# **ДЖЕРЕМИ ИНГЛЕНД**

# **ЖИЗНЬ В ОГНЕ**

# **Происхождение жизни с точки зрения термодинамики**

Содержание

[Глава 1 Введение 1](#_Toc186695557)

[Глава 2 Посох и змей 8](#_Toc186695558)

[Глава 3 Снег и пыль 25](#_Toc186695559)

[Глава 4 Река и кровь 44](#_Toc186695560)

[Глава 5 Горы и меч 64](#_Toc186695561)

[Глава 6 Пламя и дерево 79](#_Toc186695562)

[Глава 7 Ветер и дыхание 94](#_Toc186695563)

[Глава 8 Голос и слово 107](#_Toc186695564)

##

## Глава 1 Введение

*В начале сотворил Бог небо и землю*. Земля же была безвидна и пуста, и тьма над бездною, и Дух Божий носился над водою.

Бытие 1: 1-2

Он сотворил небеса и землю и то, что между ними, за шесть дней, а потом вознесся на Трон

Коран 25:59

Вся жизнь на Земле, которую мы знаем, произошла от уже существующей жизни. Это кажется очевидным, но стоит оглянуться глубже — и перед нами возникает захватывающая загадка: на заре существования мира жизни не было вовсе.[[1]](#footnote-1) Как же получилось, что из неживой материи вдруг возникло нечто живое? Это открытие переворачивает наш взгляд на мир: был ли этот момент первичного появления жизни уникальным чудом, находящимся за пределами законов физики и химии? Или это событие следовало логическому, пусть и сложному, пути, который мы способны понять?

Вот здесь-то и начинается самый интересный вопрос: **как появилась жизнь?** Этот вопрос волнует не только ученых, но и всех любознательных людей, ищущих смысл в окружающем мире. Однако перед нами встаёт вызов: каким должно быть объяснение? Мы спорим не просто о фактах — мы ищем ключ к пониманию чего-то фундаментального.

Эта загадка очаровывает и пугает одновременно. Ведь её решение — это не просто шаг вперёд для науки, но и окно в самое начало нашей истории. И то, каким образом мы подходим к этой загадке, может изменить наше представление о самих себе.

Некоторые биофизики задаются вопросом: какие именно атомы встретились и взаимодействовали, чтобы создать первые биомолекулы? Другие же принимают сам факт их возникновения как данность и сосредотачиваются на оценке вероятности такого события при разных условиях. Но что мы вообще считаем жизнью? Была ли её поява на Земле постепенным, медленно развивающимся процессом, или это был моментальный скачок, подобный вспышке молнии? Если первое, то где именно провести границу между живым и неживым? Если второе, то какое ключевое свойство жизни проявилось первым?

Был ли этот процесс неизбежным, как таяние льда на весеннем солнце, или невероятной случайностью, столь редкой, что даже наши лучшие научные теории не могут её постичь? Мы знаем, почему вода замерзает, как звезды рождаются из сжимающегося газа, но можем ли мы описать условия, при которых неживая материя неизбежно становится живой? Как скептик на выступлении иллюзиониста, мы не будем удовлетворены, пока не увидим этот загадочный «фокус» своими глазами.

Но научный поиск — лишь часть этой истории. Каждый человек, каждый учёный, готовый заглянуть внутрь себя, понимает: этот вопрос волнует нас не только из-за любопытства, но потому, что он затрагивает самое сокровенное — поиск смысла и цели. Мы размышляем, откуда мы пришли, к чему принадлежим, как всё началось. Наши представления о прошлом формируют решения настоящего и очертания будущего.

Если всё, что есть в человеке, можно найти в пруду или лабораторной пробирке, что тогда делает нас уникальными? Являемся ли мы просто ещё одной разновидностью животных? Или чем-то большим? Выражает ли наше существование замысел Творца, создавшего нас по Своему образу и подобию? Или мы всего лишь изысканная форма инея, замерзшего на грани между небом и землёй? А может, истина скрывается в обеих этих идеях одновременно?

Как только мы начинаем спорить об истоках жизни, ставки резко возрастают. На кону — наше понимание себя, мира и места, которое мы в нём занимаем. Этот вопрос — не просто научная головоломка, но отражение самых глубоких стремлений нашей человеческой души.

В этой книге мы отправимся в увлекательное путешествие, чтобы понять, как современные физические науки раскрывают загадку того, когда и как неживая материя начинает вести себя так, будто она жива. Жизнь имеет ряд поразительных черт: она способна воспроизводить себя, поглощать энергию, адаптироваться и даже предугадывать изменения в окружающей среде. Эти процессы — квинтэссенция жизни, и каждый из них можно исследовать через призму термодинамики.

Мы сосредоточимся на достижениях в неравновесной статистической механике — области, которая становится ключом к пониманию жизненных процессов. Эта дисциплина помогает рассмотреть, как физические свойства неживой материи могут породить характерную активность живых организмов. Главная идея проста, но глубока: так же, как живые существа наследуют свои свойства через гены, неживая материя формирует уникальные характеристики через способы соединения и взаимодействия своих частиц. Под влиянием повторяющихся структур окружающей среды материя как будто «изучает» возможные формы, пока её ритмы и структуры не начинают перекликаться с этими внешними шаблонами. На каком-то этапе этот процесс становится всё больше похож на жизнь.

Если бы мы остановились лишь на физическом объяснении уникальности жизни, этого, возможно, было бы достаточно для научного исследования. Но жизнь — это не просто набор формул и закономерностей. Это тема, которая волнует человечество на протяжении веков. Вопросы о том, что делает жизнь живой, в чём её уникальность, ценность и цель, касаются самых глубоких аспектов человеческой природы. Именно эти размышления требуют взгляда шире, выхода за рамки науки и поиска ответов в философском контексте.

Существует множество способов подойти к этим вопросам, но я убеждён, что лучший путь пролегает через интерпретацию еврейской Библии. Её древние тексты обладают глубиной и универсальностью, которая помогает осмыслить «великие вопросы» человеческого существования. Когда я начинал работу над этой книгой, я задал себе простой, но интригующий вопрос: может ли Библия предложить что-то значимое в ответ на сложные физические концепции, которые мы изучаем сегодня? Ответ на этот вопрос оказался куда более захватывающим, чем я ожидал.

Меня поразило, что Библия с необычайной глубиной исследует вопрос, как и почему материя переходит из состояния неживого в живое. Более того, она делает эту тему ключевой частью одного из самых значительных своих сюжетов. В её текстах скрыта удивительно детальная карта, которая не только помогает осмыслить физические идеи через призму нашего повседневного опыта, но и проливает свет на более глубокие вопросы о человеческом существовании и его смысле. Что самое удивительное, эта карта объединяет научные и философские размышления, позволяя им взаимно обогащать друг друга, а не вступать в конфликт.

Мы привыкли думать, что Библия далека от тех открытий, что сделала современная наука, особенно в области происхождения жизни. Более того, порой утверждают, что научный прогресс будто бы подрывает её авторитет как источника знания. Однако это далеко не так.[[2]](#footnote-2) Эта книга показывает: чтобы найти истину, вовсе не нужно противопоставлять эти два подхода. Вместо того чтобы участвовать в перегретых дебатах, мы обратимся к тексту Библии и увидим, что её слова не только знакомы с концепциями, необходимыми для понимания перехода от неживого к живому, но и предлагают удивительно поэтическое их объяснение, делая сложные идеи доступными и интуитивно понятными.

