sFWT-теорема (сильный вариант)[1)]

Джон Х. Конвей и Симон Коэн[2)]

Две теории, которые произвели революцию в физике XX века – *теория относительности* и *квантовая механика*, полны выводов, которые с трудом поддаются здравому смыслу. Недавно мы использовали три такие парадоксальные идеи, чтобы доказать *FWT*-теорему (здесь представлен усиленный вариант– *sFWT*), являющуюся кульминацией серии из теорем о квантовой механике, возникших в 60-х годах прошлого века. Образно выражаясь, можно сказать так: теорема утверждает, что, если для экспериментаторов имеется возможность свободной подготовки эксперимента независимо от предыстории предыдущих измерений, нечто подобное должно выполняться и для элементарных частиц. То есть, если экспериментатор может свободно выбирать – в каком направлении ориентировать аппаратуру для измерений, то ответ частицы (чтобы быть педантичным – ответ окружения частицы) определяется не всей предыдущей историей этого окружения.

Наша аргументация строится на следствиях:

теории относительности о том, что временной порядок пространственноподобных событий – не абсолютен;

ЭПР-парадокса, обнаруженного Эйнштейном, Подольским, Розеном в 1935 году;

парадокса Коэна-Спекера (1967 г., см. [2]).

В своих рассуждениях мы следуем Бому в использовании его спиновой версия ЭПР-эксперимента и Пересу, используя набор из 33-х направлений, а не первоначальную конфигурацию Коэна–Спекера. Более содержательно можно сказать, что наша аргументация включает в себя обсуждение возможности квантовой системой принимать любое состояние из доступных. Дальнейшее обсуждение этого момента мы отложим до последнего раздела этой статьи.

Заметим, что в наших рассуждениях не упоминаются "вероятности" или "состояния", которые определяют вероятности, что безусловно заслуживает отдельного внимания, поскольку эти теоретические понятия приводят к возникновению большой путаницы. Например, часто говорят, что вероятности событий в одном месте могут быть мгновенно изменены событиями в другом месте, отделённым от первого пространственноподобным интервалом. Но является ли это правдой и есть ли в этом смысл – не имеет никакого отношения к нашим рассуждениям и к самому понятию вероятности.

Для читателей оригинальной версии теоремы [1] заметим, что мы усилили теорему, заменив аксиому FIN более слабой аксиомой MIN. Ранняя аксиома FIN [1] о том, что существует конечный верхний предел скорости, с которой информация может передаваться, вызывала возражения со стороны ряда авторов. Например, Басси и Жирарди спрашивали в [3]: что точно

[1)] При переводе названия статьи возникла дилемма - дать короткий перевод, но тогда непонятный без контекста статьи, или дать понятный перевод, но пространный – несвойственный для названий. Особенность перевода заключается в отсутствии в русском языке однозначного эквивалента английскому "will" для физики. Мы решили назвать теорему, о которой идёт речь, по первым буквам оригинального текста. При этом получилась аббревиатура *sFWT* (The Strong Free Will Theorem). Для литературного перевода названия статьи на наш взгляд более всего подходило бы: "*Квантовый индетерминизм против функционального детерминизма*".

Подчеркнём ещё раз: именно многозначность английского слова "will" и наделение его статусом физического термина обуславливает необходимость придать ему значение "возможность", отражающему важное свойство недетерминированности результатов. Тогда в отношении экспериментатора (как активного элемента процесса) этот смысловой контекст выражается фразами: *свобода выбора экспериментатором условий проведения эксперимента*, а для частицы, как некоего проявляющегося её свойства - *свободой реализации своих свойств*. Общее здесь – это проявление характера недерминированности явлений. *Прим. редактора.*

[2)] *John H. Conway and Simon Kochen*
Джон Х. Конвей, профессор математики, Принстон, Университет, jhorcon@yahoo.com.
Саймон Кохен, профессором математики, Принстон, Университет, kochen@princeton.edu.

NOTICES OF AMS VOLUEM 56 NUMBER 2

есть “информация”, что воздействует и проявляется во взаимодействиях согласно GRW-теории[3)] (обсуждается в приложении)? Что в этом случае можно считать информацией? Почему "точечные моменты" не могут передаваться мгновенно и почему это не считается (или считается) передачей сигнала? Подобные возражения упускают важный момент: единственной информацией, с которой мы обращаемся в FIN ─ есть выбор экспериментатора и реакция частицы отметкой на экране, как сигнал ориентации аппарата. Скорость же передачи любой другой информации не имеет никакого отношения к нашей аргументации. Замена FIN на MIN сделала этот факт явным. Теорема была дополнительно усилена, позволяя реакциям частиц зависеть от прошлого в половинных пространствах, а не во всём световом конусе [1].

Аксиомы

Представим и обсудим три аксиомы, на которых строится доказательство теоремы.

