

Возникают ли квантовые эффекты вне пространства-времени? Нелокальность, свобода воли и "отсутствие многомирия (no many-worlds)"

Н. Жизэн (Швейцария)

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

arXiv:1011.3440v1 [quant-ph] 15 Nov 2010

Are There Quantum Effects Coming from Outside Space-time? Nonlocality, free will and "no many-worlds"

Nicolas Gisin

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

(Dated: November 16, 2010)

Наблюдение нарушения неравенства Белла иногда говорит нам кое-что обо все возможных будущих теориях: все они должны предсказывать нелокальные корреляции. Следовательно, Природа является нелокальной. После элементарного введения в нелокальность и короткого обзора некоторых недавних экспериментов доказывается, что нелокальность Природы вместе с существованием свободной воли несовместима с многомировым подходом квантовой физики.

I. ВВЕДЕНИЕ

Представим себе некоторых людей, каждый из которых отдельно и независимо осуществляет тот или иной выбор, имеющий определенные последствия. В целях научного анализа этой банальной ситуации предположим, что та же группа людей может повторить этот эксперимент снова и снова, т.е. снова и снова делать свободный выбор и наблюдать его последствия. Более того, для простоты предположим, что у каждого из них лишь конечное число вариантов выбора, которые мы называем входами, и что следствия могут быть перечислены в виде конечного набора возможных исходов (результатов). Как только собрано достаточное количество данных, могут быть оценены вероятности возможных исходов в расчете на один вход. Например, если имеется только два человека, которых мы можем называть Алиса и Боб, и мы помечаем их входы через x и y , а результаты - через a и b соответственно, то такая вероятность обозначается как $p(a, b|x, y)$. Для краткости мы можем называть такое распределение условных вероятностей $p(a, b|x, y)$ корреляцией, см. рис. 1.

Корреляции встречаются повсеместно, каждый день и, в частности, во всех естественных науках. Можно даже сказать, что научная деятельность состоит в наблюдении корреляций и развитии объясняющих их теоретических моделей, т.е. описывающих, как они возникают. Например, если кто-то смотрит футбол по телевизору с отключенным звуком и видит, что все игроки одновременно остановились, то он должен думать, в соответствии с правилами игры, что судья дал свисток.

Неожиданным образом число возможных типов объяснений корреляций крайне ограничено. До появления квантовой физики было только две категории объяснений: либо одна из систем оказывает влияние на другую, посылая ей некоторую физическую информацию, воплощенную в той или иной физической форме (сигнале), либо коррелирующие события причинно связаны в своем

прошлом. Например, при игре в футбол все игроки одновременно останавливаются, потому что в их общем прошлом судья дал свисток, т.е. действовал как общая причина для всех игроков.

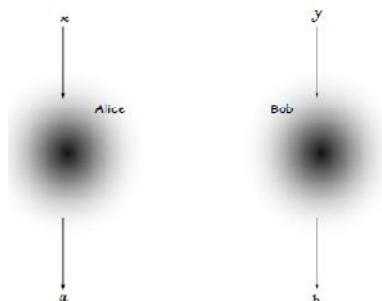


Рисунок 1: При каждой реализации эксперимента Алиса и Боб свободно и независимо выбирают по одному значению x и y , соответственно, и вводят их в свои черные ящики; последние затем формируют по одному и только одному выходному значению, a и b для Алисы и Боба, соответственно. Заметим, что в качестве тестового условия (7), см. раздел II, эксперимент повторяется много раз до тех пор, пока статистика не позволит получить удовлетворительное совпадение с вероятностью $p(a, b|x, y)$.

Эти две категории объяснений являются локальными в том смысле, что процессы начинаются в фиксированном месте и распространяются локально от точки к точке. Следовательно, обычная терминология использует понятие общей локальной причины, чтобы подчеркнуть центральное значение локальности, которая лежит в основе такого объяснения. Трудно представить себе какой-либо другой вид объяснения. Действительно, если исключить возможность влияния вне пространства и времени, то, как мне кажется, просто не существует альтернативы двум вышеупомянутым категориям объяснений.

Наряду с этим – и это поразительно – квантовая физика предсказывает совершенно иной тип корреляций, которые называются нелокальными по причинам, описываемым ниже. В физике для обозначения причины таких корреляций существует специальный термин: запутывание (entanglement). Однако физика не предлагает объяснений, как именно эти корреляции реализуются в пространстве и времени. Следовательно, каким-то образом нелокальные корреляции возникают вне пространства-времени (см. пояснение этой провокативной терминологии в приложении А).

II. НЕЛОКАЛЬНЫЕ КОРРЕЛЯЦИИ

Почему кто-то должен верить в существование нелокальных корреляций? Их существование вытекает из квантовой механики, что отметили Эйнштейн-Подольский-Розен и Шрёдингер уже в 1935 году (а на самом деле это было установлено еще раньше, см., например, [1]). Но возможность непосредственно наблюдать нелокальные корреляции кажется, на первый взгляд, трудно достижимой, если вообще реализуемой: действительно, при их наблюдении должны быть исключены любые объяснения, относящиеся к двум вышеупомянутым во введении категориям.

Первый тип объяснения, когда одна система посылает информацию другой, легко контролировать, преподаватели все время делают это во время экзаменов: они следят, чтобы студенты не могли общаться между собой. Благодаря этому

преподаватели уверены, что если результаты экзаменов коррелируют, то это не потому, что один студент списал у другого, а потому, что те вместе готовились к экзамену (т.е. в качестве объяснения остается только локальная общая причина). В физике способы устранения информационного обмена очевидны, по крайней мере, в принципе: надо разделить коррелирующие события так, чтобы никакой сигнал, распространяющийся со скоростью света, не успевал покинуть одну систему после того, как задано значение на ее входе, и дойти до другой системы раньше, чем зарегистрировано значение на ее выходе (в таком случае говорят, что события разделены пространственно-подобным интервалом). Позвольте подчеркнуть этот момент. Боб должен наблюдать свои результаты, т.е. последствия своего выбора, прежде чем какой-либо сигнал со скоростью, не превышающей скорость света, мог бы доставить ему информацию относительно выбора Алисы; и наоборот, Алиса должна наблюдать собственные результаты до того, как какой-либо сигнал от Боба может достичь ее. Эксперименты, которые не строго удовлетворяют этому условию, содержат "ловушку локальности".

