

7

Порядок и случайность

Откуда берутся вероятности

Однажды солнечным днем в английском Кембридже Элизабет Энском встретила со своим учителем Людвигом Витгенштейном.

«Почему люди говорят, — начал Витгенштейн в своей неподражаемой манере, — что думать, будто Солнце вращается вокруг Земли, а не наоборот, — естественно?»

Энском, конечно же, ответила, что все *выглядит* так, будто Солнце вращается вокруг Земли.

«Ну, — ответил Витгенштейн, — а как бы это выглядело, если бы мы могли заметить, что Земля вращается вокруг своей оси?»

Эта байка, рассказанная самой Энском, а впоследствии пересказанная Томом Стоппардом в пьесе «Прыгуны», особенно нравится сторонникам Эверетта. Физик Сидни Коулман любил упоминать ее в лекциях, а физик-философ Дэвид Уоллес открывает ею свою книгу «Эмерджентная Мультивселенная». И она, определенно, напоминает о вопросе, который Хью Эверетт задал Брайсу Девиццу.

7. ПОРЯДОК И СЛУЧАЙНОСТЬ

Легко понять, почему это наблюдение так важно. Любой разумный человек, впервые услышавший о многомировой интерпретации, сразу же решительно парирует: «*Я же не чувствую*, что расщепляюсь на множество людей, как только выполняется квантовое измерение. И мне не кажется, что рядом существуют всевозможные параллельные вселенные, кроме той, в которой я нахожусь».

Сторонник Эверетта отвечает, перефразируя Витгенштейна: «А что именно мы должны были бы видеть и чувствовать, если бы многомировая интерпретация оказалась верна?»

Остается надеяться, что обитатели эвереттовской Вселенной наблюдали бы именно то, что наблюдаем мы: физический мир, который, как представляется, с высочайшей точностью подчиняется законам академической квантовой механики и во многих ситуациях хорошо аппроксимируется классической механикой. Но концептуальная разница между «гладко эволюционирующей волновой функцией» и экспериментальными данными, которые эта функция призвана объяснить, довольно велика. Не очевидно, устроит ли нас в данном случае ответ, который можно дать на вопрос Витгенштейна. Теория Эверетта может быть строга по формулировке, но предстоит еще немало работы, чтобы полностью конкретизировать ее выводы.

В этой главе мы поговорим о главной загадке многомировой интерпретации: происхождении и природе вероятности. Уравнение Шрёдингера абсолютно детерминистское. Почему вообще в игру вступают вероятности и почему соблюдается правило Борна: вероятности равны амплитудам — комплексным числам, которые волновая функция ассоциирует с каждым возможным результатом, — возведенным в квадрат? Имеет ли вообще смысл говорить о вероятности оказаться в той или иной ветке, если «будущая версия» меня окажется в каждой ветке?

В академических, копенгагенских версиях квантовой механики нет необходимости «выводить» правило Борна для вероятностей.

Мы просто припечатываем его как один из постулатов теории. Почему нельзя поступить так же в случае с многомировой интерпретацией?

Дело в том, что, хотя ответ в обоих случаях и звучит одинаково — «вероятности задаются квадратом волновой функции», — смысл этих формулировок сильно различается. В хрестоматийной версии правило Борна — это утверждение о том, как часто происходят события или как часто они будут происходить в будущем. В многомировой интерпретации нет места для такого дополнительного постулата. Мы точно знаем, что произойдет, исходя из того базового правила, что волновая функция всегда подчиняется уравнению Шрёдингера. Вероятность в многомировой интерпретации — это безусловное утверждение о том, во что мы должны *верить* и как *действовать*, а не о том, как часто происходят те или иные события. Причем «во что мы должны верить» не относится к постулатам физической теории, а должно из них следовать.

Более того, как мы убедимся, здесь нет ни места для дополнительного постулата, ни необходимости в нем. С учетом базовой структуры квантовой механики правило Борна естественно и работает автоматически. Поскольку в природе прослеживаются соответствующие этому правилу явления, это вселяет уверенность, что мы на верном пути. Структура, в которой важный результат может быть выведен из более фундаментальных постулатов, должна, при прочих равных условиях, быть предпочтительнее той, где подобный результат нужно подразумевать отдельно.

Если нам удастся ответить на этот вопрос, то мы значительно приблизимся к отождествлению мира, который наблюдаем, с миром, каким он был бы в случае правильности многомировой интерпретации. Это мир, хорошо аппроксимируемый классической физикой во всех ситуациях, кроме событий, происходящих в квантовых экспериментах, когда вероятность получить тот или иной результат задается правилом Борна.

