

Расширяя пределы квантовой нелокальности для запутанных фотонов

Б. Кристенсен и др. (США, Тайвань, Швейцария)

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

arXiv:1506.01649v1 [quant-ph] 4 Jun 2015

Exploring the limits of quantum nonlocality with entangled photons

Bradley G. Christensen¹, Yeong-Cherng Liang^{2,3}, Nicolas Brunner⁴, Nicolas Gisin⁵, and Paul G. Kwiat¹

¹*Department of Physics, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, IL 61801, USA*

²*Department of Physics, National Cheng Kung University, Tainan 701, Taiwan*

³*Institute for Theoretical Physics, ETH Zürich, 8093 Zurich, Switzerland*

⁴*Département de Physique Théorique, Université de Genève, 1211 Genève, Switzerland*

⁵*Group of Applied Physics, University of Geneva, CH-1211 Geneva 4, Switzerland*

(Dated: June 5, 2015)

Квантовая нелокальность, безусловно, относится к числу наиболее контринтуитивных феноменов, предсказываемых квантовой теорией [1]. За недавно прошедшие годы развитие абстрактных представлений о нелокальности [2 – 4] принесло намного более глубокое понимание этой проблематики. Параллельно прогресс в экспериментальной области позволил продемонстрировать квантовую нелокальность в большом числе физических систем [5–9] и добиться почти полного устранения возможных источников ошибок в опытах по проверке неравенств Белла (loophole-free Bell test) [10 – 13]. В данной статье как теоретические, так и экспериментальные достижения используются для установления пределов квантовой нелокальности. Такой подход дает возможность тщательной проверки квантовой теории и может открыть путь к новой физике за рамками существующей квантовой модели [14, 15]. Благодаря использованию разнообразных и высококачественных источников пар поляризованных фотонов в работе устанавливаются границы для квантовых корреляций, наивысшие среди когда либо публиковавшихся, а также демонстрируется феномен увеличения нелокальности с уменьшением запутанности. Эти результаты замечательно соответствуют квантовым предсказаниям.

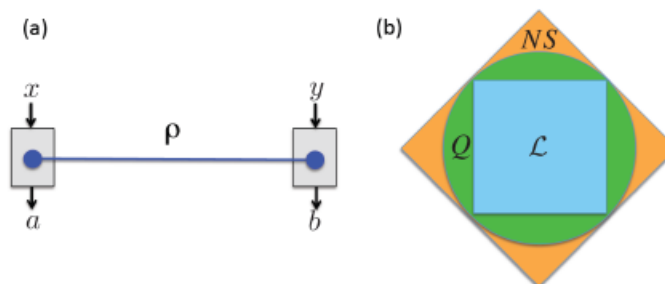


Рисунок 1.

(a) Сценарий Белл-эксперимента. Алиса и Боб делают измерения типа “черный ящик” над нелокальным (квантовым) состоянием ρ . Эксперимент характеризуется

данными $\{p(a, b|x, y)\}$, т.е. набором условных вероятностей для каждой пары результатов измерений (a и b) при заданных входных настройках x и y . Исходя из данных $p(a, b|x, y)$ могут быть проверены неравенства Белла.

(b) Геометрическое представление бессигнальных корреляций. Множество локальных (\mathcal{L}), квантовых (\mathcal{Q}) и бессигнальных (\mathcal{NS}) распределений спроектировано на плоскость, где выполняются следующие очевидные соотношения: $\mathcal{L} \subset \mathcal{Q} \subset \mathcal{NS}$.