А как обстоят дела со второй категорией объяснений, как можно экспериментально отвергнуть некоторое объяснение на основе локальной общей причины? Ответ на этот вопрос является основным вкладом в физику Джона Белла [2]. Его очень легко формализовать; взгляните на рис. 1. И Алиса, и Боб (каждый из них) должны иметь доступ только к ограниченной части пространства и времени. В частности, должно быть возможным ограничивать область того, где и когда осуществляется входной выбор (один со стороны Алисы, другой со стороны Боба), и область того, где и когда результаты производятся и регистрируются. Заметим, что входы и результаты являются стандартными (т.е. классическими) переменными: они могут быть скопированы, запомнены и обработаны как обычные элементы данных, с которыми мы повседневно имеем дело. Предположим для конкретности, что Алиса и Боб выкладывают свои входы и результаты в интернет, так что спустя некоторое время каждый может получить к ним доступ. Предположим, что корреляция $p(a, b|x, y)$ имеет объяснение, относящееся к категории общей причины. Обозначим эту общую причину через λ . Нам не нужно знать, что собой представляет λ , для нас это просто символ. Мы делаем только два допущения относительно λ , одно принципиальное, а другое - техническое.

Принципиальное допущение состоит в том, что λ не содержит никакой информации относительно свободного выбора Алисы и Боба: входы x и y независимы от λ . Заметим, что это исключает гипер-детерминизм: Алиса и Боб могут делать свободный выбор (я еще вернусь к этому). Это предположение может быть формализовано: $p(x) = p(x|\lambda)$. Или эквивалентно: $I(x : \lambda) = 0$, т.е. взаимная информация (по Шеннону) между x и λ равна нулю.

Второе – техническое – допущение гарантирует, что можно "сосчитать" и "взвесить" все возможные общие причины¹. Априори величина λ неизвестна, но все это необходимо, чтобы было можно ассоциировать вероятностные веса всех возможных λ . Например, достаточно предположить, что существует только счетное число возможных причин (возможно, бесконечное, как множество целых чисел). Или, если исходить из возможности непрерывного континуума общих причин (например, что входы зависят от температуры некоторого места в их

¹ Заметим, что можно сгруппировать величины λ в классы эквивалентности, где две величины λ называются эквивалентными, если и только если они определяют в точности те же самые вероятности $p(a, b|x, y, \lambda)$; следовательно, достаточно "сосчитать" классы эквивалентности.

общем прошлом), то необходимо предположить, что множество всех λ оснащено мерой, такой, как интеграл по пространству λ [3].

Теперь, если корреляция $p(a, b|x, y)$ имеет в качестве объяснения некоторую локальную общую причину, которая удовлетворяет двум вышеупомянутым допущениям, то для любой заданной λ два события являются независимыми:

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

Поскольку априори λ неизвестна, следует приписать некоторую вероятность каждому возможному ее значению: обозначим через $\rho(\lambda)$ вероятность того, что фактическим значением общей причины является λ . Заметим, что функция $\rho(\lambda)$ может быть неизвестна, но она является частью категории локальных общих причин в предположении, что ρ существует. Следовательно, любое объяснение, связанное с общей причиной корреляций, имеет вид:

$$p(a, b|x, y) = \sum_{\lambda} \rho(\lambda) p(a|x, \lambda) \cdot p(b|y, \lambda) \quad (2)$$

или, если существует континуум λ , то предполагается, что:

$$p(a, b|x, y) = \int_{\lambda} \rho(\lambda) p(a|x, \lambda) \cdot p(b|y, \lambda) d\lambda \quad (3)$$

Принято? Остальная часть аргументации основана на элементарной математике. Коротко говоря, не все корреляции $p(a, b|x, y)$ могут быть представлены в виде (2) или (3). Следовательно, если наблюдается корреляция, не представимая посредством (2) или (3), то ее нельзя объяснить на основе локальной общей причины. Джон Белл ввел простое неравенство, теперь обобщенное до целого семейства так называемых неравенств Белла, которым с необходимостью удовлетворяют все корреляции вида (2) или (3) [2]. Мы вскоре рассмотрим пример: выражения (6) и (7). Следовательно, нарушение неравенства Белла свидетельствует о корреляции, которая не может быть описана соотношением (2) или (3).

В этом месте стоит обратить внимание на интерпретацию λ . Исторически величины λ мыслились теми физиками, которые надеялись восстановить некоторый тип локальной классической физики, как локальные скрытые переменные. Более современная точка зрения рассматривает λ как физическое состояние систем, описываемых любой возможной будущей теорией. Следовательно, нарушение неравенств Белла говорит нам что-то не только о сегодняшней квантовой физике, но и о любой возможной будущей теории, совместимой с сегодняшними экспериментами. А эти эксперименты, в свою очередь, говорят нам о любой возможной будущей теории, что является редким и примечательным фактом! Заметим далее, насколько параметр λ является неограниченным: он может представлять состояние целой Вселенной, исключая тот факт, что λ не может определять выбор Алисой и Бобом входов x и y . В этом смысле не λ является специально локальной величиной, но все локальные допущения состоят в том, что на систему Алисы не оказывает влияния удаленный выбор Боба, и наоборот, на систему Боба не влияет выбор Алисы.

