

Экспериментальная проверка теоремы о свободе воли

Б. Лю и др. (КНР, Испания)

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

arXiv:1603.08254v1 [quant-ph] 27 Mar 2016

Experimental test of the free will theorem

Bi-Heng Liu,^{1,2} Xiao-Min Hu,^{1,2} Jiang-Shan Chen,^{1,2} Yun-Feng Huang,^{1,2} Yong-Jian Han,^{1,2, a)} Chuan-Feng Li,^{1,2, b)} Guang-Can Guo,^{1,2} and Adán Cabello^{3, c)}

¹⁾Key Laboratory of Quantum Information, University of Science and Technology of China, CAS, Hefei, 230026, People's Republic of China

²⁾Synergetic Innovation Center of Quantum Information and Quantum Physics, University of Science and Technology of China, Hefei, 230026, People's Republic of China

³⁾Departamento de Física Aplicada II, Universidad de Sevilla, E-41012 Sevilla, Spain

^{a)}Electronic mail: smhan@ustc.edu.cn ^{b)}Electronic mail: ci@ustc.edu.cn ^{c)}Electronic mail: adan@us.es

Теорема о свободе воли [1,2] утверждает, что, если экспериментаторы свободны в том смысле, что их выбор не является функцией прошлого, то это должно быть справедливым для элементарных частиц. Эта теорема выходит за рамки теоремы Белла [3], поскольку она связывает два фундаментальных ресурса квантовых технологий: одночастичную контекстуальность [4 – 6], обеспечивающую силу квантовых вычислений [7 – 9], и двухчастичную нелокальность [3], обеспечивающую безопасность коммуникаций [10 – 12]. Эта теорема основывается на трех аксиомах:

- (i) существует максимальная скорость распространения информации,
- (ii) одиночные частицы могут демонстрировать контекстуальность [4 – 6],
- (iii) две разделенные частицы могут демонстрировать корреляции Эйнштейна-Подольского-Розена (ЭПР) [13].

В данной статье сообщается о первой экспериментальной проверке теоремы о свободе воли. Используются пары гипер-запутанных фотонов, запутанных по пути и поляризации, с дополнительными условиями привлечения аксиомы (i) за счет измерения каждого фотона в отдельной лаборатории. Аксиома (ii) тестируется проверкой нарушения неравенства не-контекстуальности Переса – Мермина [14], а аксиома (iii) – демонстрацией ЭПР-корреляций между двумя лабораториями. Три аксиомы влекут верхнюю границу для суммы корреляций между результатами последовательных измерений в одной и той же лаборатории и корреляций между результатами в обеих лабораториях [15]. Авторы наблюдали нарушение этой границы на уровне 66 стандартных отклонений.

Это говорит о том, что квантовая нелокальность может возникать, когда контекстуальность одиночной частицы сочетается с корреляциями, которые сами по себе не являются нелокальными. Такие результаты указывают на ресурсы, необходимые для квантовых вычислений и безопасности квантовых коммуникаций одновременно в одном и том же эксперименте и открывают дверь к созданию квантовых машин, эффективно решающих обе задачи.

Авторы представляют здесь эксперимент, который, во-первых, демонстрирует контекстуальность одиночной частицы в одной лаборатории.

Затем, поскольку частицы были предварительно запутаны с другими частицами в удаленной лаборатории, становится возможным выявить ЭПР-корреляции между обеими лабораториями. Таким образом, этот эксперимент является тестом теоремы о свободе воли, поскольку он порождает условия, при которых применяется аксиома (i), затем проверяется выполнение аксиом (ii) и (iii), и, в конце концов, выявляется наибольшее нарушение предсказаний теорий, в которых элементарные частицы не имеют свободы воли.