Особенное очарование для меня заключается в том, как в этом подходе соединяются личные убеждения и наиболее точный способ объяснения сложных физических и химических процессов. Да, для некоторых утверждение о том, что жизнь могла возникнуть из «слепых» механических процессов, кажется ударом по библейскому повествованию о сотворении мира. Для других это выглядит как попытка свести человеческое существование к простому материальному процессу, лишённому какого-либо смысла. Но я вижу в этом возможность показать, что комментарии Библии не только не противоречат научным открытиям, но и дополняют их. Её подход к вопросу о том, как материя становится живой, удивительным образом обращается к естественному человеческому восприятию — тому, как мы осмысливаем мир через свои ощущения и непосредственный опыт.

Эта взаимосвязь между наукой и библейскими текстами раскрывает для нас не только новые горизонты понимания происхождения жизни, но и помогает увидеть, что поиск истины, независимо от его формы, всегда был и остаётся частью нашего общего человеческого путешествия.

Идеи статистической термодинамики, какими бы сложными они ни казались, можно сделать понятными и увлекательными, если подойти к ним через призму жизненных примеров. Именно эту задачу выполняет книга «Исход», которая, как ни удивительно, предлагает богатый набор образов, способных открыть перед нами сложные физические теории простым и доступным языком. Если я справлюсь со своей задачей, эти древние образы оживут, помогая лучше понять фундаментальные процессы, лежащие в основе возникновения жизни.

Представьте себе Моисея — одинокого пастуха, ведущего своё стадо по пустыне. Его повседневное, тихое существование внезапно нарушается потрясающим явлением: куст горит ярким пламенем, но огонь не сжигает его. Этот огонь становится не просто визуальным феноменом, а порталом, через который Бог раскрывает Моисею истоки его народа, обещает освобождение от рабства и вручает три знамения — ключи к великой миссии.

Каждое из этих знамений наполнено символизмом, перекликающимся с самой сутью жизни. Первый знак — посох, который оживает, превращаясь в извивающуюся змею. Это метафора превращения неживого в живое, преодоления границы между мёртвым деревом и дикой, непредсказуемой жизнью. Второе знамение — «снежное» поражение кожи. Это странное явление отражает сложность границы между человеческим телом и окружающим миром, вызывая ассоциации с хрупкими, но изящными формами снежинок — бесконечно сложными и всегда уникальными. Третье знамение завершает эту триаду: вода, смешанная с грязью, превращается в кровь — сущность, которая с древнейших времён символизирует саму жизнь.

На первый взгляд, всё это может показаться набором театральных трюков. И текст, казалось, предвосхищает такое восприятие. И египетские маги при дворе фараона, кажется, подтверждают это, с лёгкостью воспроизводя чудеса Моисея и его брата Аарона, когда они показывают фараону воду, превращенную в кровь, посох, превращающийся в змея. Но если всмотреться глубже, становится ясно, что эти знамения — не просто магические фокусы. Они представляют собой тщательно выстроенные метафоры, через которые Библия передаёт удивительно точное понимание того, как неживое может превратиться в живое. Это, по сути, руководство, объясняющее сложнейшие процессы на языке, который способен понять даже человек, не знакомый с физикой.

Названия глав этой книги, такие как *«Посох и змей», «Снег и пыль», «Река и кровь», «Пламя и дерево»*, *«Ветер и дыхание», «Голос и слово»* — вдохновлены библейским текстом. Каждая пара понятий открывает дверь к размышлениям о биологии и физике жизни, позволяя взглянуть на них с новой, неожиданной точки зрения. Моя цель — превратить эту древнюю лексику в мост между наукой и философией, показать, как библейские образы могут служить основой для интеграции идей из естественных наук, раскрывая перед нами тайны происхождения жизни.

Следуя этому подходу, мы не только узнаем, как жизнь может «вспыхнуть» из неживой материи, но и глубже поймем, как Библия осмысливает и интерпретирует этот процесс. Такое понимание не просто объясняет механизм появления жизненности, но и открывает перед нами её удивительный потенциал и ценность.

Прежде чем углубляться в детали, стоит прояснить: какого рода ответ на загадку происхождения жизни мы действительно ищем? Может показаться, что наша цель — создать нечто вроде «фильма», который с абсолютной точностью реконструирует тот загадочный момент в далёком прошлом, когда в какой-то луже произошло чудо химической трансформации. Идеально было бы подкрепить этот фильм данными, которые мы можем собрать в настоящем, чтобы заявить: вот, так всё и произошло.[[3]](#footnote-3)

Но такая картина — всего лишь фантазия. Главное препятствие — отсутствие свидетельств. Мы говорим о событиях, которые произошли миллиарды лет назад, и у нас нет никаких способов восстановить их в точности. Как и на месте преступления, где все улики уничтожены, или на археологическом раскопе, где всё перемешано временем, следы самой ранней жизни были стёрты и перемешаны природными процессами.

ДНК, РНК и белки — ключевые элементы жизни на субклеточном уровне — распадаются в воде за временные промежутки, измеряемые миллионами лет.[[4]](#footnote-4) Ожидать, что мы обнаружим сохранившиеся молекулы, настолько же наивно, как искать песочные замки на пляже, построенные ребёнком сто лет назад. Восстановление молекулярного происхождения жизни по остаткам древности — задача, по сути, безнадёжная.

Но есть иной подход к этой загадке. В основе самого вопроса лежит осознание: перед нами явление, которое требует объяснения. Что именно мы пытаемся понять? Когда мы видим груду камней в овраге или шишку под сосной, мы не задумываемся, как они там оказались. Камни могли упасть вниз, а шишка — просто упала с дерева. Это наблюдаемые, воспроизводимые события, не вызывающие удивления.

Жизнь же — совсем другое дело. Мы не видим, чтобы живое само по себе возникало из неживой материи, и это кажется нам противоестественным. Наша интуиция говорит, что дело не только в времени. Да, некоторые редкие события становятся неизбежными, если ждать достаточно долго. Например, молния обязательно ударит в горную вершину, если дать ей миллион лет.

Но жизнь — это не просто случайность. Даже самые простые её формы настолько сложны, что требовали бы бесчисленных вселенных, чтобы все необходимые элементы случайно сложились в одну функциональную систему. Точные сроки такого процесса зависят от множества мельчайших химических деталей. Где-то это может занять сто лет, а где-то миллион.

Однако наш истинный поиск заключается в другом. Мы ищем объяснение, которое можно разложить на ясные, последовательные шаги — такие, которые можно понять, воспроизвести и наблюдать. Мы хотим видеть процесс возникновения жизни таким же очевидным, как падение шишек с дерева, — простым, воспроизводимым и проверяемым.

Именно этот путь мы пройдём в рамках этой книги. Вместо того чтобы гадать о событиях древности, мы попробуем взглянуть на процессы, лежащие в основе жизненности, через физику и химию. Мы покажем, как невероятное становится возможным, а невозможное — естественным.

Я стремлюсь показать, как можно осмыслить процесс возникновения жизни, разложив его на ясные и наблюдаемые этапы. Я не претендую на знание того, какие именно молекулы вступили во взаимодействие или когда это произошло. Но я предлагаю набор идей из области физики, известной как неравновесная термодинамика. Эта наука открывает нам возможность изучать появление жизни шаг за шагом, превращая загадку в последовательность понятных процессов.

С точки зрения физики, жизнь — это совокупность конкретных явлений, каждое из которых имеет точное определение. Если рассматривать их как отдельные этапы самоорганизации, мы можем исследовать их по отдельности. Чем больше таких элементов мы воспроизведём в лабораторных условиях, тем ближе эти процессы станут к нашей повседневной реальности.

