

Квантовый дарвинизм

Реферат подготовил М.Х. Шульман (shulman@dol.ru, www.timeorigin21.narod.ru)

Как известно, в общем случае дарвиновский процесс естественного отбора предусматривает три этапа:

- репликацию, или копирование;
- варьирование характеристик различных копий;
- селективное выживание варьированных копий.

Аннотация

Применяя эту концепцию к анализу результатов измерения макроскопических систем, В. Зурек (Wojciech Hubert Zurek) из Национальной лаборатории в Лос Аламосе (США) объясняет (см. [1, 2]), каким образом эти результаты оказываются чисто "классическими", в которых нет места квантовым состояниям суперпозиции (например, делокализации объектов в пространстве).

Введение

Квантовый принцип суперпозиции требует, чтобы любая комбинация квантовых состояний также являлась допустимым состоянием. Это кажется противоречащим повседневной реальности: окружающие нас состояния являются локализованным. Классические объекты могут находиться либо здесь, либо там, но никогда одновременно и здесь, и там. Кроме того, принцип суперпозиции утверждает, что локализация должна быть редким исключением, а не правилом, для квантовых систем.

Неустойчивость состояний представляет собой вторую проблему в соответствии между квантами и классикой: при измерении исходное квантовое состояние общего вида стирается – оно "коллапсирует" в собственное состояние измеряемой наблюдаемой. Как же становится возможным, что объекты, с которыми мы имеем дело и которые могут надежно наблюдаться, хотя бы теоретически состоят из квантовых "строительных блоков"? Чтобы обойти эти трудности, Бор последовал примеру Александра Великого: он не стал пытаться распутать гордиев узел, а просто разрубил его. Этот узел в данном случае представляет собой границу между квантовым и классическим. Вселенная Бора содержит две реальности, каждая подчиняется собственным законам. Неустойчивые суперпозиции были исключены из классической реальности, будучи рассматриваемы в качестве более фундаментальных и независимых от интерпретации или даже практики квантовой теории. Таким образом, вместо попытки понять Вселенную (включая ее "классическую часть") на основе ее "квантования", просто исходят из ее классического основания.

Это был замечательный тактический ход: физики могли справиться с квантовой реальностью, не затрудняя себя проблемами интерпретации. В те дни только *мысленные* эксперименты типа знаменитого парадокса с котом Шрёдингера могли быть источником смущения: *реальные* эксперименты выполнялись с электронами, фотонами, атомами или иными *микроскопическими* системами. Правило Борна – что макроскопическое и есть классическое – считалось достаточным. Более того, многие

(включая Эйнштейна) думали, что квантовая физика есть просто шаг на пути углубления теории, который позволит решить или обойти проблемы интерпретации.

Но все оказалось не так. Вместо этого Старые мысленные опыты были осуществлены и подтвердили справедливость квантовых законов в масштабах, которые недавно достигли "макроскопических". Квантовая теория остается справедливой и здесь. Стало еще более ясно, что область действия ее предсказаний – в отношении суперпозиции и запутывания – подтверждается экспериментальными фактами, в принципе справедливыми также и для макроскопических объектов. Следовательно, вопросы о происхождении "классического", с его ограничением локализованными устойчивыми состояниями, не искаженными измерением, не могут больше игнорироваться.

Декогеренция

Итак, квантовые системы, изолированные от окружающей среды, в общем случае находятся в состоянии суперпозиции *базисных* состояний (таким базисным состояниям отвечают единичные орты в соответствующем гильбертовом пространстве; произвольное состояние представляет собой разложение по базисным векторам). В изолированном состоянии сохраняются фазовые соотношения между базисными компонентами (степенями свободы) волновой функции системы, т. е. когерентность. Общая волновая функция системы S и ее окружения ϵ может быть представлена как *произведение* волновой функции системы на волновую функцию окружения, что соответствует взаимной независимости S и ϵ .