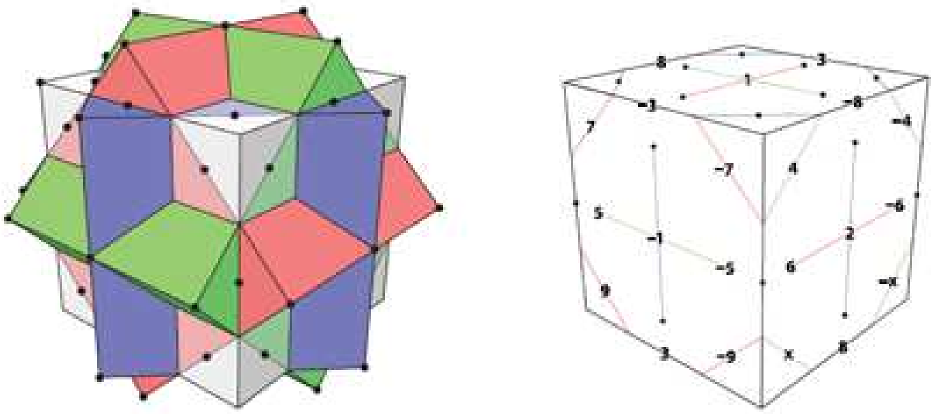

Рис. 1a Рис. 1b

Рис. 1. Три цветных куба получены вращением белого куба на 45° вокруг координатных осей. 33 направления являются осями симметрии цветных кубов и проходят через точки, отмеченные на рис. 1a. На рис. 1b отмечены эти направления на белом кубе.

(i) Спин-аксиома и парадокс Коэна-Спекера

Ричард Фейнман однажды сказал: "Если кто-то заявил вам, что понимает квантовую механику, то всё, что вы узнали ─ это то, что вы встретили лжеца". Наша первая аксиома изначально кажется простой для понимания, однако будьте осторожны, замечание Фейнмана ─ это именно тот случай! Аксиома говорит об измерении квадрата спина частицы со спином 1, что всегда приводит к результату 0 или 1.

Спин-аксиома: *Измерения квадрата спина частицы со спином 1 в трёх ортогональных направлениях всегда соответствуют покомпонентным ответам 1, 0, 1 в некотором порядке.*

Квантовая механика предсказывает эту аксиому, поскольку для частицы со спином 1 квадраты спиновых операторов s_x^2, s_y^2, s_z^2 коммутируют и имеют сумму 2.

Свойство "101" является парадоксальным, поскольку комбинация, которая якобы будет реализована при измерении на самом деле должна существовать и до её "измерения" ─ то есть должна существовать функция, определённая на сфере возможных направлений, принимающая значения $(1, 0, 1)$ в некотором порядке на каждой ортогональной тройке. Эта функция должна принимать одинаковые значения на паре разных направлений и всегда 0 на направлении ортогональном этой паре. Таким образом, необходимо доказать существование такой функции,

[3)] GRW - Ghirardi, Rimini and Weber

определённой на множестве троек ортогональных направлений, которая имеет свойства "101"-функции для этого множества. Но, к сожалению мы имеем:

Парадокс Коэна-Спекера: *не существует "101"-функции для 33 пар направлений рис. 1 (конфигурация Переса).*

Доказательство. Мы будем называть узел чётным или нечётным в зависимости от предполагаемого значения "101"-функции 0 или 1 и последовательно в возрастающем порядке присваивать чётные или нечётные номера узлам на рис. 1b пока не придём к противоречию.

Для доказательства будем пользоваться допустимыми преобразованиями ортогоналей. Например, координатная тройка вращается до тройки с узлами (2, 3,-3); этим начинается наше доказательство. Затем по очереди вращаем полученную тройку вокруг оси с узлом (-1) до тройки с узлами (8,-7, 9) и заканчиваем тройкой с узлами (-8, 7,-9).

Без потери общности будем считать узлы (1) и (-1) нечётными, а узел (2) – чётным. В силу этого узлы (3) и (-3) должны быть нечётными. Узлы (4) и (-х) образуют тройку ортогональных направлений с узлом (3), поэтому один из них (без потери общности) становится чётным. При отражении узлы (-4) и (х) переходят в узлы (4) и (-х) и без потери общности можно считать узел (-4) также чётным.

Вращение на 90° вокруг оси с узлом (1) преобразует тройку (7, 5, 9) в (4, 6, х) и показывает, что ось с узлом (5) ортогональна оси (4). Поэтому (1, 5, 6) образуют тройку направлений, а направление (6) ортогонально направлениям с узлами (7) и (9(. Таким образом, (5) есть нечётный узел, (6) - чётный, а (7, 9) - нечётные. Аналогично для $(-5, -6, -7, -9)$.

Наконец, узел (8) составляет тройку с узлами (-7) и (9), как и (-8) с узлами (7) и (-9). Оба узла должны быть чётными и, таким образом, образуют тройку ортогональных направлений, что приводит к противоречию и завершает доказательство.

Несмотря на парадокс Коэна-Спекера, ни один физик не подвергнет сомнению справедливость SPIN-аксиомы, поскольку она следует из квантовой механики, являющейся одной из всех других самой строго обоснованной научной теорией. Однако важно понимать, что фактически мы говорим не о всей квантовой механике, а только о двух проверяемых следствиях , а именно – SPIN и TWIN аксиомах.

Разумеется, эти две аксиомы представляют идеализированные формы экспериментально проверенных предсказаний, поскольку имеют дело с точными ортогональными и параллельными направлениями в пространстве. Однако, как показано в [1], теорема надёжна в том, что примерные формы этих аксиом всё равно приведут к аналогичному выводу. В то же время это показывает, что любые более точные модификации специальной теории относительности (как и общей относительности) и квантовой теории не повлияют на выводы теоремы.

(ii) TWIN-аксиома и парадокс ЭПР

На один из самых курьёзных фактов квантовой механики указали Эйнштейн, Подольский и Розен в 1935 году. Этот факт говорит о том, что хотя результаты пространственно разделённых наблюдателей не могут быть предсказаны заранее , они могут коррелировать.