7. ПОРЯДОК И СЛУЧАЙНОСТЬ



Проблема вероятностей часто формулируется как попытка выяснить, почему вероятности задаются квадратами амплитуд. Но это не самое сложное. Возведение амплитуд в квадрат для получения вероятностей — операция тривиальная; сложности возникали бы при необходимости возводить волновую функцию в пятую степень и т. п. Мы узнали об этом еще в главе 5, когда на примере кубитов выяснили, что волновую функцию можно трактовать как вектор. Этот вектор подобен гипотенузе прямоугольного треугольника, а отдельные амплитуды — его катетам. Длина вектора равна единице, и по теореме Пифагора именно такова сумма квадратов амплитуд. Поэтому «амплитуды в квадрате» естественно смотрятся в качестве вероятностей: это положительные числа, сумма которых равна единице.

Более серьезный вопрос: есть ли в эвереттовской квантовой механике что-либо непредсказуемое и если да, то почему существует специфическое правило по присваиванию вероятностей. В многомировой интерпретации, если мы знаем волновую функцию на определенный момент времени, то можем в точности вычислить, что будет в любой другой момент времени, просто решив уравнение Шрёдингера. Здесь нет места случайностям. Как же мир в таком представлении будет согласовываться с нашими реальными наблюдениями, ведь такие явления, как распад атомного ядра или измерение спина, кажутся безоговорочно случайными?

Вернемся к нашему любимому примеру с измерением спина электрона. Допустим, в исходном состоянии у нас есть электрон, находящийся в суперпозиции равных вероятностей верхнего и нижнего спинов по вертикальной оси, и этот электрон мы пропускаем через магнит Штерна — Герлаха. Согласно академической квантовой механике, у нас будет 50%-ная вероятность, что волновая функция сколлапсирует в верхний спин, и 50%-ная — что в нижний. С дру-

гой стороны, согласно многомировой интерпретации, существует 100%-ная вероятность, что волновая функция Вселенной разделится из одного мира на два. Действительно, в одном из этих миров наблюдатель увидит верхний спин, а в другом — нижний. Однако оба мира существуют, это неоспоримо. Если бы мы сформулировали вопрос так: «Какова вероятность, что я как наблюдатель окажусь в той ветви волновой функции, где спин будет верхним?», то никакого ответа на него не просматривается. Вы не окажетесь одним из наблюдателей: ваше актуальное единственное «я» с определенностью эволюционирует в обоих этих наблюдателей. Как же нам рассуждать о вероятностях в такой ситуации?

Хороший вопрос. Чтобы ответить на него, нам придется немного пофилософствовать и подумать о том, что же такое «вероятность» на самом деле.



Существование конкурирующих философских школ, по-разному трактующих феномен вероятности, вовсе не удивительно. Допустим, мы подбрасываем «честную» монету. «Честная» в данном случае означает, что при подбрасывании в 50 % случаев выпадет решка и в 50 % случаев — орел. При многократном подбрасывании никто не удивится, если какие-то два раза подряд монетка упадет орлом.

Данная оговорка «при многократном подбрасывании» подсказывает стратегию, позволяющую концептуализировать вероятности. Если бросить монету всего несколько раз, то почти никакие результаты не должны нас удивлять. Но чем больше бросков у нас будет, тем скорее общее соотношение орлов и решек должно приближаться к 50/50. Таким образом, вероятность выпадения орла определяется количеством его фактического выпадения, если подбросить монету бесконечное число раз.

7. ПОРЯДОК И СЛУЧАЙНОСТЬ

Такое представление феномена вероятности иногда называется *фреквентизмом*¹, поскольку в данном случае вероятность понимается как относительная частота повторяемости события на протяжении очень большого количества попыток. Фреквентизм очень хорошо сочетается с нашими интуитивными представлениями о том, как работают вероятности при бросании монет, игральные кости и в карточной игре. С точки зрения фреквентиста, вероятность — это объективный феномен, поскольку он зависит только от свойств монеты (или любой другой системы), о которой идет речь, а не от нас или того, что нам известно.

Фреквентизм удобно вписывается в хрестоматийную картину квантовой механики и согласуется с правилом Борна. Возможно, количество электронов, пропущенных вами через магнитное поле с целью измерить их спины, и не будет бесконечным, но их может быть очень много. (Эксперимент Штерна — Герлаха очень любят демонстрировать на лабораторных работах для физиков-старшекурсников, поэтому на протяжении многих лет таким образом было измерено немало спинов.) Можно собрать достаточно обширную статистику, чтобы убедиться, что вероятность в квантовой механике действительно представляет собой просто волновую функцию, возведенную в квадрат.

