

Мир Ровелли¹⁾

Бас ван Фраассен

Аннотация

Появление "Реляционной квантовой механики" Карло Ровелли²⁾ знаменует два события: оно даёт новое видение мира квантовой механики и предлагает программу построения теории из набора простых постулатов, относящихся к обработке информации. Здесь я предлагаю сосредоточиться на исследовании мира квантовой механики и на том, как Ровелли изображает это. Это увлекательный мир, отчасти потому, что Ровелли опирается на информационно-теоретический подход к основам квантовой механики, и отчасти потому, что принятие его представлений предполагает возникновение основополагающих расхождений в рамках самой философии квантовой механики.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

Карло Ровелли, Эйнштейн-Подольский-Розен, квантовая информация, реляционная квантовая механика

ABSTRACT

Carlo Rovelli's inspiring .Relational Quantum Mechanics. serves several aims at once: it provides a new vision of what the world of quantum mechanics is like, and it offers a program to derive the theory's formalism from a set of simple postulates pertaining to information processing. I propose here to concentrate entirely on the former, to explore the world of quantum mechanics as Rovelli depicts it. It is a fascinating world in part because of Rovelli's reliance on the information-theory approach to the foundations of quantum mechanics, and in part because its presentation involves taking sides on a fundamental divide within philosophy itself.

KEY WORDS:

Carlo Rovelli, Einstein-Podolski-Rosen, quantum information, Relational Quantum Mechanics

¹⁾ Я посвящаю эту статью Джеффри Бубу (Jeffrey Bub), чьё творчество вдохновляло меня добрую четверть века. (Rovelli's World * Bas C. van Fraassen forthcoming in *Foundations of Physics* 2009)

²⁾ Rovelli, Carlo: 1996, Relational Quantum Mechanics. *International Journal of Theoretical Physics*, 35: 1637-1678.

1. Место среди других интерпретаций квантовой механики

1.1. Описание мира Ровелли³⁾

В мире Ровелли нет состояний независимых от наблюдателя, нет независимых значений физических величин. Система характеризуется состоянием по отношению к некоторому наблюдателю и оно отличается от состояния относительно другого наблюдателя. Наблюдаемая величина может иметь одно значение относительно одного наблюдателя и другое значение относительно другого наблюдателя. Относительность значений наблюдаемых вытекает из относительности состояний в данном представлении. Мир Ровелли сохраняет однозначную связь "собственное состояние - собственное значение": наблюдаемая A имеет определённое значение x , если система, к которой она относится находится точно в собственном состоянии соответствующем наблюдаемой A . Однако это должно пониматься и как присвоение нечётких значений наблюдаемым, поскольку состояние системы по отношению к наблюдателям, как правило является смесью состояний в отличие от чистого собственного состояния. Наблюдатель здесь не имеет никакого общего контекста или какого-либо общего смысла: каждая система даёт свои собственные ссылки на состояния и значения, что и использует конкретный наблюдатель. Ситуация аналогична той, которая возникает в специальной теории относительности, где наблюдатели привязываются к конкретным движущимся пространственным системам отсчёта.

Здесь мы сразу должны определить — какие абсолюты, инварианты и особенности должны характеризовать системы наблюдения в плане безотносительности к чему-либо. Это имеет решающее значение для понимания квантового мира с точки зрения Ровелли. Следуя идее наблюдателей, которые измеряют и присваивают информацию о состояниях исследуемым объектам и приняв точку зрения Ровелли, необходимо сказать, что эти наблюдатели должны обладать подходящим наблюдательно-независимым описанием того, что происходит — с последующим присвоением характеристик состояния измеряемому объекту. Это должно включать в себя и информацию о возможных результатах будущих измерений, в частности, для алгебры наблюдаемых, вероятностях перехода и т. д. — параметров и характеристик используемых непосредственно в квантовой механике.

1.2. История интерпретации

Подход Ровелли можно отнести к весьма значимым результатам в ряде других интерпретаций квантовой механики, на что обратил внимание Дж. Уилер (Wheeler, John). В своих комментариях по этому поводу Уилер отметил что, когда Эверетт (Hugh Everett III) опубликовал в 1957 году свою знаменитую статью, он создал целостную картину единого квантового универсума. Однако при этом:

(1) концептуальная схема с "относительным состоянием" квантовой механики совершенно отличается от концептуальной схемы квантовой механики с условным "внешним наблюдением" и (2) выводы новой трактовки полностью соответствуют основным выводам обычного анализа. Остальная часть этого замечания только усиливает выводы о различии концепций (Wheeler, John: 1957, с. 463).

Уилер противопоставляет новую концепцию с более ранней концепцией "внешнего наблюдения" Эверетта, что описывает следующим образом:

Формулировка квантовой механики на основе идеи внешнего наблюдения имеет несомненное достоинство в том, что она двойственна и она явным образом связывает

³⁾ Rovelli, Carlo: 1996; я буду ссылаться на номера разделов, поскольку доступная версия в интернете претерпела изменения.

функцию состояния с исследуемой системой (например, частицей), но не с конечным результатом наблюдения. Однако сама наблюдаемая система может быть расширена как включением исходного объекта в качестве подсистемы, так и других средств наблюдения таких, например, как счётчик Гейгера. Тогда число переменных в функции состояния при этом должно соответственно увеличиться. Тем не менее конечные средства наблюдения остаются за пределами этой системы, а свойства самой системы трактуется своим волновым уравнением (1957, там же).

Ровелли чётко ставит себя в рамки старой концепции "внешнего наблюдения" вопреки той новой, которую хвалит Уилер. Это очень важный момент, который сближает Ровелли с Эвереттом. Кроме того, Ровелли серьёзно настаивает на тезисе, что любая и каждая система может играть роль "конечного устройства наблюдения":

Используя слово "наблюдатель", я не ссылаюсь на что-то сознательное, одушевлённое, вычисляемое или на другие специальные системы. Я использую термин "наблюдатель" в том смысле, в котором оно используется в относительности Галилея, когда говорится, что объект имеет скорость "относительно определённого наблюдателя". Наблюдателем может быть любой физический объект, находящийся в состоянии движения. Например, я говорю, что рука моя движется со скоростью v по отношению к лампе на столе. Скорость — это реляционная характеристика (как в галилеевой, так и в релятивистской физике) и, таким образом, явно или неявно соотносится к чему-либо; это замечание является традиционным для обозначения чего-то в качестве наблюдателя, но оно важно для последующих обсуждений и надо иметь в виду, что в качестве наблюдателя может выступать и настольная лампа (конец разд. I).

Таким образом, Ровелли настаивает на том, что все системы "должны быть по предположению эквивалентны без разделения на наблюдаемые и наблюдающие". Утверждая это, он не отказывается от понятий — независимые от наблюдателя состояния или независимые от наблюдателя значения физических величин. Вместо этого он подразумевает, как наводящее соображение, пример теории относительности, когда каждый физический объект может рассматриваться в качестве системы отсчёта, в которой определяются значения физических величин. Связанная с этим объективизация "внешнего наблюдателя" и представляет суть его информационную концепцию:

Кроме того, я использую понятие информации в смысле Шеннона (C.E. Shannon): информация — это мера числа состояний, в которых может находиться система или несколько систем, чьи состояния могут быть коррелированы. Таким образом, описание ручки на моём столе имеет в данном контексте информационное наполнение, поскольку характеризуется своими координатным положением и направлением. Здесь нет необходимости в присутствии человека, кошки или компьютера для использования такого понятия информации (там же).

Ровелли считает, что любая система в принципе содержит информацию о любых других системах вследствие воздействия предыдущих взаимодействий и приравнивает её возникновение в физическом смысле как результат корреляций, возникающих путём взаимодействий:

Любая физическая система может содержать информацию о другой физической системе. Например, если у нас имеются две 1/2-спиновые частицы, имеющие одинаковые значения спинов в одном и том же направлении, мы говорим, что одна спиновая характеристика имеет информацию о другой. Таким образом, в качестве наблюдающей системы может быть любая физическая система (с более, чем одним состоянием). Если есть понимание того, как система может выступать в роли наблюдателя, не отказываясь от основного постулата, что все системы эквивалентны, то тот же процесс "коллапса" вектора состояния, что происходит между электроном и ускорителем в ЦЕРН'е будет происходить и между электронами. Наблюдающие системы не являются "физически специальными системами" в любом случае.

Относиться к этому необходимо деликатно, поскольку обычное объяснение корреляций в терминах запутанных состояний задумано для объяснения наблюдательной независимости; при

этом используется стандартный квантово-механический формализм, которые понимается, однако, по-новому.

Старый подход "внешнего наблюдения" и поворот к взглядам Ровелли придаёт стимулирующее ощущение новизны тем, кто работает в фундаментальной физике.

1.3. Информационно-теоретический подход Грюнвальда

Особое внимание в своих построениях Ровелли уделяет роли информации. Здесь важно отметить его подход с точки зрения самой теории информации, что представляет совершенно новый момент в развитии концепции. Хотя ранее и предпринимались попытки затронуть эту тему и отмечены отдельные работы, однако в последнее время здесь наблюдается довольно радикальный поворот, а работа Ровелли может рассматриваться как участие в этом процессе. Проследим процесс возникновения самой повестки вопроса в начале и на радикальную смену её сути в более поздних работах таких авторов, как Фукс (Christopher Fuchs), Буб (Jeffrey Bub), и их последователей.

В 1950-х годах Грюнвальд (H. J. Groenewold) одним из первых высказал мнение о том, что квантовые состояния необходимо рассматривать как "хранилище" *суммарной* информации, полученной в результате всех измерений. Здесь следует отметить поразительное сходство в описаниях квантовомеханической ситуации Грюнвальдом и Ровелли.

Грюнвальд (1952, 1957) предложил формулировку теории, согласно которой весь эмпирический контент должен содержаться без ссылок на состояния в любом виде. Он иронично относился к идее, согласно которой квантовые состояния должны рассматриваться как модели состояний в классической механике. Подобная постановка вопроса проявляется довольно чётко вновь и в статье Ровелли, хотя и в более общем виде. Его идея заключается в том, что в описании квантовомеханической ситуации должно быть изображение воздействий ряда измерений на состояние системы, чередующихся с эволюционными изменениями между измерениями. По Грюнвальду единственной реальной проблемой, которую необходимо рассматривать, это:

Учитывая результаты предыдущих измерений, определять вероятности исходов очередных измерений.

Результаты должны формулироваться в терминах вероятностей переходов⁴⁾. Ниже, при изложении конкретной версии Ровелли, я постараюсь объяснить и проиллюстрировать как это происходит.

Грюнвальд сформулировал тезис о том, что состояния следует рассматривать как "субъективную" или "наблюдательно-относительную" сущность, определяемую доступной информацией.