При взаимодействии квантовомеханической системы с окружающей средой возникает необратимый, с точки зрения термодинамики, процесс нарушения когерентности (постоянства фазовых соотношений): отдельные части исходной системы запутываются с компонентами окружения, т.е. общая волновая функция уже не может быть представлена как произведение волновой функции системы на волновую функцию окружения. Этот процесс происходит исключительно быстро и называется декогеренцией. В ходе декогеренции утрачиваются корреляции между степенями свободы самой системы и возникают корреляции между состоянием системы и ее окружения, т.е. в окружение записывается информация об исходной системе.

Специфический пример декогеренции — частица в точке x , взаимодействующая со скалярным полем (которое может рассматриваться как набор гармонических осцилляторов) — подробно анализировался многими авторами. В так называемом "высокотемпературном пределе" был получен результат, согласно которому должны учитываться только эффекты теплового возбуждения поля, тогда как нулевыми колебаниями вакуума можно пренебречь.

В этом случае матрица плотности $\rho(x, x')$ частицы в заданной точке эволюционирует согласно основному уравнению, где выражение для производной ρ по времени в первом приближении точно соответствует уравнению Шредингера для частицы в поле и поэтому отображает степени свободы поля. Оно естественным образом разделяется на три слагаемых, каждое из которых отвечает за различный аспект эффективного поведения в классическом случае. *Первое* слагаемое, которое может быть выведено из уравнения Шредингера, порождает классическую обратимую эволюцию ожидаемого значения некоторой наблюдаемой. *Второе* слагаемое приводит к диссипации, вызванной взаимодействием со скалярным полем; это

взаимодействие уменьшает средний импульс и ведет к потере энергии. Последнее слагаемое также имеет классический аналог: оно ответственно за флуктуации, или случайные "толчки", приводящие к броуновскому движению.

Последнее слагаемое влияет на квантовую суперпозицию и представляет наибольший интерес: оно разрушает квантовую когерентность, удаляя недиагональные члены матрицы плотности, отвечающие за квантовые корреляции между пространственно разделенными частями волнового пакета. Следовательно, оно ответственно за классическую структуру фазового пространства, поскольку преобразует суперпозиции в смеси локализованных волновых пакетов и, в классическом пределе – в хорошо знакомые точки фазового пространства.

Рассмотрим состояние "кота Шрёдингера", показанное на рис.1, где волновая функция частицы представлена когерентной суперпозицией двух гауссиан.

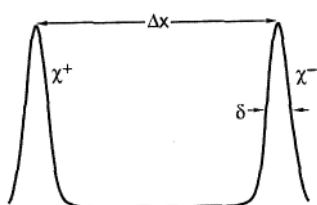


Рисунок 1. Состояние "кота Шрёдингера", или когерентная суперпозиция. Это состояние кота – когерентная суперпозиция двух гауссовых волновых пакетов, она может описывать частицу в суперпозиции положений внутри прибора Штерна-Герлаха или в двухщелевом эксперименте. Фазовый сдвиг между компонентами выбран нулевым.

Для случая сильного пространственного разделения соответствующая матрица плотности имеет четыре пика: два диагональных и два недиагональных (рис. 2). Квантовая когерентность обусловлена недиагональными пиками. Когда эти пики исчезают, положение приближается к выделенному базису.