В частности, возможно изготовление синглетного состояния с суммарным спином равным 0 из пары частиц-двойников со спином 1. Эта пара даст тот же результат о квадрате спина, измеренного в параллельных направлениях. TWIN-аксиома представляет суть этого утверждения.

TWIN-аксиома: *Для 1-спиновых частиц-двойников предположим, что экспериментатор* A *выполняет 3-эксперимент по измерению квадрата спина компонент частицы* a *в трёх направлениях* x, y, z. *В это же время экспериментатор* B *производит 1-измерение над частицей-двойником* b *в направлении* w. *Тогда, если* w *совпадёт с одним из направлений* x, y, z, *результат* *измерения экспериментатором* B *обязательно воспроизведёт ответ, соответствующий измерению экспериментатора* A.

Мы ограничимся направлениями w из 33 конфигурации Переса, рассмотренных выше, а x, y, z должны представлять одну тройку из 40 ортогональных троек, а именно — 16 таких троек и 24, полученных из ортогональных пар.

(iii) MIN-аксиома, теория относительности и *sFWT*

Одним из парадоксов, следующим из теории относительности, является факт зависимости временного порядка становления событий от выбора инерциальной системы отсчёта. Если два пространственноподобных события произойдут в определённом порядке по отношению к одной системе отсчёта, то в другой системе отсчёта они могут произойти в обратном порядке. Такие события мы должны будем использовать при спиновых измерениях частиц-двойников.

Обычно по умолчанию предполагается выполнение принципа временной причинности, который гласит о том, что будущее не может влиять на прошлое. Его релятивистская форма утверждает, что любое событие не может быть под влиянием того, что происходит достаточно удалённо и в любой инерциальной системы отсчета. Другим молчаливым предположением является то, что экспериментатор свободен в выборе настроек возможных экспериментов. Точнее можно сказать, что действия экспериментатора не являются какой-либо функцией прошлого. Мы используем эти уточнения явно только в некоторых очень специальных случаях, а здесь — для того, чтобы придать определённость в окончательной формулировке аксиомы.

MIN-аксиома: *пусть эксперименты выполняются наблюдателями* A *и* B, *разделенными пространственноподобным интервалом. Экспериментатор* B *может свободно выбрать одно из 33 направлений* w *и реакция* a *не зависит от этого выбора. Аналогично и независимо* — A *может свободно выбрать любое из 40 троек* x, y, z и *реакция* b *также не зависит от этого выбора*

Это и есть *возможность свободного выбора наблюдателя*, которая позволяет экспериментаторам осуществить свободный и независимый выбор x, y, z и w. Но относительно одной инерциальной системе, назовём её A-первой системой, эксперимент системы B случится несколько позже, чем эксперимент A и поэтому реакция a не может по временной причинности подвергнуться влиянию более позднего выбора w наблюдателем B. С B-первой системой отсчёта ситуация обратная, что касается последнего предложения MIN-аксиомы. Значение термина "независимость" мы обсудим более подробно в Приложении.

sFWT-теорема представляет усиленную форму оригинальной версии [1]. Прежде чем начать, приведём более чёткую терминологию. Мы используем слова "свойства", "события", "информация", исключительно как синонимы: произошло ли событие, проявилось ли свойство — всё это может быть закодированы информационным битом. Точный смысл этих терминов может меняться от теории к теории, однако для нас это не важно, поскольку мы используем их только в конкретном контексте наших трех аксиом.

Сказать, что выбор наблюдателем A тройки x, y, z является свободным, означает более точно то, что выбор не определяется (то есть не есть функция) тем, что случилось ранее (в любой инерциальной системе отсчёта). Наша теорема — это удивительное следствие, утверждающее, что и отклик a частицы должен быть *свободным в реализации результата* в том же смысле, что и выбор наблюдателем условий эксперимента: отклик это не функция того, что произошло раньше (по отношению к любым инерциальным системам)[4)].

[4)] Зачатую об этом говорят как о "свободном выборе" частицей своего состояния. Однако следует обратить внимание на условность этой фразы, то есть на то, что это есть не более, чем просто "фигура речи". Просто это делается с целью краткости изложения, однако в ущерб постулатам философии. *Прим. редактора*

***sFWT*-теорема.** *Из аксиом* SPIN, TWIN *и* MIN *следует, что отклик спина частицы в 3-эксперименте произволен. Это означает, что отклик не является функцией параметров более ранних событий окружения, обусловленных произошедшим в любой инерциальной системе.*

Доказательство. Допустим противное как предположение "функциональной гипотезы"[1]. Обозначим через (i, j, k) реакцию a частицы в направлениях x, y, z в 3-эксперименте относительно инерциальной системы отсчёта F; через β – более раннюю реакцию частицы для направления w в другой инерциальной системе G. Функции свойств $\alpha, \ldots$ и $\beta, \ldots$ запишем в виде:

$$\theta_a^F(\alpha) = \text{ одно из свойств: } (0,1,1), (1,0,1), (1,1,0),$$
$$\theta_b^G\,(\beta) = \text{ одно из свойств: } 0 \text{ или } 1.$$

(i) Если одна из этих функций, скажем θ_a^F, подвержена влиянию некоторого произвольного информационного воздействия – "несвязанного", то есть не влияющего на выбор спинового направления экспериментатором A и событий F-ранних, чем этот выбор, тогда должна существовать точная нижняя грань F-момента t_0, после которого вся такая информация становится доступной a [5]. Поскольку "связанная" информация также становится доступной при t_0, все информационный биты "несвязанной" или "связанной" информации должны иметь значения 0 или 1 и будут входить аргументами в функцию θ_a^F. Поэтому начало реакции a мы относим к t_0.

