

Неравенство Белла и возможные интерпретации его нарушения

Лектор: Хренников Андрей Юрьевич

Аннотация

Квантовая нелокальность несомненно является самой популярной темой современной квантовой физики. Многие интригующие свойства квантовой теории информации напрямую связываются с квантовой нелокальностью. Квантовая нелокальность получается из неравенства Белла, как единственная альтернатива «смерти реальности» – невозможности объективной интерпретации результатов наблюдений. С другой стороны, квантовая теория поля описывается локальным формализмом. Как разрешить это противоречие? Предлагается детальный анализ вероятностной структуры аргументов Белла. Показано, что его рассуждения основаны на очень серьёзном предположении, а именно возможности реализовать набор наблюдаемых, которые нельзя измерить совместно, с помощью случайных величин, заданных на едином вероятностном пространстве. Это предположение в рамках ЭПР-эксперимента не совсем обосновано. Итак, вместо альтернативы: либо гибель реальности, либо нелокальность, мы получаем третью возможность: вероятностная несовместимость некоторых квантовых наблюдаемых^[6].

Информация о докладчике



Хренников Андрей Юрьевич – доктор физико-математических наук, профессор, по образованию математик. В 1994 году уехал в Германию, затем в Швецию. Последние 10 лет директор Междисциплинарного центра математического моделирования, университет Вексио, юг Швеции^[7].

Информация о составителе реферата



Барышников Владислав Дмитриевич – студент 3 курса МФТИ, факультет аэрофизики и космических исследований, специальность – прикладная физика и математика. Призер окружной олимпиады школьников по физике (г. Нижневартовск). Преподаватель ЗФТШ при МФТИ. Репетитор по физике и математике с 2008 года. Преподаватель математики в ФТК с 2010 года.

Об интересе к квантовой теории

Основной стимулятор, основной двигатель – это развитие квантовой теории информации. Надежда, что будут построены квантовые компьютеры, надежда, что будет разработана квантовая криптография, что между банками будут передавать информацию, закодированную с помощью фотонов. Все это очень стимулирует интерес. А почему? Потому что ситуация в квантовой механике такова, что проблемы которые остались непонятыми в 20-30 годы, собственно говоря, непонятны и сейчас. Есть «храбрые» люди, которые говорят что все понятно, все решено. Например, Цален и Герлан очень активно сейчас пропагандируют линию, что нового понимания квантовой механики, основанного на квантовой нелокальности, нет. Но точка зрения докладчика состоит в том, что если мы возьмем 1930 и 2008 год, то сейчас люди понимают квантовую механику не намного лучше и даже хуже, потому что отцов основателей уже нет, чем это было в 1930 году. Докладчик имеет в виду именно понимание основ. За это время уже был создан гигантский математический аппарат в квантовой механике – теория самосопряженных операторов, были найдены спектры многих гамильтонианов. Но были сделаны эксперименты, многочисленные эксперименты, если в 30-е годы мог кто-то надеяться (как Эйнштейн), что могут быть эксперименты, которые покажут нарушение законов квантовой механике, то сейчас уже большинство людей не верят, что что-то такое можно сделать, во всяком случае без какого-то глобального изменения. Но в то же время понимание формализма квантовой механике не стало лучше, ситуация парадоксальная! В никакой области науки ничего подобного нет! Есть отличный формализм, который работает замечательно, все его предсказания осуществляются на эксперименте, но что

стоит за ним – никто не понимает! А Нильс Бор вообще оспаривал такую постановку очень просто, он говорил, что вот такая природа. До этого мы использовали один язык в классической физике, а теперь в квантовой физике мы используем другой, и мы не поймем его на бытовом уровне. Это просто новый язык. Но тем не менее многие люди пытаются понять квантовую механику и здесь дело совершенно парадоксально! Существует гигантский проект по квантовым компьютерам, на него выделяются огромные деньги. Например, в США всегда делают 2 конкурирующие группы: одна группа работает в сухопутных войсках, а другая – в военно-морском флоте. Вот в каждой из этих групп около 400 физиков – теоретиков, которые работают в некоем проекте. Ничего подобного нигде нет! Это гигантские деньги, гигантские усилия!