Представим себе, что измерительное устройство записывает свои результаты⁵⁾. После окончания серии измерений физик O проверяет записанные результаты в некотором порядке и присваивает системе состояния для моментов измерений и получения результатов, используя проекционный постулат фон Неймана (это нормально для таких задач, с чем трудно не согласиться). Для начала O выбирает некоторое исходное состояние. Грюнвальд полагает, что в отсутствие информации ею может быть совершенно неинформативная смесь. Для момента времени t между t_1 и t_2 , когда известно начальное состояние $\rho(t_1)$, результат определяется так:

$$\rho(t) = U(t, t_2)K(t_2)\rho(t_1)K(t_2)U(t_2, t)$$

Здесь $K(t_2)$ – оператор, описывающий переход системы в новое состояние $\rho(t_2)$ после измерения в момент t_2 ; зависящие от t $\rho(t)$ – матрицы плотности приписываемых состояний в соответствующие моменты времени; U_S – обычные операторы эволюции, описывающие

⁴⁾ Грюнвальд не один придерживался такого мнения; см., например, Temple, G.: 1948,

⁵⁾ О том, насколько это физически реализуемо без возмущения см. Dicke, R. H.: 1989, дальнейшее обсуждение см. в моей работе (van Fraassen, Bas C.: 1991), стр. 257-258.

изменения состояний без измерений или других влияний. Более длинные серии измерений между начальным t_1 и конечным t моментами времени, разумеется, будет представлено большим числом групп операторов).

Но что произойдёт в случае, если O (или один из его коллег) выберет другой порядок проверки записанных результатов? Естественно ожидать, что для тех же моментов времени, с той же начальной информацией и предположениями о системе результат присвоения состояний могут оказаться совершенно другим.

Нет ничего противоречивого в самом воображаемом сценарии. Спорным является лишь утверждение Грюнвальда о том, что никакого другого назначения состояниям не может быть сделано. Состояния являются не более, чем "сборниками", содержащими известную или собранную в результате измерений информацию и, таким образом, определяемую конкретными действиями наблюдателя этого процесса. Он настаивает на том, что реально проверяемая часть теории содержится в вероятностях перехода. Когда они проверены, расчёт начинается с задания начального состояния, а согласованность требует только того, чтобы начальное назначение состояния вело к правильным предсказаниям — вероятности же переходов не зависят от состояний, они формулируются в терминах наблюдаемых⁶⁾.

Идея того, что состояния мыслятся как не играющие никакой другой роли, кроме как "сборников" — это сердцевина инновации в информационно-теоретическом подходе. К. Фукс представил эту программу в наиболее радикальной форме в своей работе "Квантовая механика как квантовая информация (только чуть больше)":

Я вижу это как линию атаки, с которой мы должны наступать с беспощадной последовательностью действий: квантовая система представляет собой нечто реальное и независимое от нас; квантовое же состояние представляет собой совокупность субъективных степеней убеждений о чём-то, что можно сделать с системой (даже, если только в связи с нашими экспериментальными "пинками"). Структура, называемая квантовой механикой, есть предмет взаимодействия двух вещей — субъективного и объективного (Fuchs, C. A.: 2004, p. 5).

Он утверждает, что "квантовое состояние является исключительно выражением субъективной информации — информации, которой располагает человек о квантовой системе". Она не имеет объективной реальности сама по себе. Когда его спросили, "информации о чём?" — он ответил: "это потенциал последствий наших экспериментальных вмешательств в природу" (там же, стр. 7). Фукс даёт чёткое предложение о том, как описать информационно-обновляемый процесс в ответ на измерение (см. дальше, Fuchs, C. A.: 1998,). Опираясь на свои результаты и результаты других авторов, он изображает Байесовский метод оценки апостериорных вероятностей как частный случай. А в более общем случае, по его мнению, мы должны подумать о том, как по сценарию Грюнвальда физик, который принимает по крайней мере "голый" минимум квантовой теории, отреагирует на записанные результаты измерения на базе предыдущих знаний о состоянии от эпистемологического агента. Там же присутствует, без явных ссылок на подробности, его соображения по поводу того, что физические операции могут быть однозначно представлены в терминах динамической алгебры наблюдаемых.

Фундаментальные представления координированности при рассмотрении физической ситуации становятся явными и в важных статье Robert'a Clifton'a, Jeffrey Bub'a и Hans'a Halvorson'a. Физическая система характеризуется ими посредством алгебры наблюдаемых C^* ⁷⁾.

⁶⁾ Эти вероятности часто представляются как вероятности переходов между состояниями в силу проекционного постулата. В 1991 мною было предварительно разъяснено: вероятность определяется проекцией одного вектора (результата первого измерения) на другой, представляющий второе состояние. Но это может быть сформулировано и в терминах двух наблюдаемых, которые являются проекциями на два состояния. Более доступное изложение теории в этой форме можно посмотреть у Temple 1948.

⁷⁾ Это достаточно общая математическая конструкция, которая позволяет сформулировать многие виды физической теорий, включая и классические, и квантовые.

Состояния там являются только обобщениями вероятностных функций, более точно — математическими ожиданиями функций, определёнными на алгебре наблюдаемых. До настоящего времени этот подход является наиболее реалистичным для описания фундаментальных процедур. То, что добавляется сейчас — касается квантовой теории. А что именно добавляется, так это ограничения на передачу информации между состояниями через информационные "депозитарии". Из выполнения этих ограничений и условий выводятся основные принципы квантовой теории. Как отражение этого результата Буб уточнил свой ответ на вопрос — "Почему квантовая?":

С помощью квантовой теории достигается лучшее понимание возможностей и ограничений при передаче информации в противовес механизмам частиц или волн (Bub, Jeffrey: 2004, стр. 42).

Под информацией в техническом смысле, как и Грюнвальд, он подразумевает её классическое представление через энтропию Шеннона и фон Неймана для квантовых состояний. В работе "Квантовая механика как квантовая информатика" Буб поясняет:

Квантовая механика открывает появление в природе новых источников информации и каналов связи (связанных с квантовыми состояниями), теории о свойствах этих источников и каналов коммуникаций. Разумеется, если угодно, можно говорить и в механистической манере о квантовом феномене... но такая трактовка, если она ограничена информационно-теоретическими принципами, не будет иметь избыточного эмпирического контента "сверх" квантовомеханического содержания. Поэтому механистическая трактовка квантовых явлений будет напоминать историю с эфиром для электромагнитного поля (Bub, Jeffrey: 2005, стр. 558).

Ответом Буба на вопрос "Информация о чём?" были слова: "О фазовых соотношениях", — что показывает его особый интерес к шифрованию и декодированию.

Следует отметить момент, который ещё не получил явного внимания, но считается весьма важным: предполагается, что измерения и их результаты представляются в терминах наблюдаемых, характеризующих систему. Это указывает на использование "абсолютных" характеристик системы, которые не представляют аспектов собранной информации, но относятся непосредственно к самой системе. То, что система может быть характеризуема таким образом предполагается при выполнении операций классификации при сборе информации о ней. Здесь для Грюнвальда (и для Ровелли, как мы увидим далее) и возникает граница между особенностями субъективного и объективного экспериментальной ситуации.

2. Существует ли взгляд из "ниоткуда"?

С первого взгляда трактовка состояний Ровелли не совсем совпадает с теми, которые отстаивают Грюнвальд, Фукс или Буб⁸⁾.

Ровелли вводит в рассмотрение состояния как наблюдаемые и измеряемые сущности, имеющие отношение к системе. Вот как он трактует наблюдения, мотивируя свою точку зрения подобно Грюнвальду:

В квантовой механике различные наблюдатели могут давать разные результаты для одних и тех же последовательностей событий.

То есть он отвергает идею наблюдательно-независимых состояний и отказывается от необходимости описания истинного и единственного описания как от иллюзии или даже ошибки.

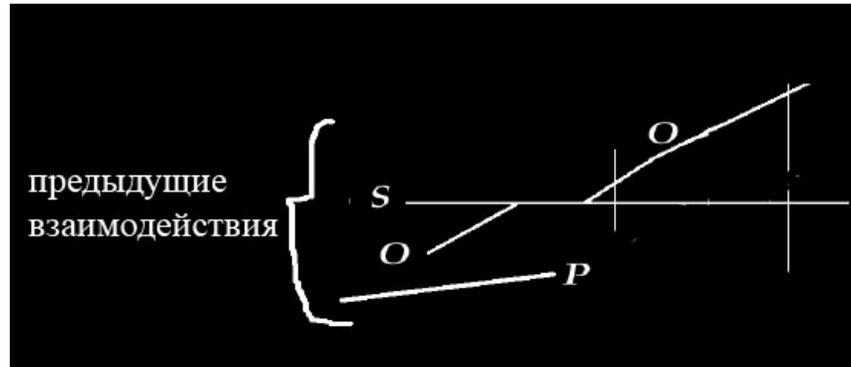
Приведём пример, который описывает Ровелли в интуитивных терминах. Я изложу это в несколько этапов.

⁸⁾ Статья Ровелли относится явно к более поздней литературе; ср. Fuchs, op. cit. p.3.

Пример 1. Ситуация с двумя наблюдателями

Для начала мы можем охарактеризовать ситуацию следующим образом.

Если O при измерении регистрирует для наблюдаемой A , например, значение 1, то состоянию S присваивается вектор $|A, 1\rangle$, а системе назначается чистое состояние $|A, 1\rangle$ относительно O .



Между тем, P может располагать информацией о том, что такие измерения уже имели место предположительно на основе предыдущих измерений, произведённых над $S + O$. Пусть наблюдатель P описывает начальное состояние O ⁹⁾ как $|\text{init}\rangle$, состояние S как $\alpha|A, 1\rangle + \beta|A, 0\rangle$, а состояние $S + O$ как совместное состояние. Поскольку состояние $S + O$ эволюционирует, мы можем написать:

$$(\alpha|A, 1\rangle + \beta|A, 0\rangle) \otimes |\text{init}\rangle \rightarrow (\alpha|A, 1\rangle \otimes |B, 1\rangle) + (\beta|A, 0\rangle \otimes |B, 0\rangle).$$

Здесь $|B, 1\rangle$ и $|B, 0\rangle$ являются так называемыми указателями чтения состояний O , а P использует их для установления фактов того, когда наблюдатель O регистрировал определённые значения 1 или 0 для A в качестве результатов измерения. По существу это есть "измерение" взаимодействия между O и S , определяющее корреляции между A и O для P , относящиеся к S .

Если теперь P задумается о том, какое состояние присвоить S , не производя измерений, он определит это с помощью "редукции пространства состояний" и присвоит S смешанное состояние, а именно смесь $|A, 1\rangle$ и $|A, 0\rangle$ в пропорциях α^2 и β^2 . Здесь мы видим, что O и P назначают различные состояния для S . Иными словами, S имеет разные состояния относительно O и относительно P . Именно на этом и настаивает Ровелли.

Ровелли также настаивает на использовании традиционной ссылки "собственное значение-собственный вектор" так что, если A принимает определённое значение 0 или 1 при измерении, то именно относительно O , но не относительно P , поскольку наблюдаемые величины принимают значения только при измерениях и поэтому в данной ситуации не могут принимать одно и то же значение, то есть относительно разных наблюдателей.

Является ли *это* описание ситуации наблюдательно-независимым, поскольку не факт, что его можно отнести и к любому третьему наблюдателю? Не должны ли мы сказать, что приведённые соображения не до конца обоснованы? Ведь здесь они приведены, хотя и для произвольного, но относительно только одного наблюдателя.

⁹⁾ Намёк. Здесь имеется ввиду состояние наблюдателя O , как системы способной к взаимодействию с S . *Прим. редактора*

2.1. Общие соображения против третьего наблюдателя

Однако здесь нет никакой непоследовательности, поскольку смысл ответа состоит в том, что мы должны чётко понять, *что* предлагает Ровелли, когда излагает свои мысли в применении к ситуации с третьим наблюдателем. Предыдущий же пример может быть оформлен таким образом, чтобы включить в рассмотрение и третьего наблюдателя.