Если действительно, существует *любой* "несвязанный" бит, который влияет на a, окружение имеет возможность свободной реализации значения около a в момент t_0. Без излишнего педантизма – это мы и называем *"свободным выбором частицей"*. Этот вопрос обсуждается более подробно в разделе "Квантовый индетерминизма против функционального детерминизма".

(ii) Теперь мы можем предположить, что никакие новые информационные биты не влияют на реакции частиц и поэтому α и β являются функциями соответствующих выборов экспериментаторов и событий более ранних, чем их выбор.

Можно ожидать, что α изменяется с x, y, z и может или не может варьироваться вместе с w. Однако, изменяется функция или не изменяется, мы можем ввести x, y, z, w как новые аргументы и переписать θ_a^F как новую функцию (которой для удобства мы даём такое же имя)

$$\theta_a^F\,(x, y, z, w; \alpha') \qquad (\star)$$

параметров x, y, z, w и свойств α', независимых от x, y, z, w.

Чтобы убедиться в этом, заменим любое α, зависящее от x, y, z, w значениями констант $\alpha_1, \ldots, \alpha_{1320}$ взятыми из $40 \times 33 = 1320$ четвёрок x, y, z, w, которые должны использовать. С другой стороны, если каждое α есть некоторая функция $\alpha(x, y, z, w)$ аргументов x, y, z, w, мы можем подставить эти функции в $(\star)$, чтобы получить информационные биты независящие от x, y, z, w.

Аналогично, перепишем θ_b^G как функцию

$$\theta_b^G\,(x, y, z, w; \beta')$$

аргументов x, y, z, w и свойств β', независящих от x, y, z, w.

Теперь по конкретному выбору w, который произведёт B, найдётся значение β_0 по β', при этом будет определено

$$\theta_b^G\,(x, y, z, w; \beta_0).$$

Согласно независимости β' от w (см. выше), функция $\theta_b^G\,(x, y, z, w; \beta_0)$определяется с тем же значением β_0 для всех 33 значениях w. Тот факт, что MIN-аксиома позволяет B свободно варьировать выбор w делает это интуитивно понятным.

---

[5] Следует отметить, что авторы не вводят понятия максимальной скорости распространения и, более того, самой скорости как пространственной производной по времени. *Прим. редактора*

Определим

$$\theta_0^G\,(w)\;=\;\theta_b^G\,(x,y,z,w;\beta_0)\,,$$

замечая, что так как согласно MIN-аксиоме, реакция b не может меняться параметрами x,y,z — θ_0^G является функцией только w.

Аналогично, существует значение α_0 из α', для которого функция

$$\theta_1^F\,(x,y,z)\;=\;\theta_a^F(x,y,z,w;\alpha_0)$$

определяется для всех 40 троек $x,y,z,$ и также не зависит от аргумента w, который мы поэтому опустим.

Но согласно TWIN-аксиоме мы имеем равенство

$$\theta_1^F\,(x,y,z)\;=\;(\theta_0^G\,(x),\,\theta_0^G\,(y),\theta_0^G\,(z))$$

Поскольку согласно SPIN-аксиоме значение слева является одним из $(0,1,1),(1,0,1),(1,1,0)$, это показывает что θ_0^G является "101"-функцией, что означает несуществование парадокса Коэна-Спекера. Этим завершается доказательство.

Локализация ответной реакции

Здесь мы предлагаем более подробное обсуждение некоторых тонких моментов.

(i) Поскольку наблюдаемая точка на экране является каскадом более ранних событий, трудно определить, когда действительно начинается "ответная реакция". Мы должны объяснить, почему можно считать реакцию частицы, скажем a, начинающейся в любое время после выбора наблюдателем A , когда все "несвязанные" биты информации становятся доступными a.

Пусть $N(a)$ и $N(b)$ представляют собой выпуклые пространственно-временные области, которые достаточно большие для того, чтобы быть "соседями соответствующих экспериментов". Под этим мы подразумеваем, что эти области включают выбранные параметры измерительной аппаратуры и ответов соответствующих частиц. Наше доказательство показывает, что если обратное полупространство $t\;<\;t_F$, определённое данным F-временем t_F, является несвязным с *N(a)*, тогда *доступной* информации недостаточно для определения a-реакции. С другой стороны, если каждое из двух полупространств содержит соответствующее окружение, то, конечно, они содержат и ответные реакции. Возможности изменений F и G становятся достаточными, чтобы найти "несвязанные" решения для двух окружений, что оправдывает наше приписывание этого самим частицам.

(ii) Отметим, что не вся информация обратного полупространства (скажем, G) должна быть доступна b, поскольку MIN-аксиома препятствует функции θ_b^G частицы b использовать с помощью экспериментатора выбор направлений x,y,z. Основной причиной, конечно, является то, что относительность позволяет нам рассматривать ситуацию из B-первой системы отсчёта, в которой выбор A делается только позже ответа b, так что A волен выбирать произвольно одну из 40 троек. Тем не менее, нашей единственной возможностью является использование релятивистской инвариантности. Этот аргумент действительно позволяет использовать любую информацию и это не свидетельствует о том, что выбор наблюдателя A должен передаваться со сверхсветовой скоростью или даже назад во времени.

