ИУ5-32Б

Афонин Иван

**2. Вычислительная Вселенная**

Идея о том, что вещество состоит из мельчайших, неделимых частиц – атомов (от древнегреческого atomos – «неделимый»), – возникла ещё в Древней Греции. Эта гипотеза, основанная на эстетическом отвращении к бесконечности, утверждала, что нельзя бесконечно делить вещество на всё более мелкие части. Однако, в XVII веке, с изобретением дифференциального исчисления Ньютоном и Лейбницем, в науке восторжествовала концепция континуума. Эта мощная математическая модель позволила описывать физические явления, считая вещество непрерывной субстанцией, которую можно делить бесконечно много раз. Атомная теория отошла на задний план, отчасти из-за элегантности нового математического аппарата, отчасти из-за отсутствия прямых доказательств существования атомов.

Тем не менее, к концу XIX века стали накапливаться экспериментальные данные, свидетельствующие в пользу атомной гипотезы. Одним из таких свидетельств стало броуновское движение – хаотическое движение мельчайших пылинок, взвешенных в жидкости. Альберт Эйнштейн в начале XX века разработал количественную теорию этого явления, показав, что оно объясняется столкновениями пылинок с невидимыми, но намного меньшими частицами – молекулами жидкости. Эта работа не только объяснила броуновское движение, но и позволила оценить размеры и массу молекул, вернув атомную теорию в основное русло науки.

Ещё до этого, однако, представление об атомах успешно использовалось для описания поведения теплоты и энергии. Уже в XVIII веке было экспериментально показано, что механическая работа может превращаться в теплоту (вспомним классический опыт Джеймса Уатта со сверлением ствола мортиры). К середине XIX века этот взаимообмен между механической энергией и теплотой был тщательно изучен и сформулирован в виде первого начала термодинамики: энергия сохраняется при переходе из одной формы в другую.

Однако, в отличие от механической энергии, энергия в форме тепла обладала загадочным свойством, названным энтропией. Энтропия, как оказалось, ограничивала возможность превращения тепла в полезную работу. В ходе экспериментов было установлено, что всякий раз, когда механическая энергия превращается в теплоту, создаётся определенное количество энтропии, пропорциональное израсходованной энергии и обратно пропорциональное температуре. Более того, было замечено, что энтропия, чем бы она ни была, в замкнутой системе никогда не уменьшается. Этот факт стал известен как второе начало термодинамики.

Именно пионеры статистической механики – Максвелл, Больцман и Гиббс – в конце XIX века смогли дать информационную интерпретацию энтропии. Они поняли, что энтропия – это не только мера беспорядка, но и мера количества недоступной информации, содержащейся в атомах и молекулах вещества. Другими словами, энтропия – это информация о микроскопических движениях частиц, слишком малых, чтобы мы могли их воспринять. Эта информация, невидимая для нас, является причиной того, что часть тепловой энергии недоступна для преобразования в полезную работу. Знаменитая формула Больцмана S = k log W, выгравированная на его могиле, выражает этот факт математически: энтропия (S) системы пропорциональна количеству битов информации (log W), необходимых для описания её микроскопического состояния.

Именно благодаря работам по статистической механике второе начало термодинамики обрело свою информационную интерпретацию. Энтропия стала рассматриваться не как некая мистическая сущность, а как форма информации, связанной с движением атомов. Этот подход позволил объединить атомную гипотезу и термодинамику, показав, что законы, управляющие поведением вещества на микроскопическом уровне, тесно связаны с информацией и её обработкой.

В то время как классическая физика рассматривала мир как набор чётких, детерминированных механизмов, квантовая механика рисует совершенно иную картину, полную странностей и парадоксов. Одним из ключевых принципов, лежащих в её основе, является корпускулярно-волновой дуализм. Этот принцип утверждает, что объекты, которые мы традиционно считаем волнами, например свет или звук, на самом деле состоят из частиц – квантов (фотонов для света и фононов для звука). И наоборот, частицы, такие как электроны, протоны или даже целые атомы, также обладают волновыми свойствами.

Этот дуализм наглядно демонстрируется в двухщелевом эксперименте. Если направить пучок света или поток электронов на преграду с двумя узкими щелями и поместить за ней экран, то на экране появится интерференционная картина – чередующиеся светлые и тёмные полосы. Это явление характерно для волн, проходящих через обе щели одновременно и интерферирующих друг с другом. Удивительно, но интерференционная картина наблюдается даже если частицы пропускать через щели по одной, что свидетельствует о том, что каждая отдельная частица проходит через обе щели сразу, как будто она является волной. Этот эксперимент наглядно демонстрирует способность квантовых объектов находиться в нескольких местах одновременно.

Однако, если мы попытаемся определить, через какую именно щель проходит частица, например, поместив рядом с ней детектор, интерференционная картина исчезает. Это явление, известное как коллапс волновой функции или декогерентность, показывает, что измерение или наблюдение неизбежно влияет на состояние квантовой системы. Частица, как будто «выбирает» одно из возможных положений, переставая быть в двух местах одновременно.

