

ЭНТРОПИЯ ПРОСТЫМИ СЛОВАМИ

*От остывающего кофе
до тепловой смерти Вселенной*



Сергей Александров

Сергей Александров

Энтропия простыми словами

«Издательские решения»

Александров С.

Энтропия простыми словами / С. Александров — «Издательские решения»,

ISBN 978-5-00-694863-1

Энтропия — слово, от которого хочется захлопнуть учебник. Но идея за ним — одна из самых красивых в науке. Эта книга объясняет её через остывающий чай, яичницу и каплю молока — и ведёт от кухни до тепловой смерти Вселенной. Просто, честно, без формул.

ISBN 978-5-00-694863-1

© Александров С.
© Издательские решения

Содержание

Сергей Александров	6
Глава 1. Почему ваш кофе остывает	7
Глава 2. Энтропия на пальцах	11
Конец ознакомительного фрагмента.	16

Энтропия простыми словами

Сергей Александров

© Сергей Александров, 2026

ISBN 978-5-0069-4863-1

Создано в интеллектуальной издательской системе Ridero

Сергей Александров
ЭНТРОПИЯ ПРОСТЫМИ СЛОВАМИ

От остывающего кофе до тепловой смерти Вселенной

Глава 1. Почему ваш кофе остывает

Утро. Вы наливаете кофе в белую кружку, ставите её на стол и отвлекаетесь на телефон. Сначала только проверить погоду, потом – пара сообщений, потом – лента новостей. Двадцать минут проходят незаметно. Вы берёте кружку – кофе тёплый, почти комнатной температуры. Тот горький вкус, ради которого вы мололи зёрна, куда-то делся. День немного испорчен.

Ничего удивительного, правда? Горячие вещи остывают. Вода течёт вниз. Стекло разбивается. Мы настолько привыкли к этому, что даже не задумываемся. Это фон нашей жизни – настолько привычный, что мы его не замечаем, как не замечаем собственное дыхание.

Но попробуйте перевернуть картинку. Представьте: вы сидите за столом, перед вами стоит кружка с холодным кофе – и вдруг он начинает нагреваться. Сам. Без микроволновки, без плиты, без какого-либо источника тепла. Просто воздух вокруг кружки становится чуть прохладнее, а кофе – чуть горячее. Потом горячее. Потом обжигающий. От кружки идёт пар, воздух в комнате свежее, и вот уже перед вами – дымящийся свежий напиток, за который не пришлось платить ни джоулем электричества.

Вы бы решили, что сошли с ума. Или что попали в фильм ужасов. Или что физика сломалась.

Но вот что странно: ни один закон физики этого не запрещает. Ни один. Каждое уравнение механики, каждый закон Ньютона работает одинаково в обе стороны – вперёд и назад во времени. Молекулы воздуха *могли бы* одновременно передать свою энергию молекулам кофе. Ни одно фундаментальное правило природы не встало бы у них на пути.

Но этого не происходит. Никогда. Ни в одной кухне, ни в одном кафе, ни в одной лаборатории мира. И вот это по-настоящему требует объяснения.

* * *

Давайте зафиксируем, что именно происходит с кофе, когда он остывает. Внутри вашей кружки – примерно десять триллионов триллионов молекул воды. Это больше, чем песчинок на всех пляжах Земли – в десять тысяч раз. Каждая мечется с огромной скоростью, сталкивается с соседками, отскакивает, меняет направление. Горячий кофе – это молекулы с высокой кинетической энергией. Они бьются о стенки керамической кружки, раскачивают молекулы керамики, те передают энергию воздуху с внешней стороны, воздух разносит тепло по комнате.

Через двадцать минут энергия, которая была сосредоточена в маленьком объёме кружки, размазалась тонким слоем по всей комнате. Каждая молекула воздуха стала чуть-чуть быстрее – на величину, которую ни один термометр не зафиксирует. Молекулы кофе стали чуть-чуть медленнее. Температуры сравнялись. Энергия никуда не делась – закон сохранения энергии выполняется безукоризненно. Она просто рассеялась, растеклась, размазалась так тонко, что перестала быть полезной.

