

Обзор механики Боба (фрагмент – бобовское объяснение процесса измерения)

Кс. Ориолс и Х. Момпар (Испания)

Перевод М.Х. Шульмана (shulman@dol.ru, www.timeorigin21.narod.ru)

arXiv:1206.1084v1 [quant-ph] 5 Jun 2012

Overview of Bohmian Mechanics

Xavier Oriols^a and Jordi Mompart^{b*}

^aDepartament d'Enginyeria Electrònica, Universitat Autònoma de Barcelona, 08193, Bellaterra, SPAIN

^bDepartament de Física, Universitat Autònoma de Barcelona, 08193 Bellaterra, SPAIN

E-mail: xavier.oriols@uab.cat; jordi.mompart@uab.cat

VI. БОМОВСКОЕ ОБЪЯСНЕНИЕ ПРОЦЕССА ИЗМЕРЕНИЯ

VI.1.1. Ортодоксальная трактовка измерительного процесса

В процессе измерения обычно разделяют квантовую систему и измерительный прибор (см. рис. 10b).

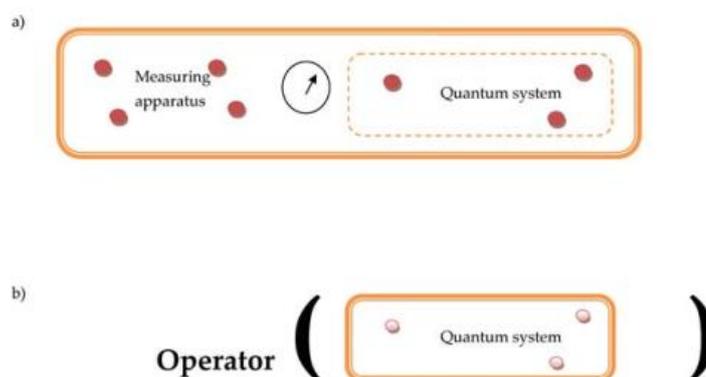


Рис. 10.

(a) Измерение по Бому предполагает, что и квантовая система (quantum system), и измерительный прибор (measuring apparatus) представлены в явном виде.

(b) Ортодоксальное измерение предполагает, что представлена только квантовая система, тогда как прибору ставится в соответствие оператор (operator), действующий на волновую функцию системы.

Ортодоксальное предсказание некоторого измерительного свойства квантовой системы выражается через собственный оператор G , *собственные значения* которого дают возможные результаты измерения. Когда мы измеряем конкретное значение, начальная волновая функция трансформируется в *собственную функцию* оператора. Это – так называемое измерение фон Неймана (проективное измерение). Таким образом, эволюция во времени волновой функции квантовой системы полностью задается двумя различными законами:

1. Эволюция одного типа задается уравнением Шрёдингера. Этот динамический закон является детерминистическим в том смысле, что

финальная волновая функция квантовых систем полностью задается, когда мы знаем начальную волновую функцию и гамильтониан этой квантовой системы.

2. Второй динамический закон называется *коллапсом* волновой функции. Коллапс – это процесс, который происходит при взаимодействии волновой функции с измерительным прибором. Начальная (до измерения) волновая функция заменяется одним из *собственных состояний* конкретного оператора \hat{G} . Вопреки закону эволюции, задаваемому уравнением Шрёдингера, коллапс не является детерминистическим, поскольку финальная волновая функция выбирается случайно среди собственных состояний оператора.

Дуализм во временной эволюции квантовой системы в ортодоксальной интерпретации – это определенно и весьма противоречивый вывод, так называемая *проблема измерения*, или *коллапс волновой функции* [47, 85]. Как многократно подчеркивал Белл, ортодоксальная теория является непрофессиональной, поскольку она не объясняет с нужной точностью, какие части всей квантовой системы образуют измерительный прибор, а какие – собственно систему как таковую. Неясно даже, требует ли измерительный прибор какой-либо человеческой деятельности (со статусом ученой степени? [47]), чтобы быть идентифицированным как собственно измерительный прибор. Проблематичный способ, при котором измерение интерпретируется ортодоксальным образом, подчеркивается Беллом [14]:

Концепция “измерения” становится в процессе размышления такой расплывчатой, что ее появление в физической теории на самом фундаментальном уровне оказывается весьма неожиданным. Возможно, менее неожиданным является то, что математики, которые нуждаются лишь в простых аксиомах относительно пока что не определенных объектов, оказались способны написать объемные работы теории квантовых измерений, которые физики – экспериментаторы не считают необходимым читать <...> Требуется ли какой-либо анализ измерений на более фундаментальном уровне, нежели сами измерения? И должна ли фундаментальная теория содержать эти более фундаментальные концепции?