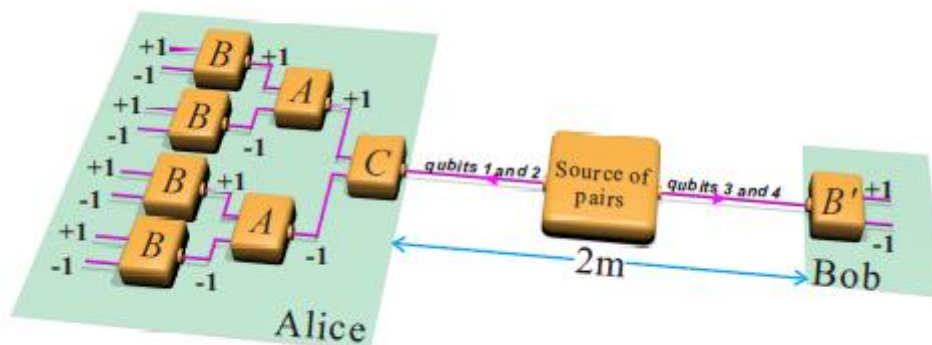


Рисунок 1. Схема эксперимента

Источник испускает пары запутанных частиц. Одна из пары частиц содержит два кубита (qubits 1 and 2) и посылается в лабораторию Алисы, где последовательно выполняется три измерения (например, C, A и B). Вторая частица также содержит два кубита (qubits 3 and 4) и посылается в лабораторию Боба, где выполняется единственное измерение (например, B'). Это позволяет получить обе корреляции при последовательных измерениях в лаборатории Алисы (например, $\langle CAB \rangle$) и корреляции между одним из измерений Алисы и одним измерением Боба (например, $\langle BB' \rangle_{CAB}$), необходимую для проверки тестируемого неравенства¹.

Приложение Е. Теорема о свободе воли и теорема Белла

Теорема о свободе воли устанавливает связь между контекстуальностью одиночной частицы и двухчастичной нелокальностью. Это было главным побудительным мотивом авторов при тестировании ее в соответствии с предложением в [9]. Однако подробное исследование показывает, что теорема о свободе воли приводит к выводам, сходным с теми, которые следуют из теоремы Белла [1]. Следовательно, интересно кратко обсудить различия между допущениями, выводами и сценариями, необходимыми для доказательства обеих теорем. Более подробный анализ различий между исходными допущениями см. в [10].

Теорема Белла рассматривает физические теории, удовлетворяющие следующим допущениям:

- (I) “Реализм”: Вероятности для результата измерения являются объективными свойствами измеряемой системы.
- (II) “Локальность”: В составных системах с пространственно разделенными частями вероятности измерений для одной части не зависят от измерений для других частей.

¹ См. ниже ссылки к основному материалу статьи.

(III) “Независимость от измерений”: Любой физический параметр, влияющий на выбор измерительной процедуры, статистически не зависит от любого физического параметра, влияющего на результаты измерений.

Вывод из теоремы Белла состоит в отсутствии теории, удовлетворяющей этим предположениям, которая могла бы предсказывать те же результаты, что и квантовая теория.

В своей исходной формулировке [2, 3] теорема о свободе воли основана на следующих допущениях:

(0) Экспериментаторы обладают свободой воли, так что их выбор измерений не предопределяется прошлым.

(i) “Fin”: Существует максимальная скорость распространения информации (это не обязательно скорость света).

(ii) “Spin”: Измерения квадратов компонент спина некоторых элементарных частиц со спином 1 в трех ортогональных направлениях, всегда дают комбинацию типа (1, 1, 0). [Комментарий авторов:] Это предсказание не может быть воспроизведено любой физической теорией с неконтекстуальными скрытыми параметрами [11, 12]. Сходные предсказания имеются для любых частиц со спином больше 1 [13].

(iii) “Twin”: Возможно разделить две элементарные частицы со спином 1 значительным расстоянием так, что если измерить их спины в параллельных направлениях, то квадраты результатов измерений совпадут. [Комментарий авторов:] Сходные предсказания имеются для любых частиц со спином больше 1 [9].

Вывод из теоремы о свободе воли гласит, что элементарные частицы обладают свободой воли в том смысле, что они продуцируют результаты, не предопределенные прошлым.

Сравним исходные допущения теорем. В теореме Белла гипотеза “локальности” сформулирована с учетом гипотезы “реализма”. В теореме о свободе воли это заменено на аксиому “Fin”, что не требует допущения о “реализме”, но требует использования понятия “информация”.

В теореме Белла “независимость от измерения” обосновывается обращением к свободе воли экспериментаторов (см., например, [14]). В этом смысле “независимость от измерения” в теореме Белла играет роль, аналогичную допущению (0) в теореме о свободе воли.

Формулировка теоремы Белла наводит на мысль о том, что ее физический смысл заключен в невозможности “локального реализма”, определенного как совокупность допущений (I) и (II). Формулировка же теоремы о свободе воли склоняет к выводу, что элементарные частицы обладают свободой воли, что и нарушает допущение (I). В этом отношении физический смысл теоремы о свободе воли выглядит более прямым.

