

“Не-реализм”: глубокая идея или всего лишь один из возможных вариантов?

Николя Жизэн

Перевод М.Х. Шульмана (shulman@dol.ru)

arXiv:0901.4255v1 [quant-ph] 27 Jan 2009

Non-realism : deep thought or a soft option ?

Nicolas Gisin

Group of Applied Physics, University of Geneva, 1211 Geneva 4, Switzerland

January 28, 2009

1 Введение

В последние годы нарушение неравенства Белла часто интерпретировалось как несоблюдение либо локальности, либо реализма (либо и того, и другого). Проблема с такими утверждениями состоит в том, что же в точности понимается в этом контексте под реализмом. Иногда реализм определяют как гипотезу, что каждая физическая величина всегда имеет определенное значение, и что измерение просто позволяет узнать это существующее значение. То есть реализм отождествляется с детерминизмом. Но если так, то во-первых, почему следует пользоваться выражением “локальный реализм” вместо выражения “локальный реализм”? А во-вторых, неравенство Белла может быть сформулировано и доказано без всякого допущения относительно детерминизма. Следовательно, детерминизм не является выходом, и определение реализма еще должно быть уточнено.

С целью анализа значения слова “реализм” в контексте неравенств Белла, начнем с главного допущения, лежащего в их основе. Для простоты ограничимся двумя частями, которые принято связывать с Алисой и Бобом. Они могут выбирать между некоторыми вариантами возможных настроек измерительных устройств; каждое измерение при выбранных настройках приводит к некоторым результатам. Поскольку неравенства Белла не ограничены физикой, а могут быть применены к различным многосторонним корреляциям, мы предпочитаем использовать несколько более общую область. Следовательно, обозначим через x и y входные параметры Алисы и Боба (физики говорят об измерительных настройках) соответственно, а через a и b – их выходные результаты (т.е. результаты измерений). Тогда корреляция будет представлять собой распределение условной вероятности $p(a, b|x, y)$ того, что результаты Алисы и Боба равны a и b при данных входах x и y , соответственно.

Пока все идет хорошо. Однако эта ситуация, описываемая, корреляцией вида $p(a, b|x, y)$, может оказаться статистической смесью различных ситуаций, что традиционно маркируется символом λ_1 для первой возможной ситуации, символом λ_2 для второй ситуации, и т.д. Эти λ могут включать обычное квантовое состояние Ψ ; они могут также включать всю информацию относительно прошлого Алисы и Боба.

На самом деле, эти λ могут даже включать состояний всей Вселенной, за исключением двух входных параметров: x и y должны быть независимыми от λ , т.е. $p(x) = p(x|\lambda)$ и $p(y) = p(y|\lambda)$. Но λ может также быть еще более ограничено¹: λ не должно содержать никакой информации относительно выбора входных значений x и y .

Без потери общности каждая условная корреляция может быть объяснена: $p(a, b|x, y, \lambda) = p(a|x, y, \lambda) \cdot p(b|x, y, a, \lambda)$. Допущение о локальности тогда состоит в том, что для любого заданного "состояния дел" λ то, что происходит на стороне Алисы не зависит от того, что происходит на стороне Боба, и наоборот: $p(a|x, y, \lambda) = p(a|x, \lambda)$ и $p(b|x, y, a, \lambda) = p(b|y, \lambda)$. Следовательно, общая гипотеза, лежащая в основе неравенств Белла, гласит:

$$p(a, b|x, y) = \int d\lambda \rho(\lambda) p(a|x, \lambda) \cdot p(b|y, \lambda) \quad (1)$$

где $\rho(\lambda) \geq 0$ - (возможно неизвестное) распределение вероятности параметра λ . Технически дополнительная переменная λ мыслится в качестве элемента реальности, связанной с измерительным устройством, таким, что интеграл в (1) является хорошо определенным [1]. Другое техническое обстоятельство состоит в том, что если множества входов и выходных результатов являются конечными, то множество корреляций $\{p(a, b|x, y)\}$, удовлетворяющих (1), является выпуклым на определенном числе вершин. Каждая грань этого множества соответствует некоторому неравенству Белла. Следовательно, корреляция $p(a, b|x, y)$ нарушает неравенство Белла тогда и только тогда, когда оно не может быть разложено в произведение подобно стоящему в (1).

