

Ж. т'Хоофт

О ПОСТУЛАТЕ “СВОБОДЫ ВОЛИ” В КВАНТОВОЙ МЕХАНИКЕ

ON THE FREE-WILL POSTULATE IN QUANTUM MECHANICS

http://lanl.arxiv.org/PS_cache/quant-ph/pdf/0701/0701097.pdf

arXiv:quant-ph/0701097v1 15 Jan 2007

Gerard 't Hooft

Institute for Theoretical Physics, Utrecht University

And Spinoza Institute

Postbox 80.195

3508 TD Utrecht, the Netherlands

e-mail: g.thoof@phys.uu.nl

internet: <http://www.phys.uu.nl/~thoof/>

Перевод М.Х.Шульмана (shulman@dol.ru)

Аннотация

Так называемая “аксиома свободы воли” является существенным элементом многочисленных дискуссий, посвященных скрытым переменным в квантовой механике. В настоящей статье мы показываем, что “свобода воли” может быть определена разными способами. Обычно используемое определение является, очевидно, неподходящим для строго детерминистических теорий. Мы предлагаем иную, более точную формулировку, определяющую условие, которое может оказаться более подходящим для теоретических конструкций и моделей. Наша аксиома, которую мы будем называть условием ‘неограниченного выбора начального состояния’, влечет следствия, подобные “аксиоме свободы воли”, но не вступает в конфликт с детерминизмом, а также приводит к иным заключениям относительно причинности и локальности в квантовой механике. Ранее предложенные нами модели не входили в эту категорию. Использование нашего условия ‘неограниченного выбора начального состояния’ в рамках детерминистической теории, обосновывающей квантовую механику, приводит к усиленному условию свободы воли для квантовой системы: наблюдатель обладает свободой воли изменить настройку измерительного устройства, но не может управлять фазой его волновой функции. Избавление от обычной концепции “свободы воли” не имеет каких-либо последствий для наших представлений и интерпретаций в рамках обычной жизнедеятельности и нашей практики мышления, но требует более тщательного обсуждения понятия свободы воли.

1. Общее введение

Могут существовать различные мотивации для изучения онтологической природы квантовой механики. При этом можно исходить из трех различных точек зрения.

Первая из них связана с фундаментальным беспокойством по поводу формы представления квантовой механики в стандартных учебниках. Оказывается, квантовая механика, чтобы мы понимали и могли предсказывать результаты наблюдений и измерений, дает описание объектов, называемых “волновыми функциями”, которые нельзя наблюдать непосредственно. Эти предсказания часто обладают “неопределенностью”, которая означает, что для

различных возможных исходов измерения предсказываются лишь статистические распределения, которые проверяются лишь в ходе многократно повторенных экспериментов. Можно согласиться с аргументацией Эйнштейна что подобная теория неудовлетворительна, и утверждать, что приемлемой может считаться лишь такая теория, которая при идеальных условиях будет определенно предсказывать отдельные события. Единственным допустимым источником погрешности предсказаний должен считаться тот факт, что на практике ни начальное состояние, ни бесконечно точные значения физических констант в точности не известны.

Многие исследователи называют другие причины неудовлетворенности стандартной формулировкой квантовой механики в связи с тем, что не только микроскопические события, но и акты наблюдения, хранения и интерпретации этих наблюдений должны, в принципе, описываться квантовой механикой. Должна существовать некоторая точка, в которой результат наблюдения приходит в соответствие с классической определенностью, которая описывается как “коллапс волновой функции”. Когда и как происходит этот “коллапс”? Эта точка перехода между квантовой и классической механикой, между волновой функцией и обычной вероятностной функцией, вызывает определенное беспокойство.