(iii) Хотя мы уже исключили возможность того, что свойство θ_b^G может меняться с выбором направлений наблюдателем A, можно предположить, что оно, тем не менее, может отличаться в будущем(!) ответе a. Однако θ_b^G не может быть затронуто ответом a на неизвестный выбор тройки наблюдателем A, поскольку эта самая информация передаётся согласно ответам $(0,1,1),\to(x,y,z)$, $(1,0,1)\;\to\;(z,x,y)$ и $(1,1,0)\;\to\;(y,z,x)$. По аналогичной причине θ_a^F не может использовать ответ b, поскольку эксперимент наблюдателя B может быть понятым в некоторой ортогональной тройке u,v,w с отброшенными ответами, соответствующими u и v.

(iv) Возможно возражение, что свободный выбор сам по себе мог бы в некотором смысле зависим от системы отсчёта. Однако её единственный экземпляр, используемый в нашем доказательстве есть выбор направления, которое проявляется в ориентации макроскопической аппаратуры и должен быть одинаковым из любых систем.

(v) Наконец, отметим, что новое доказательство использует четыре инерциальные системы отсчёта: A-первая, B-первая, F и G. Это число не может быть уменьшено без ущерба для теоремы, поскольку мы хотим использовать и системы F и G в том числе, в которых два эксперимента происходят почти одновременно.

Квантовый индетерминизм против функционального детерминизма

В заключении остановимся на некоторых философских обобщениях следующих из *FWT*-теоремы.

Возможны возражения по поводу использования термина "free will" [6] для описания индетерминизма ответной реакции частиц. Однако побуждающее использование этого термина является преднамеренным, поскольку теорема утверждает, что если экспериментатор имеет определённую свободу в выборе начальных условий для эксперимента, то и частицы наследуют такое же свойство, проявляющееся в ничем несвязанной возможности реализовать свои значения. Действительно, вполне естественно предположить, что более поздняя особенность проявления частицей этой способности является завершением трактовки возможности экспериментатора.

Очевидно, что экспериментаторы, которые выбирают направления x, y, z и w, могут быть заменены компьютерной программой, имитирующей работу генератора псевдослучайных чисел. Если мы отвергаем как нелепость мысль о том, что частицы могут быть "посвящены" в эту программу, то и в этом случае доказательство теоремы должно остаться в силе. Как отмечено в [1], *свободная возможность* реализации по-прежнему нуждается в помощи работы генератора случайных чисел, которая, однако, должна начинаться с определённости, зафиксированной, возможно, с незапамятных времён.

Мы предположили, что выбор экспериментатором направлений в конфигурации Переса абсолютно свободен и независим. Свободная же возможность реализации, которую мы ввели для частиц, более ограничена для частиц TWIN-аксиомой. Однако, мы ввели термин "частичной свободы" в [1], чтобы показать, что пара частиц действительно имеет возможность свободно принимать значения своих характеристик.

Исторически, TWIN-корреляции стали такой неожиданностью, что многие авторы стали пытаться объяснить этот феномен влиянием одной частицы на другую. Однако, как было подробно рассмотрено в [1], корреляции обладают свойством релятивисткой инвариантности в отличие от других объяснений. Наша же позиция иная: следуя известному изречению Ньютона "Гипотез не измышляю", мы не объясняем корреляции, а принимаем их как факт.

Некоторые авторы считают, что альтернативой детерминизму является случайность, однако утверждая, что "принятие случайности реально не способствует пониманию свободной возможности". Классические стохастические процессы, такие как подбрасывание монеты, не помогают в объяснении этого феномена. В Приложении и в §10.1 работы [1], показано, что добавление рандомизации не объясняет квантово-механические эффекты, описанные в нашей теореме. Именно природа "частичной свободы" частиц-двойников и более общие эффекты спутывания показывают значительное отличие рассмотренной ситуации от классической стохастичности и именно здесь это вступает в игру.

Хотя *FWT*-теорема и говорит нам о том, что детерминизм не является жизнеспособным вариантом, тем не менее позволяет всё же согласиться с Эйнштейном в том, что “Бог не играет в

---

[6] наиболее релевантным физическим переводом фразы "free will" мы считаем термин 'свободная возможность' понимаемый по смыслу в приведённой ссылке [1]. *Прим. редактора*

кости со Вселенной”. Сегодняшнее состояние знаний пока не даёт возможности понять связи между свободной возможностью частиц принимать значения своих параметров и возможностями человека влиять на этот процесс, однако свобода реализации и проявления свойств частиц – это не есть простая рандомизация.

Противоречие между свободной человеческой способностью и физическим детерминизмом имеет давнюю историю. Давным-давно Лукреций ограничился детерминизмом в трактовке поведении частиц, оставив возможность их непредсказуемого поведения. Принятие же детерминизма во многом привело к успехам в классической физике, что привлекло и привлекает многих философов и учёных к его применению даже в областях далёких от современной физики. Однако это замечание относится уже к компатибилизму – к бесполезной попытке разрешить проблему свободы человеческой воли в детерминированном мире.

