

КВАНТОВАЯ МЕХАНИКА В КОСМОЛОГИЧЕСКОМ АСПЕКТЕ

Обзор подготовил М.Х. Шульман (shulman@dol.ru)

Предисловие составителя

Как известно, в отличие от классической физики, квантовая механика дает только статистические предсказания для результатов измерений. Математически это обусловлено тем, что решением уравнения Шредингера являются не только частные решения, но и их суперпозиция. Правило Борна, дополняющее математику, устанавливает соответствие между весовыми коэффициентами при частных решениях и частотами наблюдения отдельных результатов.

Копенгагенская интерпретация квантовой механики молчаливо предполагает, что стохастическая интерпретация теории связана с возможностью многократного повторения идентичных экспериментов одним и тем же наблюдателем. Напротив, подход, который предложил Хью Эверетт, предполагает существование так называемого “многомирия”, т.е. построение ансамбля (в смысле Гиббса) из одновременных (и однократных) измерений, осуществляемых сразу в некотором множестве сходных между собой миров.

В последние годы появились работы, в которых концепция измерения оказывается еще более усложненной – речь идет уже не только о множестве измерений, но и множестве идентичных наблюдателей, что усложняет логику установления соответствия между теорией и результатами измерений. При этом квантовая механика рассматривается в космологическом аспекте.

Ниже приводится обзор трех публикаций из Архива за период 2009 – 2011 г.г.

1. Введение

Авторы работы [Aguirre, Tegmark and Layzer, 2010] пишут, что, хотя квантовая механика является, вероятно, наиболее успешной когда-либо созданной физической теорией, столетние дебаты по поводу того, как она вписывается в когерентную картину физического мира, не утихают. Предлагаемые решения так называемой проблемы измерения включают следующие интерпретации: Ансамблевую, Копенгагенскую, Инструментальную, Гидродинамическую, связанную с Сознанием, Бомовскую, Квантово-Логическую, Многомировую, связанную со Статистической Механикой, МногоРазумную, концепцию Совместных Историй, концепцию Объективного Коллапса, Транзакционную, Модальную, Экзистенциальную, Реляционную и интерпретацию

Монтевидео. Более того, различные сторонники отдельных интерпретаций часто расходятся в деталях определений. Действительно, согласия нет даже в том, какие из них могут быть названы интерпретациями.

Когда пытаются свести проблему измерения к несущественной, как чисто "философской", обсуждение связывается с другими направлениями развития физики, такими, как понимание важности и механизма декогеренции, экспериментальными исследованиями квантовых явлений в более крупных масштабах и развитие космологии.

Включение квантовой механики в космологический контекст создает новые возможности. Как можем мы применять постулат измерения к моментам времени, когда измерительный прибор – или, в некоторых интерпретациях, сознание – еще не существовал? Как можем мы расщеплять вселенную на систему и измерительный прибор, когда в качестве системы выступает вся вселенная в целом? А космология может оказаться переплетенной с квантовыми измерениями здесь-и-сейчас. В бесконечной вселенной наша наблюдаемая вселенная (сферическая область, свет из которой имел возможность достичь нас в течение 14 миллиардов лет) может оказаться как раз одной из таких областей, и даже одной из многих точных копий – и, в действительности, многие версии общепринятой стандартной инфляционной космологии предполагают подобный контекст, что мы и будем обсуждать.

2. Ревизия правила Борна для огромной Вселенной

Действительно, Дон Пэйдж недавно выдвинул утверждение [Page, 2009], что сама по себе квантовая теория и общеизвестное правило Борна не могут давать вероятности исходов для множественных реплик квантового эксперимента и, следовательно, должны быть усилены в космологическом сценарии, где такие реплики существуют. В традиционной квантовой теории вероятности наблюдательных результатов ("наблюдательных вероятностей") даются правилом Борна в виде математических ожиданий проекционных операторов. Представляется, что это хорошо работает в обычных лабораторных установках, где рассматриваются наблюдения со стороны специфического наблюдателя и известно, в каком квантовом состоянии он или она находится. Действительно, правило Борна работает, когда известно, квантовое состояние наблюдателя (например, квантовое состояние единственной конкретной лаборатории, а не вселенной в целом), так что мы имеем дело с определенными ортономированными проекционными операторами.

Однако правило Борна не работает во вселенной, которая может оказаться настолько большой, что в ней могут иметься копии наблюдателя в различных областях, поскольку тогда однозначно не известно, где находится наблюдатель, и тогда мы не располагаем определенными проекционными операторами для получения результата наблюдения. В этом случае правило Борна не является хорошо определенным.