Назовём третьего наблюдателя — ROV . Можно представить, что ROV на основании предыдущих измерений уже имеет сведения, которые могли быть получены путём обобщения информации о начальных состояниях O, S, P и их комбинаций по отношению к ROV с учётом последующей унитарной эволюции. Как это происходит — мы увидим позже при рассмотрении измерений наблюдателем P и того, что он может сделать над O и S . Но прямо сейчас мы можем отметить, что информацию от ROV не следует путать с той, о которой говорил Ровелли в этой ситуации. Расхождение, которое читатель мог бы почувствовать, можно пояснить таким образом:

Ровелли, казалось бы, претендует на попытку дать описание фрагмента мира таким образом, чтобы, с одной стороны, быть *на одном уровне* с описанием относительно заданного ROV , но, с другой стороны, быть на уровне по отношению к "ниоткуда"!

Однако Ровелли, предлагая свои примеры, говорит нам только об *общей форме*, то есть о том, что описания наблюдателей и их информацию можно получать, учитывая определенные измерения, которые имели место. Разрешение этого чувствительного расхождения состоит в следующем: Ровелли не даёт никакого специфического описания мира — он предлагает *форму описания, посредством которого должны присваиваться состояния системам*. Ровелли описывает не мир, а в общем виде информацию, содержащуюся в одной системе о другой, а именно о том, какое состояние можно присвоить системе на основе доступной информации. При этом:

- нет никакой возможно скрытой и специфической информации о том, что есть что-то независимое от любой точки зрения, но
- могут быть знания о форме такой информации относительно конкретной точки зрения, что и должно быть учтено.

Здесь мы имеем *трансцендентную* точку зрения, а Ровелли предлагает свои соображения об общей форме, об условиях и возможностях реализации описания согласно этой форме.

Мы должны серьёзно отнестись и к его видению того что, что квантовая механика — это теория не о физических состояниях, а об информации. Принципы, которые он видит в основе квантовой механики, являются принципами, содержащими общую форму описания, которая может быть принята, но не приравнена к классическим законам эволюции физического состояния.

2.2. Описание мира наблюдателем

В общем виде форма описания требует того, чтобы конкретная информация одной системы о другой получалась только в результате измерений: *единственным средством, с помощью которого один наблюдатель может быть информирован о произошедшем другим наблюдателем, является результат физического измерения, а сам обмен информацией при этом должен представляться физическим процессом* (см. конец раздела III).

Перед тем как получить более обстоятельное представление об этом, кратко опишем — как это происходит согласно Ровелли.

Вопрос о системе задаётся тогда, когда имеет место соответствующее физическое взаимодействие. Результатом взаимодействия является *измерение*, поставляющее значение некоторой наблюдаемой величине и, кроме того — *подготовкой* к последующим действиям, так что полученное значение принимает предикативный контент. Поскольку вероятности будущих измерений будут определяться полученными результатами, измеряемая система переходит в новое состояние относительно произведённого измерения. Таким образом, Ровелли принимает (в явном

непринятии модальной интерпретации Боба) *связь "собственное состояние - собственное значение"* по фон Нейману:

системы, к которым относятся наблюдаемые значения (в данный момент) находятся в собственных состояниях, соответствующих собственным значениям.

Однако есть момент, который иногда меняет смысл сказанного. Ссылка "собственное состояние — собственное значение" относится не к физическому состоянию системы, а к состоянию системы относительно наблюдателя (измерительному прибору). Поэтому "коллапс" волнового вектора — эта информация относительно наблюдателя. *Состояние же системе назначается, исходя из суммарной информации.*

Как упоминалось ранее, значения наблюдаемых следуют из ссылок "собственный вектор — собственное значение" и относительности состояний. А получает своё значение наблюдаемая в определённый момент, что также является наблюдательно-зависимым моментом (ср. конец раздела 2 в Laudisa and Rovelli 2005).

Назначение чистых состояний происходит достаточно редко, поскольку эта информация может быть получена фактически только при исполнении физического измерения состояния. Получить же максимальную информацию о системе даже в отношении целевых наблюдаемых также нелегко. Однако в общем случае значение наблюдаемой относительно одного наблюдателя не будет слишком выделяться на фоне значений, получаемых другими наблюдателями.

Получаемая информация является предметом соблюдения двух "абсолютов". Введём их таким образом, чтобы чётко понять — что не зависит от наблюдателя.

Во-первых, *каждая физическая система S характеризуется в первую очередь рядом вопросов Q_i , на которые можно получить ответы: $W(S) = \{Q_i: i \in I\}$.* Связь $W(S)$ с S безотносительна к любому наблюдателю, и мы можем назвать это *первым "абсолютом"*. Хотя представления и могут отличаться, набор вопросов, относящихся к S будет являться по сути спецификацией семейства наблюдаемых, относящихся к S (в конце концов, алгебра наблюдаемых реконструируется из этого семейства вопросов, для наших же целей и не требуется различение самих представлений). Если ряды вопросов одни и те же для двух систем, мы можем назвать эти системы однотипными.

Во-вторых, наблюдатель, который уже был во взаимодействии измерений с системой, имеет запись вопросов, которые были заданы, и последовательность ответов, полученных таким образом. Однако *этот наблюдатель не находится в связи с другим наблюдателем*¹⁰⁾. Это наш *второй "абсолют"*.

(!) Необходимо соблюдать внимательность, чтобы не отождествить факты от наблюдателя с квантовомеханическим состоянием. Мы можем попытаться описать состояние, которое якобы является состоянием, идентифицированным O , *если и только если*, оно уже получило определенную последовательность из 0 и 1, зарегистрированных в серии измерений при взаимодействиях O с S относительно другого наблюдателя P , который тоже получил, в свою очередь, эту же информацию при более позднем измерении на S . Позже мы увидим, когда и в какой степени может возникнуть несоответствие и возможность его осмысленного разрешения.

¹⁰⁾ принимая, что это не относительность, мы имеем в последовательности "нулей" и "единиц" некоторую аналогию с эйнштейновским локальным совпадением 'bed rock' представления. Критика Карлом Ровелли толкования "последовательной истории", по его мнению, не допускает никакой двусмысленности в этом отношении.

3. Состояние как "наблюдатель" за информацией

3.1. Постулаты, регламентирующие сбор информации

ПОСТУЛАТ1 (ограниченность). *Существует максимальный объем актуальной информации, которая может быть извлечена из системы.*

Ответы на вопросы имеют прогностическое значение, но, как правило, более ранние ответы становятся *неактуальными* и *избыточными* для предсказаний после получения более поздних ответов. Но именно это вполне ожидаемо и именно *так должно быть*.

Под "неактуальными" и "избыточными" ответами подразумевается следующее: если текущее состояние должно быть определено на основе извлечённой информации, то более ранние ответы должны быть отброшены поскольку они формировались на основе уже неактуальной информации. При этом:

1. Для системы S существует определенная вероятность того, что, если возникнет вопрос Q то на него будет получен ответ "Да";
2. Эта вероятность $W(S)$ может отличаться для другой системы S ;
3. Более того, эта вероятность зависит от ответов на предыдущие вопросы.

Последнее (3) означает, что вероятности в вопросах являются вероятностями переходов (условные вероятности). На этом моменте мы остановимся далее после рассмотрения второго постулата. Следует обратить внимание на то, что вероятности переходов будут представляться одинаково, независимо от того, какой наблюдатель O ставит вопросы о системе S . Здесь мы имеем *третий "абсолют"*.

И *четвёртый абсолют*: вероятности будущих результатов измерений изменяются *одинаково для всех систем одного типа* в ходе постановки ряда вопросов $c = \langle Q1, Q2, Q3, \dots \rangle$ и получении ответов $s_c = [n_1, n_2, n_3, \dots]_c$, элементы которых могут становятся неактуальными после определённого момента. Учитывая это, можно сказать:

максимально неизбыточная последовательность "вопрос-ответ" – та, в которой ни один элемент не может быть актуальным навсегда, и которая вновь актуализируется при очередном добавлении элемента "вопрос-ответ" ¹¹⁾.

Постулат 1 утверждает, что эта последовательность конечна. В конкретном случае, мы можем задаться вопросом о соответствующем конечном числе: сколько вопросов необходимо задать для извлечения максимальной информации, ведущей к присвоению системе S статуса состояния по отношению к данному наблюдателю? Это число *не зависит от последовательности* вопросов, которые мы выбираем. Здесь Ровелли пишет сразу непосредственно после постулата 1:

Можно сказать, что любая система S имеет максимальную "информационную емкость" N , где N – количество информации, выраженное в битах. N бит информации исчерпывают все, что можно сказать об системе S . В терминах традиционных понятий, мы можем рассматривать N как наименьшее целое число такое, что $N \geq \log_2 k$, где k – размерность гильбертова пространства системы S . Напомним, что результаты измерения полного набора коммутирующих 2-наблюдаемых, характеризуют состояние системы ¹²⁾, и описываются в $k = 2^N$ -мерном гильбертовом пространстве, что позволяет выделить один

¹¹⁾ Ровелли вводит и использует термин "полное информационное семейство S_Q " для "максимально неизбыточной последовательности "вопрос-ответ"".

¹²⁾ Намёк. Пусть система описывается с помощью n коммутируемых наблюдаемых. Общее число возможных ответов при опросе системы по каждой наблюдаемой в режиме – "было ли над наблюдаемой произведено измерение или не было?", составит величину $k = 2^n$, что совпадает с размерностью пространства, полученного тензорным произведением 2-векторов. Логарифм числа возможных ответов по основанию 2 совпадает с минимальной информационной энтропией по Шеннону $E = \log_2 k$, выраженной в битах. *Прим. редактора*

результат из 2^N альтернатив (число ортогональных базисных векторов). Это означает возможность получения N -бит информации о системе.

Таким образом, число вопросов, специфицирующих систему, зависит от размерности пространства состояний: если эта размерность – конечное число k , тогда N есть $\log_2 k$ или выше; размерность k есть 2^N или $(2^N) - 1$.

Мы получили связь с теорией информации: недостающая информация типа $W(S)$ может быть извлечена с помощью более, чем N "Да-Нет" ответов. *А максимальная информационная емкость системы этого типа составляет N бит*¹³⁾.

ПОСТУЛАТ 2 (неограниченность). *Всегда есть возможность получать новые сведения о системе.*

Этот постулат не противоречит первому постулату, учитывая, что новая информация может превратить более раннюю информацию в "неактуальную", подлежащую удалению, однако расходится с классическим способом уточнения состояния системы с помощью очередного измерения параметров, не затрагивающим при этом её состояния.

Это обстоятельство влечет за собой определенную степень индетерминизма: максимально возможная информация может не принимать точечных значений, которые можно было бы получить в классическом случае и обусловлено тем, что наблюдаемые величины могут быть (полностью) *несовместимы* – просто не иметь совместных собственных состояний:

при ответе "Да" на вопрос Q всегда существует много вопросов Q' , ответы на которые *не могут* следовать с достоверностью "Да" или "Нет".

Следует обратить внимание на модальный характер этого утверждения. В противоположность этому некоторые вопросы Q и Q' *совместимы*: в данном случае после получения ответа "Да" на вопрос Q , наблюдатель имеет ненулевые вероятности для возможных ответов на Q' и, если он затем задаст вопрос Q' , то на базе этих двух ответов он может сделать более точный прогноз.