Принцип неопределённости Гейзенберга формализует эту неустранимую неопределённость квантового мира. Этот принцип утверждает, что невозможно одновременно точно измерить две взаимодополняющие величины, такие как положение и скорость частицы. Чем точнее мы знаем положение частицы, тем менее точно мы знаем её скорость, и наоборот. Эта неопределенность не является следствием несовершенства наших измерительных приборов, а фундаментальным свойством квантового мира.

В квантовой механике информация хранится и обрабатывается с помощью квантовых битов, или кубитов. В отличие от классических битов, которые могут находиться только в одном из двух состояний (0 или 1), кубиты могут находиться в суперпозиции состояний, то есть быть одновременно и в состоянии 0, и в состоянии 1. Это свойство, называемое квантовой суперпозицией, является ключевым для квантовых вычислений и позволяет квантовым компьютерам выполнять операции, недоступные для классических компьютеров. Декогерентность же, вызванная взаимодействием кубита с окружающей средой, приводит к тому, что кубит «выбирает» одно из возможных состояний, теряя свою квантовую природу и начиная вести себя как классический бит.

Квантовые вычисления основаны на использовании свойств квантовых битов – кубитов – для обработки информации. В отличие от классических битов, которые могут находиться только в одном из двух состояний (0 или 1), кубиты могут существовать в суперпозиции состояний, то есть быть одновременно и в состоянии 0, и в состоянии 1. Эта способность к суперпозиции, в сочетании с квантовой запутанностью, позволяет квантовым компьютерам выполнять вычисления, недоступные для классических машин.

Одним из важнейших типов квантовых вычислений является квантовое моделирование. Квантовый компьютер, сам являющийся квантовой системой, может эффективно моделировать другие квантовые системы. В процессе моделирования состояние каждой части моделируемой системы отображается на набор кубитов в квантовом компьютере, а взаимодействия между частями моделируемой системы отображаются на квантовые логические операции между этими кубитами. Благодаря универсальности квантовых логических операций (любое логическое преобразование можно построить из базового набора операций, таких как «И», «НЕ», «ИЛИ» и «КОПИРОВАТЬ»), такое моделирование может быть настолько точным, что поведение компьютера станет неотличимым от поведения самой моделируемой системы.

В отличие от классических компьютеров, которые выполняют вычисления последовательно, один за другим, квантовые компьютеры могут выполнять вычисления параллельно, благодаря квантовой суперпозиции. Один квантовый процессор может одновременно обрабатывать множество задач. Этот феномен, известный как квантовый параллелизм, позволяет квантовым компьютерам решать задачи, недоступные для классических машин, такие как факторизация больших чисел или поиск в неупорядоченном массиве данных.

Однако, квантовое моделирование не лишено ограничений. Процесс измерения или наблюдения неизбежно влияет на состояние квантовой системы, приводя к декогеренции и потере квантовой когерентности. Это значит, что состояние системы, которая взаимодействует с окружающей средой, превращается в смесь разных состояний, что препятствует эффективному моделированию. Для того, чтобы провести эффективное квантовое моделирование, необходимо тщательно изолировать квантовую систему от внешних влияний. В противном случае полученные результаты будут искажены и не будут отражать поведение моделируемой системы.

В качестве примера эффекта декогеренции и его роли в моделировании рассмотрим эффект спинового эха. В этом эксперименте ядерные спины, вначале находящиеся в известном состоянии, подвергаются воздействию магнитного поля. Из-за незначительных флуктуаций магнитного поля спины начинают прецессировать с несколько различными скоростями, что приводит к увеличению энтропии. Однако, путем применения второго импульса магнитного поля, направленного в противоположном направлении, возможно «отменить» прецессию, возвратив спины в их первоначальное состояние. Этот эффект, впервые продемонстрированный в 1950-х годах, наглядно иллюстрирует, как взаимодействия между частями системы могут приводить к как увеличению, так и к уменьшению энтропии. В квантовом моделировании этот эффект аналогичен обратимости некоторых квантовых операций, при соответствующей изоляции квантовой системы от окружающего мира.

Вселенная – удивительно сложная система. От простейших элементарных частиц до сложнейших живых организмов и человеческих обществ – везде мы наблюдаем поразительное многообразие форм и взаимодействий. Но как из сравнительно простых законов физики возникает такая сложность? Попытки объяснить это явление привели к разработке множества теорий и моделей сложности.

Одна из первых попыток объяснить сложность Вселенной была предложена Людвигом Больцманом. Он предположил, что порядок и сложность Вселенной являются результатом чисто случайного процесса, подобного тому, как если бы мы бесконечно долго подбрасывали монету. В таком случае, с определённой вероятностью, можно получить любую конечную последовательность «орлов» и «решек», включая и текст «Гамлета», написанный на машинке случайно выбравшей буковки обезьяной. Эта идея, позже воплощённая в известном мысленном эксперименте с «печатающими обезьянами», показывает, что при бесконечном времени и количестве попыток можно получить любую заданную последовательность символов. Однако, вероятность того, что это произойдёт на практике, крайне мала.