Многомировая интерпретация

Если вы начнете искать в интернете, как люди пытаются понять интерпретацию квантового компьютерга, то вы найдете только одну общепринятую интерпретацию, так называемая многомировая интерпретация квантовой механики. Один из создателей квантовых алгоритмов, очень известный человек – Дойч опубликовал книгу «Фабрика реальностей»^[1]. Он на серьезном уровне предложил, что эта огромная новая вычислительная способность квантового компьютера связана с тем, что вычисления производятся сразу же во многих мирах, то есть акт вычисления расщепляется и происходит параллельное вычисление во многих мирах. Эту интерпретацию очень трудно принять, но тем не менее она сейчас очень популярна. На конференциях есть масса докладов по поводу этой темы. И вот такая модель реальности, что каждый эксперимент приводит к расщеплению мира, она очень популярна и везде используется. В этой многомировой интерпретации квантовой механики модель очень проста. Например, вы кинули монетку и у вас выпал «орел», но «орел» просто выпал в вашем мире, сам акт эксперимента привел к расщеплению миров, возник другой мир, в котором выпала «решка». Новый эксперимент, новое расщепление миров. И все время происходит вот такое гигантское, все большее расщепление миров. С помощью этой модели объясняют квантовый компьютеринг. Глядя на это, мы уже понимаем до чего дошел человеческий разум в попытках предложить что-то реальное для объяснения квантовой механики.

Отличие классической физики от квантовой

В двух словах, чем отличается классическая физика от квантовой. Все мы знаем, что в основе классической механики лежат дифференциальные уравнения: Ньютон начал с того что он придумал производную, интеграл и написал законы классической механики в виде обыкновенных дифференциальных уравнений. И самый главный для нас второй закон Ньютона:

$$ma=f.$$

Если мы ускорение запишем как $a=dv/dt$, где v – скорость, а скорость запишем как $v=dq/dt$, где q – координата, тогда второй закон Ньютона – это дифференциальное уравнение второго порядка – $m(d^2q/dt^2)=f$. Еще мы должны задать начальные условия – $q(0)=q_0$ и $v(0)=v_0$. Если мы решим эту систему уравнений, то найдем траекторию движения. Теперь нас интересуют такие вопросы – что хорошего в классической механике? А что тревожит в квантовой?

Детерминизм

Введем «хороший» философский термин, как детерминизм. Он состоит в том, что если у нас есть q_0 и v_0 и они заданы, то мы всегда можем узнать координату и скорость частицы в любой момент времени. То есть не может быть такой ситуации: мы знаем, что электрон сейчас в определенной точке и можем вычислить в какой точке он будет через час, но не можем написать траекторию, как он туда попал. В квантовой механике это вполне нормально, но в классическом мире – это странно! Вот более бытовой пример, если машина стояла сначала в Долгопрудном, а через час мы ее нашли где-то в Москве, то все-таки мы можем нарисовать траекторию по которой она приехала в Москву, она же не просто оказалась в Москве. Детерминизм настолько естественен, что кажется странным, что он может нарушиться. Перепишем его в более «красивой» форме, введя функцию Гамильтона.

Функция Гамильтона

Функция Гамильтона:

$$H(q,p) = (p^2/2m) + V(q),$$

где $p = mv$ – импульс тела, а $V(q)$ – потенциал (кулона, гравитационный и т. д.). Смысл этой функции – это энергия, которая равна сумме кинетической и потенциальной. Перепишем второй закон Ньютона, используя функцию Гамильтона:

$$\dot{q} = \frac{\partial H}{\partial p} \quad \text{и} \quad \dot{p} = -\frac{\partial H}{\partial q}.$$

Теперь мы можем ввести так называемую фазовую плоскость.