Опять-таки, интерпретация (1) следующая: локальные вероятности результата a на стороне Алисы и результата b на стороне Боба зависят только от локальных входов x (на стороне Алисы) и y (на стороне Боба) соответственно, и от состояния дел, обозначенного через λ . Следовательно, если переменная λ задана, вероятности результата a на стороне Алисы при входе x , $p_A(a|x, \lambda)$, и аналогично на стороне Боба, $p_B(b|y, \lambda)$, являются независимыми. Соответственно, условие (1) очевидно говорит об условной независимости. Обоснование для этой гипотезы независимости состоит в том, что, поскольку Алиса и Боб пространственно разделены, то все, что они могли бы сделать (сознательно или независимо от их воли) – это использовать ранее оговоренную общую стратегию (описываемую с помощью λ). Это есть условие локальности. Но является ли оно также и предположением о реализме, спрятанным в (1)?

Заметим, что условие (1) может быть сформулировано в рамках формализма стандартной квантовой физики, хотя мы знаем, что оно не удовлетворяет квантовой физике:

¹ λ может даже вообще отсутствовать, это не повлияет на аргумент. Все это – условная вероятность $p(a, b|x, y)$, без которой наука была бы невозможной.

$$p(a, b|x, y) = \text{Tr}(X_a \otimes Y_b \rho) \neq \int d\lambda \rho(\lambda) \text{Tr}(X_a \lambda_A) \cdot \text{Tr}(Y_b \lambda_B) \quad (2)$$

где X_a и X_b являются собственными проекторами наблюдаемых X и Y с собственными значениями a и b соответственно. Множество всех λ есть множество всех пар квантовых состояний $\lambda = (\lambda_A, \lambda_B)$, где первый элемент пары – действительное квантовое состояние λ_A квантовой системы Алисы, а второй элемент – действительное квантовое состояние λ_B системы Боба. Это с очевидностью показывает, что, помимо допущения о локальности, условие (1) не содержит никакого иного допущения, несовместимого с квантовой физикой.

Многие физики, не знакомые с неравенством Белла, пугаются разговоров о нелокальности и предпочитают говорить о "несовместимости с локальным реализмом", надеясь таким образом исключить нелокальность². Мой опыт свидетельствует, что это связано с недоразумением из-за различного понимания нелокальности в квантовой физике и в теории относительности [2]. На самом деле нелокальность не означает возможности обмена информацией, т.е. некоторые нелокальные корреляции, например, те, которые предсказываются квантовой физикой, не могут использоваться для передачи сигнала ни от Алисы к Бобу, ни от Боба к Алисе. Следовательно, невозможность передачи сигналов (no signaling) и нелокальность – различные понятия, первое существенно для теории относительности, второе – хорошо подтвержденное предсказание квантовой механики.

2 Анализ возможных скрытых мест для реализма

Может ли быть, что частое использование термина "локальный реализм" – просто коллективное заблуждение и пустая фразеология, т.е. разновидность необязательного мнения? Или в этом есть что-то большее?

Рассмотрим рис. 1, который описывает эту ситуацию, и сначала сконцентрируемся на стороне Алисы (на стороне Боба все обстоит аналогично). Мы видим 3 части: вход (вверху), результат (внизу), а между ними черный ящик с расплывчатыми границами. Детали этого черного ящика не важны для нашего обсуждения, достаточно того, что он не простирается до стороны Боба, т.е. что две части могут быть явно и однозначно различимы. Условие различимости легко может быть выполнено за счет большого расстояния, разделяющего Алису и Боба. Подчеркнем, что содержимое черного ящика может быть каким угодно. Например, он может содержать группу умных физиков, снабженных мощными компьютерами, или некоторую квантовую частицу с квантовой памятью, или еще что-нибудь еще,

² Это даже еще более неожиданно, когда выясняется что классическая физика была еще более нелокальной, чем квантовая физика, пока она не обрела общую теорию относительности [2]; действительно, закон всемирного тяготения Ньютона предсказывает возможность мгновенной передачи сигнала через всю вселенную путем простого перемещения масс, что, согласно теории Ньютона, должно немедленно изменить гравитационное поле повсюду. Следовательно, физика позволяет нам нелокально описывать природу на всем протяжении ее истории, исключая одно десятилетие, примерно между 1915 и 1925 г.г.! Заметим, однако, что Ньютон никогда не объявлял, что его теория полна [3]; только его последователи, например, Лаплас, возводили на месте ньютоновых детерминистических уравнений некоторое подобие религиозного вероучения в качестве окончательной истины.