В качестве простого примера корреляции, которая не может быть объяснена общими причинами, рассмотрим случай, когда Алиса и Боб должны сделать

двоичный выбор, обозначим эти варианты через 0 и 1, т.е. $x, y \in \{0, 1\}$, и следствия выбора также двоичные: $a, b \in \{0, 1\}$. Заметим, что это простейший возможный случай: при меньшем числе входов выбора не будет вообще, а с меньшим числом возможных выходов эти варианты выбора не будут иметь последствий. Рассматриваем пример дальше. Пусть результат Алисы случаен: $p(a|x) = \frac{1}{2}$ при всех значениях входов x ; аналогично, результат Боба случаен: $p(b|y) = \frac{1}{2}$ при всех значениях y . И пусть эти два результата скоррелированы: как только Алиса и Боб оба выбирают 1, т.е. $x = y = 1$, их результаты всегда будут различаться: $p(a \neq b | x = y = 1) = 1$, а при всех других комбинациях входных выбранных значений результаты будут всегда равны. Поскольку $x = y = 1$ если и только если $x \cdot y = 1$, эта простая корреляция может быть задана простыми соотношениями:

$$x \cdot y = 0 \Rightarrow a = b \quad (4)$$

$$x \cdot y = 1 \Rightarrow a \neq b \quad (5)$$

Заметим, что эти соотношения могут быть сведены в простое соотношение $a + b = x \cdot y$ (сложение производится по модулю 2), следовательно, нелокальность не обязательно должна скрываться за сложной математикой: концепции являются сложными, но не облечены в математическую форму. Проанализируем эту корреляцию и приглядимся к объяснению на основе локальной общей причины. С этой целью рассмотрим следующее характеристическое выражение:

$$S = p(a = b | x = 0, y = 0) + p(a = b | x = 0, y = 1) + p(a = b | x = 1, y = 0) + p(a \neq b | x = 1, y = 1) \quad (6)$$

Любая локальная причина λ должна, при всех возможных вариантах выбора x Алисы, определять некоторый выход a (или определять вероятность для результата a), и аналогично для Боба. Например, одна из возможных λ такова, что $a = b = 0$, что бы ни было на входах. Для такой λ наше характеристическое выражение S принимает значение 3: каждый из трех первых членов в (6) равен 1, а последний равен 0. Нетрудно исследовать все возможные детерминистические λ (т.е. те λ , которые определяют один и только один результат на каждой стороне для любых возможных значениях входов). Действительно, имеется только $2^2 \cdot 2^2 = 16$ таких λ . Анализируя эти 16 λ , легко убедиться, что наше характеристическое выражение S никогда не превысит значение, большее 3. А индетерминистические λ также не дадут большего значения (заметим, что они всегда могут быть исследованы в качестве статистических комбинаций этих 16 детерминистических λ). Следовательно, все корреляции, которые могли бы быть объяснены на основе общей причины, удовлетворяют неравенству, которое называется неравенством Белла:

$$S \leq 3 \quad (7)$$

Позвольте мне упомянуть для более подготовленных читателей, что это неравенство в точности эквивалентно хорошо известному неравенству Белла-CHSH: достаточно заметить, что обычное выражение

$$E(x, y) \equiv p(a = b|x, y) - p(a \neq b|x, y)$$

может равным образом быть представлено в виде

$$E(x, y) = 2p(a = b|x, y) - 1 = 1 - 2p(a \neq b|x, y),$$

тогда общий вид неравенства Белла-CHSH-Bell следует из (6) и (7):

$$E(0,0) + E(0,1) + E(1,0) - E(1,1) \leq 2.$$

Закljučая этот раздел, подчеркнем главный вывод: две категории локальных объяснений корреляций могут быть проверены экспериментально. С этой целью следует наблюдать корреляции, нарушающие некоторое неравенство Белла, как, например, (7), убедившись, что два наблюдателя – Алиса и Боб – не могут влиять на результаты другого из них за счет передачи информации со скоростью света (или медленнее). Если такие корреляции в самом деле наблюдаются, не остается ничего иного, как сказать, что эти корреляции не могут быть объяснены на основании чего-то, происходящего в пространстве и времени. Про такие корреляции говорят, что они нелокальны: не существует "локального объяснения", т.е. объяснения, основанного на локальных причинах, которые перемещаются непрерывно от точки к точке.

III. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО УСТАНОВЛЕННАЯ НЕЛОКАЛЬНОСТЬ

В данном разделе я привожу обзор некоторых недавних экспериментов, хотя и опускаю технические подробности. Уже в знаменитом эксперименте Аспека 1982 года было две части, разделенных пространственно-подобным интервалом, а настройки двух приборов (т.е. варианты выбора) определялись "случайным" выбором в последний момент, так что световой сигнал не мог объяснить наблюдаемые корреляции [4]. Надо сказать, что там не было людей, подобных Алисе и Бобу, которые могли бы осуществлять свободный выбор, был только некоторый источник псевдо-случайности, обладавший, правда, некоторой периодичностью, и этот выбор осуществлялся соответствующей электроникой. Для ученых уже это было чрезвычайно убедительно, хотя в дальнейшем эксперименты улучшались, что позволило окончательно устранить "ловушку локальности" [5 - 7].

Все вышеупомянутые эксперименты демонстрировали корреляции, которые нарушали неравенство Белла (7). Однако существует некоторая трудность: во всех экспериментах с фотонами (корпускулами света) часто вообще не бывает результата. Например, Алиса осуществляет свой выбор, но ничего не происходит. Физики понимают, почему это так: фотон где-то затерялся, или детектор не смог зарегистрировать крошечную порцию энергии, переносимую единичным фотоном (нет реального детектора, обладающего 100%-эффективностью), и т.д. Тем не менее, имеется серьезная опасность, именуемая "ловушкой детектирования". Действительно, вполне может быть, что вероятность детектирования может быть подвержена влиянию локальной общей причины λ . Сегодня два эксперимента устранили такую опасность, используя не фотоны, а ионы [8, 9]. Это было необходимым шагом, однако в указанных двух экспериментах расстояние между Алисой и Бобом было недостаточным, чтобы избежать "ловушки локальности". Следовательно, требуется еще эксперимент, который одновременно устранял бы обе ошибки. Большинство физиков не ожидает сюрприза, и я в их числе, но

логическая возможность остается и может быть устранена лишь последующими экспериментами.

Так что мы имеем в результате? Должны ли мы сделать вывод, что Природа нелокальна? Существуют ли на самом деле корреляции, объяснить которые нельзя в рамках концепции пространства-времени, т.е. которые возникают каким-либо образом вне пространства-времени? Очевидно, система требует дальнейших исследований. В остальной части этого раздела я бы хотел проанализировать два локальных объяснения вместе с экспериментальными тестами.