Хотя, как показано в [1], детерминизм формально может быть представлен последовательным, нет никаких доказательств того, ему может быть придан статус заведомой "априорности", поскольку классическая механика была заменена квантовой механикой – недетерминистской теорией. Включение *sFWT*-теоремы есть то, чего нет не только в нынешней квантовой теории, но и в представлении мира как недетерминированного образования – так что будущие теории не смогут вернуть нас к представлению о Вселенной как о часовом механизме.

Приложение. Может ли существовать механизм коллапса волновой функции?

На основе трём аксиомам, *sFWT*-теорема показывает, что сама природа недерминистична. Отсюда следует, что у природы не может существовать корректной релятивистской теории. В частности, не может существовать релятивистского варианта теории скрытой переменной как, например, у Бома [4].

Крое того, важным следствием *sFWT*-теоремы является вывод о том, что не существует релятивистского описания механизма коллапса волновой функции. Существуют нелинейные обобщения квантовой механики, называемые в совокупности GRW-теориями (Ghirardi, Rimini, и Weber, см. [5]), в которых предпринимаются попытки дать такой квантовый механизм. При этом исходная теория не была релятивисткой. Однако авторы некоторых новых версии заявляли о соблюдении принципов релятивизма. Мы сосредоточим внимание на rGRWf-теории Tumulka (см. [6]), но приводимые ниже аргументы применимы с необходимыми изменениями и поправками, касающимися деталей, к другим релятивистским GRW-теориям. Сразу отметим, что мы не согласны с утверждением Tumulka в [7] о том, что *sFWT* -теорема неприменима к rGRWf-теориям по причинам, которые сейчас рассмотрим.

(i) Как представлено в [6], rGRWf-теория – недетерминистская теория. Там для определения реакций частиц использовались стохастические "вспышки". Однако в [1] мы показали, что добавление рандомизации и стохастичности детерминизму самой теории не поможет.

"Чтобы понять – почему(?), представим стохастический элемент в псевдорелятивистской GRW-теории случайной последовательностью (не все из которых должны представляться частицами). Хотя они могут быть сгенерированы по необходимости, ясно, что не будет разницы в том, если они будут даны заранее. Но тогда поведение частиц в такой теории на самом деле должно бы быть функцией доступной информации (в том числе и этот стохастический элемент).”

Tumulka пишет в [7], что этот рецепт неприменим к rGRWf-теории:

“Так как случайный элемент в rGRWf-теории является последовательностью вспышек, природа должна, согласно этому рецепту, зафиксировать в начальный момент – где и когда произойдут вспышки и сделать эту информацию "доступной" для каждой пространственно-временной точки, включив эти вспышки в предопределённый план. Проблема в том, что распределение вспышек зависит от внешних областей и, следовательно, от произвольных решений экспериментаторов. В частности, корреляция между вспышками в системах A и B, будет зависеть для обоих от этих внешних областей. Таким образом, чтобы позволить случайности 'быть заранее', природе потребуется заранее знать решение обоих экспериментаторов, что, таким образом, потребует от теории, либо отказаться от свободного выбора, либо разрешить влияние на прошлое".

Tumulka отрицает то, что наша "функциональная гипотеза", а так же *sFWT*-теорема применимы к rGRWf-теории. Однако мы можем легко справиться с зависимостью распределения вспышек от внешних областей F_A и F_B, которые возникают при выборе двумя экспериментаторами направлений x, y, z, и w [7]. Для "вопроса" существует 40 × 33 = 1320 возможных областей для реакций. Для каждого такого выбора мы имеем распределение $X(\mathrm{F}_A, F_B)$ вспышек, то есть имеем различные распределения $X_1, X_2, \ldots, X_{1320}$. Пусть они предварительно заданы случайными последовательностями с различными весами как определённые в различных областях. Однако, природа не обязана знать заранее фактический свободный выбор $\mathrm{F_A}$ (то есть x, y, z) и $\mathrm{F_B}$ (то есть w) экспериментаторов. После того, как выбор был сделан, природа требует только ссылку на соответствующую случайную последовательность X_k чтобы эмитировать вспышку в соответствии с rGRWf-теорией.

Если обратиться к доказательству *sFWT*-теоремы, можно увидеть, что мы просто обрабатываем распределения $X(\mathrm{F_A}, \mathrm{F_B})$ $[= X(x, y, z, w)]$ точно так же, как трактовали любое информационно-битовое α, которое зависело от x, y, z, w. Там мы подставляли все значения $\alpha_1, \ldots, \alpha_{1320}$ для α в функцию отклика $\theta_a(x, y, z, w; \alpha)$. Функциональная гипотеза, применённая таким образом применима к rGRWf-теории.

Tumulka [7] гарантирует, что если это так, тогда rGRWf-теория приобретает некоторые нежелательные свойства: в некоторой системе отсчёта Λ "[вспышка] f_y^{Λ} повлечёт влияние на прошлое". Фактически, применение функциональной гипотезы к rGRWf-теории ведёт к более ужасающим последствиям – оно ведёт к противоречию. Как мы только что показали, функциональна гипотеза применяется к вспышкам, а первые вспышки определяют реакцию частицы и тоже относятся к этим реакциям, что согласно *sFWT*-теореме ведёт к противоречию.

(ii) Другое возможное возражение заключается в том, что в формулировке MIN-аксиомы утверждение о том, что реакция a не зависит от выбора B не достаточно точно. Мы считаем, что утверждение должно быть истинным независимо от точного определения "независимости", поскольку ни в какой инерциальной системе прошлое не может проявиться макроскопической точкой на экране зависящим от будущего свободного решения.

