

От Белла до Леггетта

М. Апельмейер, А. Цайлингер (Австрия)

Перевод М.Х. Шульмана (shulman@dol.ru, www.timeorigin21.narod.ru)

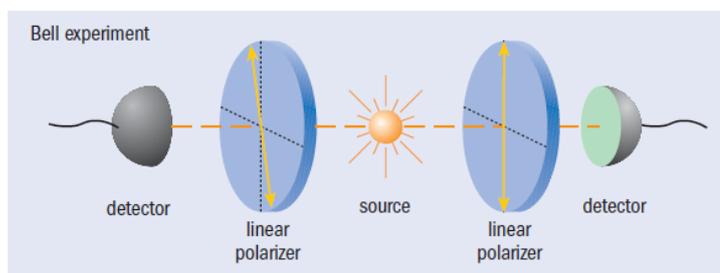
(Фрагмент статьи Markus Aspelmeyer, Anton Zeilinger. "A quantum renaissance", Physics World июль 2008, <http://vcq.quantum.at/fileadmin/Publications/2008-14.pdf>)

Центральным событием в истории квантовой механики является знаменитая дискуссия между Эйнштейном и Бором относительно того, описывает ли физика природу такой, какой она является "в реальности", как считал Эйнштейн, либо такой, какой она нам представляется (what we can say about nature), как утверждал Бор. До 60-х годов 20-го века эти споры были чисто философскими, но в 1964-м году североирландский физик Джон Белл выяснил, что эксперименты над запутанными частицами могут дать возможность проверить, существует ли более полное описание мира за рамками квантовой теории. Эйнштейн, Подольский и Розен (ЭПР) думали, что такая теория существует.

Аргументация Белла была основана на двух допущениях, сделанных ЭПР, которые непосредственно противоречили свойствам запутанных частиц. Первое состояло в локальности; это допущение утверждает, что результаты измерения, выполненного над частицей, не должны зависеть от того, что делается в то же время с другой – запутанной с ней – частицей, удаленной на произвольно большое расстояние от первой. Второе допущение – реализм – утверждало, что результат измерения над частицей отражает ее свойство, присущее ей до измерения и независимое от факта измерения. Белл показал, что результаты определенной комбинации измерений, выполненных над идентично приготовленными парами частиц, должны удовлетворять численному условию (теперь оно называется неравенством Белла) для всех физических теорий, в которых справедливы оба допущения. Он также показал, однако, что это условие нарушается предсказаниями квантовой физики для пар запутанных частиц (Physics 1 195).

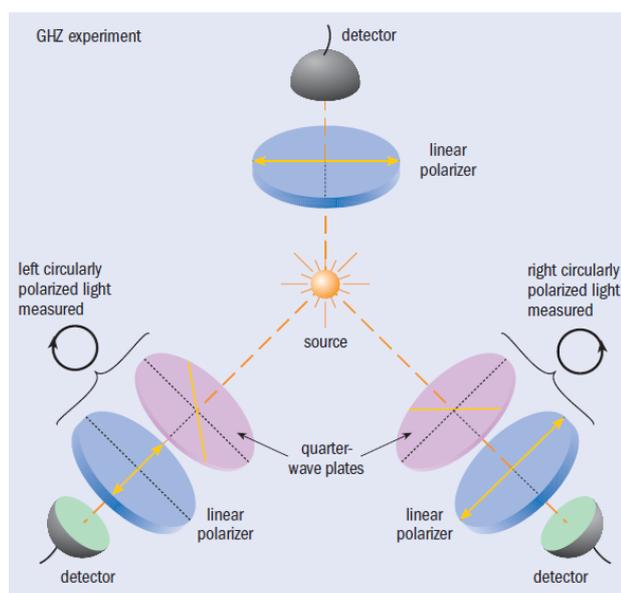
Возьмем, например, поляризацию фотонов. Отдельный фотон может быть поляризован вдоль какого-либо определенного направления, скажем – горизонтального, и мы можем измерить эту поляризацию, пропустив фотон через горизонтально ориентированный поляризатор. Щелчок в детекторе фотонов, расположенном за поляризатором, указывает на успешное измерение и показывает, что фотон поляризован горизонтально; если щелчка нет, то это означает, что фотон был поляризован вдоль вертикальной оси. Однако в случае пары запутанных фотонов отдельные фотоны не несут определенной поляризации до тех пор, пока не выполнено измерение! Измеряя горизонтальную поляризацию одного из фотонов всегда дает случайный результат, делая одинаково правдоподобным обнаружить вертикальную или горизонтальную поляризацию фотона. Выполняя также аналогичное измерение для второго фотона запутанной пары (предполагая конкретный тип запутанного состояния), мы увидим, что оба фотона поляризованы вдоль одного и того же направления. Это верно для любых направлений измерения и не зависит от расстояния между частицами.