Третья группа исследователей задает более прагматические вопросы. Стандартная Модель элементарных частиц скрупулезно описывает поведение всех известных элементов материи. Это целиком квантовомеханическое описание, и можно сказать, что квантовая механика является совершенно необходимой частью этого описания. Правда, эта модель не позволяет учесть влияние гравитационных сил. Тогда, даже допуская существование мощного обоснования этого подхода в виде “теории суперструн”, претендующей на роль единственной теории и предлагающей полное решение проблемы квантовой гравитации, это не может помочь, учитывая пока что имеющее место ее несовершенство в качестве строгого логического фундамента. Эта теория связана с асимптотическими пертурбативными расширениями, где различные области сопряжены с помощью соотношений дуальности, но в существенно интересных случаях эти расширения имеют тенденцию к расходимости, и их подлинные базисы, строго говоря, все еще остаются неясными. Приверженцы теории струн уверены, что эти проблемы будут решены, но существующий вид теории не дает нам даже намек на то, откуда возникнет это решение.

Существенным элементом теории суперструн является утверждение, что она должна быть всеохватывающей, т.е. “теории всего”. Если так, то она, естественно, должна также отвечать на вопросы, относящиеся к собственно квантовой механике. Что такое квантовая механика? Должна ли “теория всего” также объяснить (хотя бы в принципе), как все эти флуктуации в пространстве и времени могут возникать, какой может быть их природа в терминах строгих уравнений движения, как именно появились галактики, звезды, планеты? Квантовая механика, насколько мы ее знаем, никогда не даст ответа на эти вопросы, поскольку она может давать лишь статистические предсказания. Является ли это недостатком для претенциозной “теории всего”? По мнению автора, наиболее подходящий путь поиска новых концептуальных решений, которые отвечали бы не только на вопрос о непerturbативной природе теории суперструн, но также и на все другие связанные с этим вопросы, может появиться лишь при формировании следующего поколения вопросов. В прошлом один такой вопрос состоял в описании с помощью теорий суперструн черных дыр. Это привело к появлению плодотворных исследований и, в конечном счете, многочисленных новых концепций. Я думаю, что подобные вопросы должны быть также сформулированы для более глубокого понимания природы квантовой

механики, и что попытки ответить на такие вопросы снова приведет к формированию новых концепций.

Приверженцы теории суперструн до сих пор не повернулись лицом к проблемам, поставленным теми, кто пытается понять квантовую механику на более глубоком уровне. Настало время задать себе эти вопросы.

2. Свобода воли

Класс очень важных вопросов возник, когда Джон Белл (John Bell) сформулировал свои знаменитые неравенства [1]. В самом деле, когда конструируют модели, визуализирующие то, что могло бы произойти в ходе квантовомеханического процесса, то обнаруживают, что детерминистические интерпретации обычно ведут к предсказаниям, порождающим эти неравенства, в то время как хорошо понятно, что квантовая механика нарушает их. В попытках разрешить эту ситуацию и избежать ее следствий в рамках детерминистических теорий вводят концепцию “свободы воли”. В основном предполагают, что некоторый ‘наблюдатель’ обладает свободой всегда и всюду осуществить выбор наблюдаемых и измеряемых им переменных. Уход от неравенств Белла обеспечивается постольку, поскольку наблюдатель имеет возможность выбирать между наборами переменных, которые не коммутируют между собой.

Чтобы изменить настройки эксперимента, например, путем замены измерения z-компоненты на измерение x-компоненты спина частицы, требуется макроскопическое вмешательство в прибор, но исследователи не видят оснований для того, чтобы такое вмешательство повлияло на волновую функцию соответствующей частицы. Это фактически приводит к нелокальному взаимодействию того же типа, которое хотели устранить.

Такое направление мышления является естественным продолжением способа аргументации, который оказался чрезвычайно успешным в ходе развития таких физических теорий 20-го века, как специальная и общая теория относительности, равно как и собственно квантовая механика: вместо непосредственной дискуссии о микроскопических физических переменных, мы научились говорить в терминах ‘наблюдателей’, ‘измерителей’ и пространств возможных результатов измерений, уходя от самих микроскопических переменных настолько далеко, насколько это возможно, и именно потому, что наш человеческий опыт в макроскопическом мире может подвести нас. Однако в данной статье мы хотим указать на опасность подобной аргументации. Многие исследователи привыкли думать, что микроскопическим миром правит ‘иная’, нежели наша классическая логика. Мы же утверждаем, что существует только один тип логики, даже если наблюдаемые явления трудно интерпретировать.