С многомировой интерпретацией все иначе. Допустим, мы помещаем электрон в суперпозицию с равными вероятностями для верхнего и нижнего спинов, измеряем его спин, а затем многократно повторяем этот опыт. При каждом измерении волновая функция делится на мир, где спин оказался верхним, и мир, где спин оказался нижним. Допустим, что мы будем записывать наши результаты, помечая верхний спин как 0, а нижний — как 1. После пятидесяти измерений появится мир, запись в котором будет выглядеть следующим образом:

10101011111011001011001010100011101100011101000001

¹ Это другое название частотного (статистического) определения вероятности. — *Примеч. науч. ред.*

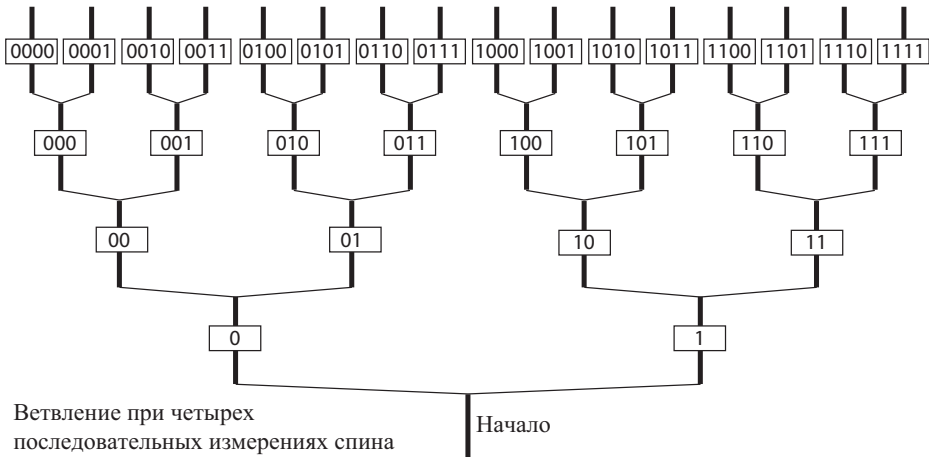
Разброс кажется достаточно случайным и хорошо подчиняется статистике: здесь двадцать четыре нуля и двадцать шесть единиц. Не совсем 50/50, но достаточно близко к этому, как мы и могли ожидать.

Однако будет и такой мир, где все измерения дадут в результате верхний спин, так что в аналогичной записи будет пятьдесят нулей. А еще будет мир, где все измерения дадут нижний спин, и последовательность будет состоять из пятидесяти единиц. Будут и все другие возможные строки с разными сочетаниями нулей и единиц. Если Эверетт прав, то существует 100%-ная вероятность, что каждая возможность воплотится в каком-либо конкретном мире.

Признаюсь: такие миры действительно существуют. Вышеприведенную строку, подобранную, казалось бы, совершенно случайным образом, я не пытался специально составить так, чтобы она выглядела случайной, и не создавал ее с помощью классического генератора случайных чисел. На самом деле она сделана с помощью *квантового* генератора случайных чисел: это штукавина, выполняющая квантовые измерения и использующая их для создания случайных последовательностей из нулей и единиц. Согласно многомировой интерпретации, стоит мне сгенерировать такое случайное число — и Вселенная разделится на 2^{50} экземпляров (что равно 1 125 899 906 842 624, или приблизительно 1 квадриллиону), и в каждом из этих миров сгенерированное число будет несколько отличаться от других.

Если все копии меня, оказавшиеся в этих разнообразных мирах, будут строго придерживаться плана и включат полученное число в ту книгу, которую сейчас пишу, то в волновой функции Вселенной окажется около квадриллиона вариантов текста этой книги. Отличия между большинством экземпляров будут незначительными, просто нули и единицы получатся слегка переставлены. Но среди всех этих моих двойников окажутся и такие бедняги, у которых в этой последовательности будут только нули или только единицы. О чем эти

7. ПОРЯДОК И СЛУЧАЙНОСТЬ



авторы сейчас думают? Вероятно, о том, что их генератор случайных чисел сбоят. Они определенно не набирают сейчас тот самый текст, который набираю я.

