

После Белла

А. Хренников (Швеция)

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

arXiv:1603.08674v1 [quant-ph] 29 Mar 2016

After Bell

Andrei Khrennikov

International Center for Mathematical Modeling in Physics, Engineering, Economics, and Cognitive Science, Linnaeus University, Växjö, Sweden

March 30, 2016

Анализируются фундаментальные последствия недавно объявленных экспериментов, свободных от [всех известных] ловушек, по проверке неравенства Белла. В статье рассматриваются две интерпретации этих замечательных экспериментов. В стандартной интерпретации “Эйнштейн ошибался, а Бор был прав, существует таинственное действие на расстоянии, квантовый реализм несовместим с локальностью”. Однако показано, что все еще возможно интерпретировать квантовую механику без обращения к нелокальности или отрицания реализма. Автор выражает надежду, что эта заметка привлечет внимание экспертов в области оснований квантовой механики и побудит их к собственным комментариям в связи с окончательным тестом Белла.

Это, наконец, произошло! В 2015 году три мировые ведущие экспериментальные группы, работающие в области оснований квантовой механики (КМ) объявили (практически одновременно), что они осуществили свободные от [известных] ловушек эксперименты по проверке наличия нарушений неравенства Белла [1], [2]: это группы Ronald Hanson (Delf University of Technology) [3], Anton Zeilinger (University of Vienna) [4] и Linden Shalm (NIST, Boulder) [5]. Это решительно великое событие в области оснований квантовой механики; тем более, что это случилось через столь продолжительное время после пионерского эксперимента Alain Aspect [6]. (Хотя некоторые эксперты в области оснований КМ утверждают, что ловушки локальности и детектирования не могут быть обойдены в рамках одного и того же эксперимента в силу принципа неопределенности Гейзенберга [7].

Ни в квантовом сообществе, ни в масс-медиа, ориентирующихся на популяризацию науки, это не вызвало широкого отклика, т.к. именно подобный результат и ожидался¹. Тем не менее, было бы замечательно, если бы недавние публикации [3]-[5] породили серьезную дискуссию о полном устранении всех ловушек из экспериментов по проверке неравенства Белла, т.к. имеются различные точки зрения на соответствующую проблему. Хотя “стандартная точка зрения” доминирует в квантовом сообществе, имеются и другие (“сингулярные”) точки зрения, см., например, М. Kurczynski [11].

¹ Эта ситуация напомнила автору историю с окончательным доказательством теоремы Ферма. Даже математики не могут обычно ответить на вопрос: кто окончательно доказал эту теорему?

Кратко напомним стандартную (“конвенциональную”) точку зрения, представленную в [1], [2] и в сотнях статей и монографий: было окончательно экспериментально подтверждено, что

CV1: Эйнштейн ошибался, а Бор был прав;
 CV2: существует таинственное действие на расстоянии;
 CV3: квантовый реализм не совместим с локальностью.

Точки зрения тех, кто не согласен с “конвенциональной позицией”, характеризуются большим разбросом [15]-[26]. Я даже не буду пытаться формулировать общую неконвенциональную платформу, а представлю лишь собственную позицию [25]:

NCV1: Были правы оба – и Эйнштейн, и Бор;
 NCV2: не существует таинственного действия на расстоянии;
 NCV3: квантовый реализм совместим с локальностью.

В разделе 2 делается попытка уточнить точку зрения сторонников CV1 – CV3; в частности, сопоставляется “интерпретация действия на расстоянии” с копенгагенской интерпретацией КМ (оказывается неожиданным, что эти две интерпретации можно совмещать без когнитивного диссонанса). Затем, чтобы обсудить вывод о реализме в КМ, я обращаюсь к его онто-эпистемологическому анализу в духе Atmanspahrer и Primas[27]. С этой точки зрения аргумент Белла может интерпретироваться как гипотеза, что онтологические состояния могут быть отождествлены с эпистемологическими. Мы также обсуждаем эту гипотезу в свете старой концепции построения (Bild conception) (Герц, Больцман, Шрёдингер) о двух дескриптивных уровнях природы – теоретическом и наблюдательном, см., например, [28] и главу 1 монографии [29]. Наш вывод состоит в том, что отклонение гипотезы Белла как результат недавних экспериментов нельзя интерпретировать как невозможность сохранить реалистическую точку зрения. Здесь нет необходимости в действии на расстоянии.

