

Экспериментальная проверка неравенства Леггетта-Гарга

Реферат подготовил М.Х. Шульман (shulman@dol.ru, www.timeorigin21.narod.ru)

1. Опыты со сверхпроводящим кубитом ([1], [2])

В 1985 г. была опубликована статья Леггетта и Гарга [1], в которой авторы “в контексте идеализированного эксперимента с макроскопическим эффектом квантовой когерентности пришли к выводу, что предсказания квантовой механики несовместимы на макроскопическом уровне с совокупностью двух гипотез – о макроскопическом реализме и неинвазивной измеримости”.

Гипотеза о макроскопическом реализме (МР) утверждает: *“Некоторый макроскопический объект, обладающий двумя или более возможными макроскопически различимыми состояниями, в любой момент времени находится в только одном из этих состояний.”* Гипотеза о неинвазивной измеримости (НИ) представляет собой допущение, согласно которому *“В принципе возможно определить, в каком из этих состояний находится система, не оказывая никакого влияния на само это состояние или на последующее поведение системы.”*

Гипотеза МР сформулирована в самом общем виде, однако, вероятно, следует уточнить, что авторы гипотезы конкретно имели в виду противопоставление классической картины мира квантовой; в последней система *может находиться в суперпозиции состояний* и поэтому не удовлетворяет формулировке МР¹.

Авторы начинают с описания явления “макроскопической квантовой когерентности” в радиочастотном СКВИДе – сверхпроводящем квантовом интерферометре, работающем с одним сверхпроводящим туннельным переходом Джозефсона. Там потенциал $V(q)$ для “вмороженного” магнитного потока (trapped magnetic flux) q имеет симметричную форму (см. рис. 1) с минимумами в точках $\pm q_0$, расположенных достаточно далеко от центра симметрии; вблизи точек $+q_0$ и $-q_0$ можно считать, что параметр q принадлежит двум макроскопически различимым состояниям. Для изолированного СКВИДа квантовая механика предсказывает, что если поток находится вначале в одной половине графика, то он будет осциллировать вперед и назад с некоторой частотой (“осцилляции Раби”). Более реалистичный квантово-механический расчет, включающий неустраняемые эффекты окружения, показывает, что при достаточно низкой температуре и достаточно слабой связи с окружением осцилляции не затухают полностью, а всего лишь ослабляются.

Возникает вопрос, находится ли “там или здесь” вмороженный в сверхпроводящее кольцо поток, когда его никто не наблюдает? При выполнении измерения подобный кубит может быть обнаружен в одном или другом состоянии с осциллирующей во времени вероятностью. Наблюдение этих осцилляций совместимо с азбучными квантово-механическими предсказаниями (которые сопоставляют каждому из этих состояний *ненулевую комплексную амплитуду вероятности*), но не обязательно несовместимо с классическим, или

¹ Разумеется, в общем случае квантовые системы не удовлетворяют и гипотезе НИ в силу соотношения неопределенностей Гейзенберга.

макроскопическим реалистичным описанием (согласно которому предписывает системе находиться точно в одном состоянии в любой момент времени) [2].

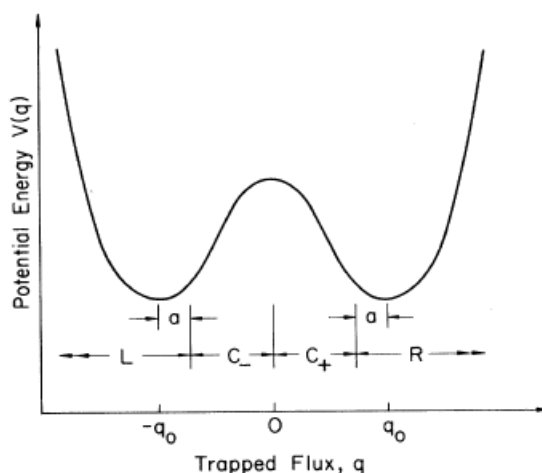


Рисунок 1.

Потенциал $V(q)$ для “вмороженного” магнитного потока (trapped magnetic flux) q .

