

Мюррей Геллман
ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ИСТОЧНИКИ НЕПРЕДСКАЗУЕМОСТИ

(FUNDAMENTAL SOURCES OF UNPREDICTABILITY)

Murray Gell-Mann

Santa Fe Institute, 1399 Hyde Park Road, Santa Fe, NM 87501

and

Theory Division Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM 87545

and

Department of Physics and Astronomy, University of New Mexico, Albuquerque, NM 87131

Выступление на конференции с одноименным названием в Santa Fe Institute, март 1996

При обсуждении фундаментальных источников непредсказуемости я сконцентрируюсь на тех неопределенностях, которые обязательно возникают в теории. Позвольте мне поэтому сразу исключить из рассмотрения предполагаемые неопределенности, возникающие вследствие неясностей, которые некоторые люди допускают в отношении основных принципов, или некоторой неосведомленности, которую я считаю временной и подлежащей устранению в относительно близком будущем. Мои предположения таковы:

1) Квантовая механика верна. Формулировка и интерпретация квантовой механики еще требуют некоторого развития, особенно в части приведения квантовой космологии в подходящий вид, но основной характер квантовой механики, как мы надеемся, не изменится.

2) Элементарные частицы и их взаимодействие подчиняются определенному динамическому закону, открываемому такой сложной и пытливой адаптивной системой, как человеческое научное исследовательское сообщество. Хотя процесс познания порождает последовательность приближенных схем, имеется конечная точка этого процесса, достижимая после конечного числа шагов исследования. (Разумеется, никогда не удастся доказать, что результирующая объединенная теория совершенна; можно только проверять ее традиционным образом, сравнивая ее предсказания с доступными наблюдениями.) Быть может, человечество уже открыло эту объединенную квантовую теорию в виде теории суперструн, в которой используются, для начала, конкретные параметры. (Разумеется, нарушение спонтанной симметрии может изменить некоторые параметры и даже повлиять на выбор решений, с вероятностями для различных альтернатив. Я рассмотрю эту возможность далее.) Второе предположение эквивалентно утверждению, что нет необходимости в фундаментальной непредсказуемости, вызванной незнанием универсального динамического закона.

3) Матрица плотности (в шредингеровском представлении) Вселенной вблизи начала ее расширения также познаваема. В некоторых случаях она должна быть сравнительно проста и далека от равновесия. Второй закон термодинамики и другие ассоциированные стрелы времени объясняются этими свойствами начальной матрицы плотности в соответствии с фактом, что Вселенная еще очень молода – период в десять миллиардов лет крайне мал в сравнении с временем релаксации, вытекающим из специальных начальных условий.

Hartle и Hawking предложили остроумную версию чистого состояния для матрицы плотности, такую, что волновая функция в принципе является вычислимой из функционала действия фундаментальной динамической теории – при этом два основных закона физики сливаются в один. Другая возможность указана в работе Линде и др., а именно – что Вселенная возникла и затем отделилась от большей системы (которую я называю мультивселенная – multiverse) подобно пузырьку, одному из большого числа ему подобных. Тогда матрица плотности не должна быть чистой, а содержать вероятности, отвечающие статистике таких пузырьков, но она все же должна иметь простой вид. Здесь “простой” означает выразимый с помощью краткой формулы [1,2,3] в терминах фундаментальных полей, зависящих от времени.

Вернемся к обещанному кандидату на роль фундаментального динамического закона для всей материи. Теория суперструн в течение нескольких лет мыслилась в некоторых различных и

взаимно исключаящих формах, из которых “гетеротическая” казалась наиболее согласующейся с природой вещей. Однако сейчас выясняется, что все различные формы взаимосвязаны.

Кроме того, гетеротическая форма, исследованная в простом приближении, порождает много различных решений, отвечающих различной пространственной размерности, различным наборам элементарных частиц и/или различным взаимодействиям множества частиц. Многие такие решения могут оказаться ложными при улучшении приближения, но что если множественность решений все же останется? Создается впечатление, что если все они будут взаимосвязаны, как взаимосвязаны различные формы теории, то это будет напоминать соотношения для фаз в теории конденсированной материи.