Важнейшее место в этом обсуждении занимает концепция «диссипативной адаптации». Она описывает, как материя, подвергаясь воздействию внешней среды, принимает формы, наиболее подходящие для взаимодействия с этой средой. Это как если бы окружающая среда «настраивала» материю на определённый лад, закрепляя её в формах, которые ей наиболее соответствуют. Мы исследуем множество наблюдений из физики и биологии, чтобы показать, как эта идея работает на практике.

Особая прелесть неравновесной термодинамики в том, что её концепции тесно связаны с явлениями, которые знакомы нам из повседневной жизни. Например, как мокрый снег плавно стекает по лобовому стеклу в дождливую погоду или как зёрна соли и перца «танцуют» на горячей сковороде. Эти на первый взгляд простые явления помогут нам проникнуть в суть гораздо более сложных процессов, которые лежат в основе возникновения жизни.

## Глава 2 Посох и змей

*Он бросил его на землю, и жезл превратился в змея*.

Исход 4: 3

Он бросил свой посох, и тот превратился в явную змею

Коран 7:107

Возможно ли, что секреты самой жизни сокрыты в строгих законах физики? Если атомы, составляющие всё живое, подчиняются этим законам (а всё указывает на то, что это так), то можно ли считать жизнь неизбежным следствием природы? Эта мысль звучит почти магически: как будто где-то существует уравнение, которое просто ждёт, чтобы его раскрыли. И надо признать, подходы физиков уже привели к потрясающим открытиям.

Когда такие учёные, как Макс Дельбрюк, начали применять физические методы в биологии, мир увидел революцию. Благодаря новым инструментам, таким как рентгеновская кристаллография и суперразрешающая микроскопия, мы получили не просто теоретическое понимание жизни, но реальные изображения молекул ДНК, белков и других микроскопических структур, которые составляют основу всего живого.[[5]](#footnote-5) Мы не только научились расшифровывать генетический код, но и смогли использовать клеточные механизмы для создания макромолекул по своему замыслу. Казалось, что, если мы будем следовать этим путём, то все тайны биологии, даже самые сложные, вскоре станут нам подвластны.

Но вот в чём подвох: этот путь, при всей его очевидной логичности, может оказаться ловушкой. И ключевая проблема здесь — редукционизм, иллюзия, что всё в мире можно свести к простым правилам, как механизм старинных часов. На первый взгляд, это кажется обнадёживающим: если вы разберёте часы на части и поймёте, как каждое колесико взаимодействует с другим, вы сможете предсказать их работу. Учёные, вдохновлённые этой мечтой, продвинули науку невероятно далеко. Ведь действительно, от объяснения приливов, вызванных Луной, до расшифровки генетических заболеваний — редукционизм часто работает. Но что, если жизнь сложнее, чем механизм часов? Что, если её секреты кроются не только в взаимодействии частей, но и в чём-то большем?

Надежда, что все загадки науки можно разгадать через редукционизм,[[6]](#footnote-6) была особенно популярна среди физиков XIX века. Казалось, что достаточно лишь разобрать сложные системы на составляющие и применить к ним известные законы Ньютона или уравнения квантовой теории, чтобы объяснить всё, от движения планет до устройства атомов. Однако XX век стал переломным моментом. Сотни учёных, включая лауреатов Нобелевской премии, написали ясные работы, объясняющие, почему редукционизм, каким бы заманчивым он ни был, не всегда даёт ответы.[[7]](#footnote-7)

Возьмём для примера турбулентные потоки или сверхохлаждённые магниты. Это не какие-то экзотические явления, а реальные физические системы. Но даже в них классические законы физики, которые, как мы привыкли думать, «управляют» всем, оказываются недостаточны. Почему? Потому что перед нами встают грандиозные барьеры: мы не можем измерить все детали, рассчитать все взаимодействия или учесть все нюансы. А в таких масштабах даже малейшие неизвестности могут перевернуть всю картину.[[8]](#footnote-8)

Даже сегодня физика продолжает исследовать эти сложные системы. Но она уже давно не полагается исключительно на фундаментальные уравнения, описывающие микроскопические частицы. Вместо этого исследователи ищут новые подходы, которые позволяют объяснить поведение «многочастичных» систем на более высоком уровне, не теряя из виду их целостность и сложность. И именно такие подходы начинают открывать перед нами двери к пониманию более глубоких тайн, в том числе тайн самой жизни.

Вторая распространённая ошибка в подходе к разгадке границы между жизнью и неживой материей кроется в самом языке, который мы используем. Многие полагают, что, если мы достаточно глубоко освоим законы физики, то сможем с такой же уверенностью понять, что такое жизнь, как мы понимаем, почему вода кипит или замерзает. Более того, нередко кажется, что идеальная физическая теория могла бы стать своего рода эталоном, чётко определяющим, что считать живым, а что нет. Но я утверждаю, что этот подход упускает важную деталь: наша способность давать названия явлениям мира предшествует любым попыткам описать их через физику. И прежде чем мы сможем дать научное определение жизни, мы должны признать, что уже в самом начале наша интуиция и язык провели эту границу.

Физик, решивший объяснить, как живые существа ведут себя или откуда они берутся, сталкивается с выбором: как перевести свойства известных нам форм жизни на язык физических формул. Этот процесс неизбежно раскрывает, что граница между живым и неживым была проведена задолго до физических рассуждений — через образы мышления и речи, которые физика не способна напрямую воспроизвести. Следовательно, правильная задача физической теории — не переопределить жизнь, а предложить точные термины, которые помогут описать эту границу и понять, как материя может её пересечь, становясь живой.

В глубине надежда на редукционизм отражается уже в самом вопросе: откуда взялась жизнь? Когда мы видим живой организм, его ошеломляющая сложность — от формы до функций — невольно заставляет нас задуматься: неужели всё это может быть просто результатом взаимодействия более простых элементов, словно бильярдных шаров, сталкивающихся на столе? Есть ли в жизни что-то большее, чем просто «слепо вибрирующие» части? И если ничего большего нет, то разве это не значит, что однажды мы сможем полностью её понять?

Другими словами, всякий раз, когда мы пытаемся объяснить возникновение жизни, мы словно хотим разложить её на череду рациональных шагов, где каждый следующий этап логично вытекает из предыдущего. Разве это не похоже на то, что мы стремимся превратить жизнь в идеально срежиссированное представление, управляемое простым набором предсказуемых физических правил?

Представьте себя блестящим мыслителем прошлых эпох, пытающимся разгадать тайну движений небесных светил. Солнце, луна и звезды, кажущиеся вечными, но постоянно меняющими свои позиции, вызывали восхищение и трепет. Как же разобраться в их сложных путях, которые, казалось, находятся за гранью человеческого понимания? Идея о том, что всё это можно свести к нескольким уравнениям, способным объяснить не только блуждающие планеты, но и далёкие галактики, и даже ящик на пружине, казалась бы невероятной для большинства мыслителей.

Но затем пришли Кеплер и Ньютон, и эта невозможная задача стала реальностью. Благодаря их открытиям, небеса превратились в открытую книгу, а расчёты движения звёзд и планет стали настолько рутинными, что сегодня их можно вовсе обойти в учебной программе, сосредоточив внимание на более «продвинутых» областях физики. Однако масштаб этого прорыва трудно переоценить: он перевернул мир, показав, что загадки Вселенной подчиняются строгим и предсказуемым законам.