Ссылки

- [1] Bell, J. S. On the EPR paradox, *Physics* 1, 195 (1964).
- [2] Popescu, S. and Rohrlich, D. Causality and non-locality as axioms for quantum mechanics. *Found. Phys.* 24, 379-385 (1994).
- [3] Barrett, J., et al. Nonlocal correlations as an informationtheoretic resource. *Phys. Rev. A* 71, 022101 (2005).
- [4] Brunner, N., D. Cavalcanti, D., Pironio, S., Scarani, V., Wehner, S. Bell nonlocality, *Rev. Mod. Phys.* 86, 419 (2014).
- [5] Aspect, A., Dalibard, J., and Roger, G. Experimental test of Bell's inequalities using time-varying analyzers *Phys. Rev. Lett.* 49, 1804 (1982).
- [6] Tittel, W., Brendel, J., Zbinden, H., and Gisin, N. Violation of Bell inequalities by photons more than 10 km apart. *Phys. Rev. Lett.* 81, 3563 (1998).
- [7] Weihs, G., Jennewein, T., Simon, C., Weinfurter, H., and Zeilinger, A. Violation of Bell's inequality under strict Einstein locality conditions. *Phys. Rev. Lett.* 81, 5039 (1998).
- [8] Rowe, M. A. et al. Experimental violation of a Bell's inequality with efficient detection. *Nature* 409, 791-794 (2001).
- [9] Ansmann, M. et al. Violation of Bell's inequality in Josephson phase qubits. *Nature* 461, 504-506 (2009).
- [10] Christensen, B. G. et al. Detection-loophole-free test of quantum nonlocality, and applications. *Phys. Rev. Lett.* 111, 130406 (2013).
- [11] Giustina, M. et al. Bell violation using entangled photons without the fair-sampling assumption. *Nature* 497, 227 (2013).
- [12] Hofmann, J. et al. Heralded entanglement between widely separated atoms. *Science* 337, 72-75 (2012).
- [13] Bernien, H. et al. Heralded entanglement between solid-state qubits separated by three metres. *Nature* 497, 86-90 (2013).
- [14] Popescu, S. Nonlocality beyond quantum mechanics. *Nature Physics* 10, 264-270 (2014).
- [15] Navascués, M., Guryanova, Y., Hoban, M. J., Acin, A. Almost quantum correlations. *Nat. Commun.* 6, 6288 (2015).
- [16] Shadbolt, P., Mathews, J., Laing, A., O'Brien, J. Testing foundations of quantum mechanics with photons. *Nat. Phys.* 10, 278 (2014).
- [17] Acin, A. et al. Device-independent security of quantum cryptography against collective attacks, *Phys. Rev. Lett.* 98, 230501 (2007).
- [18] Colbeck, R. Quantum and relativistic protocols for secure multi-party computation. PhD Thesis, Univ. of Cambridge (2007).
- [19] Pironio, S. et al. Random numbers certified by Bell's theorem. *Nature* 464, 1021 (2010).
- [20] Clauser, J. F., Horne, M. A., Shimony, A., and Holt, R. A. Proposed experiment to test local hidden-variable theories. *Phys. Rev. Lett.* 23, 880 (1969).