Как показывает сам Больцман, его объяснение сложности Вселенной ошибочно. Если бы Вселенная возникла в результате случайного процесса, то весь порядок и сложность, которые мы наблюдаем, были бы случайны и не имели бы никакого особого значения. Однако, Вселенная не является совершенно случайной. Новое объяснение происхождения сложности Вселенной предлагает концепция вычислительной Вселенной.

В вычислительной Вселенной сложность возникает не случайно, а как результат вычислений, выполняемых самой Вселенной. Фундаментальные законы физики являются универсальными с точки зрения вычислений и позволяют создавать сложные системы из простых компонентов. Квантовые флуктуации, неустранимые в квантовом мире, могут служить источником «случайности» в этих вычислениях. Подобно тому, как программы, запрограммированные случайным образом, могут всё же иногда генерировать интересные результаты, квантовые флуктуации запускают во Вселенной вычисления, результатом которых являются сложные структуры.

Для количественного описания сложности используются различные меры, такие как алгоритмическая информация, представляющая собой минимальную длину программы, которая генерирует данную строку битов, и вычислительная сложность, измеряющая количество ресурсов, необходимых для выполнения задачи. Эти меры подчёркивают взаимосвязь между количеством информации и затратами ресурсов при создании сложных систем.

Более тонким и универсальным подходом является определение эффективной сложности, предложенное Мюрреем Гелл-Манном. Эта мера оценивает степень регулярности в системе, или количество информации, необходимое для описания её упорядоченных аспектов. Системы с высокой эффективной сложностью имеют хорошо определённую структуру и стабильное поведение, в отличие от систем с высокой энтропией, характеризующихся случайностью и непредсказуемостью. Эффективная сложность может как накапливаться в процессе эволюции, так и уменьшаться в результате упрощения системы.

Рассмотрение Вселенной как гигантского квантового компьютера позволяет взглянуть на её будущее с новой, захватывающей перспективы. В отличие от пессимистических сценариев, предсказывающих "тепловую смерть" Вселенной – состояние максимальной энтропии, когда вся энергия будет равномерно распределена, и никакая полезная работа уже невозможна, – вычислительная парадигма предлагает куда более оптимистичный прогноз.

Согласно стандартной космологической модели, Вселенная будет расширяться вечно. Это означает, что количество энергии и доступной для вычислений информации в пределах горизонта Вселенной будут непрерывно расти. Однако, это не означает, что плотность энергии будет увеличиваться. Напротив, по мере расширения Вселенной её средняя плотность будет уменьшаться. Это приводит к тому, что хотя общее количество свободной энергии будет расти, найти и использовать её будет всё сложнее. Через триллионы лет звёзды сожгут все свои запасы ядерного топлива, и наши потомки будут вынуждены извлекать энергию из других источников.

Одна из возможных стратегий выживания для будущей жизни во Вселенной, предложенная Фрименом Дайсоном, основана на использовании конечного количества энергии на протяжении бесконечного времени. Согласно этой стратегии, жизнь будет продолжать выполнять вычисления, постепенно замедляя свой «темп жизни». Хотя количество энергии будет уменьшаться, время для выполнения операций будет увеличиваться, позволяя достичь бесконечного количества операций за бесконечное время. Однако, эта стратегия сталкивается с проблемой распространения энтропии и необходимостью избавляться от «мусора» – отработанной энергии. Чем медленнее выполняются операции, тем меньше энергии нужно рассеивать, и чем больше размер системы, тем больше площадь поверхности, по которой можно рассеять энергию. Однако, необходимо расширяться достаточно медленно, чтобы средняя температура системы оставалась выше температуры окружающей Вселенной.

Иную стратегию выживания предлагает концепция космологического компьютера. В этом варианте вся энергия и вся информация Вселенной поставлены на службу вычислений. Хотя такой компьютер будет обладать огромной вычислительной мощностью, количество выполненных им операций ограничено возрастом Вселенной. Согласно стандартной космологической модели, количество доступной энергии и информации в пределах горизонта Вселенной будут расти с течением времени, что позволит продолжить вычисления даже после того, как звёзды погаснут. Однако, плотность энергии и информации будет уменьшаться, что приведёт к постепенному замедлению вычислений.

В долгосрочной перспективе будущее вычислений во Вселенной зависит от многих факторов, включая количество доступной энергии, темпы расширения Вселенной и способность будущей жизни адаптироваться к меняющимся условиям. Однако, концепция вычислительной Вселенной показывает, что существует множество путей для продолжения вычислений, и будущее Вселенной может оказаться настолько же удивительным и сложным, насколько она есть сейчас. Дальнейшие наблюдения и теоретические исследования могут пролить свет на эту завораживающую загадку.