Новое предположение: отмеченный индетерминизм – это не хаотическая случайность, поскольку может быть охарактеризована в терминах определенных вероятностей.

Предположим теперь, что первый измерительный аппарат для наблюдаемой A формулирует запрос на "завершение" измерения, что производит запись, обеспечивающую *максимально избыточную вопрос-ответ последовательность*. Перед этим запросом был получен ответ об отсутствии нетривиальной информации. Далее, предположим, что второй измерительный аппарат для наблюдаемой B в ситуации, характеризуемой такой же *полнотой*, предпринимает аналогичные действия. При этом семейства вопросов очень разные. Ровелли вводит переходную вероятность $p(B|A)$ такую, что ответ "Да" для B будет следовать ответу "Да" для A , которая характеризуется свойствами идемпотентности и симметрии.

Интуитивные мнемоники. Представим себе сценарий, в котором единственный источник посылает в ряд измерительных устройств многих однотипных систем вопросы для двузначных наблюдаемых A, B, \dots установленных наблюдателем. "Поток" уменьшается за счёт некоторого фактора q при первом измерении, затем за счёт переходной вероятности p ; предположим, что мы снова работаем с наблюдаемой A , тогда "поток" снова уменьшится фактором p . В этом случае для переходов $qM \rightarrow pqM \rightarrow prqM$ операторами A, AB, ABA мы могли бы записать

$$ABA = pA.$$

¹³⁾ Сравните: "В частности, я определяю элемент квантовой механики, что бы не вводить субъективный термин в теорию. Им является целочисленный параметр D традиционно приписываемый квантовой системы через размерность гильбертова пространстве." Chris Fuchs, 2004, Abstract.

Это выражение представляет собой то, во что последовательность 1-мерных проекций превратила бы вектор, и мнемонически представляет собой способ определения переходной вероятности. Численное выражение при вычислениях приобретает величину \cos^2 угла между двумя 1-собственными векторами, на которые они проецируются, или квадрат модуля скалярного произведения в гильбертовом пространстве, что эквивалентно следу произведения двух проекторов.

После получения *максимально неизбыточной последовательности "вопрос-ответ"* при выполнении серии измерений, очередным вопросом может задаться, например, следующий: "находится ли система в подпространстве J более высокой размерности?" И здесь есть своя вероятность, которая может быть получена в соответствии с алгоритмом, связанным с применением проекционного постулата фон Неймана.

3.2. Состояние как информации относительно наблюдателя

Пусть наблюдатель O , находясь в области дающей возможность для атрибуции системы S вектором $|A, x\rangle$, где x представляет собой собственное значение A , реализовав свою серию вопросов и ответов, назначил состояние системе.

Представим теперь вновь и второго наблюдателя P , который располагает информацией, полученной ранее посредством физического процесса передачи достаточной для атрибуции начального состояния $S + O$, а гамильтониан их взаимодействия позволяет проследить эволюцию состояния. Тогда, как было описано выше, P может использовать "дистанционное" описание $S + O$:

$$\text{начальное состояние} \quad \sum_i \beta_i (|A, a_i\rangle \otimes |\text{init}\rangle), \quad (1)$$

$$\text{эволюция в конечное состояние} \quad \sum_i \beta_i (|A, a_i\rangle \otimes |B, a_i\rangle), \quad (2)$$

где B — указатель чтения состояний O со значениями, записанными последовательностью 0 и 1. В этом случае наблюдатель P может так атрибутировать состояние S :

$$\text{смесь состояний } |A, a_i\rangle \text{ с весами } \beta_i^2,$$

что показывает его явное отличие от состояний $|A, 1\rangle$ или $|A, 0\rangle$.

Согласно Ровелли, это все, что должно быть сказано на этот момент: S имеет одно состояние относительно O и другое состояние относительно P , а фраза " S имеет состояние $|A, 1\rangle$ относительно O " означает только то, что информация, полученная O , может быть выражена вектором $|A, 1\rangle$.

Но является ли факт того, что O имеет информацию свидетельством зависимости или независимости этого утверждения от наблюдателя? Мы должны ответить этот вопрос в свете двух предложений Ровелли. Он настаивает на следующем:

- (i) нет другого смысла в состоянии системы, кроме самой информации для наблюдателя;
- (ii) не существует возможности наблюдателю P получить информацию о системе O без физического взаимодействия с ней и поэтому без *разрыва* описания (на период взаимодействия) унитарной эволюции O .

В этом контексте "информация" имеет минимальный смысл: слова о том, что O имеет информацию об S означает только то, что существует определённая корреляция в состоянии $S + O$. Тогда максимум, что P может сделать, так это только предсказать статус состояния системы с определённой вероятностью и, если будет сделано измерение, то подтвердить это. Следует обратить внимание, на то, что его способность предсказывать с определённой вероятностью и составляет суть информации, которой он обладает.

Более формально это можно представить так. Рассмотрим оператор M на гильбертовом пространстве системы $S + O$, физическая интерпретация которого позволит получить ответ на вопрос с помощью специально введённого указателя: *правильно ли указатель устанавливает*

соответствие с A ?

Пусть M имеет в 2-подпространстве собственные значения 1 ("Да") и 0 ("Нет"). Из пары 2-векторов $|A, i\rangle, |B, k\rangle$ можно построить следующие комбинации:

$$\begin{aligned} M(|A, 1\rangle \otimes |B, 1\rangle), \\ M(|A, 1\rangle \otimes |B, 0\rangle), \\ M(|A, 0\rangle \otimes |B, 0\rangle), \\ M(|A, 0\rangle \otimes |B, 1\rangle) \end{aligned}$$

Если эти комбинации удовлетворяют соотношениям:

$$\begin{aligned} M(|A, 1\rangle \otimes |B, 1\rangle) &= |A, 1\rangle \otimes |B, 1\rangle, \\ M(|A, 1\rangle \otimes |B, 0\rangle) &= 0, \\ M(|A, 0\rangle \otimes |B, 0\rangle) &= |A, 0\rangle \otimes |B, 0\rangle, \\ M(|A, 0\rangle \otimes |B, 1\rangle) &= 0 \end{aligned} \tag{3}$$

возникает возможность следующей интерпретации результатов измерения M наблюдателем P .

Если при измерении M наблюдателем P получено значение 1, значит реализовались свойства первой или третьей строки. Это означает, что измеренные O значения наблюдаемой A системы S – либо 1, либо 0, что подтверждается указателем чтения M для P . Таким образом, если в момент времени t_2 система $S + O$ находится в собственном состоянии M с собственным значением 1, то P может точно сказать, что O "знает" значение A . Имеет смысл сказать, что согласно описанию P , события E , заключающиеся в том, что O "знает" величину A системы S или что O "уже измерил" значение A для системы S , а указатель M подтверждает информацию об этом (см. в середине раздела II-D).

Однако P , имея возможность выбора, может измерить и другую наблюдаемую, скажем K , чтобы попытаться выяснить – какой результат получил O :

$$\begin{aligned} K(|A, 1\rangle \otimes |B, 1\rangle) &= |A, 1\rangle \otimes |B, 1\rangle \\ K(|A, 1\rangle \otimes |B, 0\rangle) &= 0 \\ K(|A, 0\rangle \otimes |B, 0\rangle) &= 0 \\ K(|A, 0\rangle \otimes |B, 1\rangle) &= |A, 0\rangle \otimes |B, 1\rangle \end{aligned}$$

Первая и последняя строки говорят о том, что измеренные значения для A могут быть представлены 1 и 0. Они же свидетельствуют том, что эти полученные значения подтверждаются указателем чтения K

Интуиция подсказывает, что P мог бы произвести дополнительное измерение, чтобы узнать, что же нашёл O . Он мог бы получить либо результат 1, либо результат 0 и сказать " O нашёл 1" или " O нашёл 0", соответственно. Но можем ли мы понимать это буквально, как ссылку на то, что O имел информацию прежде, чем P сделал это измерение? Если P находит результат 1, означает ли это, что O нашёл 1 и что O присвоил состояние $|A, 1\rangle$ системе S ?

Согласно идее Ровелли, *в этом нет никакого смысла*. Интерпретация квантового измерения как раскрытия значения, является несостоятельной.

Мы теперь в состоянии рассмотреть некоторые практические задачи в форме вопросов-эпизодов, которые обычно встречаются при первом знакомстве с реляционной интерпретацией.

4. Рассмотренные и разрешённые вопросы

Все эпизоды будут относиться к следующей общей ситуации.

Наблюдатель O завершил измерение на S двузначной наблюдаемой A ; он имеет записи, относящиеся к заданному вопросу (назовем его " ? A " - завершением вопроса) и полученного ответа, скажем 1. В силу этого S получает статус состояния $|A, 1\rangle$ относительно O . Указатель чтения наблюдаемой на O есть B , который, согласно предыстории и существованию текущей записи, имеет значение 1.

Для Ровелли этот факт не имеет большого смысла в плане наблюдательной независимости. А чтобы отметить независимое значение указателя наблюдаемой, мы должны посмотреть на O с точки зрения второго наблюдателя P .

Между тем, P , произведя заранее измерения на $O + S$, по концу измерения, сопровождавшегося взаимодействием, имеет в распоряжении свою информацию. Основываясь на своих более ранних результатах и предсказаниях, он атрибутирует состояние $O + S$ в конце взаимодействия смешанным состоянием, а именно вектором

$$(\beta_0|B, 0\rangle \otimes |A, 0\rangle) + (\beta_1|B, 1\rangle \otimes |A, 1\rangle)$$

относительно P .

ВОПРОС 1. Могут ли O и P противоречить друг другу?

Предположим, что P после этого и при заданных условиях намерен произвести измерение на $O + S$, затем сообщить о результате наблюдателю O . При этом O делает свой прогноз о том, что же должен получить P . Возможно ли такое, что предсказания O опровергнут результаты со стороны P ?

Пример 1.

Наблюдатель P , намереваясь измерить $(I \otimes A)$ на $O + S$, предсказывает, что получит значение 1 с вероятностью < 1 , и значение 0 с некоторой вероятностью > 0 . Предположим, что он получил значение 0.

При этом O знает, что он уже видел значение 1 и есть запись об этом. Поэтому он присваивает себе состояние $|B, 1\rangle$, а состоянию S вектор $|A, 1\rangle$. Тогда состояние $O + S$ должно представиться вектором $|B, 1\rangle \otimes |A, 1\rangle$. Таким образом, O предсказывает с полной определённой, что результатом измерения P будет 1. И поэтому O делает ложный предсказание, которое искажает вывод, найденный P .

ОТВЕТ: аргументация, приведённая в Примере 1, сомнительна по нескольким причинам.

Для начала можно отметить необоснованность предположения во втором абзаце Примера о том, что O имеет здесь состояние относительно самого себя. Нет никакого самоизмерения в этом сценарии. Относительные состояния назначаются только на основе результатов реально проделанных измерений. Поскольку процесс незакончен, O не имеет здесь никакого состояния по отношению к себе, так же как и для $O + S$ статус состояния по отношению к O остаётся неопределённым

Мы можем оставить в стороне вопрос о том, возможно ли добавить к реляционной квантовой механике возможность самоизмерения, поскольку есть гораздо более важный момент, который необходимо отметить ¹⁴⁾.