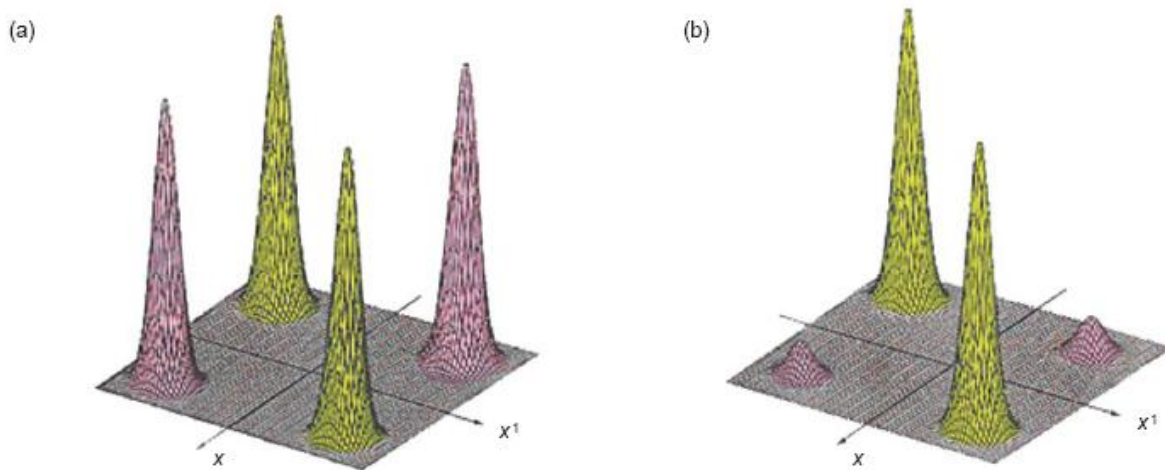


Рис. 2. Эволюция матрицы плотности для состояния кота Шрёдингера

(а) Этот рисунок показывает матрицу плотности для исходного состояния кота Шрёдингера. Диагональные пики (темнозеленые) отвечают двум возможным локализациям частицы. Недиагональные пики (сиреневого цвета) обусловлены квантовой когерентностью. Их существование и размер демонстрируют, что частица не локализуется целиком в двух местах, а представляет собой когерентную суперпозицию этих состояний.

(б) Обусловленная влиянием среды декогеренция приводит к уменьшению недиагональных пиков. Здесь исходная матрица плотности, показанная на рис. (а), является уже частично

декогерентной. Следовательно, некогерентная часть должна быть обусловлена только диагональными пиками. Она может рассматриваться как классическое распределение вероятности с эквивалентной вероятностью найти частицу в соответствующих местах, отвечающее гауссовому распределению.

Слагаемое, ответственное за декогеренцию, мало влияет на диагональные пики. Напротив, оно сильно влияет на недиагональные пики. Квантовая когерентность исчезает за время, которое для макроскопических объектов обычно много меньше, нежели время тепловой релаксации. Для систем с температурой $T = 300$ К и массой $m = 1$ г при разделении $\Delta x = 1$ см отношение времен составляет $\sim 10^{-40}$! Таким образом, даже если время релаксации будет равно возрасту Вселенной $\sim 10^{17}$ секунд, квантовая когерентность разрушится за время $\sim 10^{-23}$ секунд. Макроскопическая природа объекта является решающим фактором, способствующим переходу от квантового описания к классическому.

Отбор, индуцированный окружением

Сейчас явление декогеренции хорошо понято: непрочность состояний создает большие трудности для изоляции квантовых систем. Передача информации, которая не оказывает влияния на классические состояния, имеет драматические последствия для квантовой реальности. Таким образом, если фундаментальные задачи классической физики всегда решались в предположении об изоляции системы (когда можно пренебречь потерями энергии), то в квантовом случае это не так, поскольку утечки информации могут иметь значительно более серьезное значение.

Когда квантовая система отдает информацию, ее собственное состояние становится совместимым с информацией, которая была рассеяна. "Коллапс волновой функции" при измерениях является крайним примером, но любое взаимодействие, приводящее к корреляции, может внести вклад в такое изменение состояния системы: взаимодействия, которые зависят от некоторой наблюдаемой, коррелируют ее с окружением, так что ее собственные состояния становятся выделенными (базисными), а фазовые соотношения между векторами таких состояний утрачиваются.

Отрицательный отбор вследствие декогеренции является сущностью отбора, индуцированного окружением (суперотбора): при внимательном рассмотрении роли окружения неизменными остаются только базисные векторы состояния. Другие состояния декогерируют в смеси стабильных векторов состояний, которые могут быть устойчивыми и, в этом смысле, существуют: они подверглись отбору, индуцированному окружением.

Эти идеи могут быть сформулированы более точно. Основным инструментом является редуцированная матрица плотности. Она представляет состояние системы, которое возникает из составного состояния системы S и ее окружения ϵ . Эволюция матрицы выявляет выделенные состояния: они наиболее вероятны, когда система находится в каком-либо исходном состоянии. Чтобы количественно оценить это, можно использовать энтропию (фон Неймана) как функцию времени. *Векторы состояния дают наименьший рост энтропии. Напротив, их суперпозиция быстро производит энтропию* (со скоростью декогеренции), особенно когда исходная система S является макроскопической.