Первое объяснение, я думаю, является крайне интуитивным. Все выглядит так, как если бы две части взаимодействовали "за сценой" [10]; следовательно, поскольку они не могут общаться со световой или досветовой скоростью, давайте предположим, что обмен информацией происходит со сверхсветовой скоростью. Такое допущение не отвечает духу теории относительности Эйнштейна, но это не первый случай, когда общепринятая теория нуждается в ревизии [11]. Более того, нет кристальной ясности в вопросе о том, что такое "взаимодействие за сценой" должно противоречить принципу относительности; действительно, можно вообразить, что подобные коммуникации останутся навсегда скрытыми от людей, т.е. что они не могут контролироваться людьми, и только Природа использует их для реализации корреляций, которые не могут быть объяснены на основе общей причины. Чтобы определить сверхсветовые скрытые коммуникации, требуется определить универсальную привилегированную систему отсчета, в которой определено такое сверхсветовое взаимодействие. И снова, такая универсальная привилегированная система отсчета не очень соответствует духу принципа относительности, но также, очевидно, не находится с ним в противоречии: например, система отсчета, в которой микроволновое космическое фоновое излучение является изотропным, является именно такой системой отсчета. Следовательно, априори объяснение на основе скрытых коммуникаций не является в большей степени неожиданным, чем на основе нелокальности. Это, кстати, прекрасная возможность, которую можно экспериментально проверить. Идея состоит в том, чтобы выполнить измерения на обеих сторонах, т.е. задавать варианты выбора и регистрировать результаты квази-одновременно. Следовательно, любые гипотетические скрытые коммуникации не могут повлиять, ни на результаты Боба, ни на результаты Алисы. Если наблюдаемые корреляции все еще остаются нелокальными, т.е. нарушают неравенство Белла, то либо следует отвергнуть гипотезу о скрытых коммуникациях, либо скорость скрытых коммуникаций больше, чем допускает граничный набор экспериментальных условий, в частности, точность синхронизации и величина расстояния между Алисой и Бобом. Остается еще одна концептуальная трудность: поскольку мы не знаем, какая именно из систем отсчета является привилегированной, то мы не знаем, в какой системе события должны быть одновременными. Филипп Эберхард (Philippe Eberhard) предложил использовать вращение Земли вокруг ее оси, чтобы сканировать все возможные системы отсчета в течение 12 часов. Такие эксперименты были недавно выполнены в районе Женевы [12] и дали строгие границы скорости любого гипотетического скрытого обмена информацией: более чем в 10.000 или в 100.000 раз больше скорости света, в зависимости от технических особенностей (см. также недавнюю статью [13]).

Перед тем, как перейти ко второй альтернативе, позвольте упомянуть, что существует другой способ определить сверхсветовые гипотетические скрытые коммуникации: возможно, существует инерциальная система отсчета наблюдателя, которая определяет эту привилегированную систему. Эта очень интересная система была предложена Антуаном Суаресом (Antoine Suarez) и

Валерио Скарани (Valerio Scarani) в 1997 году [14]. Следствие этого допущения состоит в том, что в соответствии с принципом относительности два наблюдателя (Алиса и Боб), удаляясь друг от друга достаточно быстро, оба могут, каждый в своей инерциальной системе отсчета, выполнить измерение раньше другого, т.е. реализовать так называемую “раньше-раньше (before-before)” ситуацию. Такой эксперимент также уже был выполнен в Женеве [15], а наблюдаемые корреляции все еще оставались нелокальными: гипотезу, предложенную Суаресом и Скарани, можно считать опровергнутой.

Второй путь отклонить вывод “Природа нелокальна” связан с фактом, что в современных экспериментах не так легко определить, когда именно осуществляется выбор и когда именно формируется результат. В идеале, человеческие существа Алиса и Боб должны сделать осознанный выбор, но во всех недавних экспериментах выбор был делегирован генератору случайных чисел (или даже активный выбор вообще не производится, просто утверждается – очень убедительно, по моему мнению – что настройки измерения неизвестны ни причине λ , ни частицам до того момента, когда они реагируют на измерительный прибор). Для меня делегирование выбора генератору случайных чисел является прекрасным решением. В конце концов, все что требуется, это независимость выбора от общего прошлого. Предположение, что общее прошлое Алисы и Боба определяет всю процедуру локального выбора в местах, где расположены Алиса и Боб с помощью подходящей электроники или квантовых устройств, может повлечь некоторый вид гипер-детерминизма, который должен сделать всю науку некоторой иллюзией (можно решить никогда не делать эксперимент, следовательно, и не проверять теорию). Соответственно, давайте сконцентрируемся на идее, что результат на самом деле может быть определен гораздо позже, чем обычно считают [16]. Например, два физика, Диоси (Lajos Diosi) и Пенроуз (Roger Penrose), независимо предположили, что результат формируется только тогда, когда происходит существенное движение некоторой массы (оба предложили точные формулы, связывающие время формирования результата и движение массы, их формулы согласуются с точностью до множителя 2 [17]). Мотивация для этого предложения связана с трудностью сочетания общей относительности и квантовой физики. Следует заметить, что в обычных экспериментах результаты сохраняются в памяти компьютеров, следовательно, там не участвуют движущиеся значительные массы (электроны слишком легки). Следовательно, все наблюдаемые нарушения неравенства Белла могли бы быть объяснены досветовыми взаимодействиями: взаимодействие имеет время в избытке для опережения движущихся масс [18]. К счастью, опять-таки и это допущение может быть проверено. Мы соединили наши датчики с пьезокристаллом, способным перемещать зеркало, и таким способом опровергли объяснение Диоси-Пенроуза для нарушения корреляциями неравенства Белла [19].

Нет сомнений, что в дальнейшем появятся новые допущения. Однако большое количество экспериментальных данных и гигантская предсказательная способность квантовой физики очень убедительно говорят о том, что Природа нелокальна. Так каким же образом физики могут включить этот поразительный вывод в свое взгляд на мир? Проще всего даже и не пытаться это сделать, даже и не задумываться о том, что мы живем во времена огромной концептуальной революции; печально, но большинство физиков, бывших современниками Коперника или Галилея, не увидели в них гигантов, осуществлявших такую же концептуальную революцию. Однако существуют и исключения, их, грубо говоря, две категории: сторонники многомировой концепции и все остальные (я отношусь к последним).