А потом наступил XX век. Эйнштейн, размышляя о движении света, предложил новую концепцию гравитации, которая, наконец, разрешила загадку поведения Меркурия, недоступную Ньютоновской физике. В это же время Шрёдингер с помощью своего волнового уравнения открыл тайны атома, объяснив цвета света, испускаемого разными газами. Эти теории, хоть и интуитивно непостижимы, точно соответствовали экспериментам и изменили наше представление о мире. На фоне таких потрясающих успехов легко понять, почему некоторые учёные могли поверить, что с новыми теориями можно будет устранить любую неопределённость.

Но стоит копнуть глубже, и становится ясно: редукционизм, позволивший достичь этих триумфов, имеет свои ограничения. Все эти теории блистательны, но они лучше всего работают в идеальных условиях — когда исследуется ограниченный участок реальности, поддающийся описанию относительно простой формулой. Однопланетная Солнечная система, один атом водорода — примеры, где физика достигает максимальной точности, изолируя малый фрагмент реальности от остального хаоса.

Однако, как только мы выходим за рамки этих идеализированных моделей, мир становится слишком сложным для таких изящных решений. Проблемы турбулентности, фондовых рынков или взаимодействия множества частиц уже не поддаются простой математической формулировке. Эти примеры подсказывают нам: редукционизм — это мощный инструмент, но он далеко не универсален. И хотя физика продолжает открывать границы возможного, её успехи неизменно сочетаются с необходимостью понимать, где и почему наши инструменты оказываются недостаточными.

Иногда наши модели разочаровывают нас, не потому что они неправильны, а потому что не могут полностью отразить сложность систем, которые мы пытаемся описать. Возьмем, к примеру, гравитацию. Закон всемирного тяготения Ньютона прекрасно работает для большинства случаев, но он оказался недостаточным для описания орбиты Меркурия, где гравитация Солнца особенно сильна. Лишь добавление тонкости и изящества общей теории относительности позволило решить эту загадку. Однако в условиях более слабых гравитационных полей, например, для большинства планет Солнечной системы, ньютоновский подход по-прежнему остается вполне точным и эффективным.

Но что происходит, когда система становится сложнее? Когда у нас есть одна звезда и одна планета, уравнения движения изящны, и предсказать форму орбиты небесного тела сравнительно легко. Однако добавьте третье небесное тело, и перед вами окажется знаменитая задача трёх тел — проблема, для которой не существует общего решения в виде точных уравнений. Здесь начинается сложная игра: либо мы прибегаем к математическим уловкам для приближения ответа, либо используем компьютеры, которые с помощью "грубой силы" численных вычислений находят результат. И чем дольше мы пытаемся углубиться в такие задачи, тем яснее становится, что случаи, когда всё поддаётся изящному решению, — это исключения, а не правило.

Особые симметрии, как в случае однопланетной Солнечной системы, иногда позволяют написать простую формулу, которая объясняет всё поведение системы. Но в реальном мире большинство систем гораздо сложнее. Чем больше объектов взаимодействует, тем больше переменных и вычислений требуется, и для их описания приходится полагаться на компьютерные модели. Сегодняшние суперкомпьютеры позволяют чрезвычайно точно моделировать орбиты систем с десятками или даже сотнями небесных тел, но сама эта точность подчёркивает главный урок: простые системы понять проще, а сложные требуют не только вычислительных мощностей, но и глубокого понимания.

Редукционизм, казалось бы, всё ещё работает — просто он становится крайне затратным. Крайний редукционист мог бы утверждать, что вся наука должна следовать одной схеме: начать с фундаментальных законов, которые описывают простейшие элементы реальности, а затем постепенно добавлять переменные, чтобы моделировать всё более сложные системы. Такой подход кажется логичным, но, как показывает опыт последних двух столетий, наука развивается иначе.

Возьмем, например, кипящую воду. Представьте, что стакан воды стоит на нагревательной плите. Мы знаем, что при определённой температуре вода закипит и начнет превращаться в пар. Для редукциониста этот процесс можно объяснить, обратившись к фундаментальным свойствам молекул воды: их массы, взаимодействия электронов и ядер, которые образуют H2O. На этом уровне уравнение Шрёдингера даёт нам мощный инструмент для описания связей между молекулами.

Однако, чтобы предсказать точный момент, когда вода закипит, нужно было бы записать уравнение Шрёдингера для триллионов молекул воды в стакане и рассчитать их поведение. На теоретическом уровне это возможно. Но на практике такое вычисление выходит далеко за пределы современных возможностей. И здесь возникает ключевой вопрос: насколько эффективно полагаться исключительно на редукционизм, если даже такие относительно простые явления, как кипение воды, требуют учёта множества факторов, которые сложно описать одной формулой?

Рассмотрение этих вопросов помогает нам понять, где редукционизм остаётся полезным, а где ему требуется что-то большее — не только вычислительные мощности, но и другой взгляд на проблему, выходящий за рамки простого разложения системы на её части.

Попытки использовать «грубую силу» для полного моделирования физической реальности сталкиваются с непреодолимыми преградами. Представьте, что даже самые мощные суперкомпьютеры, которыми располагает человечество, оказались бы беспомощными перед задачей учесть все частицы и их взаимодействия, чтобы объяснить, почему вода превращается в пар. Мало того, что такие вычисления потребовали бы временных масштабов, выходящих за пределы нашей цивилизации, они также запросили бы ресурсы, которые превзошли бы возможности всей нашей галактики. Эта проблема настолько масштабна, что её решение — построить компьютер, достаточный для таких вычислений, — скорее из области научной фантастики, чем реальности.

Однако это не значит, что мы остаёмся безоружными. Наука нашла обходные пути, которые позволяют решать невероятно сложные задачи, обходясь без идеальной точности. Ключ к успеху — в использовании разумных приближений. Уловки, разработанные для упрощения квантовой математики, возможно, теряют в деталях, но дают удивительно точные результаты в тех аспектах, которые действительно важны. Например, мы можем слегка ошибиться в моделировании силы между молекулами или массы атомов, но всё же получить ответы, близкие к реальности. Что произойдёт, если вода нагреется? Будет ли она жидкостью или превратится в пар? Эти вопросы уже не требуют идеальной точности для осмысленных выводов.[[9]](#footnote-9)

Кипение — идеальный пример того, как небольшие изменения в свойствах отдельных частей системы могут привести к огромным изменениям в её коллективном поведении. При 98 °C вода остаётся жидкой, а при 102 °C те же молекулы превращаются в пар. Удивительно, что при этом средняя скорость движения молекул меняется менее чем на 1%. Как же тогда объяснить столь разительное различие между двумя состояниями вещества?

Ответ заключается в фазовых переходах — загадочных и захватывающих явлениях, где отдельные части системы начинают взаимодействовать и кооперироваться. Представьте себе крошечный кластер молекул воды. Эти молекулы связаны между собой электрическими силами, образуя «микроскопическую команду». Эти силы притяжения немного напоминают гравитацию, которая удерживает нас на поверхности Земли. Но если ракета достигнет достаточно высокой скорости, она преодолеет гравитационное притяжение. Точно так же, когда молекула воды внутри кластера набирает достаточную скорость, она может «вырваться на свободу» из этого тесного окружения.

На молекулярном уровне переход из жидкости в пар — это массовое бегство молекул. Каждая из них получает импульс энергии, и, одна за другой, они начинают покидать свою группу, оставляя позади жидкость и образуя газ. Этот «совместный побег» и есть то, что отличает фазовые переходы от других процессов: это не просто изменение одной молекулы, это коллективная революция, способная преобразить всю систему.