Обратный процесс потребовал бы, чтобы все эти молекулы воздуха – все до единой – одновременно двинулись в точно нужном направлении и отдали свою крошечную долю энергии обратно в кружку. Не часть из них, а все. Не приблизительно, а с точностью до каждого столкновения. Это как если бы все тринадцать миллионов жителей Москвы, не сговариваясь, в одну и ту же микросекунду повернули налево, сделали ровно три шага и остановились. Нет закона, который запрещает это. Но вероятность настолько мала, что математики назвали бы её нулевой, хотя формально она не равна нулю.

Ричард Фейнман чинил соседские радиоприёмники ещё мальчишкой, а в сорок семь получил Нобелевскую премию. Он сформулировал это так: «По какой-то причине Вселенная некогда обладала очень низкой энтропией... Это происхождение всей необратимости, это то, что заставляет нас помнить прошлое, а не будущее, что заставляет нас умирать». Звучит мрачновато для разговора о кофе. Но Фейнман имел в виду ровно то, что мы видим каждое утро

за завтраком: вещи идут в одну сторону, и никогда – в обратную. Кофе в вашей кружке следует тому же правилу, что и звёзды, галактики и сама Вселенная.

* * *

Кофе – не единственный пример. Кухня – целый музей необратимости.

Возьмите яйцо и уроните его на кафельный пол. Хрясь. Скорлупа разлетится на десятки осколков, белок растечётся, желток расплющится. Если бы вы снимали это на видео и потом прокрутили запись назад, выглядело бы как чудо: осколки скорлупы подпрыгивают, собираются, белок стягивается, желток округляется, яйцо взлетает с пола и аккуратно ложится вам в руку. Каждый, кто смотрел бы такое видео, мгновенно понял бы – плёнку пустили задом наперёд. Мы все интуитивно знаем направление времени, потому что знаем направление разрушения. Перемотка назад выглядит абсурдной, потому что мы никогда не видели, чтобы разбитое само становилось целым. Наш мозг моментально распознаёт подделку – он натренирован на однонаправленности мира с первых дней жизни.

Физик Уббелоде ещё в 1954 году разбирал именно этот пример. Число микроскопических конфигураций «разбитого яйца» – всех возможных положений осколков, капель белка, расплющенного желтка – больше на десятки порядков, чем число конфигураций «целого яйца». Яйцо не собирается обратно не потому, что существует закон «яйца не ремонтируются». А потому, что среди всех возможных состояний «разбитых» вариантов так чудовищно больше, чем «целых», что случайный переход к «целому» не произойдёт за всё время существования Вселенной.

А теперь жарьте яйцо. Белки – длинные молекулярные цепочки, свёрнутые в аккуратные клубки – разворачиваются от жара, спутываются друг с другом в хаотичном порядке, образуют новые связи. Прозрачный белок становится белым и плотным. Вода испаряется. Обратить это невозможно не потому, что какой-то закон это запрещает, а потому, что число способов быть «развёрнутым и спутанным» астрономически больше, чем число способов быть «аккуратно свёрнутым в правильный клубок». Белку абсолютно всё равно, в каком беспорядке слипнуться. А вот правильная конфигурация – только одна.

Вот ещё один пример – мой любимый. Налейте чёрный кофе в прозрачную чашку и капните туда молоко. Одну каплю. Белая капля начнёт расплываться, закручиваться, создавая красивые мраморные узоры – похожие на спиральные рукава галактик, только в миниатюре. Через несколько секунд узоры растворятся. Останется однородный коричневый напиток. Кофе с молоком. Знакомая, ничем не примечательная картина.

Но за этими несколькими секундами стоит кое-что поразительное. Число микроскопических конфигураций, в которых молоко равномерно перемешано с кофе, превышает число конфигураций, в которых молоко собрано в одну аккуратную каплю, в число раз, которое невозможно ни записать, ни произнести. Давайте попробуем осознать масштаб. Это не миллиард. Не триллион. Не гугол. Это единица, после которой стоит больше нулей, чем атомов в вашем теле. Если бы вы писали эти нули от руки, по одному в секунду, не отвлекаясь ни на сон, ни на еду, вам не хватило бы всего времени существования Вселенной. Вам не хватило бы тысячи таких вселенных. Миллиона. Это число за пределами всего, что человеческий мозг способен вместить.