IV. ПРОТИВ МНОГОМИРИЯ

В основном решение, предлагаемое “могомировой” точкой зрения в рамках квантовой физики (это называют также идеей мультиверса), состоит в запрете для экспериментов давать однозначные результаты [20]. Согласно этой точке зрения, все явления должны рассматриваться как квантовые, раз и навсегда. Следовательно, исчезает вся аргументация раздела II: нет свободы выбора и неоднозначности результатов! Действительно, мотивацией для многомирового подхода является не локальность, но тот факт, что современная квантовая теория не дает ответа на вопрос, когда заканчивается квантовое измерение. Следует вывод: квантовое измерение не заканчивается никогда, и все это порождает колоссально сложную суперпозицию состояний. Каким-то образом единственной реальной вещью является пространство Гильберта и линейность уравнения Шрёдингера².

Я не хочу пытаться дальше развивать многомировую точку зрения; из вышеприведенного небольшого рассуждения должно уже быть ясно, что я не симпатизирую ей. Но почему я так пренебрежительно отношусь к ней, хотя открыт для любых других допущений, подобных описанным в предшествующем разделе? Для этого есть две причины. Во-первых, все представленные там допущения имеют объяснительную силу. Более того, они даже могут быть проверены экспериментально (и – что еще лучше для меня – с использованием технологий, которые имеются в моей лаборатории!). Напротив, я не вижу никакой объяснительной силы в теории многих миров: кажется, что она выдвинута только с целью избежать ответа на (возможно провокативные) вопросы. Более того, она базируется на невозможности любой проверки: все ее предсказания тождественны с предсказаниями квантовой механики. Мне это кажется похожим на “подушку для лентяев” – cushion for laziness (англ.) – coussin de paresse (франц.).

Имеется и вторая, решающая, причина отвергать многомировую точку зрения: она не оставляет места для свободы воли. Испытываемое мною удовольствие от свободы воли гораздо больше, чем удовольствие от знания физики. Следовательно, физика никогда не убедит меня в том, что свобода воли – это иллюзия. Скорее напротив, любая физическая гипотеза, несовместимая со свободой воли, противоречит наиболее глубокому опыту, который я имею в отношении свободы воли.

Итак, должен ли я отклонить ньютонову классическую механику, живи я до появления квантовой физики? Вероятно, нет. Действительно, классическая физика оставляет открытой некоторую возможность для свободной воли взаимодействовать с детерминистическими уравнениями Ньютона: свободная воля могла бы устанавливать некоторый потенциал, который мог бы слегка влиять на движение частиц. Это могло бы быть чем-то похожим на шишковидную железу Декарта³. В стандартной квантовой физике такой интерфейс между свободой воли и физикой мог бы быть даже проще: свобода воли могла бы влиять на вероятности квантовых событий. Это, надо сказать, смутная и не оригинальная идея; но важно, что нет очевидного и определенного противоречия между

² Много лет назад я однажды доказывал, что многомировая точка зрения не совместима с принципом “бритвы Оккама” [21]. В ответ я получил следующее: “Бритва Оккама не должна применяться к физике, но должна применяться к уравнению Шрёдингера; к этому красивому уравнению не надо добавлять ничего” [22]. Линейность уравнения Шрёдингера была сочтена более реальной, чем наша физическая Вселенная!

³ Декарт предполагал, что в шишковидной железе заключена душа. – Прим. перев.

свободой воли и стандартной квантовой физикой. Однако ситуация с многомировой точкой зрения иная.

В многомировой концепции все возможности сосуществуют на равноправной основе. Соответственно, существо, пользующееся свободой воли, не может просто взаимодействовать с одним из состояний физического мира, но должно взаимодействовать с невообразимо большой суперпозицией всех возможных состояний! Но вероятнее всего, если конкретное взаимодействие с одним из возможных состояний вызывает нужный эффект, то же самое конкретное взаимодействие с большинством других – одинаково реальных, согласно многомировой точке зрения – состояний вызовет случайные и неконтролируемые эффекты. Следовательно, представляется, что нет способа сохранить возможное окно для свободы воли в многомировой концепции. Таким образом, я думаю, что современные эксперименты исключают многомировую интерпретацию.

Возможный способ обойти этот довод мог бы состоять в том, чтобы предположить, что существо со свободой воли также пребывает в состоянии гигантской суперпозиции, и что ветви этой суперпозиции соответствуют ветвям суперпозиции физических миров. Следовательно, в каждой ветви может быть справедливым случай классической механики Ньютона (и надежда сохраняется).

Но такой "обходной" довод является иллюзией. Действительно, отсюда следовало бы, что существо, обладающее свободой воли, никогда не принимало бы одного и только одного решения, не испытывало бы одного и только одного следствия своего выбора: оно должно было бы осуществлять суперпозицию всех выборов и испытывать все возможные последствия. Короче говоря, у такого существа вовсе бы не было свободы выбора.

Суммируя, приходим к выводу, что вечные суперпозиции и запутывание, т.е. многомировое "решение" проблемы нелокальности не совместимо с нашим наиболее личным опытом как существ, обладающих свободой воли. Я делаю тот или иной выбор, который приводит к тем или иным последствиям; следовательно, суперпозиции и запутывание должны когда-то заканчиваться. А тот факт, что современная физика не знает, где они прекращаются, вовсе не противоречит этому выводу.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы видели, что любое явное нарушение неравенства Белла влечет за собой тот факт, что все будущие теории должны предсказывать нелокальные корреляции. В этом смысле Природа является нелокальной сама по себе (раздел II). Но как это может быть? Как природа осуществляет этот фокус [23]? Оставляя в стороне некоторые технические вещи, подобные сочетанию ловушек детектирования и локальности, очевидный ответ, уже данный Джоном Беллом [10], заключается в том, что существуют некоторые скрытые коммуникации, происходящие за сценой. Первое значение выражения "за сценой" может быть "за пределами современной физики", в частности, за пределами скорости, установленной теорией относительности. Мы видели, как эта интересная идея может быть проверена экспериментально (раздел III), и как трудно совместить ее с идеей отсутствия коммуникаций (no-signaling) (приложение В). Следовательно, настало время серьезно отнестись к тому, что Природа способна продуцировать нелокальные корреляции [24]. Можно сформулировать это различными способами:

1. Бог каким-то образом "играет в нелокальные кости": в некоторых местах случайное событие может проявлять себя.