Представим себе, что мы живем в полностью детерминистическом мире. Было бы тогда корректным употреблять обычно используемое выражение ‘свобода воли’? Мой ответ: конечно, нет! Он может привести к длительной дискуссии, но следует подчеркнуть, что наше основное наблюдение является чрезвычайно простым, относящимся к категории “маленький мальчик крикнул, что король голый”.

Можем мы по своей воле изменить настройки измерительного прибора без модификации какой-либо из измеряемых частиц? Можем мы изменить наше начальное устремление измерить z-компоненту спина и вместо этого измерить его x-компоненту без того, чтобы при этом повлиять на тонкие, микроскопические переменные в нашей окрестности, и в частности на частицу, поведение которой мы собираемся исследовать? Предположим, что мы заменяем наше оборудование, включающие наш собственный план выполнения процедур, на

подлинно макроскопические устройства, такие, как планеты, движущиеся по их ньютоновым орбитам.

Может ли планета Меркурий во время 'детектирования' планеты Плутон решить 'по своей воле' приостановиться где-либо на своей орбите вокруг Солнца, в то время как Плутон продолжает свой прежний путь? Разумеется, нет. Если предположить, что Меркурий застрял где-либо на своей орбите, то все прошлое планетной системы должно было бы измениться, включая траекторию движения Плутона, даже если он все еще находится в Солнечной системе. Короче говоря, нельзя изменить настоящее без того, чтобы при этом не изменилось и прошлое (и, разумеется, будущее). Можно ли изменить прошлое таким образом, чтобы в настоящем изменились только настройки нашего измерительного прибора, но не частицы и спины, которые мы собираемся измерить? Можем ли мы изменить наши настройки без изменения волновых функций исследуемых нами частиц? Этот вопрос мы переадресуем в раздел 5. 'Свобода воли', допускающая изменение наших действий без соответствующих изменений нашего прошлого, невозможна. В главе 5 мы затем уточняем практические следствия этого 'отсутствия свободы воли', которые мы считаем значительно менее существенными, чем часто считается.

Большинство авторов не готовы ответить на вопрос о природе своей гипотезы о 'свободе воли'. Это можно проиллюстрировать с помощью следующих цитат из недавних публикаций:

В работе [3] Басси и Жирарди (Bassi and Ghirardi) утверждают: "Излишне говорить, что аксиома СВОБОДЫ ВОЛИ (FREE axiom) [т.е. гипотеза о свободе воли – т'Хоофт] должна быть справедливой, тогда В свободен измерять в любом из трех направлений ...". Но дальше нет никаких разъяснений, что здесь означает эта 'свобода'.

В работе [4] Конвэй и Кочен (Conway and Kochen) предполагают, что 'свобода воли' означает 'именно то, что экспериментатор может свободно выбрать и выполнить одно из небольшого числа наблюдений'. Замечательно, продолжают они говорить, что факт, которого они, по их утверждению, пытаются избежать, эта "ошибка предсказания", является 'скорее достоинством, чем недостатком, поскольку эти результаты влекут свободные решения, что Вселенная еще не изготовлена'. И снова далее никаких объяснений по поводу значения и необходимости использования 'свободы'.

В работе [5] Р. Тумулка (R. Tumulka) предпринимает попытку "указать три недостатка в аргументации Конвэя и Кочена", но собственно допущение о существовании свободы воли среди недостатков отсутствует: "В качестве следствия из (1)" – указывает он – "мы должны отвергнуть одно из четырех несовместимых предположений. Как мне кажется, любые теории, нарушающие допущение о свободе воли, приводят к существованию некоего промысла (conspiracy) и должны рассматриваться как неудовлетворительные", и далее: "Мы должны потребовать от физической теории, чтобы она была не основанной на предопределенности (non-conspirational), что здесь означает, что она может справиться с любыми вариантами выбора экспериментаторов, как если бы они обладали свободой воли (неважно, существует или нет " истинная " свобода воли). Теория представляется неудовлетворительной, если каким-либо образом начальные условия для Вселенной настолько хитро сплетены, что ЭПР-пары всегда заранее знают, какие магнитные поля выберут экспериментаторы." 'Предопределенность' может означать изменение прошлого так, как этого требует изменение настоящего. В детерминистической теории эта 'предопределенность' в отношении объекта затруднена, так что, вероятно, здесь подразумевается, что в Природе возникает предопределенность для адаптации волновых функций к

