

Квантовые Чеширские Коты

Я. Ааронов, С. Попеску, П. Скржипчик (Израиль, США, Великобритания)

Реферат подготовил М.Х. Шульман (shulman@dol.ru)

arXiv:1202.0631v1 [quant-ph] 3 Feb 2012

Quantum Cheshire Cats

Yakir Aharonov^{1, 2}, Sandu Popescu³ and Paul Skrzypczyk⁴

¹Tel Aviv University, School of Physics and Astronomy, Tel Aviv 69978, Israel

²Schmid College of Science, Chapman University, 1 University Drive, Orange, CA 92866, USA

³H. H. Wills Physics Laboratory, University of Bristol, Tyndall Avenue, Bristol, BS8 1TL, United Kingdom

⁴Department of Applied Mathematics and Theoretical Physics, University of Cambridge, Centre for Mathematical Sciences, Wilberforce Road, Cambridge CB3 0WA, United Kingdom

В статье описывается квантовый аналог “Чеширского Кота”. В эксперименте с пре- и пост-селекцией мы обнаруживаем Кота в одном месте, а его улыбку – в другом. В качестве Кота выступает фотон, а в качестве улыбки – его круговая поляризация.

‘Хорошо’, сказал Кот; и на этот раз он исчез довольно медленно, начиная с кончика хвоста и заканчивая улыбкой, которая еще оставалась некоторое время после того, как сам кот исчез.

‘Здорово! Я часто видывала кота без улыбки’, подумала Алиса, ‘но чтобы улыбку без кота! Это самое странное, что я видела когда-нибудь в своей жизни!’

Неудивительно, что Алиса была поражена. В реальной жизни, допуская, что коты действительно могут улыбаться, мы считаем улыбку свойством кота – нет смысла думать об улыбке отдельно от самого кота. И так обстоит дело для большинства физических свойств. Поляризация – это свойство фотона, не имеет смысла говорить о поляризации без фотона. Однако в статье показано, что в квантовой механике поляризация фотона может существовать, когда фотона нет вообще. По крайней мере, так обстоит дело, когда квантовая механика говорит об измерениях с пре- и пост-селекцией.

С помощью установки, схема которой представлена на рис. 1 и содержит интерферометр Маха-Цандера с двумя светоделителями BS_1 и BS_2 , полуволновую пластинку HWP, поляризационный светоделитель PBS и детекторы D_1 , D_2 и D_3 , обеспечивается пре- и пост-селекция фотона: если щелкает детектор D_1 , то с полной определенностью можно утверждать, что непосредственно перед детектором фотон должен был находиться в заранее определенном состоянии $|\Psi\rangle$ (пре-селекция), а внутри интерферометра, перед BS_2 и PBS – в другом заранее определенном состоянии $|\Phi\rangle$ (пост-селекция).

Используя такого рода *неразрушающее* измерение с пре- и пост-селекцией, можно, казалось бы, утверждать, что фотон с определенностью прошел в этом

случае через плечо 1, т.е. что наш Кот находится в плече 1. Но не можем ли мы обнаружить его улыбку еще где-нибудь?

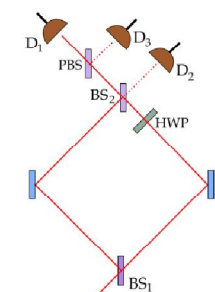


Рисунок 1.
Схема установки

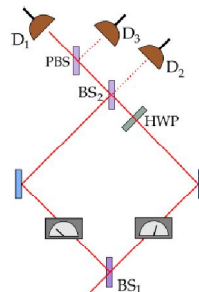


Рисунок 2.
Схема установки с
дополнительным
измерением

Предположим, мы поместили поляризационный детектор в плечо 2. Поскольку нам известно, что фотон никогда не может находиться в плече 2, мы, разумеется, не сможем обнаружить там его ‘улыбку’, так что мы считаем, что этот детектор никогда не щелкнет. Однако, неожиданно оказывается, что поляризационный детектор в плече 2 щелкнет.

Дело в том, что в плече 2 *регистрируется угловой момент*. Формально наблюдаемая переменная, отвечающая поляризационному детектору в плече 2, имеет три собственных значения:

- +1, соответствующее собственному состоянию $|2, +\rangle$, в котором фотон находится в плече 2 с угловым моментом +1;
- -1, соответствующее собственному состоянию $|2, -\rangle$, в котором фотон находится в плече 2 с угловым моментом -1;
- 0, вырожденное собственное значение, разделяемое двумя состояниями $|1, +\rangle$ и $|1, -\rangle$, когда фотон находится в плече 1 с произвольной поляризацией.

Чтобы увидеть, что возможно обнаружить угловой момент в плече 2, предположим, что мы получили результат +1. В этом случае состояние коллапсирует к $|2, +\rangle$, которое имеет ненулевое перекрытие с пост-селекционным состоянием $|\Phi\rangle$ и, следовательно, имеет ненулевую вероятность. Аналогичным образом, возможно также получить результат -1 и, следовательно, обнаружить угловой момент -1 также в плече 2.