Если действительно имеются множественные решения, равно как и множественные формы теории, все представляющие один и тот же основной закон, что определяет “фазу”, которая характеризует нашу Вселенную? Можно представить себе принцип, который определяет этот выбор, скажем, принцип наименьшего S , где S обозначает квантово-скорректированное, “евклидизированное” действие. Другая возможность отвечает вероятностной ситуации, в которой вес частного решения пропорционален $\exp(-2S)$. Тогда решение с наименьшим значением S окажется наиболее вероятным, но не единственно возможным [1]. Эти веса, или первичные вероятности, должны быть преобразованы в статистические вероятности, если наша Вселенная на самом деле является мультивселенной, содержащей огромное число практически независимых вселенных. Если же нет, то мы все еще можем вообразить себе такую мультивселенную как математическую абстракцию, позволяющую говорить о вероятности в связи с нашей Вселенной.

Предположим, что мы знаем два основных закона, управляющих поведением всей материи. Что тогда? Можем ли мы, в принципе, предсказать историю Вселенной? Конечно, нет. Потому что законы физики являются квантово-механическими, предсказание ограничено вероятностями для альтернативных историй Вселенной. Эти ограничения идут дальше, чем те, которые вытекают из знакомого, но более тривиального принципа неопределенности Гейзенберга. Чтобы оценить эти ограничения, мы должны описать подход к квантовой механике, связанный с декогерентными историями и развитый James Hartle и мной [4,5,6]. Наш подход может рассматриваться как часть усилий, предпринятых рядом физиков-теоретиков для построения современной интерпретации квантовой механики, которая была бы совместима с квантовой космологией и убедительно объясняла бы, как квазиклассический мир привычного опыта возникает в квантовой Вселенной. Вот некоторые из авторов, образующих данное направление: R. Omn's, R. Griffiths, D. Zeh, W. Zurek, J. P. Paz, C. Isham и N. Linden.

Рассмотренное с наиболее общей точки зрения, относящейся ко Вселенной в целом (это необходимо для совместимости с квантовой космологией), это приложение квантовой механики всегда связано с историями, поскольку предсказание вероятностей будущих событий всегда являются объектом причинно-следственных предположений или пост-фактумных предположений о том, что некоторые вещи уже произошли – вещи, которые имеют смысл, только если другие вещи произошли еще раньше, и так далее.

Очень важное преимущество метода декогерентных историй состоит в том, что он дает возможность сформулировать квантовую механику в ясном виде, согласующемся с требованиями общей теории относительности. Правильная объединенная квантовая теория поля должна, разумеется, включать квантованную эйнштейнову гравитацию. Теория суперструн делает это. Действительно, она в соответствующем приближении предсказывает общерелятивистскую теорию гравитации с включением квантовой механики. Более того, в ней отсутствуют абсурдные бесконечные поправки в теории возмущений, которые омрачали предшествующие попытки встроить гравитацию в квантовую теорию поля.

Разумеется, еще имеется та несомненная трудность, что квантовая механика обычно формулируется в терминах временной последовательности пространственно-подобных поверхностей, что затрудняет определение для случая квантованной метрики пространства-времени. Проблема с обычной формулировкой даже еще серьезнее, когда топология евклидизированного пространства-времени меняется вследствие квантовых флуктуаций. К счастью, Hartle [7] было показано, что наш подход может быть использован для построения не

очень значительного обобщения квантовой механики, в котором квантованная метрика не вызывает трудностей. Из чего следует, если из соображений простоты пренебречь сложностями, связанными с требованиями общей теории относительности, и работать с приближением, где мы имеем дело с традиционным гильбертовым пространством, обычная переменная времени и Гамильтониан.

Более того, исходя из интерпретации квантовой механики на основе декогерентных историй, давайте введем упрощающее предположение о чистой матрице плотности ρ для Вселенной в гейзенберговском представлении (которое отвечает начальной матрице плотности в представлении Шредингера), так что

$$\rho = |Y\rangle\langle Y|, \quad (1)$$

как в случае, рассмотренном Hartle и Hawking.

Вероятности входят только потому, что $|Y\rangle$ сравнивается с состояниями, представляющими альтернативные истории a . Модуль квадрата скалярного произведения $|Y\rangle$ на каждое из этих (нормализованных) состояний пропорционально вероятности соответствующей истории.