классическое ли, квантовое ли, описываемое ли какой-нибудь будущей теорией, пока не открытой. В частности, мы не должны каких-либо реалистических допущений относительно содержимого черного ящика. Например, заявляя, что содержимое черного ящика реально не изменяет ситуацию: вопрос о том, может ли корреляция $p(a, b|x, y)$ быть разложена как в выражении (1), остается независимо от такого заявления.

Посмотрим подробнее на две части на стороне Алисы, ее вход x и результат a . Здесь мы находим возможный намек на то, что может означать реализм. Действительно, очень важно, что и x , и a являются классическими данными, которые можно копировать, распространять, сравнивать и подвергать иной обработке со стороны людей. Очевидно, если вход x не может быть обработан Алисой, в частности, если Алиса не может решить, какое именно значение входного параметра она хочет использовать в каждом конкретном опыте, или если Алиса не может понять результат a конкретного опыта однозначным образом, то мы не можем приписать смысл всей ситуации, представленной на рис. 1.

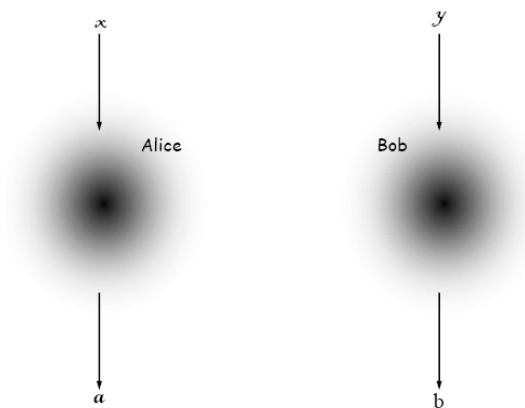


Рисунок 1: Для каждого конкретного эксперимента Алиса и Боб имеют по единственному значению входного параметра x и y на входе своих черных ящиков; тогда ящики выдают однозначные результаты a и b Алисе и Бобу, соответственно. Заметим, чтобы проверить условие (1), эксперимент должен быть повторен многократно, пока статистика не позволит зафиксировать хорошее соответствие с вероятностью $p(a, b|x, y)$.

Кажется, мы обнаружили одно – и только одно – место, где реализм играет роль: входы и результаты должны быть реальными, т.е. игроки Алиса и Боб должны иметь непосредственный доступ к своим входам и результатам. Более точно, они должны иметь свободу выбора своих входов (или свободу выбора устройства, которому они делегируют этот выбор, обычно это делает генератор случайных чисел); и они должны быть способны считывать результаты (в свой мозг, или, опять-таки, в свободно выбранное устройство памяти). Заметим, мы ничего не говорим относительно способа, каким отображаются результаты, детерминистическим или нет, под частичным воздействием игрока или полностью независимо от его/ее решений/действий/желаний.

Итак, что может означать не-реализм? Логически, либо входы, либо результаты (либо и то, и то) являются нереалистичными. Первая альтернатива должна означать, что Алиса не может свободно выбирать значение входного параметра для конкретной реализации эксперимента. Ну, что же, это логическая возможность. Но

представляет ли она интерес? Я думаю, что нет, потому что если люди отказываются от предположения о свободном выборе решать, когда и какой эксперимент выбрать, то пропадает возможность проверить любую научную теорию: это было бы концом Науки. Следовательно, допущение о нереалистичности входов стало бы разновидностью самоубийства Науки. Поэтому сконцентрируемся на гипотезе о нереалистичности результатов. Что бы это могло значить? Ну, здесь мы встречаемся с печально известной проблемой квантового измерения: возможно, измерения не имеют однозначный результат, но приводит к состоянию суперпозиции вселенной, соответствующей всем возможным результатам измерения. Здесь я вижу два способа развития этого аргумента. Первый – это обычная многомировая точка зрения. Позвольте мне просто заявить, что я рассматриваю эту точку зрения как интересную (хотя логически непротиворечивую, подобно солипсизму): рассматриваемая вполне серьезно, многомировая точка зрения не оставляет места для свободы; действительно, она требует полного детерминизма³.