Фазовые переходы — словно драматическая кульминация научного романа, где мельчайшие детали взаимодействий порождают эффект, видимый даже невооружённым глазом. Именно такие процессы напоминают нам, как глубоко взаимосвязаны макро- и микромир, и заставляют задуматься о том, насколько удивителен наш мир.



В жидкости атомы или молекулы находятся в тесной упаковке: каждая частица окружена множеством соседей, которые притягивают её своими силами. Эти силы удерживают частицы близко друг к другу, несмотря на их непрерывное хаотичное движение. Жидкость — это своеобразный танец, где участники постоянно меняют партнёров, но при этом остаются в пределах общего пространства. В газе всё иначе. Частицы движутся намного быстрее, их энергии достаточно, чтобы преодолевать притяжение соседей. Когда одна частица приближается к другой, она слишком стремительна, чтобы задержаться рядом. Вместо плотной группы они разлетаются, заполняя огромный объём, где каждая частица словно танцует сама по себе, редко встречая на своем пути других. Это отличие между жидкостью и газом делает их свойства такими разными, несмотря на то, что в основе их поведения лежат одни и те же физические принципы.

Представьте себе молекулы воды, словно игроков, заключенных в тесный круг танца. Каждая молекула ощущает притяжение своих соседей, которое становится сильнее с увеличением числа участников. Чем больше молекул вокруг, тем глубже «гравитационная долина», в которой они оказываются, и тем сложнее отдельной молекуле вырваться из общего круга. Однако, если одна молекула все же «убегает», это может создать эффект домино: её исчезновение ослабляет силы, удерживающие остальных, и вероятность, что за ней последуют другие, резко возрастает. Этот эффект коллективного побега особенно заметен на точке кипения, когда жидкая вода словно балансирует на грани между тесным порядком молекул и свободным движением в виде пара.

Вода при кипении оказывается в состоянии нестабильного равновесия, где малейшее нарушение может вызвать каскадный переход молекул из жидкости в пар. Удивительно, но обратное тоже верно: если силы между молекулами усилить, капли жидкости начнут затягивать беглецов обратно, и вместо «паники» начнется процесс массового возвращения молекул в состояние жидкости. Эта тонкая динамика, зависящая от мельчайших изменений в силах между молекулами, показывает, насколько сложным может быть предсказание поведения системы даже при, казалось бы, простом фазовом переходе.

Коллективные эффекты, подобные испарению и замерзанию, — это лишь верхушка айсберга. Такие явления существуют повсюду, от молекулярного до макроскопического уровня. Замерзание воды, кристаллизация солей, вязкость жидкостей — все эти процессы зависят от кооперации огромного числа частиц, где каждое мелкое изменение взаимодействий может вызывать огромные последствия. Но, как бы удивительно это ни звучало, предсказывать такие эффекты, исходя только из поведения отдельных атомов, часто невозможно.

Эту мысль блестяще выразил лауреат Нобелевской премии Ф. У. Андерсон: «Большее – это другое». Действительно, успех в изучении таких явлений не заключается в совершенствовании микроскопических моделей атомов. Вместо этого нужно рассматривать системы как самостоятельные единицы, изучая их коллективные свойства, взаимодействия и закономерности. Это требует не просто редукционистского подхода, но и глубокого понимания того, как части складываются в единое целое.

Мир коллективных эффектов — это мир загадок, в котором кроется ключ к пониманию сложнейших явлений природы. Однажды распутав одну тайну, мы открываем десятки новых, но в этом и заключается бесконечная красота науки: следовать за неизвестным и видеть, как из хаоса рождается порядок.

После краха редукционизма возникает надежда на иной подход: однажды исследование жизни будет напоминать не уход за садом с его хаосом и непредсказуемостью, а точное вычисление последствий физических законов. Хотя предсказать точку кипения воды на основе моделей молекулярной динамики может быть сложно, у нас есть физические теории, которые удивительно точно описывают многие явления в системах из множества взаимодействующих частиц.

Рассмотрим фазовый переход жидкости в пар. При этом переходе объем резко увеличивается, а сама жидкость поглощает определенное количество тепла из окружающей среды. Зная, насколько изменяется объем и сколько тепла поглощается, мы можем использовать уравнение Клаузиуса-Клапейрона, чтобы предсказать, как изменится температура кипения при увеличении давления.[[10]](#footnote-10) Это уравнение не требует знания квантовой механики или молекулярных деталей — оно опирается на общие принципы физики.

Ещё ярче эта универсальность проявляется в так называемых «критических показателях». Например, изменение размера пузырьков в перегретой жидкости под давлением подчиняется строгим математическим закономерностям, которые удивительным образом одинаковы для самых разных систем.[[11]](#footnote-11) Это явление можно наблюдать не только в перегретой жидкости, где пузырьки пара растут и расширяются по мере увеличения температуры, но и в таких на первый взгляд несхожих системах, как магнитные кристаллы и липидные бислои.[[12]](#footnote-12) Эти показатели иллюстрируют глубокие связи между разными типами многокомпонентных систем, независимо от их природы.

Чтобы ещё лучше понять силу таких законов, представим пулю, выпущенную в резервуар с водой. Каков будет результат? Мы знаем, что пуля, теряя скорость, передаст свою кинетическую энергию воде, увеличив её температуру. Этот расчёт не требует знания вязкости воды, формы пули или химического состава жидкости. Нам достаточно знать массу и скорость пули, объём воды и её теплоёмкость — коллективное свойство жидкости, измеренное экспериментально. Даже не вдаваясь в детали, как трение и турбулентность преобразуют движение пули в хаотическое тепловое движение молекул, мы можем точно предсказать конечную температуру воды.

Этот подход — основа термодинамики. Концепция энергии родилась из законов Ньютона: это универсальное численное значение, которое выражает движение и потенциальную способность материи двигаться. Главный принцип энергии — это ее сохранение. Её нельзя создать или уничтожить, она лишь переходит из одной формы в другую. Этот закон применим и к простым системам, и к сложным: от кубика льда до урагана. Даже если мы не можем предсказать каждую деталь их поведения, знание сохранения энергии открывает путь к новым открытиям.

Сохранение энергии — лишь один из примеров того, как система, состоящая из множества микроскопических и, казалось бы, непредсказуемых элементов, может демонстрировать закономерное коллективное поведение, которое объясняется и предсказывается с помощью хороших физических моделей. Симметрии, такие как способность молекулы быть идентичной своему зеркальному отражению, или геометрические упорядоченности, как в кристалле из одинаковых атомов, который действует как регулярная решетка крошечных магнитов, позволяют создать простые и точные модели. Такие модели используют математические приемы, чтобы предсказать, как система в целом будет себя вести.

Особенно это работает, если дополнительно применять методы теории вероятностей, чтобы сосредотачиваться на среднем или типичном поведении множества частиц, игнорируя редкие и маловероятные события, которые едва ли можно увидеть в эксперименте. Именно так наука о статистической термодинамике и более широкая теория конденсированных сред смогли объяснить множество скрытых закономерностей в разных системах: от способности кристаллов сохранять тепло до неоднородностей в липидных мембранах, от группировки микроскопических частиц до магнетизма металлов при низких температурах.[[13]](#footnote-13) Хотя такие системы включают огромное количество взаимодействующих элементов, они удивительно просты для анализа, если рассматривать их через свойства, характерные для всей системы в целом.

Этот универсальный принцип показывает, что, даже сталкиваясь с невероятной сложностью мира, мы можем находить порядок и структуру, применяя фундаментальные законы природы. Это не только упрощает сложные задачи, но и даёт нам ключ к разгадке ещё больших тайн, лежащих в основе самой жизни.