Когда чистые состояния системы отсортированы по предсказуемости в соответствии с энтропией эволюционировавшей матрицы, доминируют векторы

состояний. Этот критерий – сито предсказуемости – дает короткий список кандидатов в эффективно классические состояния: кот может оставаться в одном из двух явно устойчивых состояний, тогда как суперпозиция этих состояний должна распасться в смесь $|\text{мертвый кот}\rangle$ и $|\text{живой кот}\rangle$ из исходного состояния, описываемого уравнением Шрёдингера.

Особую роль при взаимодействиях системы и окружения играет положение, т.е. координата: они испытывают зависимость от расстояния. Следовательно, информация о координате наиболее быстро проникает в окружение. Вот почему локализованные состояния выживают в то время, как нелокальные суперпозиции распадаются на смеси.

Окружение как регистратор

Мониторинг со стороны окружения означает, что информация относительно S содержится в ϵ . Какую роль он играет, насколько эта роль решающая? Теория декогеренции как таковой игнорирует ее. Окружение сохраняет "отпечаток". Информация, которую оно содержит, трактуется как недоступная и незначимая: ϵ является "средством для очистки от" данных, которые могут подвергнуть опасности классичность.

Квантовый же дарвинизм говорит, что "формирование отпечатка" не есть то, что имеет место: наблюдатели имеют дело с окружением. Подавляющее большинство наших данных поступает от *фрагментов* ϵ . Окружение оказывается *регистратором* состояния системы.

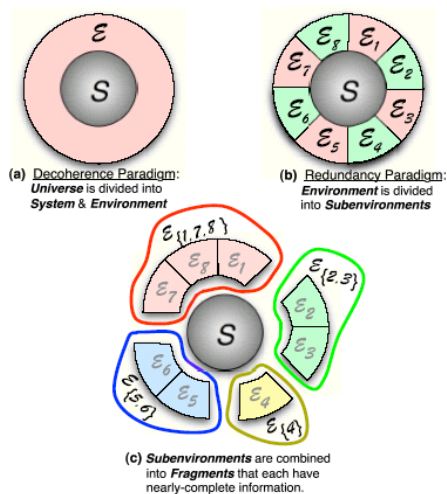


Рисунок 3: Квантовый дарвинизм и структура окружения.

- (a) Парадигма декогеренции: Вселенная делится на Систему и Окружение
- (b) Парадигма избыточности: Окружение делится на Подокружения
- (c) Подокружения группируются во Фрагменты, каждый из которых обладает почти полной информацией

Теория декогеренции различает систему (S) и ее окружение (ϵ), как показано на рисунке (a), но не производит дальнейшей детализации структуры ϵ ; окружение может рассматриваться как некое целое. Квантовый дарвинизм фокусируется на *избыточности*. Речь идет уже о разделении ϵ на подсистемы, как показано на рисунке (b). К подсистеме предъявляется единственное требование, что она независимо от других подсистем должна быть доступна для измерений; наблюдаемые различных подсистем коммутируют. Чтобы

получить информацию относительно S из ϵ , можно тогда измерять фрагменты окружения – неперекрывающиеся ансамбли подсистем ϵ . (с) Существует много копий информации относительно S в ϵ – "потомков" "наилучшей наблюдаемой", которая выжила при распространении через ϵ . Это распространение множественных информационных всплесков определяет квантовый дарвинизм. Окружение становится регистратором избыточных копий информации о выделенной наблюдаемой. Это приводит к объективному существованию векторов состояний: многие могут выявить состояние системы независимо, и они могут сделать это не напрямую, без возмущения S .

Например, именно в этот момент *вы* перехватываете часть фотонов окружения, испущенных экраном или рассеянных страницей. Мы никогда не имеем доступа ко всему окружению ϵ . Крошечной доли достаточно для выявления состояния различных интересующих нас систем.

В этом отражается сущность квантового дарвинизма: только те состояния, которые формируют множественные информационные всплески (*multiple informational off-spring*) – множественные отпечатки окружения – могут быть обнаружены с помощью малых фрагментов ϵ . Природа возникающей при этом классичности состоит тогда не в выживании выбранных состояний (эта идея уже содержится в отборе, индуцированном окружением), но в их способности "порождать", формировать множественные записи – собственные копии – с помощью окружения ϵ .