Молоко не «хочет» смешаться с кофе. У молекул нет намерений, целей, предпочтений. Просто перемешанных вариантов настолько больше, чем неперемешанных, что обратное событие – самопроизвольное расслоение молока и кофе обратно на два слоя – не произойдёт за всё время жизни миллиардов вселенных. Не потому, что запрещено. Потому, что чудовищно маловероятно.

* * *

Здесь мне нужно сделать одно важное отступление. Есть популярная аналогия, которую вы, возможно, слышали: беспорядок в комнате. Комната захламляется сама, но сама не убира-

ется – точно как кофе остывает, но сам не нагревается. Аналогия выглядит красиво. Её используют в учебниках, научно-популярных статьях и на YouTube.

Но она обманчива. И мне хочется сразу об этом сказать, потому что эта книга – про точное понимание, а не про приблизительное.

Вещи в комнате не перемещаются молекулярным движением. Футболка не прыгает со стула на пол, потому что молекулы воздуха её толкнули. Она оказывается на полу, потому что вы бросили её туда, придя вечером с работы. Носки не расползаются по квартире сами – вы их снимаете в разных местах. Комната захламляется из-за ваших решений – лени, спешки, усталости, привычки. Это психология и бытовые привычки, а не физика.

Химик Фрэнк Ламберт в 1999 году написал об этом статью и был прав: комнатный беспорядок – красивая метафора, но плохая аналогия. Она создаёт ощущение, что вы поняли, хотя на самом деле вы просто нашли поверхностное сходство. Настоящие физические примеры – это кофе, яйцо, молоко. Процессы, в которых огромное число частиц движется по законам физики, и результат определяется не чьей-то волей, а голой статистикой – тем, что одних конфигураций несравнимо больше, чем других.

Разница между хорошей и плохой аналогией принципиальна: одна помогает понять, другая создаёт иллюзию понимания. В этой книге мы будем стараться выбирать первую.

* * *

Итак, мы видим один и тот же сюжет, разыгранный в разных декорациях. Горячий кофе остывает, но холодный не нагревается сам. Яйцо разбивается – и никакая сила не соберёт его обратно. Капля молока растворяется в кофе за секунды, а на обратное расслоение не хватит возраста Вселенной. Все эти процессы идут только в одном направлении.

Тут возникает вопрос, который мучил физиков полтора века и продолжает мучить до сих пор. Законы механики – от Ньютона до квантовой физики – симметричны во времени. Если снять движение двух сталкивающихся молекул на видео, вы не сможете определить, вперёд крутится плёнка или назад. Каждое столкновение так же законно в обратном направлении. Молекулы не знают, что такое «до» и «после». Для них времени, в нашем бытовом понимании, не существует.

Но когда молекул не две, а десять триллионов триллионов – ситуация меняется радикально. На уровне отдельных частиц время не имеет направления. На уровне кружки кофе – имеет, и ещё какое. Где-то между двумя молекулами и десятью триллионами триллионов рождается стрела времени. Из абсолютно симметричных правил возникает глубоко несимметричный мир.

Ответ укладывается в одно слово. Слово, которое вы наверняка слышали, но, скорее всего, не смогли бы точно объяснить. Не переживайте – большинство людей не могут. Даже среди тех, кто сдавал по физике экзамены на пятёрки. Это слово – *энтропия*.

Звучит пугающе. Как что-то из учебника, который вы захлопнули на втором курсе и больше не открывали. Но идея, стоящая за этим словом, – одна из самых простых и красивых в науке. Просто её плохо объясняют. Катастрофически плохо. Поколения учебников твердили, что энтропия – это «мера беспорядка». Но, как мы только что выяснили, «беспорядок» – скользкое, ненадёжное слово.

Рудольф Клаузиус, который ввёл термин «энтропия» 24 апреля 1865 года, и Людвиг Больцман, который дал ему математический смысл, никогда не использовали слово «беспорядок» в своих работах. Ни разу. Этот ярлык приклеили позже – и с тех пор он больше путает, чем помогает.

