Оптика и спектроскопия, 2020, том 128, вып. 9

07

Объективная реальность и парадокс друзей Вигнера

А.В. Белинский

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
Физический факультет,
119991 Москва, Россия

e-mail: belinsky@inbox.ru

Поступила в редакцию 28.10.2019 г.
В окончательной редакции 28.10.2019 г.
Принята к публикации 02.06.2020 г.

На примере эксперимента https://arxiv.org/pdf/1902.05080.pdf показано, что отсутствие объективного существования результатов квантовых измерений не может быть строго доказано на основании регистрации нарушения неравенства Белла в форме Клаузера–Хорна–Шимони–Хольта. Приведены также аргументы общего характера, обобщающие это заключение.

Ключевые слова: квантовые измерения, неравенство Белла.

DOI: 10.21883/OS.2020.09.49870.297-20

Введение

В последнее время заметно возрос интерес к выяснению онтологического статуса волновой функции и вектора квантового состояния, являющихся одними из основных понятий квантовой механики. Проявления так называемой квантовой нелокальности и множество квантовых парадоксов не находят бесспорных и общепринятых непротиворечивых интерпретаций. В этой связи все больше приверженцев находит так называемая информационная интерпретация, истоки которой намечены еще Нильсом Бором [1]. Она получила дальнейшее развитие, например, в работах [2,3].

Информационная интерпретация отрицает объективное существование волновой функции и вектора состояния, приписывая им статус математических абстракций, исключительная роль которых сводится лишь к инструменту вычислений. Это сразу снимает ряд вопросов к большинству квантовых парадоксов. Например, нет проблем с мгновенным коллапсом волновой функции, так как ее в природе не существует, нет проблем с нелокальностью, поскольку все ее проявления опять связаны с необычным поведением вектора состояния и т.д.

Одним из аргументов в пользу такой интерпретации выдвигается так называемый парадокс друга Вигнера, получивший по утверждению авторов [4] экспериментальное подтверждение. Кратко сущность парадокса сводится к следующему. Друг Вигнера производит измерение квантовой системы, находящейся в состоянии квантовой суперпозиции. В результате этого измерения вектор состояния коллапсирует и получается определенный результат. Но сам Вигнер о нем не знает. Для него поэтому система по-прежнему находится в состоянии суперпозиции. Что же произошло на самом деле? Был коллапс или нет? Если друзья не общаются между собой, то у каждого получается своя „объективная" реальность. Конечно, ситуация здесь преднамеренно сильно упрощена, но такое вступление имеет целью подготовить читателя к анализу довольно сложного эксперимента [4].

Эксперимент, воспроизводящий парадокс друга Вигнера

Пара запутанных по поляризации фотонов поступает к друзьям Алисы и Боба, каждый в отдельную лабораторию. Сами Алиса и Боб, также находящиеся в разных местах, имеют возможность невозмущающим образом либо получить тот же результат — значения A_0 и B_0 дихотомных переменных, равные $+1$ или -1 в зависимости от состояния поляризации зарегистрированных фотонов, либо осуществить по утверждению авторов невозмущающее измерение того, произошел ли коллапс состояния суперпозиции запутанных фотонов. Для этого у Алисы и Боба приготавливается еще по паре запутанных фотонов для наблюдения двухфотонной интерференции. И на тех же детекторах при небольшой модернизации экспериментальной установки — введения в схему дополнительных светоделителей — они получают также дихотомные значения A_1 и B_1, равные $+1$ или -1.

Итак, в каждом акте измерений существуют вполне определенные значения A_0 и B_0, т.е. объективно коллапс осуществился. Но Алиса и Боб, регистрируя A_1 и B_1, видят при этом квантовую интерференцию, которая якобы свидетельствует об обратном. Как в этом предлагают убедиться авторы [4]? Они из величин A_i и B_i составляют неравенство Белла типа Клаузера–Хорна–Шимони–Хольта (CHSH) [5]:

$$S = \langle A_1 B_1 \rangle + \langle A_1 B_0 \rangle + \langle A_0 B_1 \rangle - \langle A_0 B_0 \rangle \leq 2, \quad (1)$$

и в эксперименте оно нарушается, что свидетельствует об отсутствии определенных значений величин A_0, A_1, B_0, B_1 одновременно, хотя все они измерены и известны, в том числе A_0 и B_0.