Распространение записей позволяет извлечь информацию относительно S из многих фрагментов ϵ (в вышеприведенном примере это фотоны). Таким образом, ϵ получает *избыточное* число записей S . Теперь многие наблюдатели выявляют независимо состояние S , не возмущая его. Так выделенные состояния S становятся объективными. Объективное существование – критерий классичности – возникает из квантового субстрата как следствие избыточности.

Теория декогеренции фокусировалась на системе. Ее цель состояла в определении того, какие состояния выдерживают утечки информации в ϵ . Теперь мы спрашиваем: какая информация о системе может быть выявлена из фрагментов ϵ ? Это меняет фокус, делает модель окружения более реалистичной (рис. 3): вместо "монолитного" окружения ϵ мы видим, что окружение состоит из подсистем, которые содержат фрагменты, независимо доступные наблюдателям.

Основным инструментом декогеренции была редуцированная матрица плотности, представляющая состояние системы. Для изучения квантового дарвинизма мы фокусируемся на корреляциях между фрагментами окружения и системой. Как много система копий \mathcal{F} знает об S , можно количественно оценить с использованием взаимной информации:

$$I(S : \mathcal{F}) = H_S + H_{\mathcal{F}} - H_{S, \mathcal{F}},$$

определенной как разность между энтропиями двух систем (здесь S и \mathcal{F}), вычисляемых отдельно и совместно. Например, взаимная информация между оригиналом и идеальной копией (скажем, книги) равна энтропии оригинала, каждая из которых содержит тот же самый текст. Таким образом, каждый бит информации в первой копии определяет бит информации в оригинале. *Однако обладание избыточными копиями не увеличивает информации об оригинале, но определяет,*

сколько человек может получить независимый доступ к этой информации. Число копий определяет избыточность.

Подобные идеи применимы к квантовому случаю. Изначально каждый бит информации, полученный из доли $f \ll 1$ от окружения \mathcal{E} , которое было чистым до мониторинга системы (и заставило ее декогерировать), является битом информации об S . Красный график на рис. 2 начинается этим шагом с наклоном "бит на бит", но затем $I(S : \mathcal{F}_f)$ переходит в плато избыточности при $\mathcal{H}_{S\mathcal{E}}$, где добавочные биты только подтверждают то, что уже известно.

Избыточность есть число независимых фрагментов окружения, которые поддерживают большинство классической информации об S , т.е. $(1 - \delta)H_S$. Другими словами:

$$R_\delta = 1/f_\delta .$$

R_δ - это число раз, которое можно принять $(1 - \delta)$ информации относительно S независимо (от разных фрагментов \mathcal{F}) и косвенно – не возмущая S .

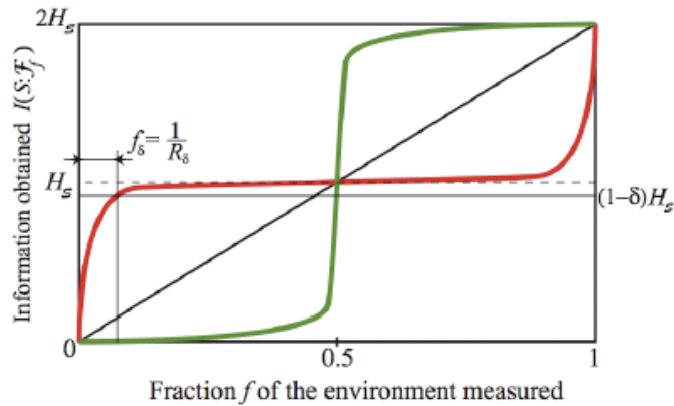


Рисунок 4: Извлекаемая информация $I(S : \mathcal{F}_f)$ об S , заключенная в \mathcal{E} , и ее избыточность в функции от доли f измеряемого окружения.