Мы пока не будем разбирать, что означает энтропия. Для этого есть следующая глава. Но я обещаю: к концу книги вы сможете объяснить её любому человеку за две минуты – и по дороге мы пройдем от остывающей кружки до чёрных дыр и тепловой смерти Вселенной. Без формул, без «беспорядка», без размахивания руками.

* * *

А пока – одна история, которая будет ждать нас впереди.

Пятого сентября 1906 года в приморском городке Дуино близ Триеста – тогда это была Австро-Венгрия, на берегу Адриатического моря, трагически оборвалась жизнь человека, который верил, что атомы реальны, – в то время, когда многие серьёзные физики считали атомы удобной выдумкой. Его звали Людвиг Больцман. Он был австрийцем, профессором, блестящим математиком и глубоко несчастным человеком. Его идеи при жизни вызывали яростные споры. Коллеги нападали на него на конференциях. Он страдал от депрессии. Он не дожил двух лет до того момента, когда француз Жан Перрен экспериментально доказал существование атомов – и тем самым подтвердил всё, за что Больцман боролся.

На его надгробии в Вене выбили формулу. Всего пять символов: $S = k \log W$. Не эпитафию, не слова утешения – формулу. В этих пяти символах зашифрован ответ на вопрос, почему кофе остывает, яйца разбиваются, молоко смешивается, звёзды гаснут и время идёт только вперёд.

Мы до этой формулы доберёмся. Разберём каждый символ. Поймём, что за ними стоит и почему один несчастный австрийский профессор оказался прав, а десятки его критиков – нет. Но не сейчас.

* * *

Астрофизик Артур Эддингтон однажды сказал: «Если ваша теория противоречит Второму закону, я не могу дать вам никакой надежды; остаётся лишь рухнуть в глубочайшем унижении». Всё, что мы наблюдали в этой главе – остывание, разрушение, перемешивание, – подчиняется одному и тому же закону. Если ваша теория говорит обратное – проблемы у вашей теории, а не у Вселенной.

Мы пока не формулировали этот закон строго. Мы просто смотрели на чашку кофе, яичницу и каплю молока. Но уже видно: за самыми обыденными вещами скрывается что-то фундаментальное. Правило, которое не нарушается никогда – ни на кухне, ни в недрах звезды, ни на краю чёрной дыры. Принцип, который управляет всем – от остывающей кружки на вашем столе до тепловой смерти Вселенной через триллионы лет.

Это правило связано с числами. С огромными, непредставимыми числами – настолько большими, что для записи их нулей не хватит всех атомов во Вселенной. С тем, что «обычных» конфигураций так много, а «особенных» так мало, что случай всегда выбирает большинство. Именно эти числа создают стрелу времени, которую мы чувствуем каждый день.

Но что стоит за словом «энтропия» на самом деле – без формул, без страшных терминов, на пальцах?

Глава 2. Энтропия на пальцах

Возьмите колоду карт. Новую, только из упаковки. Снимите целлофан, откройте крышку, вытащите карты. Они лежат в идеальном порядке: тузы, короли, дамы, валеты – масть за мастью, номер за номером. Кто-то на фабрике аккуратно сложил их именно так, и упаковка сохранила этот порядок.

Теперь перетасуйте. Один раз. Ещё раз. Ещё семь раз – именно столько рекомендуют математики для «честного» перемешивания. Разложите карты веером. Порядок исчез. Пиковый туз оказался между семёркой бубен и тройкой трэф, дама червей застряла где-то в середине, рядом с шестёркой пик. Хаос. Случайность. Ничего удивительного.

А теперь попробуйте перетасовать их обратно в фабричный порядок. Не раскладывая по одной карте, а именно тасуя – вслепую, как тасуют перед игрой в покер. Вы можете тасовать час. День. Год. Всю жизнь. Сколько раз вам придётся перетасовать колоду, чтобы случайно вернуть исходный порядок? Тут начинается самое интересное – и мы подходим к сути того, что в прошлой главе я назвал энтропией.