Итак, в ходе одного и того же эксперимента имеются определенные измеренные значения A_0 и B_0, но статистические наблюдения средних, входящих в (1), свидетельствуют о том, что определенные значения A_0 и B_0 не могут существовать одновременно с A_1 и B_1. Но они измерены и существуют! На основании этого явного противоречия авторы [4] приходят к выводу о том, что объективной реальности не существует. Ведь не может один и тот же эксперимент давать взаимно исключающие результаты. Все ли здесь корректно? Вряд ли нужно подчеркивать всю принципиальную значимость данного вопроса.

Особенности неравенства CHSH

Для выяснения следствий нарушения неравенства CHSH обратимся к простейшему его выводу [6,7]. Пусть все четыре величины A_i, B_i одновременно имеют определенные значения a_0, a_1, b_0, b_1, равные $+1$ или -1. Тогда из них можно составить следующие выражения:

$$a_1 b_1 + a_1 b_0 + a_0 b_1 - a_0 b_0 = a_1(b_1 + b_0) + a_0(b_1 - b_0)$$
$$= b_1(a_1 + a_0) + b_0(a_1 - a_0) = \pm 2, \tag{2}$$

откуда следует (1).

При этом важно отметить, что понятие определенности значений a_0, a_1, b_0, b_1 при выводе неравенств Белла, в том числе и типа CHSH, заключается не в их детерминированности, ведь они случайны, а в том, что в каждом акте измерений они существуют *одновременно*. Неравенства Белла нарушаются тогда, когда одновременно измеряются не все четыре величины, а только 2 из них, либо 3 из шести или 4 из восьми, как в парадоксе Гринберга–Хорна–Цайлингера (GHZ) [8]. Это связано с тем, что глубинной причиной нарушения классических неравенств Белла является то, что входящие в него наблюдаемые описываются некоммутирующими операторами в квантово-механическом подходе [6]. Поэтому и одновременные прямые измерения их невозможны, но неравенства конструируются из пар (CHSH), троек или четверок (GHZ) входящих в них величин.

Но значит ли это, что (1) может нарушаться только при одновременном отсутствии всех определенных значений A_i, B_i? Отнюдь нет. Достаточно лишь двух, например, A_1 и B_1, а A_0 и B_0 могут быть полностью определены. Неравенство (1) при этом может тоже нарушаться, как следует из (2), поскольку обе скобки могут быть ненулевыми, точнее неопределенными.

Вообще говоря, из соотношения (2) вовсе не следует какое-то преимущество пары A_0, B_0 по отношению к паре A_1, B_1. Ведь они входят симметрично. Но важно то, что нарушение неравенства Белла типа CHSH не является достаточным условием неопределенности A_0 и B_0, которые авторы [4] выбрали исходя из их роли в регистрируемом и измеряемом коллапсе, поскольку именно A_0 и B_0 представляют собой тот результат друзей Алисы и Боба, который подвергается сомнению в его объективности.

На первой стадии эксперимента [4] все наблюдатели (Алиса, Боб и их друзья) измеряют одни и те же величины A_0 и B_0 и, разумеется, получают одни и те же результаты. Из них составляется среднее $\langle A_0 B_0 \rangle$. Далее Алиса и Боб устанавливают в своих измерителях дополнительные светоделители и переходят к измерению A_1 и B_1. При этом все четыре величины A_0, B_0, A_1 и B_1 измеряются одновременно (Алисой и Бобом измеряются A_1 и B_1, A_0 и B_0 измеряются их друзьями) и одновременно имеют определенные значения a_0, a_1, b_0, b_1. Если из них составить средние, входящие в неравенство (1), то оно, конечно, не нарушится в силу (2), поскольку одновременное существование определенных значений a_0, a_1, b_0, b_1 является достаточным условием выполнения (1). Даже если светоделитель установлен только у Алисы или Боба, то одновременно будут измеряться три из четырех величин A_0, B_0, A_1 и B_1, и опять в силу (2) неравенство (1) нарушиться не может, так как обнулится одна из скобок в (2). Почему оно нарушилось в [4]?