Взаимная информация монотонно зависит от f . Когда глобальное состояние $S\mathcal{E}$ является чистым, величина $I(S : \mathcal{F}_f)$ для типичной доли f окружения оказывается антисимметричной относительно $f = 0.5$. Для чистых состояний, выявленных при случайном выборе в составном гильбертовом пространстве $\mathcal{H}_{S\mathcal{E}}$, имеется небольшая взаимная информация между S и типичным \mathcal{F} , меньшим, чем половина \mathcal{E} . Однако, как только достигнут порог $f = 1/2$, уже имеется почти вся информация. Таким образом, подобные случайные состояния (зеленая линия) не представляются избыточными. Напротив, состояния $S\mathcal{E}$, созданные за счет декогеренции (когда окружение осуществляет мониторинг выделенной наблюдаемой S), содержат по большей части всю (всю минус δ) информацию относительно S в небольших долях f_δ от \mathcal{E} . Соответствующая величина $I(S : \mathcal{F}_f)$ (красная линия) быстро растет до величины $\mathcal{H}_{S\mathcal{E}}$ (энтропия S , вызванная декогеренцией), которая представляет всю информацию о S , доступную с помощью \mathcal{E} или S . (Более того, до $2H_S$ может быть получено только через глобальное измерение S и почти всего \mathcal{E}). H_S , следовательно, является классически доступной информацией. Поскольку $(1 - \delta)H_S$

информации содержится в $f_\delta = 1/R_\delta$ от \mathcal{E} , имеется R_δ таких фрагментов в \mathcal{E} : R_δ есть избыточность информации относительно S . Большая избыточность влечет объективность: состояние системы могут быть выявлены косвенно и независимо многими наблюдателями, которые придут к одинаковым заключениям. Таким образом, квантовый дарвинизм учитывает происхождение объективного существования.

Быстрый рост и постепенное установление величины $I(S : \mathcal{F}_f)$, как показывает рис. 4, приводит к избыточности. Информация в \mathcal{F}_f , заключенная в \mathcal{E} , позволяет определить состояние системы S , когда она соответствует плато избыточности. *Наблюдаемые различных фрагментов \mathcal{F} коммутируют – такие измерения независимы.* Кроме того, отмеченные корреляции означают, что их результаты приводят к одному и тому же состоянию системы, как если бы S была классической: это плато является классическим плато. Его уровень H_S представляет собой классическую информацию, доступную с помощью малой части \mathcal{E} .

Избыточность обеспечивает объективное существование состояния системы S : оно может быть выявлено косвенно, так что нет опасности разрушить состояние S во время измерения. Коррекция ошибки за счет избыточности также важна: непрочность квантовых состояний означает, что копии во фрагментах \mathcal{F} разрушаются при измерениях (мы разрушаем фотоны!) и могут быть измерены в "ложном" базисе. Нельзя получить доступ к записям в \mathcal{E} без угрозы их существованию. Но, обладая многими (R_δ) копиями, состояние системы S может быть определено $\sim R_\delta$ наблюдателями, которые могут получить свою информацию независимо и без априорной информации о S . Консенсус между копиями предполагает объективное существование состояния системы S .

Таким образом, мониторинг системы со стороны окружения может создать множество записей выделенных состояний S в \mathcal{E} . Состояния составной системы, которые возникают вследствие декогеренции, являются выделенными. В случайных состояниях малые фрагменты по большей части ничего не говорят относительно остального состояния. Только при достижении половины \mathcal{E} сразу определяется полное состояние. Таким образом, состояния, возникающие при декогеренции, далеки от случайности. Грубо говоря, они имеют *ветвящуюся структуру*

Это сугубо квантовый аспект информации. В классической физике известный составной объект влечет известность каждой из его подсистем. Это не так в квантовой физике, где составные состояния являются тензорными (а не декартовыми) произведениями их составных частей. Таким образом, можно полностью знать квантовое состояние в целом, но ничего не знать о состояниях частей.

Квантовый дарвинизм не требует чистого состояния \mathcal{E} . Смешанное окружение представляет собой коммуникационный канал с шумом: его начальная энтропия h на бит может еще увеличиваться после взаимодействия с S , приводя к увеличению взаимной информации. Однако теперь бит, извлеченный из \mathcal{E} , дает только $(1 - h)$ бита относительно S .