Исходя из этой модели эксперимента, авторы вводят макроскопическую наблюдаемую Q , которая принимает значение $+1$, когда потоку q соответствует значение из левой (L) области графика, и значение -1 , когда потоку q соответствует значение из правой (R) области графика (промежуточной областью пренебрегают). Еще в исходной статье Леггетт и Гарг установили неравенство, которое справедливо при выполнении гипотез МР и НИ для *трех последовательных моментов времени*²:

$$Q_1 \cdot Q_2 + Q_2 \cdot Q_3 + Q_1 \cdot Q_3 \geq -1, \text{ или } Q_2(Q_1 + Q_3) \geq -(1 + Q_1 \cdot Q_3)$$

Заметим, что встречается (см., например, [3]) и другая форма неравенства:

$$Q_1 \cdot Q_2 + Q_2 \cdot Q_3 - Q_1 \cdot Q_3 \leq 1, \text{ или } Q_2(Q_1 + Q_3) \leq 1 + Q_1 \cdot Q_3$$

В общем случае оба неравенства можно объединить в одно:

$$-(1 + Q_1 \cdot Q_3) \leq Q_2(Q_1 + Q_3) \leq 1 + Q_1 \cdot Q_3$$

Доказательство³:

1) Пусть $Q_1 \cdot Q_3 = -1$, тогда $Q_1 + Q_3 = 0$, $(1 + Q_1 \cdot Q_3) = 0$, т.е. $0 \leq 0 \leq 0$.

2) Если же $Q_1 \cdot Q_3 = 1$, тогда $Q_1 + Q_3 = \pm 2$, $(1 + Q_1 \cdot Q_3) = 2$ и -2 , т.е. $-2 \leq Q_2(Q_1 + Q_3) \leq 2$.

Но величина $Q_2(Q_1 + Q_3)$ по модулю не может быть больше 2, поэтому и в данном случае неравенство выполняется. ■

Далее, повторив эту тройку измерений многократно и усреднив по всем реализациям, можно прийти к неравенству вида

$$\langle Q_1 Q_2 \rangle_G + \langle Q_1 Q_3 \rangle_G + \langle Q_2 Q_3 \rangle_G \geq -1,$$

где $\langle Q_i Q_j \rangle_G$ - коэффициент корреляции величин Q_i и Q_j для полного набора измерений G .

² Это неравенство называют темпоральным в отличие от другого – пространственного – неравенства Леггетта, установленного им для ЭПР-опытов в статье 2003 г.

³ В работах [1], [2] и [3] доказательство не приводится – Примеч. пер.

Теперь вспомним принятую Леггеттом и Гаргом гипотезу о неинвазивной измеримости. Согласно ей, ничего не должно измениться, если некоторые измерения будут *пропущены*. Это позволяет перейти к окончательной форме неравенства Леггетта-Гарга:

$$\text{ЛГ-неравенство: } \langle Q_1 Q_2 \rangle_{\bar{3}} + \langle Q_1 Q_3 \rangle_{\bar{2}} + \langle Q_2 Q_3 \rangle_{\bar{1}} \geq -1$$

Здесь надчеркнутые индексы указывают, какие измерения были пропущены при вычислении соответствующих корреляторов. Гипотеза НИ означает, что тщательные измерения не влияют на статистику результатов измерения при переходе от полного набора G к наборам с исключением некоторых измерений в достаточно больших ансамблях.

В 2016 г. Леггетт с сотрудниками опубликовал еще одну статью с результатами экспериментального тестирования своей модели [2]. В этой статье описывается и реализуется экспериментальный протокол осуществления теста, а также показывается, как он связан с исходным тестом Леггетта – Гарга, будучи еще менее зашумленным и концептуально прозрачным. Выполнив набор простых тестов по схеме “приготовь, тасуй, измеряй” на сверхпроводящем потоковом кубите, авторы отвергают (на уровне 83 стандартных отклонений) теории, которые запрещают когерентные суперпозиции токов в 170 нА в течение 9 нс. Далее, авторы обходят “ловушку неаккуратности (clumsiness loophole)”, определяя классическое возмущение в контрольных экспериментах.