Обратимся, наконец, к различиям между физическими сценариями, требующимися для доказательства теоремы Белла в [1] и доказательства теоремы о свободе воли в [9], которое является основой описываемого в статье эксперимента. Доказательство теоремы Белла в [1] основано на квантовом нарушении корреляционного неравенства между единичными измерениями над каждой из двух систем. Каждая система должна иметь размерность, как минимум равную двум. Доказательство теоремы о свободе воли в [9] основано на квантовом нарушении корреляционного неравенства, куда входят: (i) корреляции между двумя системами размерности 4, которые могут быть объяснимыми с помощью теорий с локальными скрытыми переменными, и (ii) корреляциями

между последовательными совместимыми измерениями над одной из систем, которые могут быть объяснимыми локальными контекстуальными теориями. Однако оба типа корреляций (i) и (ii) не могут быть одновременно объяснимыми теориями с локальными скрытыми параметрами².

Ссылки к основному материалу статьи

- [1] Conway, J. H. & Kochen, S. The free will theorem. *Found. Phys.* 36, 1441-1473 (2006).
- [2] Conway, J. H. & Kochen, S. The strong free will theorem. *Not. Am. Math. Soc.* 56, 226-32 (2009).
- [3] Bell, J. S. On the Einstein Podolsky Rosen paradox. *Physics* 1, 195-200 (1964).
- [4] Specker, E. P. Die Logik Nicht Gleichzeitiger Entscheidungen. *Dialectica* 14, 239-246 (1960).
- [5] Bell, J. S. On the problem of hidden variables in quantum mechanics. *Rev. Mod. Phys.* 38, 447-52 (1966).
- [6] Kochen, S. & Specker, E. P. The problem of hidden variables in quantum mechanics. *J. Math. Mech.* 17, 59-87 (1967).
- [7] Howard, M., Wallman, J., Veitch, V. & Emerson, J. Contextuality supplies the 'magic' for quantum computation. *Nature* 510, 351-355 (2014).
- [8] Delfosse, N., Guerini, P. A., Bian, J. & Raussendorf, R. Wigner function negativity and contextuality in quantum computation on rebits. *Phys. Rev. X* 5, 021003 (2015).
- [9] Raussendorf, R., Browne, D. E., Delfosse, N., Okay, C. & Bermejo-Vega, J. Contextuality as a resource for qubit quantum computation. Preprint available at <http://arXiv.org/abs/1511.08506> (2015).
- [10] Ekert, A. K. Quantum cryptography based on Bell's theorem. *Phys. Rev. Lett.* 67, 661-663 (1991).
- [11] Barrett, J., Hardy, L. & Kent, A. No signalling and quantum key distribution. *Phys. Rev. Lett.* 95, 010503 (2005).
- [12] Acin, A. et al. Device-independent security of quantum cryptography against collective attacks. *Phys. Rev. Lett.* 98, 230501 (2007).
- [13] Einstein, A., Podolsky, B. & Rosen, N. Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete? *Phys. Rev.* 47, 777-780 (1935).
- [14] Cabello, A. Experimentally testable state-independent quantum contextuality. *Phys. Rev. Lett.* 101, 210401 (2008).
- [15] Cabello, A. Proposal for revealing quantum nonlocality via local contextuality. *Phys. Rev. Lett.* 104, 220401 (2010).
- [16] Kurzyński, P., Cabello, A. & Kaszlikowski, D. Fundamental monogamy relation between contextuality and nonlocality. *Phys. Rev. Lett.* 112, 100401 (2014).
- [17] Zhan, X., Zhang, X., Li, J., Zhang, Y., Sanders, B. C. & Xue, P. Realization of the contextuality-nonlocality tradeoff with a qubit-qutrit photon pair. *Phys. Rev. Lett.* 116, 090401 (2016).
- [18] Kochen, S. Letter to A. Shimony in the early 70's reported in Refs.20,21.
- [19] Stairs, A. Quantum Mechanics, Logic and Reality. Ph. D. thesis, University of Western Ontario, Canada, 1978.
- [20] Stairs, A. Quantum logic, realism, and value definiteness. *Philos. Sci.* 50, 578-602 (1983).
- [21] Heywood, P. & Redhead, M. L. G. Nonlocality and the Kochen-Specker paradox. *Found. Phys.* 13, 481-499 (1983).

² См. ниже ссылки к приложению E.