Фазовая плоскость

Фазовая плоскость — координатная плоскость, в которой по осям координат откладываются две переменные (фазовые координаты), а именно в нашем случае это p и q . Если у нас есть начальная точка в этой фазовой плоскости, то мы в любой момент времени можем найти куда наша частица пришла. Это был «праздник» детерминизма в конце 19 века: все описывается дифференциальными уравнениями.

Но уже тогда возникло статистическое описание или вероятностное. Так что такое статистическая классическая механика?

Статистическая классическая механика

Рассмотрим комнату. В ней много молекул воздуха. Мы можем написать уравнение Гамильтона и описать движение каждой молекулы: если мы знаем все их координаты и скорости в начальный момент времени, то мы будем знать их координаты и скорости через час. Но это совершенно бессмысленно, объем информации (в те времена не было компьютеров!) очень большой, мы не сможем решить все эти уравнения. Сейчас, в принципе, можно справиться с таким большим объемом информации с помощью суперкомпьютера и описать, как эти молекулы двигаются. Но тогда это было нереально. И поэтому решили искать вероятность. Зададим плотность вероятности: $\rho(t, q, p)$ – это

вероятность найти молекулу в точке с координатами q и p . Выберем любую точку с координатами q, p и вокруг нее возьмем область V (объем фазового пространства). Затем проинтегрируем:

$$\int_V \rho(t, q, p) dq dp = P((q, p) \in V),$$

получим вероятность P того что координаты частицы лежат в области V , в момент времени t .

Получим теперь уравнение для вероятности, а именно уравнение Лиувилля.

Уравнение Лиувилля

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}(t, q, p) = \{H, \rho\},$$

где $\{H, \rho\} = \sum_{j=1}^n \left(\frac{\partial H}{\partial q_j} \frac{\partial \rho}{\partial p_j} - \frac{\partial H}{\partial p_j} \frac{\partial \rho}{\partial q_j} \right)$ – скобки Пуассона.

Таким образом, если у нас в начальный момент времени задано вероятностное распределение молекул в комнате, тогда решив уравнение Лиувилля при начальном условии $\rho(0, q, p) = \rho_0(q, p)$, найдем вероятностное распределение молекул через час и так далее. Но для нас важно то, что под этим вероятностным уравнением лежит настоящая поточечная динамика, что этим молекулы действительно летят в комнате.

Это все что нам говорит классическая механика: или считайте вероятности, или считайте уравнения. В 1900 году считали, что в физике делать уже нечего.

Интерференционный эксперимент

Но дальше появились некие частицы, которые обладали свойствами нарушавшими принцип детерминизма. Существует много экспериментов и теоретических схем, которые показывают, что эти частицы вовсе не макроскопические молекулы. Самый фундаментальный эксперимент – это интерференция на двух щелях. Рассмотрим его. Эксперимент выглядит так – у нас есть источник, из которого летят квантовые системы (электроны или фотоны), имеется щит с двумя отверстиями и щит, который покрыт фотоэмульсией. Представим, что сначала у нас летят из источника классические частицы. Мы увидим интерференционную картину (обозначим ее как гистограмма №1,2), пик которой будет располагаться посередине между щелями. Закроем нижнее отверстие, теперь пик интерференционной картины будет располагаться напротив верхней щели (гистограмма №1). Закроем верхнее – пик располагается напротив нижней щели (гистограмма №2). Классика утверждает, что гистограмму №1,2 можно получить путем сложения гистограммы №1 и гистограммы №2. Когда такие же эксперименты делаются с квантовыми частицами, то это равенство не выполняется. Наша задача – объяснить это.

О моделях для света

Тут существует большой простор деятельности, потому что первые эксперименты проводились для фотонов. Фотоны – это частички света. Мы знаем, что существуют две модели света – корпускулярная и волновая. Представим, что фотон – это волна.