Предположим, что пространство состоит из N различных областей, помеченных индексом L , $1 \leq L \leq N$, но при этом каждое наблюдение не определяет, в какой конкретно области L находится оператор. Если наблюдатели из разных областей могут получать различные результаты в разных областях, то копия наблюдателя в области L может получить результат наблюдения j , в то время как копия наблюдателя в области M может получить иной результат k . Тогда, если наблюдатель попытается использовать правило Борна для получения результата наблюдения j , этот результат может оказаться двузначным, поскольку наблюдатель не знает, в какой области L он или она находится.

Автор работы формализует постановку задачи и приводит полное доказательство несостоятельности правила Борна для такой ситуации. После этого им предлагается альтернативная процедура для построения усредненной матрицы плотности для случайной малой области и последующего вычисления наблюдательных вероятностей косвенно с помощью правила Борна как условных вероятностей, обусловленных фактом осуществления наблюдения. Он называет эту процедуру усреднением по объему в отличие от ранее рассмотренной им процедуры взвешивания по объему или “наблюдательного взвешивания” и считает ее более простой и естественной. В этой связи автор также отмечает, что проблема измерения в квантовой механике оказывается более сложной, чем кажется, она не может быть решена, даже если известно квантовое состояние вселенной.

3. Правило Борна – следствие космологического контекста

В свою очередь, авторы публикации [Aguirre, Tegmark and Layzer, 2010] исследуют проблему измерения в квантовой механике в контексте бесконечного, статистически однородного пространства, которое могло бы генерироваться в процессе вечной инфляции. Утверждается, что бесконечное пространство действительно делает излишним правило Борна вследствие физической реализации всех исходов квантового измерения в различных областях, с относительными частотами, даваемыми квадратами амплитуд волновой функции. Формальный аргумент авторов тесно связан со свойствами того, что они называют оператором квантовой неупорядоченности (confusion), который проецируется на гильбертово подпространство, где правило Борна нарушается; комментируется его отношение к часто обсуждаемому оператору квантовой частоты. Этот анализ объединяет классический и квантовый уровни параллельных вселенных, которые обсуждались в литературе, и влечет некоторые следствия в теории квантовых измерений. Замена стандартного гипотетического ансамбля бесконечно повторяющихся измерений на конкретный декогерированный набор экспериментов, происходящих в различных удаленных областях пространства, создает естественный контекст для статистической интерпретации квантовой механики. Это также показывает, как, даже при единичном измерении, вероятности могут быть интерпретированы в качестве

относительных частот в унитарной (эвереттовской) квантовой механике. Кроме того, утверждается, что после отбрасывания части волновой функции с нулевой нормой (zero-norm) оставшаяся часть состоит из суперпозиции неразличимых членов, так что провозглашаемый "коллапс" волновой функции оказывается несущественным, и "множество миров" в интерпретации Эверетта объединяется в один. В конечном счете, анализ авторов дает "космологическую интерпретацию" квантовой теории, в которой волновая функция описывает действительный пространственный набор идентичных квантовых систем, а квантовая неопределенность приписывается неспособности наблюдателей установить собственное местонахождение в этом наборе.

Целью статьи этих авторов является показать, что космология может и должна быть согласована с квантовой проблемой измерения. Более того, космология является не просто частью этой проблемы, но также и частью ее решения. Пэйдж в основном показал, что для того, чтобы вычислить вероятность данного исхода измерения в наборе из N идентичных экспериментов, необходимо дополнить стандартное правило Борна, устанавливающее вероятности для различных исходов измерения и основанное на проекционных операторах, правилом, которое приписывает равные вероятности каждому из событий "эксперимент был выполнен k -ым наблюдателем, где $k = 1, \dots, N$ ". Авторы идут дальше и высказывают утверждение, что если отождествить вероятности с относительными частотами исходов эксперимента в трехмерном пространстве, то постулат измерения (правило Борна) становится излишним, поскольку он возникает непосредственно из формализма квантового гильбертова пространства и равноправия всех членов бесконечного набора точных реплик. Это внутренне связано с результатами для классического оператора частоты, за исключением того, что воображаемая бесконечная последовательность идентичных измерений заменяется действительно существующим пространственным набором.