Однако существует вторая сторона предположения о нереалистичности результатов: в самом деле, можно было бы утверждать, что проходит некоторое время перед тем, как черный ящик сформирует определенный результат. Если это время больше, чем обычно предполагается, то могло бы пройти достаточное время для того, чтобы между Алисой и Бобом осуществилась коммуникация с досветовой скоростью [4]. Это порождает следующий вопрос: когда заканчивается квантовое измерение? Вместе со срабатыванием детектора, как считает большинство экспериментаторов? Или следует ожидать, пока результат не зафиксируется сознанием человека (здесь Джон Белл спросил бы, должен ли этот человек быть доктором наук)? Общая идея, что это может быть существенное, но конечное время при квантовом измерении для формирования (классического) результата, представляется интересной, особенно если модели могут быть экспериментально проверены, см., например, [5].

3 Заключение

В заключение скажем: заявление, что наблюдение нарушения неравенства Белла якобы приводит к дилемме между нелокальностью и не-реализмом, раздражает из-за неясности второго термина [6, 7]. Единственное место, где не-реализм мог бы иметь некоторый смысл в контексте неравенств Белла, это старая проблема квантового измерения. Это действительно интересная проблема, и я думаю, что в один прекрасный день физика сможет сказать по этому поводу некоторые интересные вещи. Однако это не относится к неравенствам Беллам. Более того, неясно, в каком смысле это поможет решить проблему локальности [8]. Действительно, пока есть возможность отличить Алису от Боба, проблема локальности остается. Следовательно, все нарушения неравенств Белла должны

³ Может показаться, что здесь имеется аналогия с классической физикой; однако имеется громадная разница. В классической физике вещи логически разделены, следовательно, имеется место для гипотетического интерфейса мозг-тело (иногда подобного декартовой пинеальной железе), через который люди (и животные) могут свободно воздействовать на мировую материю. Вследствие запутывания это невозможно в квантовой физике. Я думаю, что многомировая точка зрения несовместима со свободой и, следовательно, неинтересна для меня. Более того, я не вижу в ней какого-либо ресурса для объяснения: она просто снова возводит линейность уравнения Шредингера в статус религиозной догмы и окончательной истины.

интерпретироваться как демонстрация нелокальности. Более того, если нелокальность принимается, появляются новые возможности, например, безопасность распространения квантового ключа по отношению к любой (индивидуальной) атаке со стороны перехватчиков, ограниченных только условием невозможности обмена сообщениями (no-signaling) [9].

Позвольте мне закончить личным замечанием. Для меня квантовая нелокальность является установленным фактом. Еще остается загадкой: как Природа организует свою бухгалтерию и запоминает, какие измерения должны сопровождаться нелокальными корреляциями? Использует ли она огромное – чудовищно большое – пространство Гильберта, чтобы сохранить след физических систем (частиц или мод колебаний), запутанных между собой? Для меня этот вопрос, также как и проблема квантового измерения, является реальным физическим вопросом: однажды Наука даст значимые ответы на эти два вопроса. Тогда мы узнаем, что это два существенно различных вопроса, и что ответы открывают совсем новые области физических исследований.

Благодарности

Я с удовольствием благодарю Stefano Pironio, Rob Thew и Travis Norsen за чтение и комментирование ранних версий этой публикации.

Ссылки

- [1] В качестве примера, показывающего необходимость этого допущения, см.: I. Pitowsky, Resolution of the EPR and Bell paradoxes, Phys. Rev. Lett. 48, 1299, 1982.
- [2] N. Gisin, Can relativity be considered complete? From Newtonian nonlocality to quantum nonlocality and beyond, quant-ph/0512168. Русский перевод “Может ли теория относительности считаться полной” см. по ссылке http://www.timeorigin21.narod.ru/rus_translation/Gisin.pdf
- [3] Travis Norsen, частное сообщение.
- [4] J.D. Franson, Bell's theorem and delayed determinism, Phys. Rev. D 31, 2529, 1985.
- [5] D. Salart et al., Spacelike separation in a Bell test assuming gravitationally induced collapses, Phys. Rev. Lett. 100, 220404, 2008.
- [6] T. Norsen, Against "Realism", quant-ph/0607057.
- [7] F. Laudisa, non-local realistic theories and the scope of the Bell theorem, arXiv:0811.2862.
- [8] Замечательный материал к истории квантовой нелокальности читайте в : Louisa Gilder, The Age of Entanglement, Alfred A. Knopf, 2008.
- [9] A. Acin, N. Gisin and L. Masanes, From Bell's theorem to secure quantum key distribution, Phys. Rev. Lett. 97, 120405, 2006.