- [22] Freedman S. J. & Clauser, J. F. Experimental test of local hidden-variable theories. *Phys. Rev. Lett.* 28, 938-941 (1972).
- [23] Aspect, A., Dalibard, J. & Roger, G. Experimental test of Bell's inequalities using time-varying analyzers. *Phys. Rev. Lett.* 49, 1804-1807 (1982).
- [24] Hensen, B. et al. Loophole-free Bell inequality violation using electron spins separated by 1.3 kilometres. *Nature* 526, 682-686 (2015).
- [25] Giustina, M. et al. Significant-loophole-free test of Bell's theorem with entangled photons. *Phys. Rev. Lett.* 115, 250401 (2015).
- [26] Shalm, L. K. et al. Strong loophole-free test of local realism. *Phys. Rev. Lett.* 115, 250402 (2015).
- [27] Kirchmair, G. et al. State-independent experimental test of quantum contextuality. *Nature* 460, 494-497 (2009).
- [28] Amselem, E., R_ admark, M., Bourennane, M. & Cabello, A. State-independent quantum contextuality with single photons. *Phys. Rev. Lett.* 103, 160405 (2009).
- [29] Moussa, O., Ryan, C. A., Cory, D. G. & Laamme, R. Testing contextuality on quantum ensembles with one clean qubit. *Phys. Rev. Lett.* 104, 160501 (2010).
- [30] Gao, W. B. et al. Experimental demonstration of a hyperentangled [30] ten-qubit Schrodinger cat state. *Nature Physics* 6, 331-335 (2010).
- [31] Kwiat, P. G., Mattle, K., Weinfurter, H. & Zeilinger, A. New high-intensity source of polarization-entangled photon pairs. *Phys. Rev. Lett.* 75, 4337-4340 (1995).
- [32] Liu, B. H. et al. Experimental demonstration of efficient superdense coding in the presence of non-Markovian noise. Preprint available at <http://arXiv.org/abs/1504.07572> (2015).
- [33] A. Peres, Incompatible results of quantum measurements. *Phys. Lett. A* 151, 107-108 (1990).
- [34] N. D. Mermin, Simple uni_ed form for the major no-hiddenvariables theorems. *Phys. Rev. Lett.* 65, 3373-3376 (1990).
- [35] O'Brien, J. L., Pryde, G. J., White, A. G., Ralph, T. C. & Branning, D. Demonstration of an all-optical quantum controlled-NOT gate. *Nature* 426, 264-267 (2004).
- [36] La Cour, B. R. Quantum contextuality in the Mermin-Peres square: A hidden-variable perspective. *Phys. Rev. A* 79, 012102 (2009).
- [37] Blasiak, P. Classical systems can be contextual too: Analogue of the Mermin-Peres square. *Ann. Phys.* 353, 326-339 (2015).

Ссылки к приложению E

- [1] Bell, J. S. On the Einstein Podolsky Rosen paradox. *Physics* 1, 195-200 (1964).
- [2] Conway, J. H. & Kochen, S. The free will theorem. *Found. Phys.* 36, 1441-1473 (2006).
- [3] Conway, J. H. & Kochen, S. The strong free will theorem. *Not. Am. Math. Soc.* 56, 226-232 (2009).
- [4] Pearle, P. M. Hidden-variable example based upon data rejection. *Phys. Rev. D* 2, 1418-1425 (1970).
- [5] Gühne, O. et al. Compatibility and noncontextuality for sequential measurements. *Phys. Rev. A* 81, 022121 (2010).
- [6] Kleinmann, M. et al. Memory cost of quantum contextuality. *New J. Phys.* 13, 113011 (2011).
- [7] Frustaglia, D. et al. Classical physics and the bounds of quantum correlations. Preprint available at <http://arXiv.org/abs/1511.08144> (2015).
- [8] Kirchmair, G. et al. State-independent experimental test of quantum contextuality. *Nature* 460, 494-497 (2009).

- [9] Cabello, A. Proposal for revealing quantum nonlocality via local contextuality. *Phys. Rev. Lett.* 104, 220401 (2010).
- [10] Cator, E. & Landsman, K. Constraints on determinism: Bell versus Conway-Kochen. *Found. Phys.* 44, 781-791 (2014).
- [11] Bell, J. S. On the problem of hidden variables in quantum mechanics. *Rev. Mod. Phys.* 38, 447-452 (1966).
- [12] Kochen, S. & Specker, E. P. The problem of hidden variables in quantum mechanics. *J. Math. Mech.* 17, 59-87 (1967).
- [13] Cabello, A. Experimentally testable state-independent quantum contextuality. *Phys. Rev. Lett.* 101, 210401 (2008).
- [14] Bell, J. S., Shimony, A., Horne, M. A. & Clauser, J. F. An exchange on local beables. *Dialectica* 39, 85-110 (1985).