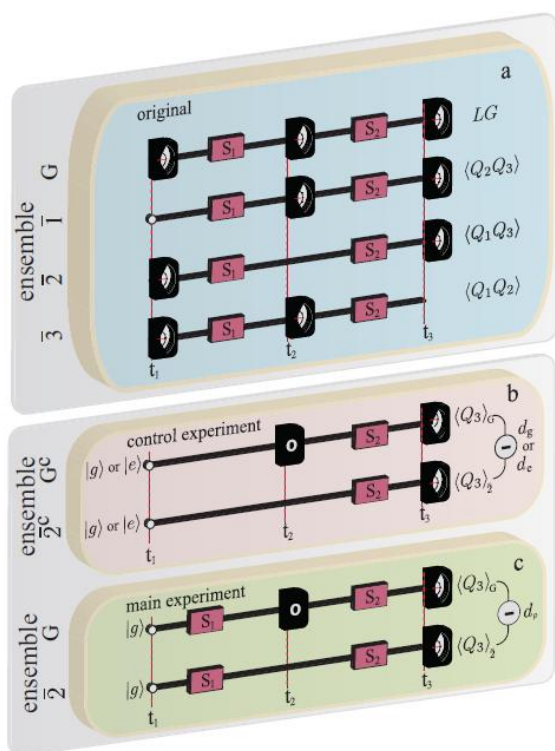


Рисунок 2. Простой тест макрореализма.

ЛГ выводят свое ограничение на макрореализм путем анализа измерения переменной Q в три последовательных момента времени (над ансамблем G). Это неравенство проверяется с помощью сборки корреляторов для двух моментов времени в отдельных экспериментах, где опущено одно из трех измерений (указано слева).

а) Верхняя панель показывает полный протокол эксперимента. На значение ожидания для финального измерения (t_3) может повлиять присутствие или отсутствие более раннего измерения (например, при t_2).

б) Контрольные эксперименты определяют наихудший случай возмущения, когда приготовлены классические состояния. Отметим отсутствие какого-либо перемешивания операций перед t_2 .

с) Основной эксперимент, аналогичный контрольному; добавляются операции перемешивания S_1 до измерения при t_2 .

В эксперименте операции перемешивания представляли собой импульсы, вводимые в резонансное микроволновое излучение, которое вызывало вращение псевдоспинов на различные углы. Они создавали взвешенные когерентные суперпозиции собственных состояний измерения. При этом создавались измеряемые возмущения, не объяснимые случайной неаккуратностью, что проверялось с помощью контрольных измерений.

Критерием невозмущенности состояния для ансамблей, определенных выше, является условие

$$d_\sigma = \langle Q_3 \rangle_G - \langle Q_3 \rangle_2 = 0$$

Существующая возможность нарушения условия из-за неаккуратности измерения при t_2 может контролироваться экспериментально. Определим параметр возмущения

$$d_\sigma := [P(Q_3 = +1|\sigma, O) - P(Q_3 = -1|\sigma, O)] - [P(Q_3 = +1|\sigma) - P(Q_3 = -1|\sigma)]$$

в качестве меры того, насколько сильное возмущение внесено в Q_3 при измерении Q в момент t_2 (сравнительно со случаем отсутствия измерения), когда приготовление системы непосредственно перед t_2 описывается разбросом σ . В паре контрольных экспериментов определяем d_g и d_e , где g и e – состояния, которые надежно выявляются при измерении (со 100%-вероятностью). Это – меры классического возмущения (см. рис. 2а).

Как только выполнены контрольные эксперименты, может быть проведен основной эксперимент по определению d_ρ . Здесь ρ описывает собственно приготовление, когда за g следует операция перемешивания S_1 – см. рис. 2с. Согласно квантовой механике, приготовление ρ описывается оператором плотности $\rho = |\alpha|^2 \rho_g + |\beta|^2 \rho_e + C$. Здесь $\rho_{g,e} = |g, e\rangle\langle g, e|$ – операторы плотности, связанные с приготовлением g и e соответственно, α и β – комплексные числа, удовлетворяющие соотношению $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$, а $C = (\alpha\beta^\dagger |g\rangle\langle e| + \text{h.c.})$ (здесь h.c. – эрмитово сопряженное – примеч. пер.) – внедиагональные члены, отвечающие за “когерентность”.

Если квантовое возмущение d_ρ значительно больше по интенсивности, чем наибольшее классическое возмущение, то это влечет за собой тот факт, что операция перемешивания приготавливает нечто другое, чем статистическая смесь g и e . С квантовой точки зрения это должно быть когерентной суперпозицией приготовленных состояний.

Этот протокол был проверен экспериментально, используя сверхпроводящий кубит с потоком, где Q – измерение “импульса”, введенного в систему. Авторы установили нарушение $d_\rho - d_g = -0.063177$, которое составило приблизительно 84 стандартных отклонения от нуля. Несмотря на использование относительно не высококачественного кубита, оказалось возможным выявить очень малые неопределенности, выполнив 7×10^6 попыток на элемент данных. Точное тестирование макрореализма предусматривает очевидность суперпозиции магнитных моментов, эквивалентную нескольким сотням тысяч статических электронных спинов, одновременно направленных в противоположных направлениях.