* * *

Пятьдесят две карты можно расположить $52!$ способами. Восклицательный знак здесь – не выражение восторга. Это математическая операция: факториал. $52!$ означает 52 умножить на 51, умножить на 50, и так далее до единицы. Результат – примерно 8 с 67 нулями. Восемь с шестьюдесятью семью нулями. 8×10^{67} .

Много это или мало? Давайте поставим это число в контекст. Количество атомов во всей наблюдаемой Вселенной – во всех галактиках, звёздах, планетах, облаках газа – примерно 10^{80} . То есть число комбинаций обычной карточной колоды и число атомов во всей Вселенной – величины сопоставимого масштаба. Разница – всего тринадцать порядков. По космическим меркам это мелочь. Пятьдесят две картонки с картинками, которые умещаются в ладони, – а уже космические числа.

Из всех этих 8×10^{67} расположений ровно одно – фабричный порядок. Одно. Вероятность случайно вытасовать его обратно – единица, делённая на 8×10^{67} . Если бы всё население Земли – восемь миллиардов человек – тасовало карты без перерыва, по одной тасовке в секунду, с момента Большого взрыва до сегодняшнего дня, общее число попыток составило бы около 10^{27} . До 10^{67} оставалось бы ещё сорок порядков – то есть в десять тысяч триллионов триллионов триллионов раз больше попыток, чем уже сделано. Фабричный порядок не вернётся. Не потому, что это запрещено. Потому, что «перемешанных» вариантов так ошеломляюще больше, что один конкретный порядок тонет в этом океане, как песчинка в Тихом океане.

Вот здесь и прячется суть. Карточная колода – штука простая, её можно потрогать руками. Но она показывает принцип, который управляет всей физической реальностью. Давайте дадим двум понятиям имена – не формальные определения из учебника, а рабочие.

Конкретное расположение всех пятидесяти двух карт – каждая в определённой позиции – назовём *микросостоянием*. Это полная, исчерпывающая информация: какая карта на каком месте. А то, что мы видим глазами, – «колода в фабричном порядке» или «колода перемешана» – назовём *макросостоянием*. Макросостояние – это общая картина, описание «в целом», без деталей.

Фабричному порядку – одному макросостоянию – соответствует ровно одно микросостояние. А макросостоянию «перемешана» соответствует всё остальное – примерно 8×10^{67} минус один. Практически все микросостояния ведут к одной и той же макрокартине: «случайный порядок карт». Вот почему тасование – дорога в один конец: перемешанных микросостояний на десятки порядков больше, чем упорядоченных.

Тут нужна важная оговорка. Карточная колода – аналогия. Хорошая, наглядная, полезная – но всего лишь аналогия. Карты не тасуются сами от молекулярного движения. Их тасует человек. Колода не нагревается, не остывает, не обменивается энергией с окружающей средой. Это чистая комбинаторика – математика подсчёта вариантов, а не термодинамика.

Настоящая энтропия – про молекулы, атомы, кванты. Про системы, которые перемешиваются сами, без чьей-либо помощи, просто потому, что частицы мечутся и сталкиваются миллиарды раз в секунду. Колода помогает увидеть математическую логику – колоссальное численное превосходство «перемешанных» вариантов над «упорядоченными». Но не путайте карточный стол с физической реальностью. Мы используем колоду как карту местности, а не как саму местность.

* * *

Теперь перейдём к настоящей физике – к молекулам.

Откройте флакон духов в углу комнаты. Что произойдёт? Через несколько минут запах распространится повсюду. Молекулы аромата – крошечные летучие соединения – разлетятся из горлышка, сталкиваясь с молекулами воздуха, отскакивая, меняя направление тысячи раз в секунду. Никто их не подталкивает, никто не направляет. Они просто мечутся – и постепенно заполняют всё доступное пространство.

Здесь, в отличие от карт, всё происходит само. Никакой рукой не нужно тасовать. Молекулы сталкиваются друг с другом, обмениваются энергией, разлетаются в случайных направлениях – и этого достаточно. Это та самая настоящая физическая энтропия, которую карточная колода только иллюстрировала.