Раздел 3 начинается с представления колмогоровской интерпретации [30] классической вероятности (CP) как наблюдательной теории (описывающей эпистемологические состояния природы). Колмогоровская CP является контекстуальной теорией, устанавливающей вероятностные пространства для экспериментальных контекстов, комплексов экспериментальных физических условий. Эта позиция приводит к контекстуальному представлению вероятностной структуры экспериментального теста Белла [23], [25].

В разделе 4 я представляю мою собственную картину будущего развития квантовых оснований в “после-белловскую эпоху”: от полного отрицания гипотезы Белла к новым исследованиям относительно подхода к КМ в виде двух дескриптивных уровней. Вопреки общему мнению (см., например, статью Aspect [9], озаглавленную “Завершая квантовую дискуссию между Эйнштейном и Бором” и статью Wiseman [10] “Квантовая физика: смерть вследствие эксперимента для локального реализма”), для меня финальный тест Белла не требовал полной невозможности “выходить за пределы квантовой теории” [29]. Главный смысл этого теста состоит в том, что некоторая истинно субквантовая модель более загадочна, чем это было предположено Беллом. Заметим также, что даже те, кто не хочет соглашаться с моими философскими и вероятностными аргументами, должны согласиться с тем, что у нас нет выбора – мы должны выйти за пределы квантового мира, по крайней мере – для решения проблемы объединения двух

великих физических теорий: квантовой механики (или, точнее, квантовую теорию поля) и общую теорию относительности.

Ссылки

- [1] J.S. Bell, “*On the Einstein-Podolski-Rosen paradox*”, *Physics* 1, 195 (1964).
- [2] Bell, J.: *Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics*. Cambridge Univ. Press, Cambridge (1987)
- [3] B. Hensen et al, *Experimental loophole-free violation of a Bell inequality using entangled electron spins separated by 1.3 km*, *Nature* 526, 682 (2015); arXiv:1508.05949 [quant-ph] (2015)
- [4] M. Giustina et al, A significant-loophole-free test of Bell’s theorem with entangled photons, *Phys. Rev. Lett.* 115, 250401 (2015) [arXiv: quantph1511.03190].
- [5] L. K. Shalm et al, A strong loophole-free test of local realism, *Phys. Rev. Lett.* 115, 250402 (2015) [arXiv:quant-ph1511.03189].
- [6] Aspect, A. (1983). *Three Experimental Tests of Bell Inequalities by the Measurement of Polarization Correlations between Photons* (Orsay Press, Orsay).
- [7] A. Khrennikov and I.V. Volovich, Local realistic representation for correlations in the original EPR model for position and momentum, *Soft Computing* 10, 521 (2005).
- [8] Weihs, G. (1999). *Ein Experiment zum Test der Bellschen Ungleichung unter Einsteinscher Lokalitat* (University of Vienna Press, Vienna).
- [9] A. Aspect, Closing the Door on Einstein and Bohr’s Quantum Debate, *Physics* 8, 123 (2015)
- [10] H. Wiseman, Quantum physics: Death by experiment for local realism. *Nature* 526, 649650 (2015).
- [11] Kupczynski, Can Einstein with Bohr Debate on Quantum Mechanics Be Closed? arXiv:1603.00266 [quant-ph].
- [12] Clauser J F, Horne M A, Shimony A and Holt R A 1969 *Phys. Rev. Lett.* 23 (15) 880–884
- [13] Clauser J F and Horne M A 1974 *Phys. Rev. D* 10 526–535 [14] Clauser J F and Shimony A 1978 *Rep. Prog. Phys.* 41 1881–1927
- [15] Pitowsky, I. (1982). Resolution of the Einstein-Podolsky-Rosen and Bell paradoxes, *Phys. Rev. Lett.* 48, 1299; *Erratum Phys. Rev. Lett.* 48, 1768.
- [16] Kupczynski, M. (1987). Bertrand’s paradox and Bell’s inequalities, *Phys. Lett. A* 121, pp. 205–207.
- [17] G. Lochak, De Broglie’s initial conception of De Broglie waves. In: Diner, S., Fargue, D. Lochak, G. and Selleri, F. (eds) *The Wave–Particle Dualism. A Tribute to Louis de Broglie on his 90th Birthday*, pp. 1–26. D. Reidel Publ. Company, Dordrecht (1984)
- [18] Accardi, L.: The probabilistic roots of the quantum mechanical paradoxes. In: Diner, S., Fargue, D. Lochak, G. and Selleri, F. (eds) *The Wave–Particle Dualism. Atribute to Louis de Broglie on his 90th Birthday*, pp. 47–55. D. Reidel Publ. Company, Dordrecht (1984)
- [19] De Muynck, W. M. (2002). *Foundations of Quantum Mechanics, an Empiricists Approach*. (Kluwer, Dordrecht).
- [20] Hess, K. (2014). *Einstein was right!* (Pan Stanford Publ., Singapore).
- [21] De Raedt, H., De Raedt, K., Michielsen, K., Keimpema, K. and Miyashita, S. (2007). Event-based computer simulation model of Aspect type experiments strictly satisfying Einstein’s locality conditions, *Phys. Soc. Japan* 76, 104005.
- [22] Allahverdyan, A., Khrennikov, A.Yu. and Nieuwenhuizen, Th.M.: Brownian entanglement. *Phys. Rev. A* 71, 032102-1 – 032102-14 (2005).