Рассмотрим тот же эксперимент с двумя щелями. Теперь из источника идут не частица, а волны. Тогда по принципу Гюйгенса, каждая щель опять станет источником волны и получится интерференция: волны будут накладываться друг на друга. Когда закроем одно отверстие, то наложение волны на волну исчезнет, поэтому гистограмма деформируется. Т.е. с помощью волн можно объяснить нарушение сложения гистограмм. Еще мы знаем работы Луи Де-Бройля. Он предписал каждой частице волновой вектор, то есть мы можем считать, что электрон – это волна.

Это не конец истории, можно провести еще один эксперимент: опять есть источник, но неизвестно чего (то ли волн, то ли частиц) и имеется щит с двумя щелями. Напротив каждой щели ставится датчик (детектор). Если это были волны, то вследствие волновой теории оба детектора часто «кликали» одновременно. Допустим, что это частицы и мы их пускаем редко (пускаем по одной), тогда детекторы будут «кликать» по одному, так как частица может пройти только через одно отверстие. Но это только теория, а вот если провести этот эксперимент в реальности, например с электронами, то мы увидим, что детекторы «кликают» по одному. Они никогда не «кликают» одновременно (в данном случае мы не учитываем так называемый «дак-кликс»).

О противоречиях между волновой и квантовой моделями

Подведем итоги: имеется два эксперимента – первый, когда мы закрывали по очереди отверстия, и показали, что частица – это волна, и второй, когда поставили два детектора, и показали, что частица вовсе не волна, а своеобразный шарик, который летит в пространстве, «стучается» по детектору и именно один этот детектор «звонит». Возникло видимое противоречие между двумя моделями. Это противоречие пытались разрешить. Над этим работали Гейзенберг и Бор. Если мы прочитаем воспоминания, то Нильс Бор даже дошел до сумасшествия, потому что не мог разрешить эту проблему.

Принцип дополнительности Нильса Бора

Нильс Бор предложил решение, которое сейчас общепринятое. Принцип дополнительности состоит в следующем: в зависимости от той экспериментальной ситуации, которую мы спроектировали, квантовая система может проявлять, то корпускулярные, то волновые свойства. Поэтому вне эксперимента говорить о свойствах частицы нельзя, т.е. частицы не имеют свойств вне экспериментальных ситуаций. Это интерпретация Бора – экспериментальная ситуация определяет свойства. Бор говорил, что квантовая механика – это не есть наука о квантовой реальности, это есть наука об описании результатов наших измерений. Однако Бор дополнил эту интерпретацию одним принципом, а именно принципом полноты квантовой механики.

Принцип полноты квантовой механики

С этим принципом боролся Эйнштейн. Мы не можем описать с помощью формализма квантовой механики, как себя ведут квантовые системы. Мы можем описать только результаты измерений. Но встает тогда такой вопрос – может улучшить этот «формализм», и мы сможем описывать не только результаты измерений, но свойства частиц? На что Нильс Бор сказал, что это, в принципе, невозможно, т.е. принцип полноты квантовой механики утверждает: «не существует описание реальности более лучшего, чем

дается это в квантовой механике». Надо добавить, что последние несколько лет жизни Бор был просто философом и для физики мало что сделал.

В каком-то смысле этот закон настолько естественный, что можно считать его всемирным. Но до этого вся традиция физики шла по другому пути. В классической механике считалось, что частица имеет траектории вне зависимости от того, смотрим мы на неё или не смотрим, т.е. считалось, что координата частицы – это свойство частицы, а не прибора, которым мы начинаем мерить. Здесь взгляды Бора менялись. Вначале, Бор даже говорил, что у частицы есть координата, но мы её никогда не можем узнать. Но потом, Бор изменил свои взгляды, и он считал, что говорить о координате частицы вне измерительного устройства – нельзя, т.е. до тех пор, пока не притащили измерительный аппарат, мы не можем говорить, что у частицы есть координата или скорость. Такой пример – сидит Ваня, он влюблен в Свету. Но он не знает, влюблен он в нее или нет. И только тогда, когда Света пришла и спросила: «Ваня, ты любишь меня?». У Вани только тогда в голове определяется – любит или нет. А до того, как пришла Света у него не было свойства – любит он её или нет. Он был в суперпозиции. Также Нильс Бор говорит, что все квантовые системы находятся в суперпозиции, т.е. они не знают какая у них энергия.