Микросостояние здесь – точное положение и скорость каждой молекулы духов. Их миллиарды миллиардов, и каждая движется по своей траектории. А макросостояние – то, что мы можем наблюдать без микроскопа и суперкомпьютера: «духи собраны в углу» или «духи равномерно распределены по комнате». Макросостояние – это грубая картина, эскиз, набросок. Микросостояние – это фотография с разрешением в каждый атом.

Сколько микросостояний соответствуют макрокартине «все молекулы духов в одном углу»? Мизерная доля. Молекулы должны быть втиснуты в крошечный объём, а вся остальная комната – пуста. Это очень специфическое требование.

А сколько микросостояний соответствуют макрокартине «молекулы равномерно рассеяны по всему объёму»? Практически все. Не «большинство» и не «девяносто процентов» – все, кроме исчезающе малой доли. Молекулы могут быть где угодно – у окна, у двери, под потолком, у плинтуса – и результат выглядит одинаково: «запах повсюду».

Ричард Фейнман выразил эту мысль проще некуда: если начать с чего-то особенного и вносить случайные изменения – получится обычное. Начать с обычного – случайные изменения не сделают его особенным. Вот и вся тайна. Чистая арифметика случайных столкновений.

Молекулы духов не «хотят» разлететься по комнате. У них нет стремления к равномерности. Они не знают, что такое «угол» или «комната». Для них нет «здесь» и «там» – есть только следующее столкновение и следующий отскок. Просто конфигураций «повсюду» несоизмеримо больше, чем конфигураций «в одном месте». Каждое случайное столкновение с одинаковой вероятностью может отправить молекулу в любую сторону. Но «любая сторона» – это почти наверняка не обратно в горлышко флакона. Потому что горлышко – крошечная точка в огромном пространстве комнаты. Молекула могла бы туда вернуться. Но вероятность этого – как вероятность вытасовать фабричный порядок колоды. Умноженная сама на себя для каждой из миллиардов молекул.

Подождите дольше жизни Вселенной – и молекулы, быть может, случайно соберутся обратно во флакон. Но «быть может» здесь – эвфемизм для «никогда на практике». Физика этого не исключает – но вероятность настолько мала, что ожидание растянулось бы на срок, перед которым возраст Вселенной выглядит мгновением.

Заметьте разницу с колодой карт. Там перемешивание обеспечивали ваши руки. Здесь – тепловое движение молекул. Там можно было остановиться и перестать тасовать. Здесь молекулы не останавливаются никогда – пока температура выше абсолютного нуля, они мечутся и сталкиваются. Природа тасует сама себя, без выходных, каждую микросекунду. И результат тот же: система переходит от редких конфигураций к обычным, от «особенных» – к «типичным». Духи заполняют комнату. Назад – не собираются.

* * *

Ещё одна картинка – самая осязаемая.

Представьте песочный замок на пляже. Кто-нибудь из вас строил их в детстве – башенки, стены, ров с водой. На постройку уходит час кропотливой работы: мокрый песок нужно утрамбовать, стены выровнять, башню вылепить так, чтобы не осыпалась. Каждое движение рук – целенаправленное, точное. Вы – внешний источник порядка, вкладывающий усилие.

На разрушение – одна волна. Или один неловкий шаг. Или просто ветер за ночь.

Число конфигураций песчинок, которые выглядят как «замок», – крошечное. Башенки должны стоять вертикально, стены – держать форму, ров – быть углублённым. Сдвиньте сотню песчинок – и замок потеряет очертания. Сдвиньте тысячу – и от него останется бугорок. Микросостояния, соответствующие макросостоянию «замок», – как иголка в стогу сена. А число конфигураций, которые выглядят как «куча песка»? Гигантское. Песчинки могут лежать как угодно – ближе, дальше, правее, левее, чуть глубже, чуть выше – и результат будет одним и тем же: бесформенная горка, неотличимая от любой другой бесформенной горки.

Замок – макросостояние с очень малым числом микросостояний. Куча – макросостояние, за которым прячется громадное множество вариантов. Волна, ветер, вибрация от шагов – любое случайное воздействие почти наверняка переведёт «замок» в «кучу». А обратно? Ни одна волна, ни один порыв ветра, ни одно землетрясение не сложит кучу песка в замок. Законы физики этого не запрещают – но среди всех возможных результатов случайного воздействия «замок» занимает исчезающе малую долю. Как в лотерее, где выигрышный билет один, а проигрышных – больше, чем атомов в Солнечной системе.