Пригодность окружения в качестве канала зависит от того, имеется ли прямой и легкий доступ к записям системы. Это зависит от структуры и эволюции \mathcal{E} . Фотоны идеальны в этом отношении: они взаимодействуют с различными системами, но фактически не взаимодействуют друг с другом. Вот почему свет формирует наибольшую часть получаемой нами информации. Более того, фотоны испускаемые

обычными источниками (например, Солнцем), далеки от равновесия с нашим окружением. Таким образом, даже когда преобладает декогеренция за счет иного окружения (например, воздуха), фотоны гораздо лучше переносят информацию, которую они получают в процессе "мониторинга интересующей нас системы": молекулы воздуха рассеиваются друг на друге, так что любая запись, которую они могут сформировать, в действительности оказывается неразборчивой.

Стабильность уровня плато избыточности при H_S , даже для смешанного окружения ε , является убедительной причиной думать о нем как о "классическом". Вопрос, который мы теперь ставим, касается природы этой информации – что знает окружение о системе, и почему?

От копирования к квантовым переходам

Квантовый дарвинизм приводит к появлению в окружении множества копий состояния системы. Однако теорема о невозможности клонирования запрещает копирование неизвестных квантовых состояний. Но если клонирование невозможно, то как может быть возможной избыточность, показанная на рис. 4 ?

Быстрый ответ состоит в том, что клонирование подразумевает воспроизведение (неизвестных) квантовых *состояний*. Таким образом, копирование *наблюдаемых* не запрещено теоремой. И все же коллизия между запретом на клонирование и необходимостью в копировании возникает: она приводит к нарушению унитарной симметрии, требуемой принципом суперпозиции, учету квантовых переходов и возникновению "коллапса волнового пакета". Бор утверждал, что прибор классичен, так что унитарность и принцип суперпозиции не должны относиться к измерениям. Но это извинение, а не объяснение.

Предположим, что имеются состояния S , которые формируют отпечаток в подсистеме системы ε (оно играет роль прибора), но остаются невозмущенными (так что они могут производить больше отпечатков). Отсюда следует, что множественные (идеальные или неидеальные) копии могут быть запечатлены в непересекающихся фрагментах \mathcal{F} . Вследствие унитарности только наборы ортогональных состояний (которые определяют эрмитовы наблюдаемые) могут быть так скопированы, что объясняет отбор набора результатов – конечных точек квантовых переходов.

Это нарушение унитарной симметрии (выбор выделенных состояний среди равноправных векторов гильбертова пространства) индуцируется повторяемостью передачи информации. Это "нелинейная операция": как и при клонировании, речь идет о "двух (или более) образцах того же самого". Возникающий конфликт с линейностью квантовой теории может быть разрешен только *ограничением множества состояний, которые могут быть скопированы*. Такие векторы состояний могут при этом представлять собой "почки" для ветвей, которые растут путем репродуцирования в ε множества копий оригинала из S . Гамильтонианы взаимодействия *не возмущают* наблюдаемых, которые коммутируют с ними. Таким образом, почки ветвей соответствуют отбору векторов состояния, индуцированному окружением.

Почему же векторы состояний предпочтительны? Здравый смысл говорит, что для воспроизводимости состояние должно создавать копии. Это приводит к теореме о том, что только базисные векторы состояния могут быть обнаружены с помощью долей ε . Другие наблюдаемые могут быть выведены только благодаря тому, что они коррелируют с вектором наблюдаемой. Таким образом, фрагменты окружения

предлагают очень узкую, проекционную точку зрения. Отпечаток избыточности некоторых наблюдаемых возникает от многочисленности их дополнений.

Ссылки

[1] Wojciech Hubert Zurek. *Decoherence and the Transition from Quantum to Classical*. Los Alamos Science, Number 27, 2002. Рус. перевод: В. Зурек. Декогеренция и переход от квантового мира к классическому.

http://www.timeorigin21.narod.ru/rus_translation/Zurek.pdf

[2] Wojciech Hubert Zurek. Quantum Darwinism. <https://arxiv.org/pdf/0903.5082.pdf>