новой ситуации. Точка зрения, которую мы отстаиваем, состоит в том, что в детерминистической теории нет волновых функций, в частности – фаз волновых функций; при этом фазы, которые мы используем для их описания, являются артефактами наших вычислительных процедур, и они могут быть хорошо определены тем, что происходило в прошлом. Когда это точно понято, противоречий не возникает.

В работе [6] математик Конвэй, будучи спрошенным, заявил: “Мы должны верить в свободу воли совершить что-либо; я верю, что я свободен в выборе – выпить эту чашку кофе или швырнуть ее в комнату. Я верю, что свободен в выборе – участвовать или нет в этом разговоре.” Но, конечно, Конвэй должен знать, что независимо от его несомненной свободы швырнуть или нет чашку кофе в комнату, все, что он делает, определяется законами физики, а не какой-либо таинственной и не поддающейся описанию ‘свободой воли’. Это, по крайней мере, есть реальное следствие предположения о детерминистичности. Он свободен в выборе того, что делать, но это не означает, что его решение не должно иметь корней в прошлом.

Но достаточно литературных цитат (см. раздел 5). Мы будем квалифицировать все не озвученные допущения о ‘свободе воли’ в физике как не заслуживающие упоминания в математически строгой теории. Однако в этом месте читатель может сказать: да, но вы навсегда отказываетесь вводить в квантовой механике ‘операторы’? Мы используем оператор \hat{p}_i , генерирующий инфинитезимальное перемещение, операторы \hat{a}_i и \hat{a}_i^\dagger , которые уничтожают или порождают некоторую частицу в данном квантовом состоянии; разве это не то же самое, что изменение волновой функции на основе ‘свободной воли’?

Конечно, это так, и это именно та точка зрения, которую автор хочет сформулировать. Эти операции стали общим местом в нашей интерпретации квантовой механики. Они чрезвычайно полезны при тех или иных вычислениях, но нам не следует забывать о том, что мы делаем в действительности. Ситуация становится немного более ясной, если принимаем за основу представление Гейзенберга, а не представление Шредингера, для квантовых состояний. В гейзенберговском представлении мы можем рассчитать, как операторы $\Omega(t)$ ведут себя в функции времени. Предположим, мы подействуем оператором $a_i(\vec{x}, t)$ на некоторое состояние, что в большей или меньшей степени означает, что мы удаляем частицу в точке \vec{x} в момент времени t . При этом возникает другое состояние, для которого и будущая, и прошлая эволюция операторов оказывается иной по сравнению с той, что имела место для исходного состояния! Состояние может быть изменено только если были изменены и его прошлое, и его будущее. Только такие изменения ведут к состояниям, подчиняющимся вышеуказанным физическим законам. И снова мы подчеркиваем, что в этом наблюдении нет ничего особенно глубокомысленного — это так очевидно, что нельзя этого не заметить. Мы должны признать простой факт, что если мы и обладаем вообще какой-то свободой воли, то изменение наших действий приведет к изменению нашего прошлого с той же необходимостью, что и изменение нашего будущего. Мы видим, что это верно даже для квантовой механики; конечно, это верно и для детерминистических систем.

Но тогда возникает еще больше вопросов; зачем вообще кому-либо нужно вводить ‘свободу воли’? Почему это так уж важно? Действительно, гипотезы такого типа необходимы для формулировки реалистичных теорий. Без них вообще нельзя построить никаких физических моделей! Это показывается далее.