Вот она – энтропия. На пальцах, без единой формулы. Энтропия – число микросостояний, которые соответствуют данному макросостоянию. У «замка» энтропия низкая – вариантов мало. У «кучи» – высокая, вариантов колоссально много. У колоды в фабричном порядке – минимальная. У перемешанной колоды – огромная. У духов во флаконе – низкая. У духов, разлетевшихся по комнате, – максимальная.

И вот главное: вещи движутся от низкой энтропии к высокой, потому что высокоэнтропийных состояний несопоставимо больше. Случайные изменения – столкновения молекул, порывы ветра, любые ненаправленные воздействия – почти наверняка ведут туда, где больше вариантов. Их ничто не тянет – просто «туда» составляет почти всё, а «обратно» – почти ничего.

Это и есть Второй закон термодинамики – тот самый закон, который Эддингтон ставил выше любой теории. Энтропия изолированной системы не убывает. Не потому что существует какая-то мистическая сила, толкающая мир к распаду. А потому что математика подавляющего большинства не оставляет другого выбора. Мир катится к более вероятным состояниям – и каждое более вероятное состояние содержит в себе больше скрытых вариантов.

* * *

Но здесь нас подстерегает ловушка. Та самая, в которую попадает большинство научно-популярных книг, почти все школьные учебники и практически все объяснения в интернете. Ловушка называется «энтропия – это беспорядок».

В прошлой главе мы уже говорили, что «беспорядок в комнате» – плохая аналогия. Но проблема гораздо глубже, чем одна неудачная метафора. Само отождествление энтропии

с беспорядком вводит в заблуждение – даже когда речь идёт не о комнатах и носках, а о настоящих физических системах.

Вот пример. Возьмите бутылку итальянской заправки для салата – той, в которой масло и уксус. Встряхните её хорошенько. Масло и уксус перемешаются в мутную эмульсию – выглядит как хаос, смесь, неразбериха. Поставьте бутылку на стол и подождите. Через некоторое время жидкости разделятся: масло всплывёт наверх, уксус осядет вниз. Два аккуратных слоя. Чёткая граница. Красивая, упорядоченная картина. Глазами – чистейший порядок.

Если бы энтропия была «беспорядком», система должна была бы оставаться перемешанной – ведь перемешанное выглядит «беспорядочнее». Но заправка самопроизвольно расслаивается. Без внешнего вмешательства. Сама.

А теперь – внимание. Это состояние, два разделённых слоя, – состояние *максимальной* энтропии для данной системы. Не минимальной. Максимальной. Как показал физик Даниэль Штайер, этот пример ломает привычную интуицию. Масло и уксус расслаиваются не потому, что «порядок побеждает хаос», а по той же самой причине, по которой духи разлетаются по комнате: система переходит в состояние с наибольшим числом доступных микросостояний. Молекулы масла друг к другу притягиваются сильнее, чем к молекулам уксуса – и наоборот. Когда они разделены, каждая группа молекул может колебаться, вращаться, обмениваться энергией с соседями более свободно. Число доступных микросостояний при данной температуре оказывается максимальным именно для «разделённого» варианта.

Порядок на вид – но максимум энтропии по сути. «Беспорядок» здесь не просто неточное слово. Оно даёт прямо противоположный ответ. Подсказывает, что заправка должна оставаться перемешанной – а она расслаивается. Вот почему физики, которые работают с энтропией каждый день, давно перестали использовать слово «беспорядок». Оно не просто упрощает – оно обманывает.

* * *

Тогда что же такое энтропия – если не беспорядок?

Мы уже дали рабочий ответ: число микросостояний, соответствующих макросостоянию. Колода, духи, песочный замок – везде один и тот же принцип. Но есть ещё один взгляд на энтропию – другой, набирающий влияние. Взгляд, который переворачивает перспективу с ног на голову.

Энтропия – это мера нашего незнания.