- [21] Pan, J.-P., Bouwmeester, D., Daniell, M., Weinfurter, H. and Zeilinger, A. Experimental test of quantum nonlocality in three-photon Greenberger-Horne-Zeilinger entanglement. *Nature* 403, 515 (2000).
- [22] Lavoie, J., Kaltenbaek, R. and Resch, K. Experimental violation of Svetlichny's inequality. *New J. Phys.* 11, 073051 (2009).
- [23] Erven, C. et al. Experimental three-photon quantum nonlocality under strict locality conditions. *Nature Photonics* 8, 292-296 (2014).
- [24] Mair, A., Vaziri, A., Weihs, G., and Zeilinger, A. Entanglement of the orbital angular momentum states of photons. *Nature* 412, 313 (2001).
- [25] Thew, R. T., Acin, A., Zbinden, H., and Gisin, N. Bell-type test of energy-time entangled qutrits. *Phys. Rev. Lett.* 93, 010503 (2004).
- [26] Dada, A. C., Leach, J., Buller, G. S., Padgett, M. J., Andersson, E. Experimental high-dimensional two-photon entanglement and violations of generalized Bell inequalities. *Nat. Phys.* 7, 677-680 (2011).
- [27] van Dam, W. Implausible consequences of superstrong nonlocality. Preprint at <http://arxiv.org/abs/quant-ph/0501159> (2005).
- [28] Pawłowski, M. et al. Information causality as a physical principle. *Nature* 461, 1101-1104 (2009).
- [29] Fritz, T. et al. Local orthogonality as a multipartite principle for quantum correlations. *Nature Commun.* 4, 2263 (2013).
- [30] Navascués, M., Wunderlich, H. A glance beyond the quantum model. *Proc. Roy. Soc. Lond. A* 466, 881 (2009).
- [31] Rohrlich, D. PR-box correlations have no classical limit. *Quantum Theory: A two Time Success Story*, (Springer, NY, 2013).
- [32] Gisin, N. Quantum measurement of spins and magnets, and the classical limit of PR-boxes. arXiv:1407.8122.
- [33] Tsirelson, B. S. Quantum generalizations of Bell's inequality. *Lett. Math. Phys.* 4, 93-100 (1980).
- [34] Navascués, M., Pironio, S., and Acín, A. A convergent hierarchy of semidefinite programs characterizing the set of quantum correlations. *New J. Phys.*, 10, 073013 (2008).
- [35] Doherty, A. C., Liang, Y.-C., Toner, B., and Wehner, S. Proceedings of the 23rd IEEE Conference on Computational Complexity (IEEE Computer Society, College Park, MD, 2008), pp. 199-210.
- [36] Kwiat, P. G., Waks, E., White, A. G., Appelbaum, I., Eberhard, P. H. Ultrabright source of polarization-entangled photons. *Phys. Rev. A* 60, 773 (1999).
- [37] Rangarajan, R., Goggin, M., Kwiat, P. Optimizing type-I polarization-entangled photons. *Opt. Express* 17, 18920 (2009).
- [38] Liang, Y.-C., Vértesi, T., Brunner, N. Semi-deviceindependent bounds on entanglement. *Phys. Rev. A* 83, 022108 (2011).
- [39] Junge, M., and Palazuelos, C., Large violation of Bell inequalities with low entanglement. *Commun. Math. Phys.* 306, 695 (2011).
- [40] Vidick, T., and Wehner, S. More nonlocality with less entanglement. *Phys. Rev. A* 83, 052310 (2011).
- [41] Pearle, P. Hidden-variable example based upon data rejection. *Phys. Rev. D* 2, 1418 (1970).
- [42] Braunstein, S., and Caves, C. Wringing out better Bell inequalities, *Annals of Phys.* 202, 22 (1990).
- [43] Stuart, T. E., Slater, J. A., Colbeck, R., Renner, R., Tittel, W. Experimental bound on the maximum predictive power of physical theories. *Phys. Rev. Lett.* 109, 020402 (2012).

- [44] Eilitzur, A., Popescu, S., and Rohrlich, D. Quantum nonlocality for each pair in an ensemble. *Phys. Lett. A* 162, 25 (1992).
- [45] Barrett, J., Kent, A., Pironio, S. Maximally nonlocal and monogamous quantum correlations. *Phys. Rev. Lett.* 97, 170409 (2006).
- [46] Colbeck, R., and Renner, R. No extension of quantum theory can have improved predictive power. *Nature Commun.* 2, 411 (2011).
- [47] Brunner, N., Gisin, N., Scarani, V. Entanglement and nonlocality are different resources. *New J. Phys.* 7, 88 (2005).
- [48] Cerf, N. J., Gisin, N., Massar, S., Popescu, S. Simulating maximal quantum entanglement without communication. *Phys. Rev. Lett.* 94, 220403 (2005).
- [49] Bernhard, C. et al. Non-locality of experimental qutrit pairs. *J. Phys. A: Math. Theo.* 47 424013 (2014).
- [50] Branciard, C. Detection loophole in Bell experiments: How postselection modifies the requirements to observe nonlocality. *Phys. Rev. A* 83, 032123 (2011).
- [51] Braunstein, S. L., Mann, A., Revzen, M. Maximal violation of Bell inequalities for mixed states. *Phys. Rev. Lett.* 68, 3259 (1992).
- [52] Lang, B., V´ertesi, T. and Navascu´es, M. Closed sets of correlations: answers from the zoo. *J. Phys. A: Math. Theor.* 47, 424029 (2014).
- [53] L¨ofberg, J. Proceedings of the CACSD Conference, Taipei, Taiwan, 2004.
- [54] Liang, Y.-C. and Doherty, A. C. Bounds on quantum correlations in Bell-inequality experiments. *Phys. Rev. A* 75, 042103 (2007).
- [55] Liang, Y.-C., Lim, C. W., and Deng, D. L. Reexamination of a multisetting Bell inequality for qudits. *Phys. Rev. A* 80, 052116 (2009).