы) крайне мал, но он может достигать и достаточно больших значений в случаях, подобных ЭПР-конфигурации. Таким образом, *ограничения на скорость того или иного взаимодействия могут быть недействительными* для ситуаций, подобных ЭПР-экспериментам.

Библиография:

[Aspect, 2000] Alain Aspect. Bell's theorem: the naive view of an experimentalist. "Quantum [Un]speakables - From Bell to Quantum information", edited by R. A. Bertlmann and A. Zeilinger, Springer (2002). Available at <http://arXiv.org/abs/quant-ph/0402001>
Выступление на конференции памяти Джона Белла, состоявшейся в Вене в декабре 2000 года. Русский перевод "Теорема Белла: наивная точка зрения экспериментатора" доступен по ссылке http://www.timeorigin21.narod.ru/rus_translation/aspek_teorema_bella.pdf.

[Belinskii and Klyshko, 1993] Белинский А.В., Клышко Д.Н. "Интерференция света и теорема Белла", Успехи физических наук. Август 1993г. Т. 163, № 8 – 1 – 45.

[Bell, 1964] J. Bell, Physics (N.Y.) 1, p.195, 1964.

[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. Русский перевод "Сверхсветовое туннелирование фотонов" доступен по ссылке http://www.timeorigin21.narod.ru/rus_translation/Tunneling_experiments.pdf

[Cialdi et al., 2008] S. Cialdi, I. Boscolo, F. Castelli and V. Petrillo. Superluminal advancement of a single photon far beyond its coherence length. ArXiv:0805.1315v1 [physics.optics] 9 May 2008

[EPR, 1935] A. Einstein, B. Podolsky, and N. Rosen, Phys. Rev. 47, p. 777, 1935.

[Jacques et al., 2008] Vincent Jacques, E. Wu, Frederic Grosshans, Francois Treussart, Philippe Grangier, Alain Aspect and Jean-Francois Roch. "Delayed-choice test of complementarity with single photons" (arXiv:0801.0979v1 [quant-ph] 7 Jan 2008). Русский перевод "Экспериментальная проверка соотношения дополненности между свойствами волны и частицы у единичных фотонов" доступен по ссылке

http://www.timeorigin21.narod.ru/rus_translation/Wheeler_2.pdf

[Wang and Xiong, 2005] 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://timeorigin21.narod.ru/rus_translation/rus_superluminal.pdf

[Weihs et al., 1998] Weihs G., Jennewein T., Simon C., Weinfurter H., and Zeilinger A. 1998 Phys. Rev. Lett. 81 5039-5043

[Zurek, 2002] Zurek H. Woitech. Decoherence and the Transition from Quantum to Classical. Los Alamos Science, Number 27, 2002 (текст доступен на сайте <http://quantum3000.narod.ru/> , раздел “Статьи для продвинутых”). Русский перевод “Декогеренция и переход от квантового мира к классическому” доступен по ссылке http://www.timeorigin21.narod.ru/rus_translation/Zurek.pdf