

Теорема Белла о скрытых параметрах утверждает, что если квантовая динамика системы спинов в эксперименте Эйнштейна-Подольского-Розена управляется локальными скрытыми параметрами, то для величины корреляции измеренных значений проекций спинов на различные направления должны выполняться определенные неравенства, которые известны как неравенства Белла. Так как эксперименты показывают, что неравенства Белла в действительности нарушаются, то на основании этого обычно делается вывод, что локальные скрытые параметры, как возможная основа онтологии квантовой теории, исключаются наблюдениями. В другой формулировке этот вывод известен как утверждение о невозможности локального реализма в квантовой теории. В настоящей работе показано, что этот вывод нуждается в уточнении.

Доклад основан на анализе явного контр-примера к теореме Белла, который строится следующим образом.

Под локальностью скрытых параметров в теореме Белла понимается следующее. Пусть есть две (квантовые) системы A и B , результаты измерений над которыми зависят, соответственно, от значения скрытых переменных a и b . Предположим, что над системами измерения производятся таким образом, что события, отвечающие этим измерениям, разделены пространственно-подобным интервалом, то есть информация о результатах измерения в одной системе не может повлиять на результаты измерения в другой системе за счет передачи сигналов со скоростью, не превышающей скорость света. Тогда скрытые переменные a и b называются локальными в том случае, когда результат измерения над системой A не может зависеть от скрытых параметров системы B и наоборот. Иными словами, результаты измерений описываются некоторыми функциями $A(a)$ и $B(b)$, но функции вида $A(a,b)$ и $B(b,a)$ исключены.

Рассмотрим теперь обычный компьютер. Будем для простоты описывать компьютер состоянием его памяти. Память компьютера представлена набором двоичных ячеек — триггеров, каждый из которых может рассматриваться как классическая система с двумя состояниями. Триггеры компьютера представляют собой физические устройства, распределенные определенным образом в пространстве. Совершенно очевидно, что, с принципиальной точки зрения, можно произвести измерение состояния двух триггеров таким образом, что события измерений будут разделены пространственно-подобно (или будут даже просто одновременны в лабораторной системе), причем результат каждого измерения определяется исключительно состоянием измеряемого триггера и результаты измерения над разными триггерами не влияют друг на друга. С физической точки зрения состояния триггеров компьютера являются типичным примером локальных переменных, причем эти переменные имеют чисто классический характер в том смысле, что результат измерения всегда определяется состоянием триггера совершенно однозначно. То есть в данном случае можно говорить не только о наличии локального реализма, но и наличии классического локального реализма. Именно такой вид локального реализма обсуждается в докладе.

Квантовая теория в математическом отношении является полностью вычислимой теорией. Иначе говоря, поведение квантовой системы, предписываемое квантовой механикой, может быть предсказано со сколь угодно высокой точностью чисто алгоритмическим путем, с помощью выполнения некоторой механической процедуры (программы) на компьютере. Следовательно, с принципиальной точки зрения, любое квантовое поведение может быть со сколь угодно высокой точностью промоделировано на компьютере. В частности, может быть промоделировано и поведение спиновых систем, нарушающих неравенства Белла. Один простой пример такой программы был реализован автором, и он будет использован в докладе.

Вычислимость квантовой теории приводит к выводу, что компьютер определенным эмерджентным образом может демонстрировать квантовое поведение. Если представить себе на минуту, что вместе с фрагментом квантового мира на компьютере был промоделирован и наблюдатель, и при этом моделирование имеет достаточно совершенный характер, то такой наблюдатель не сможет обнаружить, что он является составной частью математической модели и не заподозрит, что наблюдаемое им квантовое поведение спиновых систем, нарушающее неравенства Белла, «ненастоящее». Конечно трудно относиться серьезно к полному компьютерному моделированию наблюдателя, но действительно можно построить компьютерные модели несложных приборов вместе с наблюдаемыми ими квантовыми системами, причем такие компьютерные модели приборов будут регистрировать квантовое поведение без всякого ущерба. Однако, в основе этого наблюдаемого квантового поведения явно и несомненно лежит работа компьютера, которая описывается в существенно локальных и классических терминах. Эта ситуация может рассматриваться как контр-пример к теореме Белла: состояние компьютера играет роль классических локальных скрытых переменных для демонстрируемой системой квантовой динамики. Теорема Белла такую возможность исключает. Что является причиной возникшего противоречия?