Не сильно теряя в общности, мы можем сконструировать состояния, представляющие истории через последовательности проекционных операторов в последовательные моменты времени t_1, t_2 , и т.д. В каждый момент t_k мы имеем множество взаимно исключающих и в совокупности полных альтернатив a_k , которые могут зависеть от предшествующих альтернатив, в согласии с принципом причинности. Обозначим проекционные операторы для моментов t_k через $P(a_k; a_{k-1} \dots a_2 a_1)$. Состояние, соответствующее истории $a = a_1 a_2 a_3 a_4$, тогда будет пропорционально $C_a |Y\rangle$, где

$$C_a = P(a_n; a_{n-1} \dots a_2 a_1) P(a_{n-1}; a_{n-2} \dots a_2 a_1) \dots P(a_2; a_1). \quad (2)$$

Поскольку альтернативы в каждый момент t_k являются взаимно исключающими и в совокупности полными, то мы имеем

$$P(a_k; a_{k-1} \dots a_2 a_1) P(a'_k; a_{k-1} \dots a_2 a_1) = d(a_k, a'_k) P(a_k; a_{k-1} \dots a_2 a_1) \quad (3)$$

и

$$\sum_a P(a_k; a_{k-1} \dots a_2 a_1) = I, \quad (4)$$

где I – единичный оператор. В результате получаем

$$\sum_a C_a = I, \quad (5)$$

так что

$$|Y\rangle = \sum_a C_a |Y\rangle. \quad (6)$$

Для вероятностей, сопоставленных историям a , не должно быть каких либо интерференционных членов между ними, поскольку вероятность истории a или истории b равна сумме вероятностей обеих историй a и b . Множество историй без интерференционных членов назовем декогерентным множеством. Бывают различные степени декогеренции, но для простоты будем работать главным образом с тем, что мы называем средней декогеренцией, при которой все различные состояния $C_a |Y\rangle$ взаимно ортогональны. Нормой для каждого из этих (ненормализованных) состояний является его вероятность.

За исключением тривиальных случаев, множества с мелкозернистыми историями не декогерентны, тогда как истории a в декогерентном множестве должны быть крупнозернистыми. По определению, множество мелкозернистых историй должно характеризоваться значениями полного набора переменных в каждый момент времени. Например, в нерелятивистской квантовой механике без спина координаты и импульсы всех частиц могут быть заданы в любой момент времени. (Принцип неопределенности Гейзенберга делает невозможным, разумеется, точное определение и координаты, и импульса для одной и той же частицы в один и тот же

момент времени.) Крупнозернистые истории могут рассматриваться как связи мелкозернистых историй, в которых, например, все времена, за исключением образующих некоторый дискретный набор, устраняются путем суммирования по проекциям всех значений всех переменных для всех моментов времени, не входящих в этот дискретный набор. В остающиеся дискретные моменты времени проекции всех значений многих переменных суммируются. Остающиеся проекционные операторы в дискретные моменты времени должны осуществлять проектирование на диапазоны значений тех переменных (в соответствующие времена), проекции которых не суммировались. (В недавней статье [6] Hartle и я показали, что вместо средней декогеренции требуется значительно более сильная форма декогеренции, влекущая значительно более крупную зернистость историй.)

Мы определяем область (realm) как полный набор альтернативных декогерентных крупнозернистых историй. Мы называем ее квазиклассической областью, если проекционный оператор стремится, в крупном масштабе времени, находиться в подобных диапазонах значений подобных операторов (т.е., грубо говоря, отвечает перемещению во времени) и подчиняется с высокой вероятностью детерминистическим законам поведения во времени, варьируясь с некоторой частотой вследствие малых флуктуаций и случайных значительных ветвлений (major branchings).

Слово “ветвление (branching)” используется как метафора для дерева возможных крупнозернистых декогерентных историй; имеется в виду ветвление вперед по течению времени, с вероятностями для различных альтернатив при каждом ветвлении. Разумеется, реально осуществляющиеся в этой Вселенной события дают только одну из альтернатив при каждом ветвлении, непредсказуемую иначе, чем в вероятностном смысле. Когда какая-либо из них осуществилась, и ее результат проявился, то эти вероятности “коллапсируют” к единице и нулю. Когда мы имеем дело с декогерентными историями, речь идет не о таинственном “коллапсе” волновой функции, а всего лишь о хорошо знакомом коллапсе вероятностей, который происходит на скаковой дорожке, когда мы видим, какая лошадь победила на скачках.

Максимальная квазиклассическая область есть максимально мелкозернистый объект декогеренции и квазиклассичности. Квазиклассическая область повседневного опыта есть крупнозернистый фрагмент частичной максимальной квазиклассической области, который мы можем описать в терминах проекций в диапазоны значений так называемых гидродинамических переменных. Эти переменные определяются следующим образом. Для каждого из наборов дискретных времен мы рассматриваем множество сохраняющихся величин, таких, как плотность импульса, плотность энергии и плотность электрического заряда, и почти сохраняющихся величин, таких, как плотность ядерных зарядов, плотность дислокаций и т.д.. Эти величины интегрируются по малым объемам, вполне достаточным для обеспечения инерционности и устойчивости по отношению к большинству флуктуаций, но достаточно малым для сохранения приблизительного внутреннего равновесия. Диапазоны значений этих величин и интервалы времени корректируются с учетом декогеренции, квазиклассичности и максимальной.