Ссылки

- [1] A. J. Leggett and A. Garg, Quantum Mechanics versus Macroscopic Realism: Is the Flux There When Nobody Looks?, [Phys. Rev. Lett. 54, 857 \(1985\)](#).
- [2] A.J. Leggett et al. A strict experimental test of macroscopic realism in a superconducting ux qubit. ArXiv:1601.03728v2 [quant-ph] 15 Jan 2016
- [3] Leggett–Garg inequalities. C. Emary, N. Lambert, and F. Nori, Rep. Prog. Phys. **77**, 016001 (2014). ArXiv:1304.5133v3 [quant-ph] 30 Jan 2014

2. Эксперимент Робенса и др. (2015 г.)

Работа [4] озаглавлена так: “Идеальные негативные измерения для квантовых блужданий, опровергающие теории, основанные на представлении о классических траекториях”. Как сказано в аннотации, сообщается о строгом тесте на неклассичность движения массивной квантовой частицы, которая распространяется на дискретной решетке. Измеряя темпоральные корреляции положения одиночных атомов, осуществляющих квантовое блуждание, авторы зафиксировали нарушение (на уровне вероятности, отвечающем 6σ) неравенства Леггетта-Гарга. Полученные результаты строго исключают (т.е. опровергают) любое объяснение квантовой транспортировки, основанное на классических хорошо определенных траекториях. Используются так называемые идеальные негативные измерения – существенный реквизит любого естественного теста Леггетта-Гарга – для получения информации о положении атомов, устранив любое прямое взаимодействие между ними. Свободное от взаимодействия измерение (interaction-free measurement) основано на новой системе транспортировки атомов, которая позволяет непосредственно определять отсутствие, а не присутствие атомов в выбранном месте решетки. За рамками фундаментального аспекта этого теста показано применение корреляционной функции Леггетта-Гарга для подтверждения квантовой суперпозиции. Здесь свидетельства этого используются для разделения различных типов блужданий, отличающего чисто классическое от целиком квантового поведения.

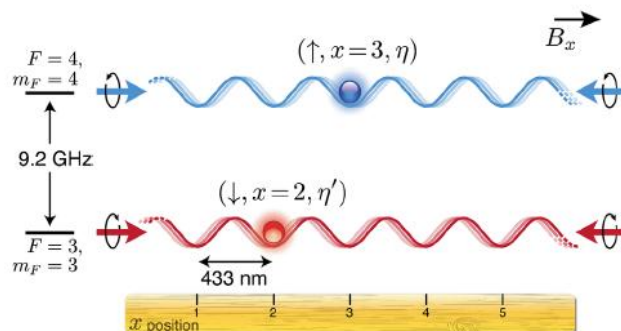
Краткое и популярное содержание статьи авторы приводят в следующей форме. Движение квантовых частиц радикально отличается от движения повседневных объектов. В то время, как наш опыт говорит, что движущийся объект следует по хорошо определенной траектории, в квантовой механике объекты движутся не вдоль отдельно взятой единичной траектории, но по суперпозиции всех возможных траекторий, соединяющих начальную и конечную точки.

В качестве объективного и строгого теста существования таких квантовых суперпозиций Леггетт и Гарг вывели математическое неравенство, которому подчиняются все объекты, движущиеся вдоль классических траекторий, но которые могут нарушаться квантовыми суперпозициями. Экспериментально исследовалось движение единичного атома цезия в процессе квантового блуждания в оптической периодической решетке; удалось осуществить управление атомами цезия с субнанометровой точностью. Было установлено, что это движение порождает значительное нарушение неравенства Леггетта-Гарга. Важно, что осуществляемые измерения являются неинвазивными. Когда атом не обнаруживается, эти (неинвазивные) измерения не должны оказывать влияния на классическое движение, что радикально отличается от квантовой транспортировки. Этот факт представляет существенное условие для любого собственного теста Леггетта-Гарга и позволяет сделать вывод, что наблюдаемое нарушение отвергает любое прямое объяснение проделанного эксперимента на основе представления о классических траекториях.

Проделанные измерения создают платформу для дальнейших тестов состояний квантовомеханической суперпозиции, включающих разделение более массивных объектов на увеличенные расстояния. Это – шаг к дальнейшему прояснению возникновения определенности в повседневных опытах из неопределенности квантового мира.