- [23] A. Khrennikov, Bell-Boole inequality: Nonlocality or probabilistic incompatibility of random variables? *Entropy*, 10, N 2, 19-32 (2008).
- [24] Adenier, G.: Local Realist Approach and Numerical Simulation of Nonclassical Experiments in Quantum Mechanics. Växjö Univ. Press, Växjö (2008)
- [25] A. Khrennikov, *Contextual Approach to Quantum Formalism*, Springer, ISBN 978-1-4020-9592-4 (2009).
- [26] Nieuwenhuizen, Th. M. (2009). Where Bell went wrong?, in L. Accardi, G. Adenier, C. A. Fuchs, G. Jaeger, A. Yu. Khrennikov, J.-A. Larsson and S. Stenholm (eds.), *AIP Conf. Proc., Foundations of Probability and Physics - 5* 1101 (Am. Inst. Phys., Melville, NY), pp. 127–133.
- [27] Atmanspacher, H. and Primas, H.: Epistemic and ontic quantumrealities. In: Adenier, G., Khrennikov, A. Yu. (eds) *Foundations of Probability and Physics-3*, pp. 49-62. American Institute of Physics, Ser. Conference Proceedings 750, Melville, NY (2005)
- [28] D'Agostino, S.: Continuity and completeness in physical theory: Schrödinger's return to the wave interpretation of quantum mechanics in the 1950's. In: Bitbol, M. and O. Darrigol (eds.) *E. Schrödinger: Philosophy and the Birth of Quantum Mechanics*, 339-360. Editions Frontieres, Gif-sur-Yvette (1992)
- [29] A. Khrennikov *Beyond Quantum*, Pan Stanford Publ., Singapore, 2014.
- [30] Kolmogoroff, A. N.: *Grundbegriffe der Wahrscheinlichkeitsrechnung*. Springer Verlag, Berlin (1933); English translation: Kolmogorov, A.N.: *Foundations of Theory of Probability*. Chelsea Publishing Company, New York (1956).
- [31] A. Einstein, B. Podolsky, and N. Rosen, Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete? *Phys. Rev.* 47, 777-780 (1935).
- [32] N. Bohr, Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete?, *Phys. Rev.* 48, 696-702 (1935).
- [33] Plotnitsky, A.: *Reading Bohr: Physics and Philosophy*. Springer, Dordrecht (2006)
- [34] Bohr, N. (1938). The causality problem in atomic physics, in J. Faye and H. J. Folse (eds.), (1987). *The Philosophical Writings of Niels Bohr, Volume 4: Causality and Complementarity, Supplementary Papers* (OxBow Press; Woodbridge, CT), pp. 94–121.
- [35] Bitbol, M. and Darrigol, O. (eds.): *E. Schrödinger: Philosophy and the Birth of Quantum Mechanics*. Editions Frontieres, Gif-sur-Yvette (1992).
- [36] A. Khrennikov, Statistical measure of ensemble nonreproducibility and correction to Bell's inequality. *Il Nuovo Cimento*, B 115, N. 2, 179-184 (1999).
- [37] de Broglie L and Andrade E Silva J (the author of a chapter) 1964 *The Current Interpretation of Wave Mechanics. A Critical Study* (Amstredam-London-New York: Elsevier)
- [38] von Neumann J 1955 *Mathematical Foundations of Quantum Mechanics* (Princeton: Princeton Univ. Press)
- [39] Boole, G.: On the theory of probabilities. *Phil. Trans. Royal Soc. London*, 152, 225-242 (1862)
- [40] Vorob'ev, N. N. (1962). Consistent families of measures and their extensions, *Theory of Probability and its Applications* 7, pp. 147–162.
- [41] Accardi L., On the noncommutative Markov property, *Func. Anal. Appl.*, 9 (1975) 18.
- [42] A. Khrennikov, CHSH inequality: quantum probabilities as classical conditional probabilities *Found. Phys.* 45, N 7, 711-725 (2015).
- [43] A. Khrennikov, Bell argument: Locality or Realism? Time to make the choice. arXiv:1108.0001v3 [quant-ph]
- [44] A. Khrennikov, B. Nilsson, S. Nordebo, and I. V. Volovich, Quantization of propagating modes in optical fibers, *Phys. Scr.*, 85, 2012. 065404