После краха редукционизма физики нашли новые подходы, которые позволяют заглянуть за пределы хаоса множества частиц и открыть скрытые закономерности, управляющие поведением материи. Одной из самых значительных побед в этом направлении стало изучение фазовых переходов — процессов, которые превращают одно вещество в другое с качественно новыми свойствами. Представьте: вода, столь подвижная и текучая, в какой-то момент становится твёрдым льдом — хрупким, кристаллическим, который можно держать в руках, нарезать на куски или лепить в формы. Это кажется волшебным, особенно когда вы впервые наблюдаете, как лёд тает в вашей ладони, превращаясь в капли воды. Как возможно, что одно и то же вещество, всего лишь под влиянием температуры, способно так кардинально измениться?

Физики раскрыли эту тайну. Они показали, что при определённых условиях молекулы начинают взаимодействовать и формировать упорядоченные структуры, преодолевая хаотичное тепловое движение. Температура оказывается ключевым параметром, контролирующим этот переход, а силы притяжения между молекулами выступают дирижёром этого танца. Однако самое удивительное — это то, что эти переходы, несмотря на их видимую сложность, можно предсказать с помощью чётких математических уравнений.

И вот теперь, спустя десятилетия успехов в изучении фазовых переходов, физики задаются ещё более амбициозным вопросом: а что насчёт жизни? Если лёд и вода — это просто две фазы одного и того же вещества, различающиеся лишь своей структурой, то можно ли жизнь рассматривать как новую фазу материи, которая возникает при определённых условиях? Этот вопрос вызывает тот же трепет, что и первое знакомство ребёнка с тающим льдом, только теперь масштаб в тысячи раз больше. Мы знаем, что живые организмы состоят из тех же безжизненных атомов, что и всё остальное в природе. Мы понимаем, что законы физики, управляющие этими атомами, остаются неизменными. Но как именно происходит превращение инертных молекул в нечто живое, осмысленное и удивительно организованное?

Это кажется почти мистическим. Но если мы смогли разгадать тайну перехода льда в воду, может быть, разгадка жизни тоже лежит в понимании условий и законов, управляющих её «фазовым переходом». Возможно, ключ — в симметриях, скрытых закономерностях и коллективных эффектах, которые превращают беспорядочную совокупность атомов в гармоничный танец, рождающий жизнь. Может быть, когда-нибудь мы сможем с такой же уверенностью сказать, как и почему строительные блоки Вселенной обретают жизненность, как сегодня мы можем объяснить, почему вода закипает или лёд тает.

Эти вопросы — не просто игра разума. Они касаются самой сути нашего существования и того, как мы понимаем мир. И хотя сейчас кажется, что мы только начинаем раскручивать эту загадку, уже очевидно: ответ, как и сама жизнь, будет сложным, многослойным и невероятно красивым.

В первой половине XX века несколько титанов квантовой теории пытались разобраться в тайнах жизни, используя мощные инструменты, которые только начали формироваться. Физики, вооруженные блестящими теориями мельчайших частиц и атомов, вдохновлялись успехами, которые позволяли объяснить молекулярную химию как следствие фундаментальных физических законов. Это был момент, когда казалось, что границы познания готовы раздвинуться: разве живое существо, состоящее из тех же атомов, что и всё остальное, не должно быть подчинено тем же физическим законам, что и неживое? Вот тут и возникли сомнения.

**Нильс Бор** утверждал, что жизнь — это нечто большее, чем просто сумма её составляющих, но так и не смог объяснить, почему.[[14]](#footnote-14) **Эрвин Шрёдингер**, в своей знаменитой работе "Что такое жизнь?", сделал попытку приблизиться к разгадке.[[15]](#footnote-15) Его рассуждения произвели революцию, хотя оставили больше вопросов, чем ответов. Шрёдингер предположил, что наследственность, эта удивительная способность передавать черты от родителей к потомкам, требует существования уникальной молекулы, которая напоминала бы «апериодический кристалл». Этот термин позже оказался пророческим: структура ДНК, обнаруженная спустя годы, точно соответствовала его интуитивному предположению.

Кроме того, Шрёдингер ввел концепцию «питания отрицательной энтропией», что стало ярким и захватывающим образом для описания того, как живые существа упорядочивают хаос вокруг себя. Однако на главный вопрос — управляется ли жизнь законами физики или выходит за их пределы — Шрёдингер так и не дал однозначного ответа. Он признавал, что поведение живых существ отличается от неживого, но не видел причин, почему молекулярные процессы не могли бы объяснить эти различия.

Сегодня, спустя десятилетия, мы понимаем: молекулярная биология, которая выросла в полноценную науку, подтвердила многие из его догадок. Благодаря миллионам экспериментов теперь ясно, что функции живого организма имеют материальные основания. И всё же это знание не ведёт к триумфу редукционизма. Напротив, жизнь демонстрирует, что её ключевые свойства возникают из взаимодействий, которые невозможно объяснить, просто разобрав всё на атомы.

Возьмем, к примеру, кровь. Её способность переносить кислород — результат сложной биохимии гемоглобина, который можно объяснить на молекулярном уровне. Но такие свойства, как вязкость крови — важнейшая характеристика, влияющая на работу организма, — не поддаются точному вычислению. Смешение молекул воды, белков и других компонентов создаёт столь сложную и чувствительную к изменениям систему, что предсказать её поведение с помощью фундаментальных уравнений невозможно. Мы можем измерить вязкость экспериментально, но никогда не сможем рассчитать её с такой же уверенностью.

Жизнь необычайно чувствительна к изменениям в окружающей среде. Малейшие отклонения от привычных условий могут вызывать цепную реакцию, ведущую к крупным последствиям, будь то в организме, в экосистеме или в обществе. Слишком густая кровь может стать причиной болезни. Ошибка в последовательности ДНК может изменить весь организм. Жизнь — это не просто сумма её частей, это сложный конгломерат, где некоторые аспекты поддаются предсказанию, а другие навсегда остаются загадкой.

Каждое живое существо — это тонкий баланс между законами природы и тем, что рождается из взаимодействий, которые мы пока не способны постичь до конца. Жизнь пленяет своей сложностью, и именно эта загадка делает её изучение столь захватывающим. Мы продолжаем искать ответы, потому что каждая разгаданная тайна приближает нас к пониманию самого себя и того, что значит быть живым.

В основе этого вечного вызова лежит напряжённая дуэль двух подходов: описывать мир языком физических величин или исследовать его через призму биологических явлений. Эти два мира, несмотря на их пересечения, различаются так же кардинально, как формулы Ньютона отличаются от зелёного листа, тянущегося к свету.

Физика строится на фундаменте строгих количественных величин: массы, времени, заряда, температуры. Её феномены описываются через предсказуемые изменения измеряемых чисел. Второй закон Ньютона *(F=ma)*, на первый взгляд простой закон. Но его гениальность заключается в том, что он связывает силу, массу и ускорение через уравнение, которое можно проверить опытом. Вся мощь физики заключена в её способности переводить реальность в точные математические модели, опирающиеся на измерения.

Биология, напротив, следует совершенно другой логике. В её основе — не числа, а понимание. Она не объясняет, что такое жизнь, она берёт это как данность. Мир давно разделён на живое и неживое в нашем восприятии, и на этом биология строит свои исследования. Учёным не нужно доказывать, что существует разница между цветком и камнем; языки всех народов мира изначально отражают это различие. Именно эта интуитивная данность вдохновила появление биологии как науки.