Если отбросить возможность какой-то ошибки эксперимента [4], то единственным объяснением возникающего несоответствия может быть то, что среднее $\langle A_0 B_0 \rangle$ на первой стадии эксперимента не тождественно среднему $\langle A_0 B_0 \rangle$ на последующих его стадиях. Почему это может происходить? Дело в том, что информативной в [4] считается только регистрация всех шести фотонов. Остальные реализации просто отбрасываются. Таким образом, при изменении условий измерений у Алисы и/или Боба (установкой светоделителей) происходит селекция измерительных отсчетов у их друзей, и среднее $\langle A_0 B_0 \rangle$ может измениться.

Значит ли это, что объективность измерений отсутствует? Нисколько. Ведь изменение измерителя естественно может обусловливать и изменение результатов измерений. Объективность могла бы пострадать лишь в случае подлинно невозмущающего измерения, когда результат Алисы и/или Боба никак бы не влиял на результаты их друзей. Однако, как будет показано в следующем разделе, и это вряд ли возможно. Но вначале приведем дополнительную аргументацию в пользу приведенных здесь соображений.

Есть еще одно доказательство неравенства (1), которое строится на более мягком предположении одновременного существования не всех четырех значений a_0, a_1, b_0, b_1, а лишь на существовании всех элементарных четырехмерных вероятностей $P(A_0, A_1, B_0, B_1)$ [9]. Действительно, предполагая все их неотрицательными и в сумме дающими единицу, исходя из условия нормировки всех возможных вероятностей исхода эксперимента, составляя средние, входящие в (1), например:

$$Pab(++) = (+ + ++) + (+ + +-)$$
$$+ (+ - ++) + (+ - +-),$$

получим, что сумма всех средних, входящих в (1), в точности равна удвоенному разложению единицы, т.е. удвоенной сумме всех возможных $P(A_0, A_1, B_0, B_1)$, откуда опять необходимо следует (1) [9]. Но для нарушения (1) достаточно отсутствия существования не всех, а $P(A_0, A_1, B_0, B_1)$.

В самом деле, если посчитать квантовые средние этих элементарных вероятностей применительно к случаю измерения состояния поляризации запутанной пары фотонов, как это имеет место в эксперименте [4], то лишь некоторые из них окажутся отрицательными [9], аналогично тому, как это происходит в распределении Вигнера.

Но что означают эти совместные отрицательные вероятностные распределения? Они связывают наблюдаемые величины, некоторые из которых описываются некоммутирующими операторами, например, A_0 и A_1 в случае, когда (1) нарушается [9]. Поэтому их прямые измерения, как и измерения их вероятностных распределений, невозможны. В этом смысле подобные элементарные вероятности лишены операционального смысла, как и отрицательные вероятности вообще.

Но как же авторам [4] удалось получить противоречивые взаимно исключающие результаты? Очевидно, это произошло потому, что на разных стадиях эксперимента были разные средние $\langle A_0 B_0 \rangle$. Действительно, когда установлены дополнительные светоделители и одновременно измеряются все четыре наблюдаемые, ясно, что все они описываются коммутирующими операторами, и (1) нарушиться не может. Нарушение может возникнуть лишь в том случае, если оператор наблюдаемой A_0 на первой стадии эксперимента не коммутирует с A_1 на последующих стадиях. Аналогично с B_0 и B_1. А если наблюдаемые описываются разными операторами на разных стадиях эксперимента, то ясно, что и сами наблюдаемые отличаются друг от друга.

Из этих несложных соображений с очевидностью следует, что нарушение (1) вовсе не свидетельствует об отсутствии объективно реально существующих A_0 и B_0 и факта коллапса исходного вектора квантового состояния. Для доказательства этого положения требовались бы более веские основания.