Этот момент заключается в следующем. Нельзя предполагать, что наблюдатель P когда-нибудь сможет получить значение 0 в случае, если наблюдатель O уже получил значение 1. Следствием этого предположения является то, что, если бы это было так, вероятности

¹⁴⁾ Мое предложение заключается в том, что это не должно быть добавлено как возможность и, как мне кажется, у Ровелли также нет толкования, как это сделать. Противоположное мнение ранее высказал и "друг Вигнера", предоставив пример с использованием теоретико-информационного подхода (в частности, у Джеффри Буба в недавней работе; см. Nagar and Nemmo 2006).

наблюдателя P оказались бы неверными согласно квантовой механике, то есть такой сценарий противоречит самой квантовой механике. Но этот момент исчезает, как только мы принимаем во внимание тот факт, что для P эта ситуация описывается с помощью вероятностей. Это есть то, при учёте чего P должен делать свои выводы без сведений о том, что нашёл O . Вероятности же эти могут быть проверены как частоты при многократных повторениях наблюдателем P ситуации, в соответствии с той информацией, которую он использовал. Вероятности значений 1 или 0 для P предназначены для установления только *типа ситуации*, когда сама ситуация не определена и служат для получения определённости по поводу фона происходящих измерений A наблюдателем O в системе S — то есть, что O находится в процессе. Таким образом, вероятности наблюдателя P служат для установления типа ситуации, когда сама ситуация не определена в терминах. Однако мы можем быть уверены в том, что если квантовая механика верна и P входит во множество таких ситуаций, то он найдет значения 1 и 0 с правильными частотами.

В дополнение мы можем отметить (мы к этому еще вернемся), что при немедленной попытке повторить измерения наблюдателями O и P результаты будут таким же и будет получен положительный результат.

ВОПРОС 2. А что насчет "немедленного повторения" измерения?

Как подчеркивал фон Нейман, сразу после того как наблюдателем O найдено собственное значение при измерении A над S , он с достоверностью будет прогнозировать то же самое значение при очередном измерении. Однако применимо ли это утверждение к результатам измерения наблюдателем P ?

ОТВЕТ: Нет. В рассуждениях Ровелли коллапс волнового пакета проявляется только относительно данного наблюдателя. Так что ответом от фон Неймана будет следующее: O предскажет с той же определенностью, если *он сам* или наблюдатель с точно такой же историей взаимодействия с системой типа $W(S)$ проделает немедленно новое измерение A над S , то же самое значение появится снова.

Как подчёркивает Ровелли, O может получить результат наблюдателя P только в результате соответствующего взаимодействия посредством измерения O над P . Наблюдатель O мог бы задать вопрос: *что увидел P , когда он произвёл измерения A над S после моего измерения?* - в том смысле, что O может измерить указатель чтения наблюдателя P и получить какое-то значение. В реляционной концепции мы не можем предполагать, что в результате O получит то же значение, которое наблюдаемая имела до измерения.

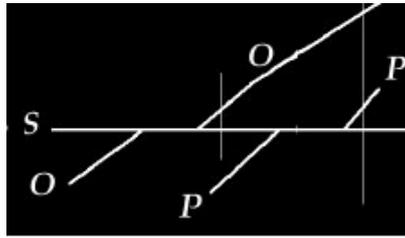
Вообще говоря, это означает, что O и P теряют возможность установления факта того, кто раньше из них увидел, подтверждением тем, что было "на их глазах"? И это вызывает недоумение. Чтобы ответить должным образом на этот вопрос, необходимо рассмотреть ситуацию с большей точностью и тщательностью.

ВОПРОС 3. Может ли наблюдатель выяснить что наблюдалось ранее?

Чтобы увидеть, как можно запутаться при разрешении этого вопроса, я рассмотрю сначала возможность ответа в "старом" стиле, предполагая состояния наблюдательно независимыми. Затем вопрос будет рассмотрен снова с той точки зрения, которую предлагает концепция Ровелли.

Пусть измеряемая система S стартует из суперпозиции $\sum \beta_i |A, i\rangle$ собственных состояний наблюдаемой A , соответствующих различным собственным значениям. Наблюдаемая A

измеряется дважды, используя измеряющие системы O и P ¹⁵⁾. Для простоты я буду полагать A независимой от времени (мы могли бы включить в рассмотрение оператор эволюции, как это сделано у Грюнвальда и Ровелли, но это не окажет сильного влияния на нашу аргументацию). Пусть, кроме того, для обоих наблюдателей O и P будет один указатель чтения – B .



Согласно идеализированной схеме процедуры измерения по фон Нейману, составная система $S + O$ по окончании первого измерения окажется в динамическом состоянии $\sum \beta_i (|A, i\rangle \otimes |B, i\rangle)$. По окончании второго измерения система $S + O + P$ (игнорируя фазовые факторы) окажется в состоянии $\sum \beta_i (|A, i\rangle \otimes |B, i\rangle \otimes |B, i\rangle)$.

Редукцией полного состояния можно получить состояния частей системы. Обозначим через $P[|A, i\rangle]$ проекцию вектора на луч, содержащий $|A, i\rangle$. В конце первого измерения системы S и O , рассматриваемые отдельно, будут находиться в динамических состояниях $[\sum |\beta_i|^2 P[|A, i\rangle]$ и $[\sum |\beta_i|^2 P[|B, i\rangle]$, соответственно. Окончательным динамическим состоянием для $O + P$ будет $\sum |\beta_i|^2 P[|B, i\rangle \otimes |B, i\rangle]$. Следуя фон Нейману и *предполагая коллапс* векторов при измерении, мы рассуждаем следующим образом.

Как и для отдельных состояний, в силу взаимодействия S и O , по результатам измерения S переходит в некоторое состояние $|A, k\rangle$, а O в $|B, k\rangle$, соответственно. Таким образом, при выполнении первого измерения указатель чтения наблюдаемой B для O примет значение k , а наблюдатель сообщит, что его указатель прочитал k . Аналогичным образом, второе измерение на S заканчивается в некотором состоянии $|A, m\rangle$, для P – в $|B, m\rangle$; наблюдатель P прочтёт указатель со значением m . **И, разумеется, $m = k$.**

Предположим, что мы хотим проверить, так ли это? Для этого мы можем произвести **третье** измерение, чтобы убедиться в "согласии наблюдений". Эту ситуацию Ровелли описывается следующим образом.

Введём наблюдаемую M для составной системы $O + P$, которая имеет собственное значение 1 на пространстве, натянутом на векторах $|B, i\rangle \otimes |B, i\rangle$, и собственное значение 0 для всех $|B, i\rangle \otimes |B, j\rangle$, для которых $j \neq i$. Тогда, если O и P находятся в чистых динамических состояниях $|B, i\rangle$ и $|B, j\rangle$, соответственно, (игнорируя фазовые факторы), а значением M будет 1 только в случае, если $i = j$. В обычной интерпретации это означает, что единственным случаем, в котором наш указатель чтения может иметь определённые значения, а M значение 1 тогда, когда их значения будут находиться в согласии друг с другом. В контексте этого толкования резонно говорить об M как о наблюдаемой, которая регистрирует согласие между двумя указателями чтения. В контексте же интерпретации Ровелли можно продолжить говорить об M и как об индикаторе согласия наблюдаемых. В качестве вывода должен быть ответ на вопрос: может ли M принимать значение 1, если показания указателей чтения не согласуются?

Следующий пример предоставляет такую иллюстрацию. Конечное динамическое состояние $O + P$ есть $\sum |\beta_i|^2 P[|B, i\rangle \otimes |B, i\rangle]$. Поскольку все слагаемые смеси являются собственными состояниями с собственным значением 1, то состояние является самим собой.

¹⁵⁾ Предполагаем, что P и O свободно эволюционируют после измерения их взаимодействия, что нет взаимодействия между O и P . Как A , так и указатель чтения B для O коммутируют с гамильтонианами S и O , соответственно.

Таким образом, M принимает значение 1 над системой $O + P$. Однако, чтобы сделать такой вывод однозначным, нам необходимо убедиться в том, что смеси состояния будет назначено состояние системы $O + P$. Нам не нужна какая-либо информация о том, что состояния O и P разделены и индивидуализированы, поскольку эта информация логически не противоречит не менее обоснованному выводу о том, что O и P находятся в смеси различных состояний $\{|B, i\rangle\}$. Поэтому факт того, что M принимает значение 1 не может сам по себе гарантировать однозначного вывода о том, что указатель чтения наблюдателя P будет равен указателю чтения наблюдателя O . Но если мы примем точку зрения фон Неймана, а не интерпретацию Ровелли, у нас появится необходимость вывода о том, что O и P как системы, коллапсируют в различные указатели состояний.

ОТВЕТ: Мы ещё раз обрисовали возможность появления загадочного следствия интерпретации Ровелли, представляя ситуации в "старых" терминах. Затем окинули взглядом возникшую ситуацию для того, чтобы понять — к чему ведёт его точка зрения. Но чтобы действительно понять — есть ли здесь вопрос, мы должны пересказать логику Ровелли с самого начала. **Этот пересказ** мы можем выставить как более сложный пример рассуждений Ровелли.

Пример 2. Включение третьего наблюдателя ROV

Опишем ситуацию с точки зрения третьего наблюдателя ROV . Пусть он произвёл измерения над S, O и P . На основе этого он может сказать, что начальное состояние системы S есть суперпозиция $\sum \beta_i |A, i\rangle$ собственных состояний наблюдаемой A , соответствующих различным собственным значениям. Наблюдаемая A будет измерена дважды двумя наблюдателями как измерительными системами O и P ¹⁶⁾. Указатель наблюдаемой для обоих O и P есть B с собственными векторами $\{|B, i\rangle\}$.

Далее, исходя из этого, простым вычислением временной эволюции можно найти, что составная система $S + O$ будет находиться в динамическом состоянии $\sum \beta_i (|A, i\rangle \otimes |B, i\rangle)$ относительно ROV в конце первого измерения. В конце второго измерения динамическим состоянием $S + O + P$ относительно ROV будет $\sum \beta_i (|A, i\rangle \otimes |B, i\rangle \otimes |B, i\rangle)$.

При редукции состояния общей системы в эти моменты на составные части, сами части также получают определённость своих состояний по отношению к ROV . Как и прежде, обозначим через $P[|A, i\rangle]$ проектор на луч, содержащий $|A, i\rangle$. В конце первого измерения индивидуальные системы S и O окажутся в состояниях $|\beta_i|^2 P[|A, i\rangle]$ и $|\beta_i|^2 P[|B, i\rangle]$ относительно ROV , соответственно. В конце второго измерения конечным состоянием $O + P$, также вычисленным редукцией, будет $\sum |\beta_i|^2 P[|B, i\rangle \otimes |B, i\rangle]$.

Нет необходимости проводить **третье** измерение для установления "согласованности наблюдаемой" M , поскольку это предсказуемо ROV с уверенностью, что он получит значение 1, если это будет сделано.

Но предположим теперь, что ROV спрашивает себя о том, что получили O и P и получили ли они одно и то же. Но здесь задаётся вопрос, на который нет ответа, ибо он не может ответить на вопросы о их прошлом, учитывая, что не сделал никаких замеров, на основании которых мог бы получить ответы на эти вопросы!