Можно придать более четкую формулировку MIN-аксиоме заменой фразы "реакция b частицы не зависит от выбора A" на фразу "если реакция a определяется выбором B, тогда её значение не меняется с этим выбором". Тем не менее, фактически это уточнение необходимо только в представлении функциональной гипотезы, когда используется математическая форма того, что функция θ_a^F предполагаемой реакции a не может меняться с выбором B. Принятие теории относительности с отрицанием MIN-гипотезы есть предположение того, что экспериментатор может свободно произвести выбор, который повлияет на прошлое, изменяя локализацию точки на экране, которая уже наблюдалась.

Tumulka утверждает в [7], что поскольку в эксперименте с частицами-двойниками вопрос о том, какая из первых вспышек A и B произошла раньше является системно-зависимым, то и определение того, какая вспышка повлияет на другую так же будет системно-зависимо. Однако, MIN-аксиома не имеет дела со вспышками или другими мистическими событиями, она

[7] К сожалению, это делает GRWf-теорию непредсказуемой - возможно найти только распределение вспышек, что "объясняет" поведение любой частицы, когда заданы области обоих экспериментаторов.

имеет дело только с откликами частиц, формирующими макроскопические точки на экране, что, конечно — системно-независимо.

В любом случае, мы можем избежать любых таких вопросов о термине "независимость", модифицируя MIN-аксиому так, чтоб улучшить версию *sFWT*-теоремы, которая, тем не менее, воспроизводит противоречие релятивисткой GRW-теории:

MIN': *Относительно* A-первой *системы отсчёта* B *может свободно выбирать любое из 33 направлений* w *и до проявления реакции на этот выбор реакция* a *не зависит от предварительного выбора* B. *Аналогично, в* B-первой *системе* A *может независимо и свободно выбрать любую из 40 троек* x, y, z *и до проявления реакция предварительная реакция* b *не зависит от выбора* A.

Аргументом к замечанию в MIN' является то, что реакция a отмечается точкой на экране событием уже произошедшим в A-первой системе отсчёта и не может быть изменено очередным свободным выбором w наблюдателем B; аналогичное замечание применимо к реакции b. В [7] Tumulka, видимо, принимает этот аргумент для MIN' в rGRWf-теории: "... первая вспышка f_A не зависит от области F_B в системе, в которой точечное событие для B происходит позже, чем для A. "

Уточнение MIN позволяет доказать FWT-теорему в более слабой форме:

FWT': *Из аксиом* SPIN, TWIN *и* MIN' *следует, что существует инерциальная система такая, что реакция спина 1 частицы на 3-эксперимент не является функцией свойств части окружения, события в котором происходили раньше, чем реакции относительно этой системы отсчёта.*

Этот результат следует без изменений, из нынешнего доказательство *sFWT*-теоремы, если принять во внимание, что F должна быть A-первый системой и G B-первый системой и применяя MIN' на месте MIN для устранения зависимости θ_a^F от w и зависимости θ_b^G от x, y, z.

Теперь можно применить $sFWT'$-теорему чтобы показать, что функция первой вспышки (f_y^Λ в [4]) rGRWf-теории , которая определяет реакцию a не может существовать при выборе Λ как системы, названной в $sFWT''$.

Таким образом, *sFWT*-теорема показывает, что любая такая теория, даже если она включает в себя стохастический элемент, должна проходить по тонкой линии предсказания о том, что для определённых взаимодействий волновая функция коллапсирует в некоторую собственную функцию гамильтониана, не будучи в состоянии показать — в какую именно. Даже, если такая теория существует, авторы не имеют понятия — какую форму это может принять.

Ссылки

[1] J. Conway and S. Kochen, The Free Will Theorem, *Found. Phys.* 36 (2006), 1441–1473.

[2] S. Kochen and E. Specker, The problem of hidden variables in quantum mechanics,
J. Math. Mech. 17 (1967), 59–88.

[3] A. Bassi and G. C. Ghirardi, The Conway-Kochen argument and relativistic GRW models,
Found. Phys. 37(2) (2007), 169–185.

[4] D. Bohm, Quantum Theory in terms of “hidden” variables, I, *Phys. Rev.* 85 (1952), 166–193.

[5] G. C. Ghirardi, A. Rimini, and T. Weber, Unified dynamics for microscopic and macroscopic systems,
Phys. Rev. D34 (1986), 470–491.

[6] R. Tumulka, arXiv:0711.oo35v1 [math-ph] October 31, 2007.

[7] Comment on “The Free Will Theorem”, *Found. Phys.* 37 (2) (2007), 186–197.

Примечание от авторов: мы благодарим Eileen Olszewski за верстку статьи и Frank Swenton за графику.

Джон Х. Конвей и Симон Коэн. *sFWT*-теорема (сильный вариант)
NOTICES OF THE AMS. VOLUEM 56, NUMBER 2. FEBRUARU 2009

Две теории, которые произвели революцию в физике XX века – теория относительности и квантовая механика, полны выводов, которые не поддаются здравому смыслу. Недавно мы использовали три такие парадоксальные идеи, чтобы доказать *FWT*-теорему (здесь усиленный вариант – *sFWT*), являющейся кульминацией серии из теорем о квантовой механике, возникшей в 1960-х годах. Грубо говоря, теорема утверждает, что, если для экспериментаторов имеется возможность свободной подготовки эксперимента независимо от предыстории предыдущих измерений, нечто подобное должно выполняться и для элементарных частиц. Точнее, если экспериментатор может свободно выбирать – в каком направлении ориентировать аппаратуру для измерения, то ответ частицы (чтобы быть педантичным – ответ окружения частицы) определяется не всей предыдущей историей этого окружения.