Некоторые общие соображения

Уже сам факт возможности невозмущающего измерения присутствия или отсутствия коллапса вектора состояния в удаленной локализованной системе вызывает вряд ли разрешимые вопросы. Если коллапс происходит мгновенно (а этому существует и экспериментальное подтверждение, по крайней мере скорость коллапса в [10,11] превысила c на несколько порядков), то имея возможность такого измерения я могу моментально передавать информацию сверхсветовым телеграфом, поскольку присутствие и отсутствие коллапса закодирую дихотомными значениями, соответствующими 1 биту. Но этому препятствует так называемая „no communication theorem“ [12], имеющая весьма общий характер, так что преодолеть ее вряд ли возможно.

Действительно, предположим, что в эксперименте [4] Алиса и Боб производят интерференционный эксперимент до регистрации их друзьями запутанной пары фотонов, т.е. до коллапса. Естественно, они получат интерференцию, которая подтверждает отсутствие коллапса. Но что, если коллапс происходит до измерения Алисы и Боба? В полном соответствии с „no communication theorem“ ничего не должно измениться, иначе у них с друзьями установится мгновенный сверхсветовой канал связи.

Итак, даже не вникая в тонкости эксперимента и особенности неравенства Белла типа CHSH, можно заключить, что отрицание существования объективной реальности не может быть доказано на основании парадокса друзей Вигнера. Справедливости ради надо отметить, что в эксперименте [4] информативной считают лишь одновременную регистрацию всех шести фотонов: у Алисы, у Боба, у их друзей. То есть формально говоря, нет удаленного наблюдения локализованной квантовой системы друзей. Но в парадоксе друга Вигнера предполагается именно такое невозмущающее измерение. Поэтому этот раздел и добавлен в статью, чтобы эти несложные соображения учитывались при планировании подобных экспериментов и чтобы пояснить возможность получения не совпадающих $\langle A_0 B_0 \rangle$ на разных стадиях эксперимента [4].

Заключение

Какой вывод можно сделать из приведенной аргументации? Доказывает ли она несостоятельность информационной интерпретации квантовой механики? Вовсе нет. Но если бы удалось доказать отсутствие объективной реальности применительно к волновой функции и вектору состояния, то все остальные интерпретации следовало бы отправить в архив. Однако, как следует из вышеизложенного, это было бы преждевременно. Информационная интерпретация остается лишь одним из претендентов наряду с другими непротиворечивыми концепциями [13–16].

Но является ли в принципе парадокс друга Вигнера столь неразрешимым в рамках традиционного квантово-механического описания? Мне представляется, что он не требует какого-то принципиально нового подхода и кардинального изменения представлений об объективности квантовых процессов и результатов измерений. В самом деле, друг Вигнера произвел коллапсирующее измерение и совершенно справедливо описывает его с помощью проекционного постулата фон Неймана. Сам Вигнер рассматривает всю экспериментальную установку друга, включая его измеритель, как единую квантовую систему. Процесс измерения при этом нет необходимости подвергать действию проекционного постулата, а просто следует рассмотреть его в рамках явления декогеренции. В работах [17,18] указано, что имеется два подхода к описанию подобных ситуаций. Первый состоит в том, что при измерении из матрицы плотности исчезают недиагональные члены, математически это описывается оператором проектирования на одно из базисных состояний (коллапс волновой функции). Эта ситуация не описывается уравнением Шредингера, процесс нелинеен. Во втором подходе перед измерением вводятся в рассмотрение два независимых состояния суперпозиции — системы и окружения, которое играет роль прибора. Пусть система находится в суперпозиции состояний $|a'\rangle$ и $|a''\rangle$, а окружение (прибор) — в суперпозиции состояний $|b'\rangle$ и $|b''\rangle$. Результат измерения — состояние составной системы, включающей исходную систему и ее окружение — теперь уже описывается произведением этих векторов, т. е. линейной операцией, отвечающей эволюции в соответствии с уравнением Шредингера. Между подсистемами, ранее независимыми, возникает квантовая корреляция, так как по состоянию прибора можно судить о состоянии исходной системы. Строя матрицу плотности составной системы после измерения и вычисляя от нее след по всем степеням свободы прибора, получаем матрицу плотности измеряемой системы. В этой матрице недиагональные матричные элементы отличны от нуля. Однако следующее рассуждение показывает, что они на самом деле пренебрежимо малы.