Очевидно, существует много возможных вариаций относительно деталей описания этой обычной максимальной квазиклассической области, но, по-видимому, эти детали не имеют слишком большого значения, так что в основном мы приходим к описанию одного множества крупнозернистых историй. Каждая сложная адаптивная система, которая нам известна, эволюционировала с использованием некоторого крупнозернистого фрагмента этой области. Заманчиво порассуждать об этих и других в целом различных квазиклассических областях, о которых говорит теория, когда те или иные сложные адаптивные системы могут эволюционировать с их использованием, но оставим это для других. В некоторых случаях вероятности и операторы для событий имеют смысл только для данной области.

Что является критическим при исследовании фундаментальных источников непредсказуемости, так это то обстоятельство, что некоторая сложная адаптивная система [1,2], (включая структурированную сложную адаптивную систему, подобную человеческому научному сообществу), использует чрезвычайно крупнозернистый фрагмент максимальной квазиклассической области. Для описания такой сложной адаптивной системы, как наблюдатель, мы используем термин IGUS (information gathering and utilizing system - система накопления и использования информации). Большинство переменных во Вселенной недоступно для IGUS, с

учетом того, что они удалены или скрыты в недоступных местах, таких, как внутренние части далеких звезд, или связаны с масштабами слишком мелкими, чтобы выполнить нужные измерения. Таким образом, по мере раскрытия максимального множества историй, в процессе невообразимо длительной последовательности событий с вероятностными исходами, большинство информации об этих реально осуществившихся исходах (или, на языке специальной теории относительности, произошедших в световом конусе прошлого) остается неизвестным для IGUS и недоступным для использования с целью предсказаний. Такая информация должна быть просуммирована, в результате чего эта реальная область, используемая IGUS, действительно оказывается очень крупнозернистой по отношению к прошлому, и, разумеется, подобное рассмотрение применяется по отношению к будущему. (Примером такой крупнозернистости является статистическая механика.)

Незнание как источник непредсказуемости было осознано сотни лет назад, если не более. В данной дискуссии мы только отметим неизбежную неполноту информации в контексте квантовой механики.

Все неопределенности, которые мы обсудили, возрастают вследствие механизмов усиления. Такие механизмы ответственны за связь событий на квантовом уровне с квазиклассическими историями. Рассмотрим измерительные ситуации типа опыта Штерна-Герлаха, где атом соды с валентным электроном, имеющим проекцию спина “вверх”, воздействует на некоторое зерно фотопленки так, что оно должен давать иное зерно изображения, нежели в случае спина, направленного “вниз”. Здесь квантовая переменная коррелирует непосредственно с ветвлением в квазиклассической истории. Это верно независимо от того, наблюдал ли человек (или шиншилла, или таракан) результат или нет. Имеются, разумеется, много естественных ситуаций, не зависящих от бытия человечества, при которых события в атомных или субатомных масштабах приводят к ветвлению в квазиклассической области. Например, распад радиоактивного ядра в пластинке слюды может породить длинный и устойчивый след, фиксирующий направление распада, равно как и сам факт этого события. Это явление является основным инструментом при изучении цепных реакций деления.

Важным источником усиления является хаос, широко распространенный в нелинейных системах. В классическом понимании этот термин обозначает случаи, когда результат процесса чувствителен к мельчайшим деталям на входе, в смысле взаимной расходимости классических орбит, которая характеризуется экспоненциальной зависимостью от времени. Хаос в квантовой механике является более хрупким, но он может приводить к усилению квантовых флуктуаций таким образом, что они оказывают реальное влияние на квазиклассическую историю. Наиболее очевидным проявлением хаоса является, однако, гигантское усиление эффекта неопределенности первоначальных данных (включая влияние ошибок измерения).