Такая потенциальная космологическая связь между вероятностями в квантовой механике и относительными частотами для фактических наблюдателей значима для большинства вышеупомянутых квантовых интерпретаций. Это, в частности, представляет интерес для МногоМировой Интерпретации Эверетта (ММИЭ), для которой показывается, что она устраняет озадачивающее свойство: согласно ему, грубо говоря, некоторые наблюдатели "более равны", чем прочие. Именно, предположим, что измерение спина, которое должно дать результат "вверх" с вероятностью $p=0.5$, повторяется $N=10$ раз. Согласно ММИЭ, окончательная волновая функция имеет $2N=1024$ членов, каждый отвечает одинаково реальному наблюдателю, большинство которых измерял кажущуюся случайной последовательность результатов "вверх" и "вниз". Это предполагает, что квантовые вероятности могут быть заданы простой частотной интерпретацией. Однако для случая неравных вероятностей, таких, как $p=0.001$, окончательная волновая функция все еще имеет $2N$ членов,

отвечающих реальным наблюдателям, но теперь большинство из них измеряют приблизительно 50% значений спина "вверх" и заключают, что правило Борна неверно. (Предполагается, что все еще как-то совместимо, потому что наблюдатели с меньшей амплитудой волновой функции в некотором смысле "менее реальны".) Показывается, что в пространственно бесконечной инфляционной вселенной вероятности могут быть заданы частотной интерпретацией даже в этом случае.

4. Квантовое многомирие и космологический мультиверс – это одно и то же.

В работе [Bousso and Susskind, 2011] ее авторы пишут: согласно старой точке зрения на квантовую механику, объективные явления происходят лишь тогда, когда выполнено наблюдение, и в результате произошел коллапс волновой функции. Более современная точка зрения связана с понятием декогеренции, обязанной влиянию неконтролируемого окружения, которое становится запутанным с интересующей нас системой (включая наблюдателя). Но в какой именно точке виртуальная реальность, описываемая квантовомеханической волновой функцией, становится объективной реальностью?

Этот вопрос не является философским. Без точного описания декогеренции нельзя утверждать, что что-либо реально “произошло”, включая конкретные результаты экспериментов. А без способности к причинно обусловленному доступу к бесконечному числу строго декогерированных исходов нельзя надежно верифицировать вероятностные предсказания квантовомеханической теории.

Целью настоящей статьи является показать, что указанные вопросы могут быть решены с помощью космологии. Предлагаются некоторые принципы, которые, по мысли авторов, являются необходимыми для непротиворечивого понимания квантовой механики; они показывают, что непрерывная инфляция – это всего лишь космология, удовлетворяющая этим принципам. Имеется две точки зрения на непрерывную инфляцию мультиверса: глобальная (или параллельная) и, в противовес этому, локальная (или последовательная). Параллельный подход рассматривает все иерархическое дерево целиком, все его ветви и отростки одновременно. Последовательная точка зрения – это то, что видит насекомое, ползущее от основания дерева к конкретному отростку при путешествии по конкретному маршруту.

В рамках обеих многомировых интерпретаций квантовой механики и мультиверса с вечной инфляцией мир рассматривается как безграничная коллекция параллельных вселенных. Точка зрения, выраженная в прошлом каждым из авторов, состоит в том, что нет необходимости добавлять дополнительный слой параллелизма к мультиверсу для интерпретации квантовой механики. Говоря кратко, многомирие и мультиверс – это одно и то же.

Декогеренция объясняет, почему наблюдатели экспериментально не

обнаруживают суперпозиции макроскопически различных квантовых состояний, например, кошки в состоянии суперпозиции жизни и смерти. Ключевой подход заключается в том, что макроскопические объекты стремятся к быстрому запутыванию с большим числом степеней свободы “окружения” E , например, с тепловыми фотонами. На практике эти степени свободы не могут подвергаться мониторингу со стороны наблюдателя. Всякий раз, когда подсистема E не подвергается мониторингу, все значения математических ожиданий ведут себя так, как если бы остальная система описывалась матрицей плотности с частичным следом в гильбертовом пространстве для E . Матрица плотности будет диагональной в выделенном базисе, определяемом природой взаимодействия с окружением.

В качестве примера рассмотрим изолированную квантовую систему S с двумерным гильбертовым пространством и общем состоянии $a|0\rangle_S + b|1\rangle_S$.

Предположим, что измерение осуществляется в маленькой области пространства-времени, которую мы можем идеализированно считать событием M . Это означает, что в точке M система S взаимодействует и становится коррелированной с вектором состояния прибора A :

$$(a|0\rangle_S + b|1\rangle_S) \otimes |0\rangle_A \rightarrow a|0\rangle_S \otimes |0\rangle_A + b|1\rangle_S \otimes |1\rangle_A$$

Этот процесс является унитарным и называется пред-измерением.