Обязательным свойством измерительного прибора является большое (макроскопическое) число степеней свободы, а также то, что состояния, соответствующие различным результатам измерения, являются „макроскопически различимыми“. Это значит, что соответствующие волновые функции зависят от очень многих переменных и отличаются своими функциональными зависимостями от большого числа этих переменных. При этом скалярное произведение таких волновых функций равно нулю, точнее, экспоненциально мало с показателем степени порядка -10^{23}. Причина этого в том, что скалярное произведение представляет собой интеграл по огромному (макроскопическому) числу переменных. При этом даже если интеграл по каждой переменной дает множитель, лишь немного меньший единицы, полный кратный интеграл будет близок к нулю. Таким образом, с большой степенью точности имеет место равенство $\langle b'|b''\rangle = \langle b''|b'\rangle = 0$. Это приводит к тому, что недиагональные члены матрицы плотности исчезают. Так при измерении возникает декогеренция или суперотбор. Суть этого явления была понята довольно давно. Зурек углубил его анализ и дал ему удачное название: суперотбор, индуцированный окружением (environment-induced superselection) [18]. Рассмотрение соответствующих моделей показывает, что декогеренция возникает (т. е. недиагональные члены вымирают) экспоненциально быстро. Это происходит по мере того, как все больше и больше степеней свободы окружения переплетается с измеряемой системой. Таким образом, один и тот же результат измерения получается разными способами описания, чем и исчерпывается вся парадоксальность ситуации.

Финансирование работы

Работа поддержана грантом РФФИ № 18-01-00598А.

Конфликт интересов

Автор заявляет, что у него нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] *Bohr N.* // Phys. Rev. 1935. V. 48. P. 696.
[2] *Brukner C., Zeilinger A.* // Acta Phys. Slovaca. 1999. V. 49. P. 647.
[3] *Brukner C., Zeilinger A.* // Phys. Rev. Lett. 1999. V. 83. P. 3354.
[4] *Proietti M., Pickston A., Graffitti F.* et al. https://arxiv.org/pdf/1902.05080.pdf
[5] *Clauser J., Horne M., Shimony A., Holt R.* // Phys. Rev. Lett. 1969. V. 23. P. 880.
[6] *Белинский А.В., Клышко Д.Н.* // УФН. 1993. Т. 163. № 8. С. 1; *Belinskii A.V., Klyshko D.N.* // Phys. Usp. 1993. V. 36. P. 653.
[7] *Belinsky A.V., Klyshko D.N.* // Phys. Lett. A. 1993. V. 176. N 6. P. 415–420.
[8] *Greenberger D.M., Horn M.A., Shimony A., Zeilinger A.* // Am. J. Phys. 1990. V. 58. P. 1131.
[9] *Белинский А.В.* // УФН. 1994. Т. 164. 4. С. 435–442; *Belinskii A.V.* //Phys. Usp. 1994. V. 37. P. 413–419.
[10] *Gisin N.* Quantum Chance. Nonlocality, Teleportation and Other Quantum Marvels. Springer International Publishing Switzerland, 2014; *Жизан Н.* Квантовая случайность. Нелокальность, телепортация и другие квантовые чудеса. М.: Альпина нон-фикшн, 2016.
[11] *Salart D., Baas A., Branciard C., Gisin N., Zbinden H.* // Natura. 2008. V. 454. P. 861–864. doi 10.1038/nature07121
[12] *Peres A., Termo D.R.* // Rev. Mod. Phys. 2004. V. 76. P. 93.
[13] *Frauchiger D., Renner R.* // Nature Commun. 2018. V. 9. P. 3711.
[14] *Lazarovici D., Hubert M.* // Sci. Rep. 2019. V. 9. P. 470-1-8.
[15] *Sudbery A.* // Found. Phys. 2017. V. 47. P. 658–669.
[16] *Pusey M.F.* // Nature Physics. 2018. V. 14. P. 973–978.
[17] *Менский М.Б.* // УФН. 1998. Т. 168. № 9. С. 1017−1035.
[18] *Zurek H. W.* // Los Alamos Sci. 2002. N 27. P. 1.