Конечно, ROV может сделать два новых отдельных измерения на O и P , чтобы увидеть — что они регистрируют сейчас. Пусть он измеряет $I \otimes B$ на $O + P$ и получает значение k . В данной ситуации он может с определённостью сделать предсказание, что найдёт при измерении

¹⁶⁾ Это часть знаний наблюдателя ROV , базирующихся на основе последних измерений, когда P и O — каждый, эволюционировали свободно после измерительного взаимодействия при отсутствии взаимодействия между O и P , и что A и указатель чтения B для O , коммутируют со свободными гамильтонианами для S и O , соответственно.

$I \otimes P$ над этой системой: состояние $O + P$ относительно ROV есть результат обусловленный тем, что он имеет на этот момент. Он прогнозирует с полной определенностью, что будет видеть тот же указатель чтения $|B, k\rangle$ на O .

Получено ли значение k прежде, чем увидели O и P ? По мнению Ровелли, на данный момент у нас нет основания полагать, что этот вопрос может иметь смысл. Нет состояний O и P относительно ROV , на которые можно сослаться для ответа.

Итак, подведем итог: следуя фон Нейману, мы должны сказать, что факт о том — что видели O и P , значим для обоих наблюдателей и что этот факт значимости закреплён в определении квантового состояния. Но в мире Ровелли это не так.

5. Можем ли мы выйти за рамки решения этих вопросов?

Предыдущие вопросы представляют собой те из них, которые можно было разрешить с первого взгляда согласно концепции Ровелли. Но их рассмотрение оставляет в стороне ещё один момент по поводу указателя чтения, который регистрируется как результат измерения, то есть как ответ 1 на вопрос $?A$. Этот факт не является равносильным для O по поводу определения физического состояния, будь то относительно себя или относительно другого наблюдателя.

Другими словами, у Ровелли есть элементы метаописания, которые в отдельных случаях не могут соответствовать описанию любым наблюдателем, и, следовательно, не поддающиеся описанию на языке квантовой механики. Может возникнуть соблазн представить существование "универсального наблюдателя", который знает — какая информация была (какие ответы были зарегистрированы) от каждого "обычного" наблюдателя. Но эта фикция не может быть реализована без разрушения хронологии наблюдения за системой.

В наших рассуждениях о том, какие результаты будут фиксировать наблюдатели в описании мира по Ровелли, в понимании этого мы нацелены на основы квантовой механики:

Квантовая механика — это теория о физическом описании физической системы относительно других систем, и это полное описание мира (Разд. II-C).

Опираясь на иллюстрацию видения эйнштейновского мира из разных систем отсчёта, возникает желание получить чёткий ответ на вопрос: *в каких отношениях находятся описания разных наблюдателей, когда они наблюдают одну и ту же систему?* Конечно, нет и не может быть подсказок на все ответы, если предположить, что нет никаких взаимодействий между различными наблюдателями. Но, возможно, мы получим эти подсказки, если будем представлять отдельных наблюдателей самих как субъекты наблюдений третьим наблюдателем! Ровелли же и представляет общую форму атрибуции состояния и значений наблюдаемых, которая может быть принята и именно это та информация, которой *может* располагать наблюдатель.

5.1. Символизм Ровелли для информации, упрощённый

Рассмотрим как в своём метаописании Ровелли вводит символику, чтобы выразить тот факт, что данная система имеет информацию о другой.

Поскольку существует максимальная информация, которая может быть извлечена из системы, мы можем предположить, что она выбрана как ответы на множество $W(S)$ вопросов Q_i , обозначаемых как $c = \{Q_i, i = 1, N\}$ независимых друг от друга элементов. Нет ничего изначального в этой выборке, поскольку она может быть представлена совершенно разными семействами c, b, d, \dots N независимых вопросов $W(S)$. Если система O запрашивает N вопросов из семейства c о системе S , то полученные ответы можно представить в виде строки, которую обозначим как

$$S_c = [e_1, \dots, e_N]_c. \quad (4)$$

Строка S_c представляет информацию о системе S для O как результат взаимодействия, которое и позволяло задавать вопросы из семейства c (Section III-C).

Идея вопросов о состоянии системы S относительно наблюдателя O возникла потому что на базе на этой информации O может представить состояние S в конечном подпространстве соответствующего гильбертова пространства и даже назначить чистому состоянию вектор в этом пространстве. При этом "вопрос-ответ" последовательность должна быть максимально совместимая. Это есть то, что мы описываем неформально следующим образом:

(Форма 1): O регистрирует ответ 1, чтобы "завершить вопрос" $?A$, поскольку S имеет состояние $|A, 1\rangle$ относительно O .

Мы видим теперь, что возникает эффект **временного порядка**, в котором задаются вопросы, поскольку задаются они во вневременной метрике. N упорядоченных вопросов (4) появляются в порядке $1, \dots, N$ так, что мы можем мыслить это как упорядоченность во времени моментами t_1, \dots, t_N . Но, тем не менее, формальное описание Формы 1 должно быть расширено:

(Форма 2): O регистрирует ответ $e1$, чтобы "завершить вопрос" $?A(1)$ в момент t_1 , поскольку S имеет состояние $|A(1), e1\rangle$ относительно O в момент t_1, \dots ; O регистрирует ответ eN для "завершения вопроса" $?A(N)$, поскольку S имеет состояние $|A(N), eN\rangle$ относительно O в момент t_N .

Более того, в общем случае O будет определять эволюцию состояний на периоды между измерениями (см. формулировки Грюнвальда, где это делается явно). Поэтому я предполагаю, что можно говорить и об эволюции относительного состояния следующим образом:

(Форма 3): S имеет состояние $|\psi(t)\rangle$ относительно O , в течение интервала (t_1, t_N) или, когда мы отмечаем только определённые специальные моменты интервала в следующей приемлемой форме описания:

(Форма 3- FIN) S имеет состояния $|\psi(1)\rangle, \dots, |\psi(N)\rangle$ относительно O в моменты t_1, \dots, t_N .

В некоторых случаях для подавления привязки ко времени удобно будет использовать Форму 1, но в других случаях мы должны будем использовать полную форму 3 или 3-FIN.

5.2. Конкретный пример, сформулированный с помощью ROV

В качестве конкретного примера рассмотрим ситуацию, приведённую в Примере 2 **ВОПРОСА 3**, где наблюдатели O и P сами были объектами наблюдения со стороны внешнего наблюдателя ROV, начавшего с той же исходной информации об $S + O$, которую имел P , но, и кроме того, информацию о P . Таким образом он может предвидеть последовательность двух измерений, которые были показаны в примере. Обозначим начальный момент через t_0 , а два момента взаимодействия измерений через t_1 и t_2 .

(Состояния относительно ROV)

- Начальным состоянием измеряемой системы S относительно ROV является $\theta = \sum \beta_i |A, i\rangle$, которое представляется суперпозицией собственных состояний наблюдаемой A , соответствующих разным собственным значениям.
- A будет измерена дважды двумя измерительными системами O и P . Каждый из O и P будет в "готовности" к старту измерения состояния наблюдателем ROV из $|B, r\rangle$. Индикатор состояний есть $|B, i\rangle$ для собственных значений i наблюдаемой A (который не включает r).

Мы предполагаем, что каждая из систем P и O свободно эволюционируют после их взаимодействия, связанного с измерением, и что нет взаимодействия между ними. Как A , так и "указатель чтения наблюдаемой" B для O коммутируют со свободными гамильтонианами S и O , соответственно.

- с) Составная система $S + O$ будет находиться в состоянии $\sum \beta_i(|A, i\rangle \otimes |B, i\rangle)$ относительно ROV в момент окончания первого измерения t_1 .
- д) Аналогично, принимая во внимание неизменение P , состоянием $S + O + P$ относительно ROV будет суперпозиция $\sum \beta_i(|A, i\rangle \otimes |B, i\rangle \otimes |B, r\rangle)$.
- е) На момент t_2 – конца второго измерения состоянием $S + O + P$ относительно ROV будет $\sum \beta_i(|A, i\rangle \otimes |B, i\rangle \otimes |B, i\rangle)$.

Последующее развитие состояний относительно ROV

Из д) и е), можно увидеть, что состояние S относительно ROV не меняется после момента t_1 , поскольку коэффициенты суперпозиции не изменять и даже через компоненты.

Чтобы показать это, заметим, что по редукции мы имеем состояния также для частей общей системы, а именно S, O, P , относительно ROV . Как и прежде мы обозначаем через $P[|A, i\rangle]$ проекцию на луч, содержащий $|A, i\rangle$. Имеем:

ROV от себя назначает для S эволюционирующую *смесь* $\rho(S, ROV)(t) |\psi(t, i)\rangle$ так, чтобы

$$\begin{aligned} \text{для } t < t_1 \text{ состояние } |\psi(t, i)\rangle &= \theta = \sum \beta_i(|A, i\rangle), \\ \text{для } t_1 \leq t \text{ состояние } |\psi(t, i)\rangle &= |A, i\rangle \end{aligned}$$

Эта смесь имеет как компоненты проекции на эволюционирующие вектора, по одному на каждое значение i так, что коэффициент β_i не равен 0, а веса являются "квадратами" этих коэффициентов.

Отметим также, что не будет никаких изменений в этом относительно состоянии при втором измерении, поскольку в суперпозиции всей системы значения B для O и P останутся теми же самыми в каждой компоненте, то есть для каждого собственного значения i такого, для которого β_i не нуль). Отсюда и веса в смеси не изменяются с момента t_1 .

5.3. Пять измерений, которые наблюдает ROV

На самом деле, согласно фон Нейману, в только что описанной ситуации представлено пять типов измерений и исключительно в терминах квантовомеханических состояний и эволюционных операторов (гамильтонианов). Изначальные операции измерения:

- измерение A наблюдателем O , заканчивающееся в промежуточный момент t_1 ;
- измерение A наблюдателем P , заканчивающееся в конечный момент t_2 .

Обе они имеют указатель чтения наблюдаемой B и отвечают критерию измерения фон Неймана такому, что измерение – это такое взаимодействие, что

(**vN-критерий**) начальное состояние $|A, k\rangle \otimes |B, r\rangle$ системы $S + O$ эволюционирует в $|A, k\rangle \otimes |B, k\rangle$, где k есть любое собственное значение A ; а начальное состояние $\sum \beta_i |A, i\rangle \otimes |B, r\rangle$ эволюционирует в $(\sum \beta_i |A, i\rangle) \otimes |B, i\rangle$.

Аналогично для P . По той же причине

измерение A наблюдателем O , также заканчивается в момент t_2 ,

где для простоты мы считаем A независимой от времени. Если это так, а состояние S относительно O эволюционирует, то наблюдатель O имеет возможность вычислять и корректировать значения по прошествии времени. При этом отсутствует необходимость в аргументации общего случая. Поэтому O просто продолжает наблюдать значение A и сохранять назначение соответствующего собственного состояния S для всех моментов времени после t_1 .

Но есть ещё один момент. Из вышесказанного следует, что взаимодействие между S и общей системой $O + P$ также коррелирует измерения – фактически по разному в трех различных случаях. Например, если мы примем $B \otimes I$ и $I \otimes B$, соответственно как указатели наблюдаемых на $O + P$, тогда **vN-критерий** удовлетворяется для моментов t_1 и t_2 , соответственно. Поэтому имеем:

два измерения A на $O + P$, заканчивается в моменты t_1 и t_2 , соответственно.

Чтобы убедиться в этом, переформулируем ситуацию в терминах состояний относительно ROV и разберёмся в общей эволюции системы относительно ROV .