Дополнение по результатам on-line обсуждения

Терминология

"101"-свойство: свойство тройки иметь значения для компонент какую-либо перестановку чисел 1, 0, 1.

"101"-функция: функция, обладающая "101"-свойством, заданная на тройке взаимноортогональных направлений; при этом аргументом функции является пара ортогональных направлений, а значением – третье ортогональное направление.

Спиновый 3-эксперимент: Измерения квадрата спина частицы со спином 1 в любых трёх ортогональных направлениях всегда соответствуют покомпонентным ответам 1, 0, 1 в некотором порядке как значение "101"-функции.

TWIN-эксперимент: для 1-спиновых частиц-двойников предположим, что экспериментатор A выполняет 3-эксперимент по измерению квадрата спина компонент частицы a в трёх направлених x, y, z. В это же время экспериментатор B производит 1-измерение над частицей-двойником b в направлении w. Тогда, если w совпадёт с одним из направлений x, y, z, результат измерения экспериментатором B обязательно воспроизведёт ответ, соответствующий измерению экспериментатора A.

Факты, которые потрясли "здравый смысл".

1. Спиновый 3-эксперимент: *результат при любом пространственном положении – результат эксперимента будет обладать "101"-свойством.*

2. Парадокс Коэна-Спекера: *не существует "101"-функции для 33 пар направлений в частной конфигурация Переса* .

3. TWIN-эксперимент: *удалённая частица-двойник повторяет конфигурацию исходной, над которой производятся измерения.*

4. *sFWT*-теорема: *из аксиом* SPIN, TWIN *и* MIN *следует, что отклик спина частицы в 3-эксперименте произволен. Это означает, что отклик не является функцией параметров более ранних событий окружения, обусловленных произошедшим в любой инерциальной системе.*

Несмотря на парадокс Коэна-Спекера, ни один физик не подвергнет сомнению справедливость SPIN-аксиомы, поскольку она следует из квантовой механики, являющейся одной из всех других самой строго обоснованной научной теорией. Однако важно понимать, что фактически мы говорим не о всей квантовой механике, а только о двух проверяемых следствиях , а именно – SPIN и TWIN аксиомах.

Разумеется, эти две аксиомы представляют идеализированные формы экспериментально проверенных предсказаний, поскольку имеют дело с точными ортогональными и параллельными направлениями в пространстве. Однако, как показано в [1], теорема надёжна в том, что примерные формы этих аксиом всё равно приведут к аналогичному выводу. В то же время, это показывает, что любые более точные модификации специальной теории относительности (как и общей относительности) и квантовой теории не повлияют на выводы теоремы.

Суть *sFWT*-теоремы: *то, что проявляется в эксперименте оказывается невоспроизводимым функционально или, другими словами - явное отсутствие функциональной связи между возмущением и откликом!*

Это же какое воображение надо иметь, чтобы наизусть вращать части целого? (По поводу доказательства парадокса Коэна-Спекера)

Просо тогда ещё не изобрели кубик Рубика, чтобы наглядно убедиться в некоммутативности группы вращений в реальном окружении ... Именно в этом и идея доказательства - она становится достаточно прозрачной и воспринимаемой визуально...

Но согласно спин-аксиоме: *измерения квадрата спина частицы со спином 1 в трёх ортогональных направлениях всегда соответствуют покомпонентным ответам 1, 0, 1 в некотором порядке.* Почему результаты эксперимента и не назвать функцией? Здесь присутствуют и аргументы, и значения!

Но для функциональности важно наличие устойчивой связи между аргументами функции и её значениями, благодаря чему мы можем сказать, что данному аргументу соответствует своё значение функции. Именно эта связь позволяет определить значение функции при заданном аргументе до исхода эксперимента. Например, пусть $y = \sin x$ или $y = \cos x$. Здесь мы имеем разные функции, но общее у них то, что обе связи устойчивы в проявлении: если связь в каком-либо эксперименте характеризуется одной из этих функций или какой-либо другой, то ещё до самого проведения эксперимента мы можем прогнозировать результат. Лаудиза сформулировал это как "Принцип реальности". См.

https://www.dropbox.com/s/m8qzfxghm4az00x/Laudi-2000-Rus-2.pdf?dl=0
https://cloud.mail.ru/public/DPV3/WhAXJ7a1c
https://www.academia.edu/33329716/

Однако, на частном примере (парадокс Коэна-Спекера) отрицается существование такой связи, а по индукции это доказывается sFWT-теоремой и для общих условий. Сама sFWT-теорема "ставит точку" на теориях "скрытых параметров" в спин-экспериментах, утверждая спонтанный характер возникновения значений спи-функции.

Касимов ВА. Авторский семинар
http://my.mail.ru/community/physiks.princips/?ref=cat

Для связи:
quadrica-m@mail.ru
http://quadrica.ucoz.net/
https://independent.academia.edu/KasimovVladimir
https://vk.com/public128913510
https://www.facebook.com/notes/1557999174417186/
http://v_kasimov.livejournal.com/