В отличие от физики, биология не требует математической строгости для своих основ. Примеры вокруг нас просты и очевидны: растения нуждаются в свете, рыбы не могут жить без воды. Эти базовые истины, доступные даже ребёнку, не требуют измерений, хотя углублённый анализ может добавить деталей. Например, измеряя, сколько света нужно растению, чтобы оно зацвело, или через сколько минут рыба погибнет без воды, мы обогащаем наше знание. Но эти цифры не заменяют главного биологического вопроса: что нужно для процветания жизни?

Биология не могла бы появиться без интуитивного осознания того, что жизнь — это что-то уникальное. Каждый из нас инстинктивно знает, что значит жить, и ежедневно взаимодействует с жизнью и смертью, ухаживая за растениями, уничтожая вредителей или наблюдая за животными. Наука лишь уточняет, как можно продлить жизнь или остановить её, но понимание этих понятий — наш врождённый дар.

**Тревоги Бора и Шрёдингера** о сущности жизни нельзя было разрешить через одну лишь физику. Их вопросы были философскими, а ответы, возможно, лежали за пределами уравнений. Современник Бора и Шрёдингера, философ Людвиг Витгенштейн, однажды сказал: «Границы моего языка — это границы моего мира».*[[16]](#footnote-16)* Его слова освещают сложность описания мира: одно и то же явление может быть представлено разными словами, отражающими разные подходы.

Возьмём, к примеру, каплю дождевой воды, всасываемую корнями дерева. Физика объяснит это явление через капиллярное действие и осмотическое давление, оперируя точными терминами и формулами. Биология же скажет, что дерево «пьёт воду», чтобы поддерживать свою жизнь. Оба подхода верны, но они не равнозначны. Физика сосредоточена на деталях и механизмах, тогда как биология говорит о целостности и смысле.

Эти два языка мира, хотя и разные, не противопоставлены. Они обогащают наше понимание: один учит нас видеть структуру, другой — чувствовать жизнь. Вместе они раскрывают тайну существования, соединяя формулы с трепетом ветра в листьях дерева, которое тянется к свету.

После краха редукционизма перед учёными встал более глубокий вопрос: может ли физика, столь успешная в объяснении поведения материи, пролить свет на тайну возникновения жизни? В основе этой загадки лежит попытка соединить два подхода, которые кажутся несовместимыми: язык физических величин и биологические понятия. Что делает кусок материи живым, а другой — мёртвым? И, что важнее, как физика может определить, что значит быть живым?

С точки зрения физика, кошка и ураган кажутся не столь уж различными. В обоих случаях — это множество частиц, взаимодействующих согласно определённым законам. Однако биология видит мир иначе. Она задаёт цель и смысл: кошка — это не просто набор частиц, это существо, чья кровь переносит кислород, чтобы поддерживать её жизнь. С другой стороны, ураган, каким бы сложным он ни был, остаётся набором физических процессов без внутренней цели.

**Но откуда берётся сама цель?** Мы создали слово «жизнь», не зная ничего о молекулах, атомах и квантовой механике. И было бы странно ожидать, что физика, разработанная задолго до этого, вдруг начнёт диктовать нам, что это слово значит. Эта нестыковка кажется пугающей, но она, на самом деле, открывает путь к исследованиям. Да, физика может не объяснить, что значит жить, но она способна раскрыть удивительные механизмы, которые делают жизнь возможной.

Возьмём для примера гемоглобин — белок, без которого жизнь большинства животных невозможна. Это не просто случайное соединение атомов, а удивительно сложная молекула, которая обладает уникальной способностью «собираться» в определённую форму. Она представляет собой длинную цепочку атомов, которые, взаимодействуя друг с другом, складываются в изящную трёхмерную структуру. Именно эта форма позволяет молекуле выполнять жизненно важную функцию: атомы железа в её составе захватывают кислород в лёгких и затем освобождают его в тканях, где он необходим.

Но как же молекула «знает», какую форму принять? Почему она складывается именно так, а не иначе? Этот процесс остаётся одной из самых интригующих загадок науки и называется проблемой сворачивания белков.[[17]](#footnote-17) Он исследует, как из простых строительных блоков (аминокислот) самопроизвольно образуется сложная структура, идеально подходящая для выполнения своей функции. Этот феномен даёт ключ к пониманию того, как на молекулярном уровне формируется жизнь, объединяя химию, физику и биологию в поиске ответа.

Пересечение этих трех наук раскрывает тайны того, как из простейших строительных блоков рождаются удивительно сложные структуры, обеспечивающие жизнь. Полипептидная цепь, составляющая основу белков, представляет собой цепочку аминокислот — небольших молекул, каждая из которых может вращаться и вибрировать в своём окружении. На первый взгляд, это просто набор атомов, ничем не примечательный.

Но как только сотни таких аминокислот соединяются вместе, начинается нечто поистине поразительное. Взаимодействуя друг с другом, эти молекулы формируют сложные трёхмерные структуры, которые не просто красивы, но и чрезвычайно функциональны. Они становятся ферментами, способными ускорять жизненно важные химические реакции, или прочными каркасами, придающими форму и устойчивость клеткам. Некоторые из них превращаются в настоящие молекулярные моторы, использующие химическое топливо для выработки энергии, необходимой клетке.

Таким образом, цепь аминокислот — это не просто химическая головоломка, а ключ к пониманию того, как материя переходит в состояние, которое мы называем жизнью. Это связь между хаосом и порядком, между случайностью и целенаправленностью, раскрывающая, как простые элементы природы объединяются для выполнения сложных задач.

Функциональные возможности белков настолько впечатляющи, что кажутся естественными. Однако здесь скрыта ловушка: мы видим их полезность, потому что знаем биологическую цель. Гемоглобин нам важен, потому что он переносит кислород. Но представьте, что у нас нет представления о целях организма. Как тогда понять, чем белок отличается от случайного куска минерала или пластика?

**Если** убрать биологическую цель, что делает молекулу «живой»? Многие исследования в биофизике берут эту цель как данность. Учёные изучают, как молекулы решают задачу, которую организм перед ними ставит. Но что, если задача ещё не сформировалась? Как могла возникнуть первая цель?

Эта проблема ведёт нас к размышлениям о самом начале. Что значит, что вещество обладает функцией? Как, в мире без жизни, где нет заданных целей, вещество могло вдруг начать «решать задачи»? Эти вопросы не только направляют нас к истокам жизни, но и к фундаментальному пониманию того, как материя начинает обретать смысл.

Чтобы понять, как неживое вещество может стать живым, полезно обратить внимание на физику, лежащую в основе превращения обыденного в исключительное. Ведь ключ к пониманию жизни заключается не в попытке дать ей общее определение, а в исследовании условий, при которых материя начинает вести себя настолько необычно, что становится способной к самовоспроизводству, использованию энергии и адаптации. Исключительность жизни, как и любого сложного явления, основана на том, что большинство возможных состояний материи не обладают необходимыми для этого свойствами. Например, если бы любая случайная молекула могла переносить кислород так же эффективно, как гемоглобин, понятие функции теряло бы всякий смысл.

Трёхмерная структура гемоглобина — это исключение из хаоса возможных конфигураций. Подобное исключение возникает из определённых физических условий, которые делают одну структуру гораздо более функциональной, чем тысячи других. Это подсказка: вместо того чтобы искать общее определение жизни, мы можем задать более узкий, но проясняющий вопрос — как вещество приобретает качества, которые делают его столь отличным от обычного?