2. Нелокальные корреляции просто происходят каким-то образом вне пространства-времени, в том смысле, что не существует пространственно-временного описания, которое могло бы ответить на вопрос, как именно это происходит (см. приложение А).

3. Коммуникации за сценой происходят вне пространства-времени.

4. Действительность осуществляется в конфигурационном пространстве, а то, что мы видим, является всего лишь тень в 3-мерном пространстве (это может быть близким к описанию, даваемому стандартной квантовой физикой) [25].

Следует признать, что ситуация серьезна в такой степени, что, очевидно, должны быть предприняты дальнейшие исследования. Однако в этом месте мы должны иметь смелость серьезно рассматривать возможность того, что Природа действительно истинно и глубоко нелокальна⁴.

Здесь нам следует спросить себя, действительно ли это новый вывод, или сходные выводы вытекают из самого индетерминистического характера квантовой физики? В самом деле, можно было бы аргументировать, что индетерминизм обуславливает происхождение причины где-то в другом месте, т.е. где-то вне пространства-времени. Но это звучит не слишком убедительно. Я вполне могу допустить, что определенные объекты могут иметь внутреннее предрасположение к спонтанному стохастическому акту. Далее, стохастичность сама по себе могла бы действовать чисто локально. Следовательно, в лице нелокальности мы сталкиваемся с чем-то совершенно иным.

Одна логическая возможность целиком отвергнуть этот аргумент – и, следовательно, вывод "Природа нелокальна" – предусматривает запрет возможности свободного выбора входных вариантов и/или регистрации измеренных результатов. Можно было бы привлечь некий гипер-детерминизм, такой, что состояние Вселенной λ с необходимостью определяет входы x и y , но это кажется мне целым научным предприятием. Действительно, при таком тоталитарном детерминизме не должно быть способа проверки физических теорий. Наоборот, можно было бы наложить запрет на существование результатов измерений, или, как минимум, потребовать, чтобы их результаты становились определенными в течение гораздо большего времени, чем принято думать. Пример, обсуждавшийся в разделе III, мог состоять в том, что результат измерения определяется только по результатам существенного движения массы. Такое интересное объяснение наблюдаемой корреляции может быть экспериментально отвергнуто. Другой пример может состоять в том, что измерение заканчивается только тогда, когда человек осознает его результаты ... но тогда, как сформулировал Джон Белл, "означает ли это, что данный человек должен иметь научную степень (does that human need to have a PhD)?" Ясно, что подобные идеи плохо определены, хотя они предполагают дальнейшие исследования. В конце концов, дойдя до предела, можно доказывать вместе со сторонниками многомировой теории, что измерения не имеют результатов, что все возможные результаты потенциально сохраняются в некотором огромном состоянии суперпозиции, содержащем в себе на равной основе все возможности. Я доказывал в разделе IV, что такая предельная точка зрения не интересна и заведомо неверна, так как она несовместима со свободой воли.

⁴ Многим физикам не нравится такой вывод, они боятся, что отсюда следует возможность сверхсветовых коммуникаций. Позвольте мне подчеркнуть, что нелокальность не обязательно влечет за собой возможность сверхсветовых коммуникаций. В действительности большинство специалистов принимают парадигму "нелокальность без сверхсветовых коммуникаций".

Следует сказать, что до недавнего времени не было физических теорий, способных интересным образом включить в себя свободу воли; однако многомировой подход кажется первым, который полностью не совместим с нашим наиболее личным опытом в отношении свободы воли.

Приложение А

Что может значить утверждение “Нелокальные корреляции возникают вне пространства-времени”?

В физике мы развиваем математические модели, которые позволяют нам вычислять результаты экспериментов или вероятности этих результатов, т.е. мы имеем дело с уравнениями. Это, однако, лишь половина теоретической физики. Мы также разрабатываем описания (stories) того, как это все происходит. Например, луна притягивает воду океанов и тем самым вызывает приливы. Или мы описываем соотношение между температурой и давлением газа примерно в таком виде: газ состоит из триллионов маленьких частиц, которые движутся во всех направлениях; чем выше температура газа, тем быстрее в среднем движение частиц; когда частицы ударяются в стенки сосуда, содержащего газ, они прикладывают к нему небольшую силу, следовательно, совместное действие триллионов частиц создает некоторое давление на сосуд; в конечном счете, давление больше, когда больше средняя скорость частиц. Кто начинал изучать физику, используя только уравнения и не прибегая к описаниям? Очевидно, что в физике описания нужны в той же мере, что и уравнения. Поэтому мы располагаем своего рода каталогом возможных средств, позволяющих излагать наши описания. До недавнего времени все наши описания производились в контексте пространства-времени. Но этот набор описаний эволюционирует вместе с эволюцией наших теорий параллельно с эволюцией набора математических средств; см., например, средства, которые используются сегодня, чтобы говорить о деформации пространства-времени в общей теории относительности.

Однако, как мы видели в разделе II, для нелокальных корреляций отсутствуют физические описания: их нет в нашем наборе описаний. Следовательно, мы обычно рассуждаем следующим образом: "событие А влияет на событие В", или: "событие А оказывает призрачное влияние на расстоянии (a spooky action at a distance) на событие В", или: "событие А вызывает коллапс волновой функции в точке В". Но мы знаем, что это неправильно: нет временного упорядочения для событий А и В; следовательно, нет подходящего описания во времени. Более того, расстояние между А и В не играет роли; следовательно, и расстояние не должно участвовать в нашем описании. Обычная реакция на такое положение дел состоит в том, чтобы начать искать какое-либо описание, т.е. некоторым образом искать возможность придать смысл нелокальным корреляциям, понять их. Некоторые физики объявили, что математика здесь слишком сложна, поэтому в данном случае мы просто не можем дополнить уравнения подходящим физическим описанием. Но мы видели, что математика как раз тривиальна: это не может служить объяснением!