В конечный момент времени t_2 составная система $S + O + P$ находится в чистом состоянии $\sum \beta_i (|A, i\rangle \otimes |B, i\rangle \otimes |B, i\rangle)$ относительно ROV . В результате редукция другие состояния относительно ROV принимают вид:

$$\begin{aligned} S & \text{ в } \sum |\beta_i|^2 P[|A, i\rangle] \\ O \text{ и } P & \text{ оба в } \sum |\beta_i|^2 P[|B, i\rangle] \\ S + O \text{ и } S + P & \text{ оба в } \sum |\beta_i|^2 P[|A, i\rangle \otimes |B, i\rangle] \\ O + P & \text{ в } \sum |\beta_i|^2 P[|B, i\rangle \otimes |B, i\rangle] \end{aligned}$$

Проверка показывает, что **vN-критерий** удовлетворяется при упомянутых взаимодействиях с I . Однако необходимо добавить: выбирая $B \otimes B$ как указатель чтения наблюдаемой, можно увидеть, что $O + P$ принимает участие в измерении в более поздние моменты t_2 . Это пятое измерение, которое появляется в нашем рассмотрении состояний различных систем по отношению к ROV и их различные эволюции¹⁷⁾

Важно отметить, что наблюдатели получают информацию о системах только путём измерения и получают они информацию от тех и о тех системах, которые имеют определённые состояния по отношению к ним. Теперь в соответствии с метаописанием Мира Ровелли мы можем продолжить рассмотрение, чтобы увидеть – какие состояния имеет S относительно O, P и $O + P$.

Состояния относительно $O, P, O + P$

Мы можем найти состояния S относительно O, P и $O + P$ для интервала за исключением отдельных точечных, а именно собственных состояний, которые назначаются системе S на основе произведённых измерений. Поскольку, когда в начале интервала ROV производит измерения на S , нет одинаковых начальных данных для вычисления матрицы плотности $\rho(S, ROV)$. Поэтому имеем:

- g) Наблюдатель O назначает S эволюционирующее чистое состояние $\rho(S, O)(t)$:
 для $t < t_1$ состояние $\rho(S, O)(t) = \theta = \sum \beta_i |A, i\rangle$,
 для $t_1 \leq t$ состояние $\rho(S, O)(t) = \theta = |A, m\rangle$.

Здесь значение m неизвестно – оно получается как результат того, что O регистрирует на выходе при измерении.

- h) Для P это выглядит немного сложнее: P присваивает S смесь $\rho(S, P)(t)$ эволюционирующих чистых состояний $\lambda(t, i)$ с весами $|\beta_i|^2$:
 для $t < t_1$ состояние $\lambda(t, i) = \theta = \sum \beta_i |A, i\rangle$;
 для $t_1 \leq t < t_2$ состояние $\lambda(t, i) = \theta = |A, i\rangle$;
 для $t_2 \leq t$ состояние $\lambda(t, i) = |A, k\rangle$.

И здесь значение k – результата измерения наблюдателем P неизвестно.

В случае $O + P$ мы видим, что есть наблюдатель, который делает два измерения, одно точно в момент измерения наблюдателем O и одно в момент измерения наблюдателем P и находит, соответственно, в это время значения r и s , неизвестными как для нас, так и для ROV . Нет никаких оснований связывать результаты измерений различных наблюдателей, независимо от того, насколько тесно они могли быть близки. Но только здесь этот наблюдатель не назначает смесь, как это сделал O , а назначает чистое состояние:

¹⁷⁾ Не может быть никаких сомнений, как мне кажется, в разрешении тривиальных ограничивающих моментов: если между O абсолютно отсутствует взаимодействие S , посредством которого распространяется информация, то это вопрос "чистой бухгалтерии", если мы скажем, что состояние S относительно O представляется Идентификационным оператором – безинформационным статистическим оператором. Это соглашение может сгладить представление, даже, если оно в этом и нет необходимости.

$$\begin{aligned}
 \text{i) } \rho(S, O + P)(t) &= \text{состояние } \theta = \sum \beta_i |A, i\rangle, \quad \text{для } t < t_1, \\
 &= \text{состояние } |A, r\rangle, \quad \text{для } t_1 \leq t \leq t_2, \\
 &= \text{состояние } |A, s\rangle, \quad \text{для } t_2 \leq t,
 \end{aligned}$$

с неизвестными r и s .

Хотелось бы увидеть, какие ограничения должны быть добавлены, чтобы обеспечить соответствие между состояниями системы S относительно различных наблюдателей, таких как O , P и ROV . Это представляется актуальным, поскольку это необходимо сохранить и для $O + P$.

В связи с этим, я собираюсь предложить дополнение к расчётам Ровелли.

5.4 Дополнительный постулат, связанный с относительными состояниями

Дополнительный Постулат. Для любой из систем S, O, P, ROV :

- состояние S относительно O (если такое имеется) в любом случае не может быть ортогональным к состоянию S относительно $O + P$ (если такое имеется);
- состояние S относительно P (если таковое имеется) точно так же не может быть ортогональным к состоянию S относительно $O + P$ (если такое имеется);
- состояние S по отношению к какой-либо из этих систем не может быть ортогональным к состоянию S по отношению к ROV ;
- и так далее для более сложных композиционных ситуаций.

Здесь слова "если такое имеется" необходимы для общности.

В наших примерах только три системы дают назначения состояниям системы S . Необходимо еще раз отметить, что случай чистого состояния очень специфичен в общем случае реляционные состояния будут смешанными. И это не связывается с "незнанием" в интерпретации смесей. Требование неортогональности является скорее всего ограничением "свободно быть" для чистых состояний, но, конечно же, всегда меньшим ограничением, чем для смесей.

Какими могли бы быть интуитивные основания и мотивация для введения этого постулата с точки зрения реляционной квантовой механики? Такими же, как и у Ровелли, когда он представил свою собственную аргументацию: он ссылается на пример методологии Эйнштейна в создании теории относительности в той же мере, в какой и копенгагенские физики черпали свое вдохновение в этом же эпизоде. Озарение приняло форму своего рода умеренного эмпиризма: ничего не может быть объяснено, как и природа процесса, за пределами того, что проявляется в результатах измерений. Таким образом, основная причина отказа в ортогональности состоит в том, что наблюдатели действительно получают "одновременно" чётко выраженные значения, когда совершенно определённо измерений не производится и отсутствует сама процедура измерения, чтобы выявить эти возможности. Более точно можно сказать, что нет такой конфигураций наблюдаемых, для которой можно было бы постулировать существование сущности с неизмеряемой природой, если нет состояния, которое показывало бы со всей определённой эту конфигурацию как итог.

В квантовом случае для ортогональных состояний, когда вероятности перехода точно равны нулю, эту идею можно инкапсулировать так:

Слоган: борновская вероятность = 0 → НЕТ!

Рассмотрим, как выглядит ситуация для ROV . Когда ROV предполагает измерения над указанными системами, для того чтобы увидеть, что указатели наблюдаемых $O, P, O + P$ могут быть в несогласии друг с другом в соответствующие моменты времени, расчёт борновской условной вероятности для этого даст ноль. Поэтому, чтобы иметь возможность следовать вышеприведённому предположению в "создании" неизмеренных сущностей, ROV будет использовать отношения между теми результатами, которые регистрируются подсистемами. Идея

о том, что, если что-то происходит в природе, то оно должно иметь некое числовое выражение, которое можно ожидать при детектировании, измерении или наблюдении, сильна в копенгагенской традиции, даже если это противоречит идее сторонников существования скрытых переменных. Мне кажется, что это отголоски как раз того озарения, которое копенгагенские теоретики и Ровелли почерпнули из рассуждений Эйнштейна при создании им теории относительности.

Рассмотрим как соотносится это озарение с Дополнительным постулатом? Если мы оглянемся назад к описанию эволюции состояний системы S через соответствующие интервалы времени относительно трёх наблюдателей, мы увидим следующие назначения чистых состояний:

$$\begin{aligned} \rho(S, O)(t) &\text{ остаётся тем же от } t_1, \text{ а именно } |A, m\rangle, \\ \rho(S, P)(t) &\text{ есть смесь до момента } t_2 \text{ и становится } |A, k\rangle, \\ \rho(S, O + P)(t) &\text{ есть } |A, r\rangle \text{ для моментов от } t_1, \text{ и становится } |A, s\rangle \text{ в момент } t_2. \end{aligned}$$

Для различных значений m, k, r, s , чьи вектора взаимно ортогональны, поскольку являются собственными векторами одного и того же оператора. Вторая и третья строки говорят, что $k = s$. Но первая и третья говорят, что $m = r$, когда наступает момент t_1 и аналогичным образом, что $m = s$ при наступлении момента t_2 . То есть, все величины после всего этого одинаковы.

Результат: эволюционирующие состояния системы S относительно наблюдателей O и P не совпадают в начале, но становятся одинаковы, когда P производит измерение A на S , где-то после O (без возмущений A в промежутке).

Предположим, что ROV , исходя из реляционной квантовой механики, *расширил горизонт вопроса* до уровня того, что он может знать ещё, не предпринимая измерений O и P в течение или после этого интервала?

Он знает, что результаты их измерений, которые они нашли, действительно совпали.

Но он уже знал, что если он *проведёт изменения на проверку согласия*, то только на основе квантовой механики он получит ответ "Да" со всей определённой. И теперь, уже из учёта тех же результатов измерений, которые составляли его первоначальную информацию, но используя Дополнительный постулат, он делает вывод, что согласие он мог бы получить с определённой, если бы измерение действительно произошло.

Я должен подчеркнуть, что этот замечательный результат, получен только благодаря введению Дополнительного постулата, регламентирующего то, как *регистрируется информация* компонентами составной системы и как устанавливается связи между измерениями. Я не могу делать вид, что согласованность между информацией, полученной с помощью различных взаимодействующих наблюдателей, следует только из того, что представлено Ровелли.

Ровелли не стал углубляться в вопрос о том, существуют ли возможности для связывания информации, которой могут обладать наблюдателями в такой ситуации. Дополнительный же постулат был сформулирован так, чтобы добавить только общую форму описания, в которой информация может быть получена от разных систем в сложной ситуации, описания без какого-либо объяснения наблюдательно-независимых квантовомеханических состояний.

Я утверждаю, что дополнение согласуется с утверждением Ровелли и не выходит за пределы его метаописания, в которое он укладывает своё понимание мира квантовой механики. Остается всё то, что было предусмотрено как только мы признаем *концепцию целостности*¹⁸⁾ в сложных ситуациях с участием множества взаимодействий. И это ответ на вопрос: "Какова общая форма описания мира с точек зрения разных наблюдателей?"

¹⁸⁾ Известная концепция *холізма*, в широком смысле — позиция в философии и науке по проблеме соотношения части и целого, исходящая из качественного своеобразия и приоритета целого по отношению к его частям. Принцип предпочтения ЦЕЛОГО-ЧАСТИ. Прим. редактора.

6. Реляционная интерпретация ЭПР

Laudisa (2001), Smerlak и Rovelli (2006) рассмотрели ситуацию с парадоксом Эйнштейна-Подольского-Розена с позиций реляционной квантовой механики. Они не совсем согласны с их интерпретацией. Здесь я покажу, как регламентируется ситуация, если принять Дополнительный постулат. Результаты, разумеется, отличаются от тех, которые получил Ровелли, хотя вовсе не затрагивает эмпирического содержания, полученного с помощью квантовой механики.