Теперь, в дополнение ко всему, что мы раньше обсуждали, мы должны поговорить о результатах вычислений. Сложность расчетов может стать источником непредсказуемости. Предположим, мы имеем теорию и максимальную крупнозернистую область – для прошлого и настоящего – в согласии с информацией, которая может быть доступна для IGUS (с учетом возможных погрешностей измерения). Тогда существует время t_k и определенный набор вероятностей для полностью крупнозернистых будущих историй. Но возможно ли вычисление этих вероятностей? Очевидно, в настоящее время – практически нет, из-за невозможно учесть гигантское число дальнейших крупных зерен. Вероятно, с течением времени вычислительная техника получит дальнейшее развитие, и мы сможем прогрессирующим образом редуцировать этот фактор, связанный с крупнозернистостью. Но позволит ли это решить проблему в принципе? Даже если мы изучаем случаи степеней свободы с высокой инерцией, например, орбиты массивных объектов, где классическая физика применима с замечательной точностью, не очевидно, что точные предсказания на очень протяженные периоды времени являются принципиально разрешимой проблемой из-за наличия классического хаоса. Следовательно, возможно, что вопросы вычислимости всегда будут в принципе обсуждаться с учетом требований к дополнительным крупным зернам, ограничивающим точность вычисления вероятностей.

Резюмируя, мы предполагаем, что фундаментальная теория материи и начальные условия для Вселенной просты и познаваемы, а квантовая механика - верна, исключая некоторые обобщения. Тогда фундаментальные источники непредсказуемости могут быть следующими:

- 1) Возможная неопределенность начальных условий для Вселенной, если ее состояние не является чистым.
- 2) Возможная неопределенность выбора решений фундаментальной теории (для данной Вселенной), если выбор является вероятностным.
- 3) Крупная дискретизация, требуемая моделью декогеренции историй в максимальной области, скажем, обычная максимальная квазиклассическая область. (Декогеренция должна быть сильной, влекущей экстра-крупную дискретизацию.) Сюда автоматически включается принцип неопределенности.
- 4) Вероятностный характер всех ветвлений в этой области в будущем.
- 5) Огромное количество дополнительных крупных кластеров, вытекающее из неизбежного незнания части некоторых данных IGUS относительно результатов большого числа ветвлений в прошлом.
- 6) Еще большая дискретизация, необходимая при практических вычислениях на имеющихся компьютерных средствах.
- 7) Ограничения, связанные с доступной точностью вычислений на имеющихся компьютерных средствах.

Мы также обсудили *увеличение* неопределенности за счет механизмов усиления, включая хаос.

Теперь можно рассмотреть пункты 1) и 2), если они присутствуют, как представляющие начальные события в этой Вселенной наравне со всеми вытекающими из них событиями. Будем придерживаться такой точки зрения. Тогда мы можем сказать, что история Вселенной совместно определяется основными законами (динамической теорией всей материи и начальными условиями для Вселенной) и последствиями невообразимо длительной цепочки событий, и мы можем принять в качестве фундаментальных источников непредсказуемости:

- a) Крупномасштабную дискретизацию, необходимую для максимальной области, скажем, обычной максимальной квазиклассической области, со всеми ее событиями.
- b) Вероятностный характер всех событий (ветвлений) в этой области в будущем.
- c) Незнание части некоторых данных IGUS относительно результатов большинства уже произошедших событий наряду с возрастанием непредсказуемости результатов за счет механизмов усиления.
- d) Приближения и ограничения точности, вносимые за счет использования доступных вычислительных средств.

ССЫЛКИ

1. Murray Gell-Mann, *The Quark and the Jaguar*, W. H. Freeman, New York, 1994.
2. Murray Gell-Mann, *Complexity* 1/1, 16-19, (1995).
3. Murray Gell-Mann and Seth Lloyd, *Complexity*, 2/1, 44-52, (1996).
4. Murray Gell-Mann and James B. Hartle, 'Quantum Mechanics in the Light of Quantum Cosmology,' in *Complexity, Entropy, and the Physics of Information*, SFI Studies in the Sciences of Complexity, Vol. VIII, ed. by W. Zurek, Addison-Wesley, Reading, MA, 1990.
5. Murray Gell-Mann and James B. Hartle, *Phys. Rev. D*, 47, 3345 (1993).
6. Murray Gell-Mann and James B. Hartle, 'Strong Decoherence,' in *Proceedings of the 4th Drexel Symposium on Quantum Non-Integrability -- The Quantum-Classical Correspondence*, 1994, D.-H. Feng, ed., in press.
7. James B. Hartle, 'The Quantum Mechanics of Cosmology,' in *Quantum Cosmology and Baby Universes: Proceedings of the 1989 Jerusalem Winter School for Theoretical Physics*, ed. by S. Coleman, J. B. Hartle,
8. T. Piran, And S. Weinberg, World Scientific, Singapore (1991).