Похоже, мы видим то же, что увидела Алиса – улыбку, но не самого Кота! Нам определенно известно, что фотон прошел через плечо 1 и, кроме этого, мы обнаруживаем угловой момент в плече 2. Но может ли это быть на самом деле? Быстрая проверка показывает, что эта линия доказательств оказывается всего лишь “оптической иллюзией”. Действительно, давайте теперь мы проверим, где находится Кот. Мы можем сделать это, добавив детекторы фотонов P_1 и P_2 дополнительно к детектору углового момента (рис. 2). Мы теперь обнаруживаем, что когда бы ни был зарегистрирован угловой момент в плече 2, фотон также оказывается там. Действительно, пусть мы обнаруживаем угловой момент +1 в

плече 2, состояние коллапсирует в $|2, +\rangle$, а это состояние отвечает факту, что фотон не прошел через детектор в плече 1, а прошел через детектор в плече 2.

Вывод таков: все, что мы ранее утверждали, представляет собой парадокс, подобный многим другим хорошо известным парадоксам [1–3]. То есть мы выводили утверждения о том, где находится фотон и где находится его угловой момент, которые кажутся парадоксальными до тех пор, пока мы не выполним все нужные измерения. Но как только мы фактически помещаем соответствующие детекторы и *выполняем* соответствующие измерения, парадокс пропадает. Это типичный способ разрешения такого парадокса квантовой механикой: осуществление измерения *возмущает* состояние системы, и наше заключение, сформулированное в отсутствие возмущения, перестает быть справедливым.

Таким образом, мы можем выполнить измерения, которые ограничивают возбуждение, если мы готовы пожертвовать некоторой точностью – иначе говоря, это парадигма “слабого измерения” [5, 6]. Выполняя слабые измерения, мы можем измерить все интересующие нас физические величины одновременно и устранить возмущение одних со стороны других.

Итак, было показано, что в квантовой механике существуют Чеширские Коты – физические свойства могут быть отделены от объектов, которым они присущи, с помощью эксперимента с пре- и пост-селекцией. Хотя в статье был представлен лишь один пример, в котором фотон отделяется от его поляризации, должно быть ясно, что это весьма общее явление – например, мы можем отделить спин электрона от его заряда, или внутреннюю энергию атома от самого атома.

Это порождает много интригующих вопросов, как теоретических, так и прикладных. Прежде всего, как отделить эффект для одного электрона с зарядом и массой от эффекта для соседнего электрона? В атоме с внутренней энергией, отделенной от массы, на что будет похоже результирующее гравитационное поле? Какого типа тепловое равновесие будет устанавливаться в системе с двумя отделенными степенями свободы? Далее, рассматривая более чем две степени свободы, можем ли мы каждую из них отделить от всех остальных? Могут ли фотоны передавать угловой момент одному объекту в то время, как давление их излучения воздействует на другой объект?

С прикладной точки зрения мы можем поинтересоваться, полезны ли Чеширские коты при проведении точных измерений, что имеет место, как это было показано, для слабых измерений благодаря мощным методам усиления [7–12]. Например, предположим, что мы хотим выполнить измерение, в котором магнитный момент играет центральную роль, тогда как заряды вызывают нежелательные возмущения. Используя данную схему, мы получаем возможность удалить это возмущение с помощью пост-селекции (т.е. сигнального фотона), порождая Чеширского кота, для которого заряд удерживается в области эксперимента, удаленной от магнитного момента.

Ссылки

- [1] L. Hardy, Phys. Rev. Lett. 68, 2981 (1992).
- [2] Y. Aharonov, S. Popescu, D. Rohrlich, and L. Vaidman, Phys. Rev. A 48, 4084 (1993).
- [3] Y. Aharonov and D. Rohrlich, *Quantum Paradoxes: Quantum Theory for the Perplexed* (Wiley VCH, ADDRESS, 2005).
- [4] Y. Aharonov, A. Bojero, S. Popescu, B. Reznik, and J. Tolaksen, Phys. Lett. A 301, 130 (2002).
- [5] Y. Aharonov, D. Z. Albert, and L. Vaidman, Phys. Rev. Lett. 60, 1351 (1988).
- [6] Y. Aharonov and L. Vaidman, Lect. Notes Phys. 734, 399 (2008).
- [7] J. K. Resch, J. S. Lundeen, and A. M. Steinberg, Phys. Lett. A 324, 125 (2004).
- [8] G. J. Pryde, J. L. O'Brien, A. G. White, T. C. Ralph, and H. M. Wiseman, Phys. Rev. Lett. 94, 220405 (2005).
- [9] O. Hosten and P. G. Kwiat, Science 319, 787 (2008).
- [10] P. B. Dixon, D. J. Starling, A. N. Jordan, and J. C. Howell, Phys. Rev. Lett. 102, 173601 (2009).
- [11] K. Yokota, T. Yamamoto, M. Koashi, and N. Imoto, New J. Phys. 11, 033011 (2009).
- [12] A. Palacios-Laloy, F. Mallet, F. Nguyen, P. Bertet, D. Vion, D. Esteve, and A. N. Korotkov, Nature Phys. 6, 442 (2010).