Предполагается, что прибор не является замкнутой системой (так оно и есть в случае реального макроскопического прибора). Таким образом, степени свободы E запутываются с прибором. В силу унитарности система SAE в целом остается в чистом квантовом состоянии.

Декогеренция объясняет “коллапс волновой функции” в Копенгагенской интерпретации как неунитарную эволюцию из чистого состояния в смешанное, возникающее вследствие отсутствия информации о запутанной подсистеме E . Она также объясняет очень специфические квантовые состояния макроскопических объектов, с которыми мы имеем дело, как элементы базиса, в котором матрица плотности ρ_{SA} является диагональной. Этот выделенный базис и воспринимается прибором, который переводит окружение в ортогональные состояния. Поскольку взаимодействия обычно локальны в пространстве, ρ_{SA} будет диагональной в базисе, состоящем из приближенных положений собственных состояний пространства. Это объясняет, почему мы воспринимаем базисные состояния прибора, но никогда не воспринимаем столь же реальные состояния его суперпозиции.

Запутанные состояния, полученные после пред-измерения, представляют собой суперпозицию двух незапутанных чистых состояний, или “ветвей”. В каждой ветви наблюдатель видит определенный исход измерения: $|0\rangle$ или $|1\rangle$. Это само по себе не объясняет, однако, почему определенный результат можно увидеть в базисе $\{|0\rangle, |1\rangle\}$, а не в базисе $\{|+\rangle, |-\rangle\}$. Поскольку разложение по базису неединственно, взаимодействие с недоступным окружением и результирующая матрица плотности существенны для отбора предпочтительного базиса макроскопических состояний.

Декогеренция имеет два важных ограничения: она субъективна и, в принципе, обратима. Это является проблемой, если мы используем ее для точных проверок квантовомеханических предсказаний. В главе 2 (“Построение мультиверса из многомирия ромбов причинности”) статьи показывается, что ромбы причинности дают естественное определение окружения в мультиверсе, и это приводит к понятию независимых от наблюдателя историй декогеренции. В главе 3 (“Многомирие счетчика”) показывается, что эти истории имеют точные, необратимые образы в “шапках” мультиверса.

В главе 2 изучается первое ограничение декогеренции, ее субъективность. Поскольку когерентность никогда не утрачивается в полном гильбертовом пространстве SAE, то скорость, объем и возможные результаты декогеренции зависят от определения окружения E. Этот выбор неявно делается наблюдателем на основании практических обстоятельств: окружение состоит из степеней свободы, которые могут стать запутанными с системой и прибором, но остаются ненаблюдаемыми. Например, нереально сохранить след каждого теплового фотона, испущенного столом, при всех его взаимодействиях со светом и частицами воздуха, и т.п. Но если бы мы сделали это, то мы должны были установить, что система SAE в целом ведет себя как чистое состояние $|\psi\rangle$, которое может представлять собой “состояние кошки”, включающее суперпозицию макроскопически различных конфигураций материи. Таким образом, декогеренция возникает из описания мира наблюдателем, имеющим доступ только к подсистеме. Следовательно, декогеренция является субъективной.

Субъективность декогеренции не представляет проблемы, когда нам требуется объяснить свой собственный опыт, т.е. когда наблюдатель погружен в гораздо большую, чем он, систему. Но это подразумевает, что декогеренция не может происходить при полностью унитарном описании

вселенной в целом. Возможно, что для нашей вселенной и не существует такого описания.

В разделе 2.1 показывается, однако, что причинность накладывает ограничения на декогеренцию в гораздо меньших областях, в которых применимость унитарной квантовомеханической эволюции представляется несомненной.

В разделе 2.2 наш анализ декогеренции и причинности применяется к непрерывной инфляции. Он приводит к ясному, но, возможно, неожиданному следствию: в глобальном описании непрерывно инфлирующего пространства-времени декогеренция осуществляться не может; таким образом, нельзя представить себе, что локальные вселенные или вакуумные пузыри возникали в локальных областях пространства и времени.

В разделе 2.3 обсуждается ряд подходов к восстановлению унитарного глобального описания и делается вывод, что они не состоятельны.

В разделе 2.4 дается обзор описания на основе “ромба причинности” мультиверса. Ромб причинности – наибольшая область пространства-времени, которая может быть экспериментально доступна, и можно думать о нем как световом конусе прошлого, начинающемся в точке на конформной границе будущего. Утверждается, что описание на основе ромба причинности приводит к естественному, не зависящему от наблюдателя выбору окружения: поскольку его границы светоподобны, он действует подобно полупроницаемой мембране, а степени свободы, покидающие этот ромб, не возвращаются, исключая весьма специальные случаи. Эти степени свободы могут быть прослежены, что приводит к разветвляющемуся дереву историй для ромба причинности.