Итак, это был мощнейший философский принцип. Ни одна теория до этого не претендовала, что она последняя. Если взять любую теорию, то оговаривалось, что это некая аппроксимация описания реальности, и через несколько лет появится новое описание. А Нильс Бор сказал, что он и Гейзенберг создали такую теорию, которая никогда не будет лучше, чем квантовая механика. С этим принципом я не согласен, поскольку он «затормозил» попытки выйти за пределы формализма. Причем по рассказам людей, которые лично знали Бора, Бор был настоящим диктатором. Поэтому, если кто-то хотел что-то добавить, то он быстро исчезал из квантовой механики.

Фейнмановский интеграл по траектории

Фейнмановский интеграл появился в 1948 году. Существует книга Фейнмана и Хиббса «Квантовая механика и интегралы по траектории», в которой вся квантовая механика написана на языке Фейнмановского интеграла по траектории. Фейнман предложил, что все вероятности, которые предсказывает обычно квантовая механика, можно получить, если считать, что из одной точки в другую частица движется не по одной траектории, а по целому ансамблю траекторий, и она их выбирает с какой-то вероятностью. Вот по такому простому правилу можно воспроизвести всю квантовую механику. По рассказам очевидцев, когда Фейнман делал доклад об этом на семинаре Бора, то он был выгнан с позором, потому что ему сразу сказали: «Какие траектории?! Нет траекторий! Хотя Вы считаете правильно, получаете те же ответы». По рассказам, Фейнман познакомился с Паули, который ему сказал: «А ты называй их виртуальными». Так, Фейнман назвал их виртуальными траекториями. Бор это принял и Фейнманский интеграл стал всемирно известен.

Когда Бор все это сформулировал, то у него возникли некоторые проблемы. Мы можем сказать, что у электрона нет никаких свойств до тех пор, пока мы его не «притащили» и не стали у него что-то мерить. Но, тот же самый простой стул сделан из тех же электронов, протонов и т.д. Т.е. возник вопрос соответствия между макроскопическим

миром и микроскопическим. Возник, так называемый, принцип соответствия: где прекращается действие квантового мира и где начинается действие нашего макроскопического мира, где все объекты имеют свойства. И на этот вопрос квантовая механика ответа не дает.

Кот Шредингера

Это кот, который находится в суперпозиции двух состояний – живой и мертвой. А получить эту суперпозицию можно легко, начиная с того, что квантовая частица может находиться в суперпозиции двух состояний. Шредингер не любил Бора, поэтому и придумал этого Шредингеровского кота, чтобы критиковать Бора. Он считал, что можно уйти за пределы квантовой механики. Этот пример Шредингер придумал в 1930 году.

О вере в Бора

Есть люди, которые верят в Бора до конца. Например, Антон Цалингер и Антони Леггет (нобелевский лауреат). Их идея заключается в следующем: есть стул, у него действительно есть волновая функция, у которой очень маленькая длина волны, и поэтому мы ничего не замечаем. Происходят какие-то флуктуации, какие-то тепловые движения, но мы не можем понять, что стул – это действительно квантовый объект. Так, например, Цалингер занимается тем, что пытается через две щели посылать все большие и большие объекты и наблюдать интерференционную картину (за это он надеется получить нобелевскую премию!).