- [45] A. Khrennikov, B. Nilsson, S. Nordebo, I. Volovich, Photon Flux and Distance from the Source: Consequences for Quantum Communication. *Found. Physics* 44 389-405 (2014).
- [46] J. Bell, On the impossible pilot wave, Ref.TH.3315-CERN, 1982, p. 15
- [47] A. Auffèves and P. Grangier, Violation of Bell's inequalities in a quantum realistic framework. Special issue of Växjö-15 conference, to be published in IJQI.
- [48] P. Grangier, Contextual objectivity: a realistic interpretation of quantum mechanics, *European Journal of Physics* 23, 331 (2002) [arXiv:quant-ph/0012122].
- [49] P. Grangier, Contextual objectivity and the quantum formalism, *IJQI*, 3 (1): 17-22 (2005) [arXiv:quant-ph/0407025]
- [50] C. Brukner, A. Zeilinger, Information Invariance and Quantum Probabilities, *Found. Phys.* 39, 677 (2009).
- [51] Fuchs, C. A. (2002). Quantum mechanics as quantum information (and only a little more), in A. Khrennikov (ed.), *Quantum Theory: Reconsideration of Foundations, Ser. Math. Modeling 2* (Växjö University Press, Växjö), pp. 463–543.
- [52] Fuchs, C. A. (2002). The anti-Växjö interpretation of quantum mechanics, *Quantum Theory: Reconsideration of Foundations, Ser. Math. Model. 2* (Växjö University Press, Växjö), pp. 99–116.
- [53] A. Khrennikov, Växjö interpretation of quantum mechanics. In: A. Khrennikov "Quantum Theory: Reconsideration of Foundations" Ser. Math. Model. 2, p.163-170, Växjö University Press, Växjö (2002). [arXiv:quant-ph/0202107v2]
- [54] A. Khrennikov, Växjö interpretation-2003: Realism of contexts. In: Khrennikov, A.Yu. (ed) *Quantum Theory: Reconsideration of Foundations-2. Ser. Math. Model. 10*, pp. 323-338. Växjö University Press, Växjö (2004).
- [55] A. Khrennikov, Växjö interpretation of wave function: 2012. [arXiv:quant-ph/1210.2390]
- [56] Einstein, A. and Infeld, L.: *Evolution of Physics: The Growth of Ideas from Early Concepts to Relativity and Quanta*. Simon and Schuster, New-York (1961)