Честно говоря, мы нуждаемся в расширении нашего набора описаний. Трудность состоит в том, что новые средства должны включать в себя странные свойства, которые не могут быть описаны в контексте пространства-времени. Я уверен, что благодаря будущим квантовым технологиям эти новые элементы нашего набора инструментов будут широко использоваться будущими поколениями. Позвольте мне привести один пример того, как это новое может

выглядеть. Представим себе пару ящиков⁵, соединенных между собой нематериальной связью (immaterial link), см. рис. 2. Каждый ящик может воспринимать один входной параметр, обозначаемый x для первого ящика и y – для второго; как только ящик воспринимает входной сигнал, он формирует результат, обозначаемый через a или b для первого и второго ящика соответственно. Для простоты представим себе, что входы и выходы имеют двоичную природу: и входы, и выходы – это просто биты, т.е. "0" или "1". Локально результаты являются случайными: локально ящики генерируют просто шум, но мы предположим, что результаты удовлетворяют следующему условию: $a + b = xy$ (сложение производится по модулю 2). Это идентично соотношениям (4) и (5). Данное новое средство представляется нам незнакомым, но оно весьма простое. Более того, в нем заключена самая суть: условие $a + b = xy$ выполняется независимо от временного порядка, в котором поступают входные сигналы, и от расстояния между двумя ящиками; следовательно, корреляция $p(a, b|x, y)$ является нелокальной (т.е. не может быть описана с помощью общей локальной причины, поскольку нарушает неравенство Белла (7)). Данное средство хорошо знакомо специалистам и называется "нелокальным ящиком (nonlocal box)" [28]. Оно, подобно нелокальным квантовым корреляциям, обладает важным свойством: оно не может быть клонировано [29] (причем доказательство весьма просто – еще один замечательный сюжет), соответственно, можно также рассказать простую историю, связанную с квантовой криптографией [30]. Наконец, позвольте мне упомянуть, что с помощью такого нелокального ящика могут быть воспроизведены все квантовые корреляции, соответствующие двум максимально запутанным кубитам [31], а следовательно, нелокальный ящик содержит достаточно нелокальности, чтобы охватить самые распространенные корреляции, содержащиеся в квантовой физике. Однако, чтобы исключить недоразумения, я должен добавить, что этого нового средства недостаточно, чтобы описать квантовую телепортацию [32].



Рисунок 2: Пример возможного нового средства для описания нелокальных корреляций. Входы x и y и результаты a и b все являются двоичными величинами (битами). Как только какой-либо из входных параметров вводится в ящик, то формирует случайный результат. Но при этом для результатов выполняется условие: $a+b = xy$ (сложение производится по модулю 2). Это условие выполняется независимо от временного порядка поступления входных значений и от расстояния между Алисой и Бобом. Как объясняется в тексте, это простой и мощный пример нелокальной корреляции.

Следовательно, требуется еще больше средств. Но поиски этих новых средств, однако, еще не стали важным направлением физики. Можем мы реально ожидать, что, несмотря на это, физика будет прогрессировать и соответствовать

⁵ Термин "ящик" (box) используется по аналогии с "черным ящиком". – Прим. перев.

общественному запросу, как это должно быть, если мы предоставляем ей возможность использовать новые описания?

Приложение В

Скрытые коммуникации без скрытых параметров

Эксперименты могут только установить границы скорости при возможных сверхсветовых скрытых коммуникациях. А как насчет бесконечной скорости? И позволяет ли теоретическая аргументация отвергнуть возможность скрытых коммуникаций с произвольно большой, но конечной скоростью?

Позвольте мне сначала коротко прокомментировать идею скрытых коммуникаций с бесконечной скоростью. Откровенно говоря, мне трудно придерживаться интерпретации, содержащей такое допущение: из него вытекает, что все что угодно может мгновенно влиять на все остальное [26].

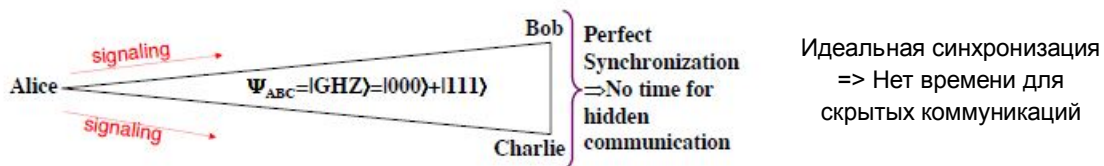


Рисунок 3: В такой конфигурации, если все корреляции обусловлены скрытыми коммуникациями за сценой, то Алиса сможет послать Бобу/Чарли сверхсветовой сигнал.

Интересно, однако, что второй вопрос имеет по крайней мере частичный и положительный ответ. Действительно, можно доказать, что имеются 3-частичные сценарии, в которых любое объяснение удаленных корреляций, основанных чисто на скрытых коммуникациях (с любой конечной скоростью), следовательно, без какой-либо дополнительной локальной переменной λ , должно допускать сверхсветовую сигнализацию [27]. Аргументация следующая [25]. Представим себе, что три игрока – Алиса, Боб и Чарли – совместно разделяют GHZ-состояние из 3 кубитов: $(|000\rangle + |111\rangle)/\sqrt{2}$. Алиса находится далеко от Боба и Чарли. В то же время Боб и Чарли не так далеки один от другого, но все же интервал между ними (их результатами), см. рис. 3. Далее, представим, что Боб и Чарли синхронизируют происходящие в их частях события так хорошо, что скрытые коммуникации между ними невозможны, поскольку на эти коммуникации и взаимное влияние между ними просто не остается времени. Следовательно, если Алиса ничего не делает, в то время как Боб и Чарли измеряют свои кубиты в стандартном базисе $\{|0\rangle, |1\rangle\}$, то они наблюдают случайные и некоррелированные результаты. Действительно, все кубиты локально оказываются в случайном состоянии и, по предположению, нет времени для какого-либо влияния (даже при, возможно, сверхсветовой, хотя и конечной, скорости). Если, однако, Алиса осуществляет измерение, также в стандартном базисе, за достаточно длительное время до того, как это делают Боб и Чарли (в привилегированной системе отсчета), так что скрытые сигналы от Алисы успевают прийти к Бобу и Чарли, то результаты Боба и Чарли оказываются скоррелированными: они оба равны результату Алисы. Следовательно, если Боб и Чарли сравнивают свои результаты, то они знают, производила ли Алиса свое измерение, или нет, т.е. имеет место передача сигнала от Алисы к (Бобу, Чарли). Заметим, что сравнение

результатов Бобу и Чарли занимает некоторое время, но, поскольку Алиса может находиться произвольно далеко, существует очевидная возможность того, что сигнал от Алисы к (Бобу, Чарли) является сверхсветовым.