На рисунке ниже показана схема транспортировки одиночных атомов Cs в зависящих от состояния периодических потенциалах. Две независимые оптические решетки создают из стоячих волн с противоположной круговой

поляризацией, но одинаковой длиной волны $\lambda = 866$ нм. В зависимости от внутреннего состояния (\uparrow или \downarrow) атомы подвергаются действию потенциала той или другой решетки. Оптоэлектронный серво-контур блокировки позволяет произвольно управлять положением каждой решетки. Положение атома извлекается с точностью до шага решетки с помощью флуоресцентных изображений. Параметр η учитывает другие степени свободы, такие, как перпендикулярные к решетке положения атомов или, в общем случае, другие скрытые физические аспекты. Ось квантования определена малой крутизной магнитного поля B_x , которое выбирается вдоль двух оптических решеток. F и m_F обозначают соответственно полный угловой момент и его проекцию вдоль оси квантования для обоих внутренних сверхтонких состояний.



Ссылка

[4] Carsten Robens, Wolfgang Alt, Dieter Meschede, Clive Emary, and Andrea Alberti. Phys. Rev. X 5, 011003 – Published 20 January 2015
<http://journals.aps.org/prx/abstract/10.1103/PhysRevX.5.011003>

3. Комментарий к эксперименту Робенса и др.

20 января 2015 года на сайте журнала *Physical Review X* была опубликована статья с описанием экспериментов, продемонстрировавших, что атомы цезия нарушают принципы движения по классическим траекториям. “Постнаука” попросила прокомментировать это исследование доктора физико-математических наук Алексея Рубцова.

Что произошло

Международная группа ученых из Германии и Великобритании с точностью до шести стандартных отклонений показала, что для атомов цезия, охлажденных до сверхнизких температур и движущихся в созданном оптическом поле периодическом потенциале, нарушаются неравенства Леггетта — Гарга. Вероятность ошибки при такой точности составляет примерно 1 шанс из 500 миллионов. Эти неравенства определяют соотношения между координатами одной и той же частицы, измеренные в разные моменты времени. Их нарушение означает принципиальную невозможность свести эволюцию атома к движению по какой-либо определенной траектории.

Предыстория

Эта тема восходит ко временам Эйнштейна, который, как известно, считал, что квантовая механика не является окончательной теорией и что есть скрытые

параметры, в пространстве которых частицы движутся по определенным траекториям, просто мы не можем ни измерить эти параметры, ни посчитать траектории. Согласно положениям квантовой механики, мы всегда имеем дело с суперпозицией многих траекторий.

С предположением Эйнштейна было покончено, когда было проверено нарушение так называемых неравенств Белла, которые описывают корреляции между двумя частицами. Эти неравенства в классическом «эйнштейновском» мире должны всегда выполняться, а в квантовом мире они нарушаются. Было показано, что они действительно нарушаются — это было проверено примерно 50 лет назад.

После этого остается вопрос: если речь идет об одной частице, можно ли также убедиться, что она движется не по определенной траектории, а по целой совокупности траекторий? Для этого необходимо убедиться в нарушении неравенств Леггетта — Гарга, в которые входят корреляции между положениями частицы в различные моменты времени. Именно это и было сделано в данной работе применительно к массивной частице — атому цезия.

Похожие эксперименты были проведены и раньше, но не для реальных, а для квазичастиц вроде кубитов. Основная сложность в проведении эксперимента состояла в необходимости практически исключить взаимодействие атомов с окружающим миром: такое взаимодействие приводит к декогеренции, подавляющей эффекты квантовой интерференции траекторий.

Перспективы

Авторы говорят о возможности экспериментов, в которых интерферирующие траектории были бы разделены макроскопически большим расстоянием. Кроме того, неравенства Леггетта — Гарга было бы интересно проверить применительно к средним, вычисленным для систем нескольких взаимодействующих частиц, например атомным кластерам. Это новое знание о том, как квантовые свойства нашего мира выражаются в эволюции отдельных объектов. О квантовых свойствах как таковых ничего нового не узнано, они давно установлены, ничего проверять не нужно. Но вот о том, как они проявляются, данное исследование предоставляет действительно новое знание.

Ссылка

[5] У атомов обнаружили суперпозицию траекторий движения. Об эволюции движения атомов, ошибочном предположении Эйнштейна и нарушении неравенств Леггетта — Гарга. Сайт “Постнаука”. <http://postnauka.ru/faq/40588>