3. Неограниченный выбор начального состояния

В этой статье мы защищаем старый способ целостного мышления: хватит разговоров о 'наблюдателях', 'системах', 'измерительных приборах' и 'результатах измерения'. Вместо этого давайте сосредоточимся на 'физических переменных', 'физических состояниях' и 'полных описаниях' этих физических состояний. Это и суть истинные элементы для тех, кто хочет строить модели. Можно держать в голове Стандартную Модель элементарных частиц, или некоторую теорию струн, или планеты на их околосоляных орбитах. Все мы должны задаться вопросом, удовлетворяет ли модель наиболее жестким требованиям внутренней логики. Наша модель должна давать полное описание ее физических переменных, значений, которые они могут принимать, и законов, которым должна подчиняться ее эволюция.

Должно быть сделано и замечание относительно времени, если только мы хотим различать причину и следствия: причина должна всегда предшествовать следствию. Если мы не сделаем такую оговорку относительно времени, мы не сможем знать, в какой последовательности нам следует применять 'законы природы', которые мы могли бы постулировать. Поскольку законы природы приводят к чрезвычайно сложному поведению, их следствия будут, конечно, зависеть от порядка их применения, так что наш тезис позволит установить этот порядок.

Во многих других отношениях наша модель мира может быть любой. Но введем допущение, что она является детерминистической в классическом смысле. Примем, как сказал Омар Хайям, что все события во Вселенной необратимо запечатлеваются в тот самый миг, когда они происходят: условия в момент Большого Взрыва решительным образом предопределили все события вплоть до событий, характеризующий 'финальный апокалипсис'. Откуда тогда возникает идея о 'свободе воли'?

Вероятно, покажется неожиданным, если мы теперь заявим: свобода воли царит повсюду, но это не то допущение, о котором в виде 'аксиомы' толкуют нынешние квантовые физики. Ситуация представляется нам следующей. Законы Природы, определяющие ее эволюцию, являются сложными. Это означает, что в большом числе случаев нет способа точно предвидеть, что произойдет. Только после скрупулезных вычислений от начала процесса до конца можно было бы кое-что сказать о том, что будет, но очень скоро понадобится внести не очень проверенные аппроксимации. Истинные значения степеней свободы Природы не будут известны надежно — понадобятся 'разумные догадки'. Наоборот, если мы хотим понять, почему и как развивается определенная ситуация в нашей Вселенной, мы должны строить многочисленные предположения, относящиеся к прошлому, и, возможно, отбирать их, добиваясь максимального соответствия с тем, что мы знаем. В нашей модели мы будем способны решать только такие задачи, если мы обладаем некоторым набором из полного класса всех возможных конфигураций наших переменных. Для каждого члена этого класса наша модель должна продуцировать разумные предсказания. Даже если в реальном мире лишь иногда и где-то будут реализовываться только очень ограниченные подмножества всех возможностей, наша модель должна описывать все возможности.

Если бы мы были лишены возможности свободного выбора наших начальных состояний, мы никогда не смогли бы доверять нашей модели; мы никогда бы не знали, имеет ли вообще наша модель какой-либо смысл. Короче

говоря, мы должны потребовать, чтобы наша модель давала правдоподобные сценарии для Вселенной при любом выборе начальных условий!

Такова аксиома свободы воли в ее модифицированной форме. Вот почему, утверждаем мы, следует действительно принимать наличие 'свободы воли'. Это не свобода изменения настоящего без того, чтобы повлиять на прошлое, но это свобода выбора начального состояния, учитывающая как его прошлое, так и то, что может произойти в будущем. В самом деле, когда Тумулка в цитированной публикации говорил о предопределенности, утверждая что теории с предопределенностью кажутся неприемлемыми, по существу речь шла об этой модифицированной форме свободы воли, которую он имел в виду. Но это не та свобода воли, которая подразумевается в аргументации Конвэя-Кочена!