Причиной возникшего противоречия является слишком буквальное и ограниченное понимание локального реализма. Обычный классический компьютер представляется системой локальных классических параметров, с этим невозможно спорить. Но он представим системой таких параметров с нашей, человеческой, внешней по отношению к компьютерной программе точки зрения. Однако компьютерная программа создает свою собственную модельную реальность, и пространство-время, которое существует в этой реальности, не совпадает с нашим реальным пространством-временем. Локальность физических состояний компьютера может не иметь никакого отношения к понятию локальности, которое может сформироваться в реальности, промоделированной этим же компьютером. Гипотетические моделированные наблюдатели заключили бы, что локальная реальность в их понимании исключена результатами экспериментов. На примере реальной программы, моделирующей эксперимент Эйнштейна-Подольского-Розена со спинами, явно показано, что локальные состояния компьютера с уровня понятий компьютерной программы действительно воспринимаются как нелокальные, то есть результаты измерений описываются функциями вида $A(a,b)$, не соответствующими представлению о локальном реализме.

То, что физическая локальная структура компьютера с концептуального уровня выполняемой на нем программы в общем случае недостижима и не имеет для программы никакого значения, можно понять из самых общих соображений. Действительно, работа любого вычислительного устройства в принципе эквивалентна работе некоторой машины Тьюринга, и структура машины Тьюринга представляет максимально детальный уровень реальности для выполняемой на ней программы. Но даже в самое детальное описание машины Тьюринга не входят никакие пространственно-временные характеристики локализации этого механизма, поэтому они оказываются за рамками «реальности», доступной программе. Более того, машины, имеющие различную пространственно-временную организацию и работающие на разных принципах, могут выполнять одну и ту же программу. Для структуры виртуальной реальности, реализуемой программой, физические характеристики компьютера не имеют никакого значения.

Таким образом, в рассмотренных примерах с моделированием квантовой динамики на компьютере возникают два разных локальных реализма. Один локальный реализм является внешним по отношению к виртуальной реальности, моделированной на компьютере, и он адекватен реальному локальному устройству классического компьютера. Другой локальный реализм характеризует внутреннюю виртуальную реальность компьютерной программы, и квантовая динамика, реализуемая в ней, не обладает свойством такого внутреннего

локального реализма в точном соответствии с теоремой Белла. Таким образом, понятие локального реализма оказывается относительным: разным «концептуальным слоям реальности» отвечает свой собственный локальный реализм, и эти локальные реализмы могут между собой никак не взаимодействовать. Понятие локального реализма оказывается относительным: вместе с ним должен упоминаться тот концептуальный слой реальности, к которому он относится.

В наших примерах пока было всего два концептуальных слоя реальности: слой виртуальной реальности компьютерной программы и слой «физической реальности». Однако логически ниоткуда не следует, что этим все и ограничивается. Далее можно рассуждать на основании аналогии с уже выявленными фактами.

Наблюдаемая нами в экспериментах реальная квантовая динамика в принципе может быть эмерджентным проявлением некоторой более глубокой классической и локальной реальности, подобно тому, как квантовая динамика, моделируемая нами на компьютере, является эмерджентным проявлением классического локального реализма триггерных схем компьютера. Экспериментальные наблюдения нарушения неравенств Белла и теоремы квантовой механики о невозможности локальных скрытых переменных вовсе не закрывают возможность локальной реальности на более глубоком уровне, так как они относятся только к реальности верхнего уровня, которая может иметь эмерджентный характер по отношению к более глубокой локальной реальности. Так что распространенное убеждение, что в основе квантового поведения не может лежать классический локальный реализм, основано на упрощенном понимании локального реализма. Теоремы о невозможности локального реализма в квантовой теории закрывают только его возможность «в текущем концептуальном уровне», и это является необходимым уточнением формулировки всех этих теорем.