Что бы ни думали об этой ситуации я или мои двойники, она весьма далека от фреквентистской парадигмы вероятностей. Практически бессмысленно говорить о частоте, когда речь идет о бесконечном количестве попыток, результат каждой из которых может быть любым, просто он попадает в какую-то другую ветку волновой функции. Нужно иначе подойти к трактовке феномена вероятности и его значения.

○ ○ ○

К счастью, существует и другой подход к вероятности, появившийся задолго до квантовой механики. Это *эпистемологическая* вероятность, и она связана с тем, что нам известно, а не с каким-то гипотетическим бесконечным количеством попыток.

Рассмотрим вопрос: «Какова вероятность, что “Филадельфия Севенти Сиксерс” выиграют Чемпионат НБА-2020?» (лично я считаю, что эта вероятность очень велика, но фанаты других клубов

могут со мной не согласиться). Это событие — не из тех, которые могли бы повторяться бесконечное количество раз. Как бы то ни было, баскетболисты стареют, и это сказывается на уровне их игры. Финал Чемпионата НБА-2020 состоится лишь однажды, и ответ на поставленный здесь вопрос будет строго определенным, даже если пока мы не знаем победителя. Но профессиональные букмекеры не испытывают никаких угрызений совести, присваивая вероятности таким ситуациям. С той же уверенностью мы присваиваем их в повседневной жизни: постоянно судим о вероятности различных однократных событий, от получения работы, на которую мы подавали резюме, до перспективы проголодаться к семи вечера. Если уж на то пошло, мы рассуждаем и о вероятности событий, произошедших в прошлом, хотя каждое из этих событий уже является свершившимся фактом — мы просто не помним подробностей. «Я не помню, во сколько ушел с работы в прошлый четверг, но, вероятно, между пятью и шестью вечера, поскольку именно в это время я обычно направляюсь домой».

В таких случаях мы присваиваем «степень уверенности» — достоверности — различным рассматриваемым утверждениям. Степени уверенности, как и вероятности, должны варьировать в диапазоне от 0 до 100 %, а общий набор субъективных степеней уверенности для всех возможных исходов указанного события должен составлять 100 %. Ваша уверенность в свершении некоторого события может измениться по мере того, как вы собираете информацию. Например, вы можете быть в некоторой степени уверены, что слово пишется именно так, но затем посмотрите в словарь и узнаете правильный вариант. Специалисты по статистике формализовали этот процесс под названием *байесовский вывод*, в честь преподобного Томаса Байеса, пресвитерианского священника, жившего в XVIII веке и увлекавшегося математикой. Байес вывел уравнение, описывающее, как нужно корректировать степень уверенности при получении новой информации. Сегодня

7. ПОРЯДОК И СЛУЧАЙНОСТЬ

эта формула красуется на плакатах и футболках на кафедрах статистики по всему миру.

Итак, существует отличное определение «вероятности», применимое даже к событиям, которые могут произойти всего лишь однажды, а не бесконечное количество раз. Правда, здесь мы имеем дело с субъективным феноменом, а не с объективным: разные люди, обладающие разным набором знаний, могут присваивать разные степени уверенности одинаковым исходам одного и того же события. Это нормально, пока все придерживаются некоторых правил корректировки степени уверенностей по мере поступления новой информации. На самом деле, если вы верите в этернализм, то есть считаете, что будущее столь же реально, как и прошлое, просто мы до него еще не добрались, — то на место фреквентизма приходит байесовский вывод. Когда вы подбрасываете монету, утверждение «вероятность, что монета упадет решкой, составляет 50 %» может быть интерпретировано следующим образом: «учитывая, что я знаю об этой и других монетах, лучшее, что я могу утверждать о ближайшем будущем монеты — она с равной вероятностью может упасть орлом или решкой, несмотря на то что результат вполне предопределен».

До сих пор не очевидно, делаем ли мы шаг вперед, основывая подход к вероятности на наших знаниях, а не на частоте событий. Многомировая интерпретация — это детерминистская теория, и если мы знаем волновую функцию в определенный момент времени и уравнение Шрёдингера, то сможем вычислить все, что произойдет. В каком смысле здесь можно говорить о неизвестных нам деталях, которым мы можем присваивать степени уверенности по правилу Борна?

Напрашивается заманчивый ответ, который, однако, неверен: мы не знаем «в каком мире окажемся». Эта точка зрения ошибочна, поскольку имплицитно опирается на понятие личной идентичности, которое неприменимо к квантовой Вселенной.