Далее следует переход к вопросу о том, может ли глобальная картина мультиверса быть восстановлена из декогерентных ромбов причинности. В разделе 2.5 рассматривается известный дуализм между ромбом причинности и частной структурой ветвей в глобальной геометрии, известной как световой конус времени: в обоих случаях получаются те же вероятности.

Этот дуализм является стартовой точкой для стандартного глобального представления, но в разделе 2.6 она заново реинтерпретируется как способ реконструкции глобальной точки зрения на основе локальной. Истории причинного ромба образуют многомирие, такая конструкция показывает, что мультиверс представляет собой многомирие, систематизированное в рамках

одной геометрии.

В главе 3 речь идет о втором ограничении, связанным с декогеренцией, ее обратимостью. Рассмотрим ромб причинности с конечной максимальной границей A_{\max} . Границы энтропии влекут то, что такие ромбы могут быть описаны гильбертовым пространством конечной размерности не более, чем $\exp(A_{\max}/2)$. Это означает, что в таких ромбах не может быть наблюдаемых, определенных с бесконечной точностью.

В разделах 3.1 и 3.2 обсуждается другое требование этой конечности: имеется небольшая, но ненулевая вероятность того, что декогеренция будет незавершенной. Это означает, что декогерентные истории ромбов причинности и реконструкция глобального пространства-времени из таких ромбов не являются вполне точными. Не важно, насколько точным является приближение, важно понимать, что оно таковым является. В разделе 3.3 развиваются два постулата, которые должны удовлетворяться в фундаментальной квантовомеханической теории, если декогеренция оказывается заметной, а ассоциированные вероятности – операционально значимыми: декогеренция должна быть необратимой, и она должна осуществляться бесконечно много раз для заданного эксперимента в одной причинно связанной области.

Струнный ландшафт содержит суперсимметричные вакуумы с точно исчезающей космологической постоянной. Ромбы причинности, входящие в такие вакуумы, обладают бесконечной граничной областью для больших времен. В разделе 3.4 показано, что в таких областях – “шапках” все предложенные постулаты могут быть удовлетворены. Точные наблюдаемые могут существовать, а декогеренция на основе механизма, описанного в разделе 2.4, может быть действительно необратимой. Более того, поскольку такие шапки являются пространственно открытыми, статистически однородными вселенными, все, что происходит в шапке, будет происходить бесконечно много раз.

В разделе 3.5 дается обзор дополнительности черных дыр и выдвигается гипотеза относительно аналогичной “дополнительности шапок” для мультиверса. Из нее следует, что приближенные наблюдаемые и приближенная декогеренция ромбов причинности с конечной областью (раздел 2.4) имеет точные аналоги в шапке. В разделе 3.6 предлагается соотношение между глобальной реконструкцией мультиверса раздела 2.6 и обрезанием счетчика (Census Taker cutoff) на геометрии шапки.

Недавно появились две интересные статьи ([Aguirre, Tegmark and Layzer, 2010], [Nomura, 2011]), устанавливающие отношения между многомировой интерпретацией и мультиверсом. Настоящая работа существенно отличается от них рядом аспектов. Среди таких отличий – представление о том, что ромбы причинности предполагают предпочтительное окружение для декогеренции; видение глобального мультиверса как мозаики декогерентных ромбов причинности; постулаты, требующие необратимого запутывания и бесконечного повторения; роль, которая отводится областям-шапкам мультиверса.

Ссылки

[Aguirre, Tegmark and Layzer, 2010] Anthony Aguirre, Max Tegmark and David Layzer. Born in an Infinite Universe: a Cosmological Interpretation of Quantum Mechanics arXiv:1008.1066v1 [quant-ph] 5 Aug 2010

[Bousso and Susskind, 2011] Raphael Bousso and Leonard Susskind. The Multiverse Interpretation of Quantum Mechanics. ArXiv:1105.3796v1 [hep-th] 19 May 2011

[Nomura, 2011] Y. Nomura. Physical Theories, Eternal Inflation, and Quantum Universe". ArXiv:1104.2324 [hep-th].

[Page, 2009] Don N. Page. Born Again. ArXiv:0907.4152v1 [hep-th] 23 Jul 2009

Поступил 27.05.2011