Рассмотрим теперь такой (пока) мысленный эксперимент, который, в принципе, может быть реализован и в железе. Пусть наш обыкновенный классический компьютер моделирует некоторую достаточно сложную квантовую систему (вместе со всей присущей ей нелокальностью), причем в таком состоянии, когда для квантовой системы или для каких-то ее фрагментов начинает хорошо работать классический предел. С использованием полученных таким способом классических блоков построим виртуальный классический компьютер. Заставим теперь эту виртуальную машину снова моделировать динамику некоторой квантовой системы. По отношению к этой последней виртуальной квантовой системе верхнего уровня имеется более фундаментальный классический уровень с локальным реализмом (представленный виртуальным классическим компьютером), однако в действительности и сам этот локально-классический уровень реальности является эмерджентным проявлением нелокальной квантовой динамики, которая, в свою очередь, опять является виртуальной и эмерджентной (моделируется нашим физическим компьютером). В этом квазиреалистичном примере возникает целый многоуровневый сэндвич из различных реальностей, причем они попеременно характеризуются наличием и отсутствием локального классического реализма. Из этого примера ясно видно, что многослойная реальность с различными типами локальности логически возможна, поэтому нельзя исключить, что подобная многослойная структура из реальностей с различными типами локальности характерна и для нашего реального мира. Наблюдаемый мир является в этой модели верхним слоем бутерброда, но, как теперь понятно, мы сами имеем возможность строить на нем новые слои с использованием компьютерного моделирования. Подчеркнем, что пока нам неизвестны какие-либо реальные указания на то, что такая многослойная квантово-классическая структура реальности действительно имеет место, но нельзя упускать из виду, что с чисто логической точки зрения такая возможность определенно существует. Таким образом, в основе онтологии квантовой теории может лежать не просто локально-классический реализм, как мы уже установили, но многослойная или даже бесконечно-слойная структура реальностей, каждая из которых характеризуется своим типом

локальности.

Предположим, что в основе квантового поведения действительно лежит классический локальный реализм подобно тому, как в основе моделируемой квантовой динамики может лежать классический компьютер. Не следует понимать эту аналогию слишком буквально: фундаментальный локально-классический процесс вовсе не обязан быть вычислением и даже не обязан быть похож на вычисление. Не надо представлять себе Верховного Программиста, который запрограммировал этот вычислительный процесс. Аналогия только показывает, что квантовый мир может быть каким-то эмерджентным явлением по отношению к некоторому сорту реальности, характеризующемуся классичностью и локальностью в кажущемся противоречии с теоремой Белла — это логически допустимая возможность. Слишком буквальная аналогия с вычислительным процессом приводит к неприятным парадоксам. Так, например, простые оценки показывают, что для того, чтобы реализовать классический компьютер, пригодный для точного математического моделирования всего одного многоэлектронного атома, не хватит объема всей видимой части Вселенной, даже если в каждой планковской ячейке пространства объемом 10^{-99} см³ помещать по одному биту памяти такого компьютера. Откуда же тогда взять объем пространства для размещения классического компьютера, моделирующего всю нашу квантовую Вселенную? Но ошибкой было бы считать, что «вместилищем» для локально-классического процесса, лежащего в основе всей реальной квантовой динамики, должно быть нечто, напоминающее обычное физическое пространство. Вот нет. Например, такая локально-классическая сущность может оказаться гораздо больше похожей просто на абстрактную математическую информацию, поэтому вопрос о «вместилище» может даже не стоять. Можно, в частности, обратить внимание на то, что математическая информация обладает определенными чертами «классичности». Для квантового мира характерно, что получение о нем какой-то информации разрушает изучаемую систему (или просто неустранимо возмущает ее состояние). Напротив, в классических системах измерения могут быть проведены без возмущений или с возмущениями, которые в принципе могут быть точно учтены. Информацию о математических объектах мы получаем путем вычислений, которые являются в каком-то смысле аналогом измерения для мира математики. Вычисления не возмущают и не разрушают математические объекты, на которые они направлены (что совсем не тривиально и должно рассматриваться как обобщение опыта). В этом смысле математические вычисления очень похожи на измерения над классическими системами.

Последний обсуждаемый вопрос связан с потенциальной познаваемостью классической локальной реальности, лежащей в основе квантовой теории, если таковая действительно существует. Здесь снова полезна аналогия. Предположим, что на классическом компьютере моделируется квантовый мир, в котором имеются, в том числе, и наблюдатели. Как уже упоминалось, даже самые скрупулезные поиски не смогут завести этих наблюдателей дальше, чем логическая структура машины, лежащая в основе симуляции. Физическая структура машины лежит за пределами возможности познания наблюдателей, живущих в модельной реальности. Но, изучив логическую структуру машины, наиболее прозорливые из наблюдателей могут догадаться, что эта структура существует неспроста, и что за ней стоит некоторый физический агент, о строении которого могут быть сделаны разумные предположения. На основе этих предположений могут быть сделаны и предсказания, которые могут быть проверены. В этом смысле физическая природа компьютера, в котором существует эта квантовая симуляция с наблюдателями, для симулированных наблюдателей по крайней мере частично может быть познаваема. Точно также, онтология классически-локальной реальности, которая, быть может, лежит в основании квантового мира, может быть познаваема для нас, даже если она окажется вне досягаемости прямых наблюдений.