Короче говоря, Белл утверждает, что разделение между квантовой системой и измерительным прибором, показанное на рис. 10b, является произвольным. *Инкапсуляция* остального мира (помимо квантовой системы) в математическом объекте, именуемом оператором \hat{G} , является очень ловким *трюком*, который дает возможность прямого вычисления результатов квантовых измерений [86, 87] без учета остального мира.

VI.1.2. Бомовская интерпретация измерительного процесса

В теории Бома измерительный процесс интерпретируется как любой другой процесс взаимодействия частиц, так что выше описанные трудности ортодоксальной интерпретации просто исчезают. Исчезает необходимость введения операторов [63, 86, 87]. Здесь вся квантовая система описывается траекторией плюс волновой функцией (а не одной только волновой функцией). Волновая функция и траектория обе ассоциируются с системой в целом, т.е. с измеряемой квантовой

системой плюс измерительный прибор. Тогда имеется один динамический закон для эволюции волновой функции, а другой – для эволюции траектории:

1. Уравнение Шрёдингера (с подходящим гамильтонианом для квантовой системы вместе с измерительным прибором) определяет эволюцию во времени волновой функции независимо от того, осуществляется ли измерение или нет.
2. Эволюция во времени частицы определяется интегрированием по времени боровской скорости независимо от того, осуществляется ли измерение или нет.

Например, представим себе, что измеряемая величина индицируется некоторым указателем (pointer); тогда частицы (степени свободы), которые образуют этот указатель, должны быть представлены в гамильтониане¹. В этом смысле в механике Бома квантовая система должна описываться многочастичным гамильтонианом. Если боровские траектории, сопоставленные координатам указателя, известны, результаты измерения уже могут быть предсказаны. Нам как раз нужны значения координат частиц указателя. И снова Белл дает нам одну из своих дидактических рекомендаций [14]:

В физике в качестве наблюдений мы должны рассматривать только наблюдения координат указателей. Великой заслугой представления де Бройля – Бома является то, что она побудила нас учесть этот факт. Когда вы формулируете аксиомы, а не определения и теоремы, относительно того, что является “измерением” чего-то, то вы снижаете избыточность и риск появления противоречий.

Следовательно, строгое моделирование боровского измерения требует явного рассмотрения степеней свободы в многочастичной волновой функции и многочастичных боровских траекторий, которые определяют систему в целом. См. рис. 11. В частности, мы должны ввести в гамильтониан взаимодействие частиц указателя с остальными частицами системы. Обратная реакция процесса измерения на волновую функцию рассматривается тривиально. Конечно, гамильтониан с измерительным прибором или без него будет определять различную эволюцию волновой функции квантовой системы. По этой причине Белл предпочитал использовать слово “эксперимент”, а не “измерение”.

Боровское и ортодоксальное объяснения измерения формируют одинаковые вероятностные предсказания. Однако математическое применение уравнений движения в каждом случае весьма различается. Ортодоксальная квантовая теория требует использования оператора для описания эффекта измерительного прибора, но в боровском объяснении этот оператор не необходим.

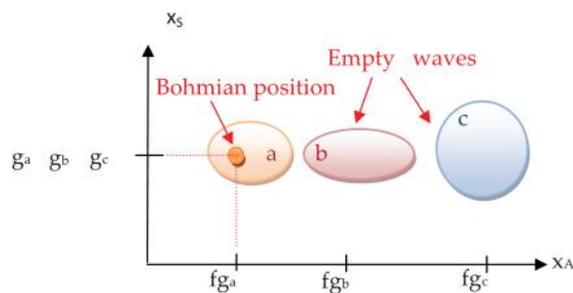
Чтобы понять, как измерение (по фон Нейману) может быть описано с помощью механики Бома, еще раз повторим, что в ней процесс измерения

¹ В современных электронных измерительных средствах указателем может быть дисплей в виде семи-сегментной матрицы со светоизлучающими диодами (LED), каждый элемент которой может находиться в состоянии ON или OFF. Когда электроны находятся внутри PN-перехода одного LED-элемента, радиационный переход электронов из зоны проводимости в зону валентности генерирует свет, соответствующий ON-состоянию, тогда как отсутствие электронов ассоциируется с OFF-состоянием.