Журнал *Quanta Magazine* в 2024 году опубликовал большой обзор, в котором физики формулируют это так: «Энтропия измеряет то, чего мы не знаем – о движении частиц, о следующей цифре в строке кода, о точном состоянии квантовой системы». Обратите внимание на сдвиг. Энтропия – не свойство системы самой по себе, не какая-то штука, сидящая внутри газа или колоды карт. Это свойство нашего описания системы. Мера того, сколько деталей мы упускаем, когда говорим «газ при такой-то температуре» или «колода перемешана».

Вернёмся к колоде карт. Когда вы говорите «колода перемешана», вы описываете макросостояние. Вы не знаете, какая карта на каком месте. Ваше незнание огромно – 8×10^{67} вариантов равновероятны, и вы не можете отличить один от другого без того, чтобы перевернуть каждую карту. Когда вы говорите «колода в фабричном порядке» – ваше незнание минимально. Вы точно знаете, где какая карта, даже не глядя. Энтропия – мера этого зазора между тем, что мы видим, и тем, что происходит на уровне деталей.

С духами – то же самое, но масштабнее. Когда молекулы равномерно распределены по комнате, мы знаем макрокартину – «запах везде». Но мы понятия не имеем, где конкретно находится каждая молекула. Вот эта молекула – у окна или у двери? Летит вверх или вниз? Быстро или медленно? Мы не знаем. Наше незнание максимально – и энтропия максимальна. Когда молекулы были собраны во флаконе, мы знали их местоположение гораздо точнее – все они находились в одном маленьком объёме. Незнания было меньше. Энтропия была ниже.

Итальянский физик Карло Ровелли пошёл ещё дальше. Он утверждает, что само направление времени – «вперёд» – это просто то направление, в котором энтропия растёт, а мы теряем информацию о деталях. Мы чувствуем ход времени, потому что мы – ограниченные наблюдатели, неспособные отследить каждую молекулу, каждый квант энергии, каждое столкновение. Мир вокруг нас непрерывно теряет различимость: детали размываются, конфигурации сливаются в одно общее «всё перемешано». Мы воспринимаем эту потерю различимости как течение времени.

Если бы существовало всезнающее существо, способное отследить положение и скорость каждой частицы во Вселенной, для него понятие «энтропия» потеряло бы смысл. Оно видело бы каждое микросостояние как единственное в своём роде – и ни одно не было бы «более вероятным», чем другое. А вместе с энтропией исчезло бы, возможно, и само ощущение необратимости. Времени – в нашем, человеческом понимании – для такого существа не было бы. Не все физики согласны с этим взглядом – для многих энтропия объективна, как масса. Но спор далёк от завершения.

Это радикальная идея, и мы к ней ещё вернёмся в этой книге. Пока достаточно запомнить главное: энтропия – не хаос, не бардак, не разруха. Это количество вариантов, скрытых за тем, что мы наблюдаем. Мера глубины нашего неведения. Песочный замок – мы знаем, где песчинки. Куча – не знаем, и нам всё равно. Фабричная колода – знаем каждую карту. Перемешанная – понятия не имеем. Духи во флаконе – знаем, где молекулы. Духи в комнате – потеряли их из виду навсегда.

* * *

Давайте подведём итог. В прошлой главе мы увидели, что вещи идут в одну сторону. Теперь мы объяснили почему – на пальцах, без единой формулы.

Энтропия – число скрытых микросостояний за наблюдаемой макрокартиной. У фабричной колоды, духов во флаконе, песочного замка вариантов мало. У перемешанной колоды, духов в комнате, кучи песка – колоссально больше. Вещи движутся от первых состояний ко вторым. Это Второй закон термодинамики – не мистическая сила, а статистика огромных чисел.

Конец ознакомительного фрагмента.

Текст предоставлен ООО «Литрес».

Прочитайте эту книгу целиком, [купив полную легальную версию](#) на Литрес.

Безопасно оплатить книгу можно банковской картой Visa, MasterCard, Maestro, со счета мобильного телефона, с платежного терминала, в салоне МТС или Связной, через PayPal, WebMoney, Яндекс.Деньги, QIWI Кошелек, бонусными картами или другим удобным Вам способом.