Пусть S будет двухчастичной системой $\alpha + \beta$, такой как фотонная пара в синглетном состоянии в суперпозиции коррелированных состояний $\uparrow \otimes \downarrow$ и $\downarrow \otimes \uparrow$. Стрелками обозначены собственные значения наблюдаемой A .

Наблюдатели $P1$ и $P2$, соответственно, измеряют $A \otimes I$ и $I \otimes A$ с указателем чтения наблюдаемой B . Наблюдатель ROV имеет информацию о начальных состояниях и динамике процесса.

$P1$ получает \uparrow или \downarrow ... состояние α относительно $P1$ есть $|\uparrow\rangle$ или $|\downarrow\rangle$

$P2$ получает \uparrow или \downarrow ... состояние α относительно $P2$ есть $|\uparrow\rangle$ или $|\downarrow\rangle$

$P1 + P2$ получает $\uparrow\uparrow$ или $\uparrow\downarrow$ or $\downarrow\downarrow$ или $\downarrow\uparrow$... состояние $\alpha + \beta$ относительно

$P1 + P2$ есть $|\uparrow\rangle$ или $|\downarrow\rangle \otimes |\uparrow\rangle$ или $|\uparrow\rangle \otimes |\downarrow\rangle$ или $|\downarrow\rangle \otimes |\downarrow\rangle$ или $|\downarrow\rangle \otimes |\uparrow\rangle$

Для $P1 + \alpha + P2 + \beta$ ROV назначает в момент измерения суперпозицию из

$(|B, 1\rangle \otimes |\uparrow\rangle) \otimes (|B, 2\rangle \otimes |\downarrow\rangle)$ и $(|B, 2\rangle \otimes |\downarrow\rangle) \otimes (|B, 1\rangle \otimes |\uparrow\rangle)$

Это ведёт к тому, что ROV назначает $\alpha + \beta$ смесь из $(|\uparrow\rangle \otimes |\downarrow\rangle)$ и $(|\downarrow\rangle \otimes |\uparrow\rangle)$.

Из Дополнительного постулата следует, что состояние $\alpha + \beta$ относительно $P1 + P2$ должно быть таким, которое исключает обе возможности, отмеченные выше. Тогда $P1 + P2$ назначит α и β отдельно – либо $|\uparrow\rangle$ и $|\downarrow\rangle$, либо $|\downarrow\rangle$ и $|\uparrow\rangle$, соответственно. Но тогда опять же согласно Дополнительному постулату, состояния α и β относительно $P1$ и $P2$, соответственно, не могут быть одинаковыми по причине нарушения ортогональности, поскольку являются относительными для $P1 + P2$.

Мы пришли к "жуткой" нелокальности? Мы должны быть обеспокоены возможным конфликтом с тем чувством, которое так явно выражено в Smerlak & Rovelli (2006):

Нет операционального определения процедуры сравнения наблюдательной независимости ... "информации" от различных наблюдателей: информация от разных наблюдателей может сравниться только при физическом обмене информацией между наблюдателями.

Может ROV в нашем случае, включая Дополнительный постулат, сравнивать два состояния $\alpha + \beta$ относительно $P1$ и $P2$ до измерения $P1$ и $P2$? **ДА и НЕТ!**

ROV может знать, что $P1$ и $P2$ не зарегистрировали одного значения для A . Но ничего не зная о том, *какие* значения они зарегистрировали, ROV мог бы произвести свои измерения. Поэтому ROV может предсказать не более того, чем кто-то, без использования Дополнительного постулата и только то, что он, измерив оба значения и обнаружил бы их различие, что предсказуемо и без привлечения постулата.

Мы можем определить функцию исходов, регистрируемых $P1$ и $P2$, которая принимает значение 1, если результаты одинаковые и значение 0, если они различаются. Это значение ROV тогда сможет узнать не прибегая к измерению. Но определённая величина имеет значение 1, если и только если, состояния α и β относительно $P1$ и $P2$, соответственно, есть $|\uparrow\rangle$ и $|\downarrow\rangle$, либо $|\downarrow\rangle$ и $|\uparrow\rangle$. Но я не думаю, что это следует из исходной реляционной квантовой механики и потому может быть расценено как движение "вопреки".

Но я бы хотел полагать, что и здесь имеется реальный повод для утверждения Дополнительного постулата. Ибо в противном случае мы не исключаем возможности того, что

состояние $\alpha + \beta$ относительно $P1 + P2$ есть $|\uparrow\rangle \otimes |\downarrow\rangle$, например, хотя состояниями α и β относительно $P1$ и $P2$, соответственно, являются оба $|\uparrow\rangle$!

Даже, если бы мы и настаивали на том, что " S имеет состояние ... относительно O " может иметь только истинное значение, отнесённое к будущему наблюдению ROV (но не быть абсолютно верным или неверным), эта же сложность появилась бы и в ситуации¹⁹⁾. Однако есть ещё много чего, что можно было бы исследовать здесь, включая наиболее радикальные моменты, а именно, даже то, что состояния относительные для любого наблюдателя, сами должны бы быть относительными для себя.

Приложение. *Вспомогательный формализм*

Наконец, *исключительно для лучшего восприятия* мы можем дополним изложение несколько вспомогательным символизмом.

Отметим, что O регистрирует ответ исключительно физическим путём, что включает процедуру измерения и требует учёта корреляций измеряемой наблюдаемой A на S с помощью указателя чтения B на O . Следовательно, если мы хотим отметить этот факт, получим окончательный вариант Формы 1:

(Форма 1-bis) O имеет $[[[B, 1 >]]]$

Это обманчиво выглядит как атрибуция состояния O . Однако это не так. Здесь имеется в виду эквивалент Формы 1, когда известно только то, что B — указатель чтения наблюдателя O и ничего более. Мы можем представлять себе это как код информации о том, что O имеет информацию о системе S в духе замечания Ровелли:

Позвольте мне чисто в лексическом плане отныне выражать тот факт, что q имеет определенное значение по отношению к O словами: O имеет "информацию" о том, что $q = 1$. (Раздел II-E).

В приведённом отрывке q является наблюдаемой некоторой системы, над которой производится измерение наблюдателем O , поэтому несмотря на упрощённость формы, это утверждение является реляционным. Конкретным примером может служить проецирование q на подпространство и ещё более конкретным примером будет одномерный проекционный оператор в случае, когда необходимо сказать, что " $q = 1$ ", назначая чистое состояние (измерение в системе S относительно O).

В октябре 2006 года на симпозиуме в университете Provence, Aix Карло Ровелли высказал некоторое сомнение об этом вспомогательном символизме, мотивируя тем, что я предпринял переформулировку как аргумент отказа от ссылки на устройство измерения.

Однако, используя вспомогательной символики, мы имеем в качестве альтернативы Дополнительному постулату:

Если составной наблюдатель $X + Y$ имеет $[[\varphi]]$, в то время как X имеет $[[\xi]]$, Y имеет $[[\xi']]$, тогда существует возможность относительной редукции ξ в состояние $\# \varphi$ и существует возможность относительной редуцировать ξ' в состояние $\# \varphi$.

Описанный таким образом формализм с модальной интерпретацией (CVMI), хотя и коротко для принятия его в целом, я представил в 1997. Там и в цитируемых работах 1991 года, можно увидеть, насколько необходимо конкретизировать в деталях последнюю строку Дополнительного постулата: "*... и так далее для более сложных композиционных ситуаций*".

¹⁹⁾ Предположение здесь могло бы иметь место, как мне кажется, радикализация оригинальной квантовой механики. Но, возможно, ближе к первоначальной интуиции, что я уже сделал здесь. Однако, хотя вопрос и заслуживает дальнейшего исследования, я вижу как трудно это поддерживать, учитывая очевидную опасность обратного движения, либо цикличности — но, возможно, и стоит исследовать в силу этой опасности!

Благодарности

Это исследование было поддержано NSF грантом в SES-0549002. Я хочу поблагодарить Carlo Rovelli и Matteo Smerlak за многие полезные обсуждения. Спасибо также за обсуждения первого варианта статьи на семинаре в Принстоне с David John Baker, Jeffrey Bub, Christopher Fuchs, Hans Halvorson и Tim Maudlin.

Ссылки

- Bub, Jeffrey: 2004, Why the Quantum? *Studies in the History and Philosophy of Modern Physics* 35: pp. 241--266.
- Bub, Jeffrey: 2005, Quantum Mechanics is About Quantum Information. *Foundations of Physics* 35: pp. 541--560.
- Dicke, R. H.: 1989, Quantum measurements, sequential and latent. *Foundations of Physics* 19: pp. 385--395.
- Fuchs, C. A.: 1998, Information Gain vs. State Disturbance in Quantum Theory. *Fortschritte der Physik* 46(4,5): 535--565. (Reprinted in *Quantum Computation: Where Do We Want to Go Tomorrow?*, edited by S. L. Braunstein (Wiley-VCH Verlag, Weinheim, 1999), pp. 229--259.)
- Fuchs, C. A.: 2004, Quantum Mechanics as Quantum Information (and only a little more)...
quant-ph/0205039
- Groenewold, H. J.: 1952, Information in Quantum Measurement. *Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen B55*: pp. 219.27;
- Groenewold, H. J.: 1957, Objective and Subjective Aspects of Statistics in Quantum Description. In Stephan Körner (ed.) *Observation and Interpretation in the Philosophy of Physics Proceedings of the Ninth Symposium of the Colston Research Society held in the University ... April 1st-April 4th, 1957*. pp. 197--203.
- Hagar, A and Hemmo, M.: 2006, Explaining the Unobserved . Why QM Ain't Only About Information. *Foundation of Physics* 36: pp. 1295-1324.
- Laudisa F.: 2001, The EPR Argument in a Relational Interpretation of Quantum Mechanics. *Found. Phys. Lett.* 14: pp. 119-132.
- Laudisa, Federico and Carlo Rovelli: 2005, Relational Quantum Mechanics. In *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, <http://plato.stanford.edu/entries/qm-relational/>.
- Rovelli, Carlo: 1996, Relational Quantum Mechanics. *International Journal of Theoretical Physics*, 35: 1637--1678.
- Smerlak, Matteo and Carlo Rovelli: 2006, Relational EPR. ms.
- Temple, G.: 1948, *The General Principles of Quantum Theory*. London: Methuen.
- van Fraassen, Bas C.: 1997, Modal interpretation of repeated measurement: Reply to Leeds and Healey. *Philosophy of Science* 64: pp. 669-676.
- van Fraassen, Bas C.: 1991, *Quantum Mechanics: An Empiricist View*. Oxford: Oxford University Press.
- Wheeler, John: 1957, Assessment of Everett's .Relative State. formulation of quantum theory. *Review Mod. Phys.* 29: pp. 463-465.

Rovelli's World * Bas C. van Fraassen forthcoming in *Foundations of Physics* 2009
http://www.princeton.edu/~fraassen/abstract/Rovelli_sWorld-FIN.pdf

Для связи:

quadrica-m@mail.ru
<http://orcid.org/0000-0002-1435-9220>

Авторский семинар

<http://my.mail.ru/community/physiks.principis/?ref=cat>
<http://quadrica.ucoz.net/>
<https://independent.academia.edu/KasimovVladimir>
<https://vk.com/public128913510>
<https://www.facebook.com/quadrica.m>