Вышеприведенный аргумент иллюстрирует, как трудно модифицировать квантовую физику, сохраняя нелокальность без возможности сигнализации (signaling). Однако указанный аргумент имеет ограниченное применение: легко устранить возможность сигнализации, добавляя некоторые локальные переменные λ и предполагая, что если скрытые сигналы не успевают дойти, то результаты определяются этими дополнительными λ . Таким образом, желательно расширить аргумент, включив смешанные модели, т.е. смесь скрытых коммуникаций и дополнительных локальных переменных λ . Было бы замечательно показать, что любая такая смешанная модель с необходимостью использует возможность сигнализации в некотором многочастичном сценарии. Я считаю такую исследовательскую программу интересной.

Ссылки

- [1] For a beautiful account of the history of quantum non-locality read: Louisa Gilder, *The Age of Entanglement*, Alfred A. Knopf, 2008.
- [2] J.S Bell, *Physics* 1, 195-200 (1964); reprinted in: J.S. Bell, *Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics: Collected papers on quantum philosophy*, (Cambridge University Press, Cambridge, 1987, revised edition 2004).
- [3] См. пример, показывающий необходимость этого допущения, в: I. Pitowsky, *Resolution of the EPR and Bell paradoxes*, *Phys. Rev. Lett.* 48, 1299, 1982.
- [4] A. Aspect, P. Grangier, and G. Roger, *Phys. Rev. Lett.* 49, 91 (1982).
- [5] Tittel W., Brendel J., Zbinden H., and Gisin N. *Violation of Bell Inequalities by Photons More Than 10 km Apart*. *Phys. Rev. Lett.* 81, 3563-3566 (1998); *ibid Phys. Rev. A*, 59, 4150-4163 (1999).
- [6] Weihs G., Jennewein T., Simon C., Weinfurter H., and Zeilinger A. *Violation of Bell's Inequality under Strict Einstein Locality Conditions*. *Phys. Rev. Lett.* 81, 5039-5043 (1998).
- [7] N. Gisin and H. Zbinden, *Phys. Lett. A* 264 103-107 (1999).
- [8] Rowe M. A. et al. *Experimental violation of a Bell's inequality with efficient detection*. *Nature* 409, 791-794 (2001).
- [9] Matsukevich D. N. et al. *Bell inequality violation with two remote atomic qubits*. arXiv:0801.2184.
- [10] J.S. Bell in *The Ghost in the Atom*, eds P.C.W Davies and J.R. Brown, Cambridge University Press, pp 45-57 (1993).
- [11] N. Gisin, *Can relativity be considered complete ? From Newtonian nonlocality to quantum nonlocality and beyond*, quant-ph/0512168. См. русский перевод: "От нелокальности Ньютона к квантовой нелокальности и далее. Может ли теория относительности считаться полной?" по ссылке: http://timeorigin21.narod.ru/rus_translation/Gizin.pdf
- [12] D. Salart et al., *Nature* 454, 861 (2008).
- [13] B. Cocciaaro, S. Faetti and L. Fronzoni, *Phys. Lett. A*, in press 2010, arXiv:1006.2697
- [14] A. Suarez & V. Scarani, *Phys. Lett.A* 232, 9 (1997).
- [15] N. Gisin et al., *Annal. Phys.* 9 831 (2000); H. Zbinden et al., *Phys. Rev. A* 63, 022111 (2001); A. Stefanov et al., *Phys. Rev. Lett.* 88, 120404 (2002); A. Suarez, quant-ph/0110124.
- [16] J.D. Franson, *Phys. Rev. D* 31 2529 (1985).
- [17] см., например, S. Adler, *J.Phys. A*40, 755 (2007).

- [18] A. Kent, arXiv:gr-qc/0507045.
- [19] D. Salart et al., Phys. Rev. Lett. 100, 220404 (2008).
- [20] Длинный список различных версий многомировой точки зрения см. A. Kent, arXiv:0905.0624
- [21] N. Gisin and I.C. Percival, Phys. Lett. A 175 144-145 (1993).
- [22] H.D. Zeh, Phys. Lett. A 172 189-192 (1993).
- [23] N. Gisin, Science, 326, 1357-8 (2009).
- [24] Некоторые считают, что неверно предположение о реализме. Но я не вижу, как может спасти локальность? Более того, реализм часто противостоит детерминизму, забавный терминологический вывод, см.: N. Gisin, Non-realism: deep thought or a soft option ?, Found. Phys., in press (2010), quant-ph/0901.4255 См. русский перевод: "Не-реализм": глубокая идея или всего лишь один из возможных вариантов? Доступно по ссылке:
http://timeorigin21.narod.ru/rus_translation/Gisin_0901_4255v1_rus.pdf
- [25] Речь на церемонии по случаю присуждения первой премии имени Джона Стюарта Белла
<http://hosting.epresence.tv/IOS/1/watch/45.aspx>
- [26] Garisto R. What is the speed of quantum information? arXiv:quant-ph/0212078.
- [27] V. Scarani and N. Gisin, Brazilian J. of Physics 35, 328-332 82005). См. также L.C. Ryff, arXiv:0903.1076.
- [28] Иногда это также называют PR-ящиками по именам изобретателей: S. popescu and D.Rohrlich, Found. Phys. 24, 379 (1994).
- [29] Ll. Massanes, A. Acin and N. Gisin, Phys. Rev. A 73, 012112 (2006).
- [30] A. Acin, N. Gisin and Lluís Masanes, Phys. Rev. Lett. 97, 120405 (2006).
- [31] N.J. Cerf et al., Phys. Rev. Lett. 94, 220403 (2005).
- [32] A.J. Short, S. Popesci and N. Gisin, Phys. Rev. A 73, 012101 (2006).