интерпретируется просто как любой другой квантовый процесс, который описывается уравнением Шрёдингера плюс одной траекторией, определенными совместно в общем расширенном конфигурационном пространстве, которое включает квантовую систему и измерительный прибор. Здесь нет места *привилегированному* наблюдателю, т.е. измерительному прибору, внешнему относительно квантовой системы. По этой причине некоторые авторы характеризуют теорию Боба как “квантовую механику без наблюдателей” [83].

Неожиданно эта идея каким-то образом проявилась в книге Боба “Квантовая теория” [34], опубликованной в 1951 году. Хотя в ней Боб следовал ортодоксальной интерпретации квантовой механики, он также подробно рассмотрел в главе 22 процесс измерения. Во-первых, Боб настаивал на недвусмысленной терминологии при квантово-теоретической интерпретации всего процесса измерения в рамках уравнения Шрёдингера. В частности, он утверждал, что хороший измерительный прибор заставит волновую функцию разделиться на некоторые неперекрывающиеся волновые пакеты. Каждый из этих волновых пакетов может быть ассоциирован с одним конкретным значением результата измерения. Во-вторых, он дополнил свой измерительный процесс некоторым не вполне ясным обсуждением декогеренции, при которой выживает только один из волновых пакетов. После 1951 года, когда Боб представил свою теорию “скрытых параметров” [8, 9], он сохранил первую часть своего предварительного анализа, а затем дал простое объяснение финального разделения имеющихся волновых пакетов: выбранный волновой пакет – это тот, который содержит траекторию [34], см. рис. 11а.

(a) Bohmian measurement explanation in $[x_S, x_A]$ space



(b) Orthodox measurement explanation in $[x_S]$ space

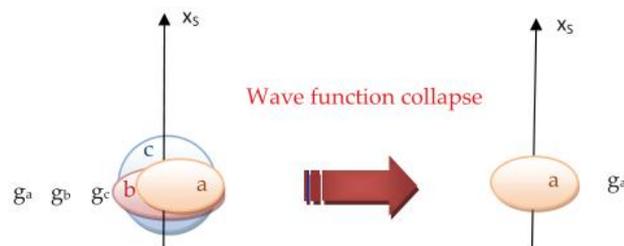


Рис. 11. (a) Бомовское измерение в пространстве $[x_S, x_A]$ (система – прибор): Из неперекрывающейся волновой функции только часть g_a волновой функции, где представлена траектория, требуется для вычисления эволюции бомовской системы (bohemian position – бомовская координата, empty waves – “пустые волны”). (b) Ортодоксальное измерение в пространстве $[x_S]$ (система): волновая функция (системы) коллапсирует в часть g_a , когда осуществляется измерение (wave function collapse – коллапс волновой функции).

Ссылки:

- [8] D. Bohm, A suggested interpretation of the quantum theory in terms of “hidden” variables I, *Phys. Rev.* 85, 166, (1952).
- [9] D. Bohm, A suggested interpretation of the quantum theory in terms of “hidden” variables II, *Phys. Rev.* 85, 180, (1952).
- [14] J. S. Bell, 1987, *Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics* (Cambridge University Press, Cambridge 1987).
- [34] D. Bohm, *Quantum Theory* (Dover Publications, New York, 1951).
- [47] J. S. Bell, *Against Measurement*, *Physics World*, 3, 33 (1990).
- [63] D. Dürr and S. Teufel, *Bohmian Mechanics: The Physics and Mathematics of Quantum Theory* (Springer, 2009).
- [83] S. Goldstein, Quantum mechanics without observers-part one, *Physics Today*, 51(3), 42 (1998).
- [86] M. Daumer, D. Dürr, S. Goldstein, and N. Zanghi, Naive Realism about Operators, *Probability, Dynamics and Causality*, 45(2–3), 379 (1997).
- [87] D. Dürr, S. Goldstein and N. Zanghi, Quantum Equilibrium and the Role of Operators as Observables in Quantum Theory, *Journal of Statistical Physics*, 116, 9595 (2004).