Невозможно изменить настоящее без допущения о том, что прошлое также изменится. В действительности изменение прошлого, которое должно ассоциироваться даже с самым крошечным изменением настоящего, должно быть очень сложным, и едва ли может определенным образом повлиять на частицы, спин которых предполагается измерить. Мы вернемся к этому в разделе 5.

4. Операторы в квантовой механике

С точки зрения детерминизма наибольшая степень предопределенности в квантовой механике связана с центральной ролью операторов. Если оператор применяется к наблюдаемой (observable), то считается, что он некоторым образом описывает 'реальность'. Тогда мы называем его 'реально существующим (beable)'. Но таким же образом, в зависимости от разных обстоятельств, оператор может описывать изменение. Тогда мы называем его 'изменяющим (changeable)' [переменную, на которую он действует, можно назвать 'изменяемой' – прим. переводчика]. Например, оператор σ_z для электрона может считаться реально существующим, когда он используется для измерения его спина, если спин ориентирован в z -направлении, но тот же оператор может быть использован для описания перехода к другой ориентации спина, если мы применяем его к переменной спина в x -направлении или y - направлении; тогда он должен считаться изменяющим.

Наша точка зрения состоит в том, что само по себе это не превращает квантовую механику в недетерминистическую теорию. Мы могли бы также ввести такие операторы в ньютонову гравитацию, например, оператор M_{12} , который переводит планету Меркурий из положения 1 (если это отвечает действительности) в положение 2, или куда либо еще в Солнечной системе. В ньютоновой теории гравитации операторы этого типа не представляются особо полезными; но в квантовой механике они таковыми являются. Действительно, только при использовании этих операторов можно установить, что теория инвариантна относительно вращений. Существует по меньшей мере одна классическая модель, для которой можно повысить симметрию, используя квантовомеханические операторы, даже исходя из того, что теория сама по себе является детерминистической, см. [7]. Имеются и другие примеры, где методы квантовой теории поля применяются для решения задач классической теории, таких, как двумерная модель Изинга [8]. В детерминистической теории реально существующие (beables) и изменяющие (changables) представляют собой два разных набора операторов.

Первый представляет наблюдаемые (observables), в детерминистическом смысле. Реально существующие (beables) не влияет на онтологический статус системы, и потому по определению они все и всегда коммутируют с другими реально существующими. Операторы, которые не коммутируют с одним или

более оператором реально существующей величины, называются изменяющимися (changeables) [они изменяют переменную, на которую действуют – прим. перев.]. Когда, исходя из некоторого понимания ‘свободы воли’, наблюдатель мысленно заменяет объект измерения, меняя настройки своего измерительного прибора, этот может рассматриваться как использование изменяющего (changeable) оператора. Согласно как квантовой механике, так и любой детерминистической теории, использование изменяющего оператора сейчас, при $t = 0$, означает, что это распространяется на все моменты времени, как после, так и до момента $t = 0$: операторы эволюционируют.

На рисунке 1 проиллюстрирован мысленный эксперимент с электронами. Неважно, выполнялся ли он на самом деле. В принципе он возможен.

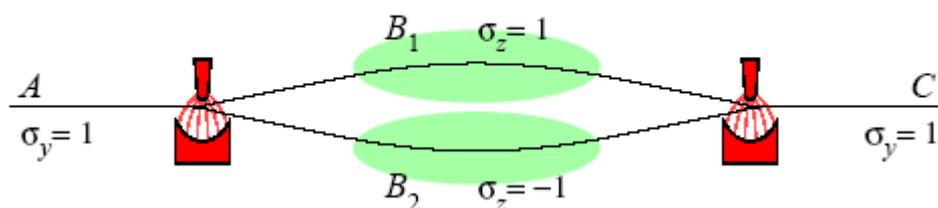


Рисунок 1: гипотетический эксперимент с двумя устройствами Штерна-Герлаха. Начальный спин ориентирован вдоль оси y ; неоднородное магнитное поле разделяет пучок на два, в одном из которых $\sigma_x = 1$, а в другом $\sigma_x = -1$. Затем с помощью магнитного поля пучки вновь сводятся воедино, после чего спин снова становится равным 1 в направлении оси y .