Неравенство Белла открыло возможность проверки базовых допущений физических теорий – что справедливо было названо Эбнером Шимони из Бостонского Университета “экспериментальной метафизикой”. В подобных Белл-экспериментах два взаимно удаленных наблюдателя измеряют поляризацию запутанных частиц вдоль различных направлений и вычисляют корреляцию между ними. Поскольку квантовые корреляции между независимыми измерениями поляризации для запутанных частиц могут быть сильнее, чем это допускается локальной реалистической теорией, то неравенство Белла нарушается.



В исходном Белл-эксперименте оба фотона запутанной пары имеют одинаковую линейную поляризацию, если поляризаторы параллельны. Но в случае поляризаторов, ориентированных под небольшим углом друг к другу, как показано на рисунке, одинаковый результат для обоих фотонов получают чаще, чем если бы поляризация была *локальным реальным* свойством фотонов.

В 1987-м году Д. Гринбергер, М. Хорн и А. Цайлингер (объединяющая аббревиатура – GHZ) выяснили, что запутывание трех и более частиц должно накладывать еще более сильное ограничение на локальный реализм, чем двухчастичное запутывание (Am. J. Phys. **58** 1131). В то время, как две запутанные частицы не подчиняются локальному реализму только в отношении их статистических свойств, что и составляет сущность теоремы Белла, три запутанные частицы могут обусловить прямой конфликт в результате одиночного измерения, так как измерения над двумя из этих частиц позволяют предсказать с определенностью свойство третьей частицы.



В так называемых GHZ-экспериментах известные, скажем, круговые поляризации двух фотонов из трехфотонного запутанного состояния позволяют квантовой механике однозначно предсказать линейную поляризацию третьего

фотона (сверху, в данном случае – горизонтальную). Локальный реализм предсказывает ортогональную линейную поляризацию – в данном случае – вертикальную.

Первый эксперимент над тремя запутанными фотонами был выполнен в конце 1999-го г. А. Цайлингером с сотрудниками, и они обнаружили полное соответствие с квантовой теорией (*Nature* **403** 515). До настоящего времени все проверки неравенства Белла и измерения над тремя запутанными частицами (GHZ-эксперименты) подтверждают предсказания квантовой теории и, следовательно, конфликтуют с совокупностью допущений о локальности и реализме, которые используются в любых иных физических теориях, пытающихся объяснить свойства запутанных частиц.

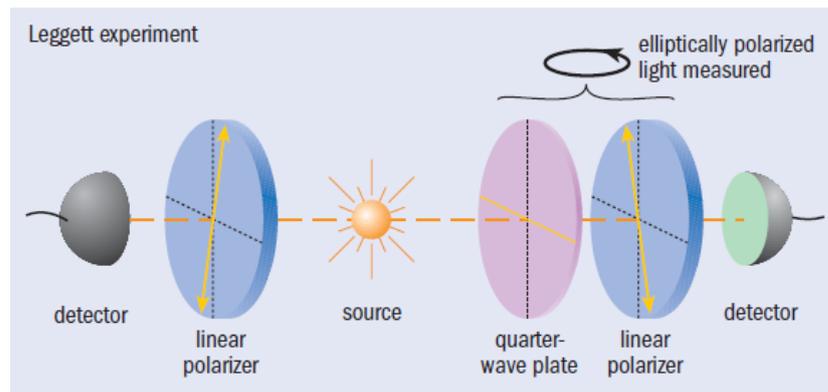
Таким образом, вся совокупность Белл- и GHZ-экспериментов, выполненных в течение ряда последних лет, дает основания предположить, что по крайней мере одно из допущений (локальность и реализм) является неадекватным при попытке описать физический мир (если используется представление о запутанных состояниях). Но теорема Белла не позволяет нам решить, какое именно из двух допущений должно быть отвергнуто.