Эйнштейн против Бора и принципа полноты квантовой механики

Первый основной противник Бора был Эйнштейн. Всю свою жизнь он посвятил борьбе против «боровской» интерпретации квантовой механики. Даже в некоторых книгах можно найти такие странные слова: «Альберт Эйнштейн так и не понял квантовой механики», что довольно странно, так как он был одним из создателей квантовой механики (такое понятие, как фотон, было предложено Эйнштейном и т.д.). Конечно, Эйнштейн понимал квантовую механику и никогда не протестовал против формализма. Эйнштейн протестовал против принципа полноты квантовой механики. До конца своей жизни Эйнштейн верил, что можно построить теорию, которая будет гораздо лучше квантовой механики, и которая будет описывать свойства электронов, какие они есть, когда мы на них не смотрим. Всем известен разговор Паули с Эйнштейном, когда Эйнштейн спросил Паули: «Что же луна не существует, когда на нее никто не смотрит?» И Паули ответил: «Конечно, не существует»^[4]. Итак, существовали две разные позиции. Но почему Эйнштейн не верил всем этим людям? Он создал теорию относительности, и в ней он не выходил за рамки физики. Его идея заключалась в том, что если мы будем продолжать в том же духе, то мы объясним и квантовую механику. На русском языке существует очень старая книга Эйнштейна и Инфильда, в которой Эйнштейн пишет о том, как должна выглядеть квантовая реальность, реальность полей. Он считал, что нужно полностью отказаться от понятия частицы: частица – это что-то первобытное, пришедшее от Ньютона. То есть он мечтал, что кругом будут одни поля, которые будут описывать все в этом мире и уравнения, удовлетворяющие этим поля, будут нелинейными, потому что основное уравнение квантовой механики – уравнение Шредингера, и оно линейное. В этом заключалась мечта Эйнштейна.

Давид Бом (David Bohm)

Давид жил в Соединенных Штатах. Он создал модель, называемая бомовской механикой. Давид выписал детерминистические уравнения, по которым двигаются квантовые частицы. Таким образом, вопреки Бору, Гейзенбергу и Паулю, он доказал, что, если взять электрон, задав его координату и импульс, то можно написать траекторию электронов в пространстве. И если мы будем находить вероятность того, что электрон оказался в какой-то области по бомовской механике (которая оказалась такая же как и ньютоновская), то эта вероятность будет та же, которую предскажет квантовая механика.

В чем минусы теории Боба? В теории Боба плохо то, что она не локальна. Таким образом, это был первый нелокальный подход к теории квантовой механики.

Нелокальный подход в квантовой механике

Если написать уравнение движения для двух частиц, которые даются в бомовской механике (например, для двух электронов), а затем, допустим, что между этими частицами нет никакого взаимодействия в этом физическом пространстве (нет никаких потенциалов, которые даёт нам физика, потенциал – ноль). Тем не менее, если мы изменим траекторию одного электрона, то траектория другого изменится. Это вот такая «суровая» нелокальность. Например, стоит автомобиль в Долгопрудном, вы его «пнули», а загудела другая машина где-нибудь в Орехово или в Борисово! Перед физиками встал выбор – сохранить реальность (квантовые электроны имеют такие же свойства, как и стул), но ценой нелокальности (все в этом мире связано).

Эксперимент с поляризационной призмой

Существует эксперимент, с помощью которого считается, что этот вопрос закрыт. И если бы Эйнштейн сейчас жил, то он бы понял, что был не прав. Первоначально эксперимент был замышлен Эйнштейном, Подольским и Розиним^[2]. Он довольно простой.

Имеется лазер, который светит на кристалл. В кристалле находятся атомы, у которых имеется два возбужденных уровня, и на них находятся электроны (на каждом из уровней в этом атоме). По бокам идут волноводы в две стороны. Когда лазер светит на этот атом, то два электрона, упавших на разные уровни, излучают два фотона. Получаются, что фотоны собираются таким образом, чтобы они пошли в разные стороны. Итак, был атом, который был на двух возбужденных уровнях, на него посветили лазером, и произошло излучение двух фотонов. Главным является то, что они из одного атома, то есть это как близнецы, рожденные одной матерью (они помнят этот атом). Эти фотоны называются «tangled» (т.е. «зацепленные» или «запутанные»). Дальше они расходятся в разные стороны и на их пути ставятся две поляризационные призмы, у которых оси наклонены под определенными углами. Эти призмы расщепляют фотоны еще на два направления и в каждом стоят детекторы.