Вопрос состоит в том, как это описать с помощью детерминистического формализма. Было бы ошибкой считать, что в точках A и C реально существующей величиной будет σ_y , а в точках B_1, B_2 таковой будет σ_z . В квантовой механике понятно, как описывать временную эволюцию этих операторов. Если электроны допускают разделение и воссоединение без возмущения, то реально существующие в момент разделения будут весьма сложными, и картина окажется нелокальной. Однако обычная аргументация, апеллирующая к их нелокальности, не применима в нашем детерминистическом подходе. Какими бы локальными ни были реально существующие, они не могут быть описаны в терминах σ_y и σ_z .

5. Кофе Конвэя, предопределенность и квантовые фазы

Необходимость в ‘абсолютной’ свободе воли сомнительна. Может ли существовать какая-либо ‘предопределенность’, чтобы помешать Конвэю бросить чашку кофе в комнату во время интервью? Конечно, никакой такой предопределенности не требуется, но допущение о том, что его решение сделать это зависит от микроскопических событий в прошлом, даже отдаленном прошлом, очень важно в любой детерминистической теории, даже если не существует способа предугадать его действия. Легко аргументировать, что даже наилучший мыслимый компьютер не может вычислить, когда м-р Конвэй сделает это, просто потому, что Природа проделывает свои собственные вычисления гораздо быстрее, чем это может сделать любое рукотворное устройство, собранное из существующих в Природе частей.

Условие неограниченного выбора начального состояния говорит (независимо от того, как поступит Конвэй со своим кофе): то, что произойдет, должно определяться детерминистическими уравнениями. Однако эти детерминистические уравнения не могут содержать волновых функций, следовательно, нельзя требовать свободы воли для изменения настроек детектора (или броска кофе в каком-либо направлении), не оказывая при этом влияния на волновые функции измеряемых объектов. Согласно нашим детерминистическим теориям эти волновые функции оказываются рукотворными артефактами и, поэтому, не могут остаться не подвергшимися влиянию. Эти волновые функции вполне могут оказаться критическим образом зависящими от прошлых событий, как раз в духе предопределенности.

Очень похожая ситуация, как известно, существует в теориях локальной калибровки для элементарных частиц. Фиксируя калибровку с помощью некоторого калибровочного условия, можно генерировать полевые конфигурации, которые зависят предопределенным образом от прошлого или будущего, но это не влияет на физически наблюдаемые события, и как раз потому, что они являются калибровочно-независимыми. Точно так же зависимость волновой функции может оказаться предустановленной именно потому, что волновые функции как таковые являются ненаблюдаемыми.

Библиография

- [1] J. S. Bell, "On the Einstein-Rosen-Podolsky paradox," *Physica* 1 (1964) 195. Reprinted as chapter 2 of Ref. [2]; "Free variables and local causality," *Epistemological Letters* Feb. 1977. Reprinted as chapter 12 of Ref. [2].
- [2] J. S. Bell, *Speakable and unspeakable in quantum mechanics* (Cambridge Univ. Press, Cambridge, 1987).
- [3] A. Bassi and G.C. Ghirardi, "The Conway-Kochen argument and relativistic GRW models", [quant-ph/0610209](https://arxiv.org/abs/quant-ph/0610209), *J. Found. Phys.*, to be publ.
- [4] J. Conway and S. Kochen, [quant-ph/0604079](https://arxiv.org/abs/quant-ph/0604079).
- [5] R. Tumulka, "Comment on the 'Free Will Theorem'", *J. Found. Phys.*, to be publ.
- [6] J. Conway, in *New Scientist*, 6 may 2006, p. 8: "Free will - you only think you have it".
- [7] G. 't Hooft, "Quantum discrete theory by Hilbert Space Extension", *Nucl. Phys. B*342 (1990) 471.
- [8] B. Kaufman, *Phys. Rev.* 76 (1949) 1232; B. Kaufman and L. Onsager, *Phys. Rev.* 76 (1949) 1244.