В 2003 году Энтони Леггетт из Университета Иллинойса в США дал частичный ответ, представив новую теорему несовместимости, очень напоминающую теорию Белла, но с другим набором исходных предположений (*Found. Phys.* **33** 1469). Его идея состояла в отклонении допущения о локальности, и принятии подходящей концепции реализма – а именно, в том, чтобы считать фиксированную поляризацию “реальным” свойством каждой частицы в запутанной паре – в качестве достаточной для полного воспроизведения квантовой теории. Интуитивно можно ожидать, что свойство, допускающее нелокальные влияния, может привести к произвольным корреляциям. В конце концов, если вы допускаете, что результаты вашего измерения зависят от всего, что происходит в целой вселенной (включая точку, где производится другое измерение), то почему мы можем ожидать ограничения на такие корреляции?

В специальном случае пары поляризационно-запутанных фотонов класс нелокальных реалистических моделей Леггетта предусматривает следующие допущения: каждая частица пары излучается источником с хорошо определенной поляризацией; имеют место такие нелокальные влияния, что каждый результат индивидуального измерения может зависеть от любого параметра на произвольном удалении от измерения. Предсказания таких теорий нарушают исходные неравенства Белла в силу допущения нелокального влияния, так что естественно спросить, способны ли они воспроизвести все предсказания квантовой теории.

Леггетт показал, что это не так. Подобно Беллу, он вывел набор неравенств для некоторых измерений над двумя запутанными частицами, которые удовлетворяют всем теориям, основывающимся на этих специальных нелокальных реалистических допущениях, но нарушающих квантово-теоретические предсказания. Тестирование неравенства Леггетта еще более сложно, чем тестирование неравенств Белла, поскольку оно требует измерений и линейной, и эллиптической поляризации, а также намного более высококачественного запутывание.

Но в 2007 году, благодаря значительному прогрессу в области источников запутанных фотонов, группа авторов смогла провести тестирование неравенства Леггетта экспериментально, с помощью корреляций между линейной и эллиптической поляризациями запутанных фотонов (*Nature* **446** 871, <http://arxiv.org/pdf/0704.2529v2.pdf>).



В Леггетт-эксперименте корреляция между линейной поляризацией одного фотона и эллиптической реализацией другого фотона, как можно показать, нарушает “реалистическую” точку зрения даже в случае допущения нелокальных коммуникаций. Как показано на рисунке, круговая и эллиптическая поляризация одиночных фотонов может быть измерена с помощью комбинации четвертьволновых пластинок (quarter-wave plate) и линейных поляризаторов (linear polarizer).

Эксперименты подтвердили предсказания квантовой теории и, тем самым, опровергли широкий класс нелокальных реалистических теорий, как концептуальной основы квантовых явлений. Подобно эволюции Белл-экспериментов, скоро должны последовать строгие Леггетт-эксперименты. Например, независимые эксперименты в Вене в 2007 году (*Phys. Rev. Lett.* **99** 210406) и исследователями из Женевского Университета и Национального Университета Сингапура (*Phys. Rev. Lett.* **99** 210407) подтвердило нарушение неравенства Леггетта при более слабых допущениях, расширяя класс запрещенных нереалистических моделей. Из этих экспериментов стали более ясными две вещи. Во-первых, недостаточно полно сформулировать понятие локальности. Во-вторых, надо отказаться по крайней мере от наивного представления о реализме, согласно которому частицы имеют определенные свойства (в нашем случае – поляризацию), независимые от любого наблюдения.