В чем здесь квантовость?

Квантовость состоит в том, что если фотон налетает на поляризационную призму, то он может пройти в одном из двух направлений. Классический свет расщепился бы. Если бы шел хороший источник классического света, то он бы пошел сразу по двум направлениям с определенными интенсивностями. А в квантовой – фотон, когда летит на призму, то он может проскочить только в одном направлении, то есть проскочить в двух направлениях он не может. Поэтому раздается щелчок то в одном детекторе, то в другом. Пусть щелчок в одном детекторе соответствует плюсу, а в другом – минусу (в другом направлении тоже самое). Введем, например, вот такие случайные величины: $\xi = \begin{cases} +1, \text{ щелчок от первого детектора} \\ -1, \text{ щелчок от второго детектора} \end{cases}$, и ξ' – для второго направления. Дальше считаются экспериментальные корреляции, то есть меряем эти величины много раз и пишем такую сумму:

$$\langle \xi, \xi' \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \xi_i \xi'_i, \text{ где } N - \text{число испытаний.}$$

Что сделал Белл?

Белл провел весь эксперимент, меняя угол наклона призм, к направлению движения фотона. Ведь ξ и ξ' зависят от этих углов. Таким образом, он провел три эксперимента и тремя способами выбрал углы. Обозначим их следующим образом: $\alpha - \alpha' = A$, $\beta - \beta' = B$, $\gamma - \gamma' = C$, где штрихованные углы это второе направление от места излучения. Затем он посчитал три корреляции, соответствующие этим трем экспериментам. Возьмем модуль разности двух первых корреляций. Белл показал, что если мы будем считать, что у этих фотонов до измерений были свойства, то есть если фотон уже заранее знал в какой детектор он рассеется, то можно доказать такое неравенство:

$$|\langle \xi, \xi' \rangle^1 - \langle \xi, \xi' \rangle^2| \leq 1 - \langle \xi, \xi' \rangle^3.$$

А дальше проводятся эксперименты и находятся такие углы, когда это неравенство нарушается. На эксперименте мы можем проверить, что предположение о том, что частицы несут какие-то свойства, имеет смысл или нет? Какая альтернатива такому свойству, что фотон с самого начала знал, в какой детектор ему кликнуть? Альтернатива – это опять нелокальность. Можно считать, что когда этот фотон летел в один детектор, он тут же послал сигнал другому детектору, и тот тоже кликнул. При такой нелокальности мы тоже можем нарушать неравенство Белла. Даже если считать, что они знали, но нелокально коммуницировали друг с другом, мы тоже неравенство Белла нарушим.

Состояния Белла

Состояния этих частиц можно записать так:

$$\Psi = \frac{1}{\sqrt{2}} (|+\rangle |-\rangle - |-\rangle |+\rangle)$$

Ψ – это и есть состояния Белла. Фактически, это закон сохранения поляризации. То есть если у фотона поляризация в определенном направлении плюс, тогда у другого – поляризация в этом направлении минус. Тоже самое для спина. Самое главное, что это должно быть ни для одного фиксированного направления, а для разных, таким образом,

это состояние инвариантно относительно вращения. И если мы повернем оси, то можно записать:

$$|+\rangle = \cos \varphi |+\rangle' + \sin \varphi |-\rangle'$$

Мы с удивлением увидим, что состояние опять будет иметь точно такую же форму для $|+\rangle'$ и для $|-\rangle'$. В этом состоит проблема.

Заявлено, что неравенство Белла нарушается и готовятся такие состояния Белла, которые его нарушают. Цальингер сделал некую статистику по кликам. У докладчика был аспирант Adenier, у которого есть статья об аномалиях, в которой получены данные по нарушению неравенства Белла. То, что написано в статье, не соответствует тем кликам, которые были у Цальингера. Но может быть это не так страшно, может быть это состояние можно модифицировать. Но существуют многие интерпретации этого состояния. Например, интерпретация Алана Аспека такая: если есть два фотона, которые разведены в разные места, то делая что-то с первым, например, заставляя его отклониться в один детектор, мы заставляем фотон, который находится где-то, делать что-то другое, то есть люди, действительно, верят в квантовую нелокальность. Сейчас 99% людей верят в наличие нелокальных квантовых взаимодействий. Если приготовлено зацепленное состояние (из двух фотонов или электронов), они разведены в пространстве на огромное расстояние, и вы производите измерение на одном, то есть его состояние проецируется по постулату Фон-Неймона, то состояние другого автоматически меняется. На этом основана квантовая телепортация. Квантовая механика – нерелятивистская теория. И вся дискуссия о квантовой нелокальности, в рамках нерелятивистской теории, по мнению докладчика бессмысленна. Но, тем не менее, эта дискуссия ведется.

Об ошибке Белла

Нарушение неравенства Белла приводит к квантовой нелокальности. Докладчик согласен с точкой зрения Нильса Бора. Он считает, что Бор объяснил этот эксперимент следующим образом. Имеется три совершенно разных эксперимента. В этих трех совершенно разных экспериментах вводятся разные случайные наблюдаемые, которые индексированы этими экспериментами. Выводить неравенство, как выводил Белл, нельзя для корреляций из разных экспериментов, потому что Белл писал все эти корреляции в виде интеграла по одному распределению. Белл писал, что в не зависимости от эксперимента, корреляции равны

$$\langle \xi, \xi' \rangle = \int \xi(\lambda) \xi'(\lambda) dP(\lambda),$$

где $dP(\lambda)$ – одно и то же вероятностное распределение, вне зависимости от эксперимента. Докладчику кажется, что Бор размышлял бы так: а с чего, собственно говоря, совершенно разным экспериментальным условиям ставите в соответствие одно и тоже вероятностное распределение? Если считать, что каждый эксперимент производит свою случайность, что случайность при одном повороте одна, при другом повороте – другая, при третьем – третья, то неравенство Белла просто не вывести. Докладчик считает, что неравенства Белла нет. Оно выведено при ложных предположений, когда данные, которые собрали в трех разных экспериментах, пытаются «засунуть» в одно неравенство, которое вывели при условии, что эксперимент один.

На этом рассказ заканчивается. Это интересные проблемы, поэтому существует множество интерпретаций.

Библиография

- [1] Д. Дойч, "Структура реальности",
см. <http://lib.ru/FILOSOF/DOJCH/reality.txt>
- [2] А. Эйнштейн, статья «ЭПР» (Эйнштейна-Подольского-Розена), Phys. Rev. 47, 777-780 (1935),
см. http://prola.aps.org/abstract/PR/v47/i10/p777_1
- [3] J. S. Bell, On the Einstein Podolsky Rosen Paradox, Physics 1, 195 (1964),
см. http://www.drchinese.com/David/Bell_Compact.pdf
- [4] Аспект, Phys.Rev.Lett. 49, 1804-1807 (1982),
см. http://prola.aps.org/abstract/PRL/v49/i25/p1804_1
- [5] Видеозапись к семинару,
см. <http://www.intuit.ru/video/10/>
- [6] Аннотация к семинару,
см. <http://theorphys.fizteh.ru/subscription/RassylMejPred/mejprs19nov2008.htm>
- [7] сайт А. Ю. Хренникова,
см. <http://vxu.se/>
- [8] А. Ю. Хренников, «Введение в квантовую теорию информации», Физматлит, 2008,
см. <http://lastman.ru/audioknigi/90-vvedenie-v-kvantovuu-teoriu-informacii.html>