Ветхозаветная история о Моисее (Мусе) и Кораническое ей подтверждение предлагает необычную аллегорию для размышлений о жизни. Когда Моисей в первый раз ступил на гору Хорив (Синай), в его руке был посох — простой инструмент пастуха, направляющий стадо. На первый взгляд, посох олицетворяет всё, что мы привыкли ассоциировать с неодушевлённой материей. Он движется только по воле того, кто его держит, подчиняясь физическим законам. Если нажать на один конец, другой сдвинется в точном соответствии с силой давления. Инструмент, предсказуемый и безвольный, является противоположностью чему-то живому.

Но тогда Бог велит Моисею бросить посох на землю. «Господь сказал: брось его на землю. Он бросил его на землю, и посох превратился в змея» (Исх. 4:3). Эта трансформация заставляет нас задуматься: что отличает неодушевлённый объект от живого существа? В одно мгновение пассивный инструмент становится змеёй — существом, которое двигается самостоятельно, имеет цель, способно предсказывать, избегать опасностей. Чем вызвано это превращение? Было ли оно просто чудом, или за ним стоит нечто более фундаментальное, лежащее в самой природе материи?

С точки зрения физики, трансформация посоха в змею предлагает возможность рассмотреть границу между неживым и живым с неожиданного ракурса. Посох представляет собой стационарный порядок, подчиняющийся внешним силам. Змей, напротив, олицетворяет динамический порядок, который создаёт сам себя, использует энергию из окружающей среды и движется к своим целям. И хотя посох и змей состоят из одной и той же материи, поведение этой материи кардинально меняется.

Этот момент — не только религиозная метафора, но и мощное напоминание о ключевой истине: *«больше — это другое».* Когда множество взаимодействующих элементов начинают вести себя координированно, они проявляют свойства, которых не было у их отдельных частей. Как стадо овец, которое не просто совокупность животных, а сложная система с уникальным поведением, так и жизнь — это явление, которое невозможно понять, глядя только на строительные блоки. Вместо этого нужно исследовать правила, по которым эти блоки соединяются в нечто большее.

История Моисея учит нас, что, даже рассматривая материю как пассивный инструмент, мы можем упустить её потенциал к трансформации. Посох в руке Моисея — это напоминание, что даже самое привычное может стать чем-то невероятным, если на него взглянуть с другой стороны. В этом и состоит главный вызов: *увидеть исключительное там, где раньше было лишь обыденное.*

Когда Моисей бросает свой посох на землю, мы, как и он, поражены чудом: посох превращается в змея. Этот момент наполнен драматизмом, но если задуматься глубже, становится ясно, что за этим превращением скрывается нечто большее, чем простое чудо. Почему именно змей? Почему не другой образ, скажем, птица или черепаха? И что делает змея настолько отличной от безжизненного посоха?

На первый взгляд, различие очевидно: посох — это мёртвая, неподвижная палка, тогда как змея — живое, извивающееся существо. Но это превращение заставляет нас задуматься: а что, собственно, отличает жизнь от неживого? Если положить рядом палку и змею и начать сравнивать, то список отличий окажется длинным. Змея движется, питается, выделяет вещества, изменяет форму, взаимодействует с окружающим миром. Однако, если углубиться, становится ясно, что ключевое отличие — это способность к коммуникации. Змея из библейской истории Эдема, к примеру, не просто живое существо; это образ, способный говорить, передавать намерения, вызывать реакцию.

Посох и змей в истории Моисея — это не просто два разных объекта. Они — один и тот же объект в разных состояниях. И это наталкивает нас на мысль: насколько устойчивы границы между живым и неживым? Может ли палка, реагирующая на поток воды или на порывы ветра, выполнять нечто, что можно было бы назвать «жизненной функцией»? Может ли неодушевлённый объект действовать так, словно он пытается достичь определённой цели?

Эти вопросы звучат странно, даже абсурдно, если судить с точки зрения повседневного опыта. Но физика, которая сводит всё существующее к взаимодействию частиц и энергии, заставляет нас пересмотреть привычные категории. Если всё живое состоит из тех же атомов и молекул, что и неживое, то что именно придаёт жизни её уникальные свойства?

Когда мы наблюдаем такие явления, как пламя или торнадо, мы не называем их живыми, но в то же время они обладают удивительным динамизмом, упорядоченностью и способностью к изменению. Как понять, где заканчивается неживое и начинается жизнь? Может ли скала, хранящая следы ударов времени в своей структуре, быть чем-то вроде примитивного архива памяти? Могут ли физические процессы в природных явлениях — от потоков воды до вращающихся вихрей — быть началом того, что мы называем жизнью?

Эти вопросы не имеют однозначных ответов, но они поднимают важную тему: жизнь — это не строгая категория, а спектр. И в этом спектре змея и посох, человек и торнадо, молекула и звезда занимают свои места. Каждое явление в природе — это своего рода «перевод» на язык физики, и эти переводы редко бывают точными.

История Моисея и его посоха — это не просто библейское чудо, а приглашение задуматься о том, как мы определяем живое. Взгляд на жизнь как на набор свойств, возникающих из сложных взаимодействий, позволяет увидеть её не как исключение, а как часть более общего физического порядка. Возможно, посох и змея — это не две противоположности, а две стороны одного и того же явления, где границы между жизнью и нежизнью остаются загадкой, вдохновляющей на новые открытия.

## Глава 3 Снег и пыль

Он простер руку свою к груди своей и вынул ее, и вот рука его покрылась язвами, как снег.

Исход 4:6

Ибо прах ты, и в прах возвратишься.

Бытие 3:19

Мы сотворили вас из нее (земли), в нее Мы вас вернем и из нее выведем еще раз

Коран 20-55

**Что считать жизнью, а что — нет?** Кажется, мы все интуитивно понимаем, где проходит граница между живым и неживым. Птицы? Конечно, живые. Камни? Несомненно, нет. Водоросли? Да. Лёд? Нет. Эта способность разделять, казалось бы, очевидна. Однако стоит углубиться, и оказывается, что определить жизнь с точки зрения физики гораздо сложнее, чем кажется.

Мы можем называть жизнь феноменом, но само понятие "жизни" не проистекает из физики. Если физика объясняет движение планет, свойства материалов или взаимодействие атомов, то жизнь словно принадлежит к другому уровню реальности. Как её описать на языке физических теорий? Какие свойства и качества она привносит в мир, и как мы можем перевести этот загадочный феномен на более универсальный язык науки?

На первый взгляд, всё просто: каждый из нас может привести сотни примеров живого и неживого. Птицы — живые. Камни — нет. Это звучит тривиально, пока не сталкиваешься с пограничными случаями. Что делать с вирусами? Или с митохондриями, которые когда-то были самостоятельными организмами? А компьютерные вирусы? А вдруг кто-то заявит, что камни тоже живые, если принять во внимание их долгую "жизнь" в масштабе геологии?

Парадокс в том, что эти экзотические случаи не мешают нам уверенно классифицировать подавляющее большинство.[[18]](#footnote-18) Мы учимся значениям слов не через академические определения, а через их использование. Мы слышим их снова и снова, и они постепенно обретают смысл. Мы — прирождённые эксперты в распознавании жизни в её классических формах.

И всё же этот простой навык обманчив. Пока мы легко различаем живое и неживое на интуитивном уровне, попытка уложить это понимание в строгие научные рамки остаётся одной из самых сложных задач. Она требует перевести ту самую "неопределённость жизни" на язык теорий, который понятен не только людям, но и самой Вселенной.

Может быть, ключ к разгадке лежит не в том, чтобы навсегда провести чёткую границу, а в том, чтобы понять, как мы сами, как наблюдатели, создаём эту грань. Что если жизнь — не просто свойство объектов, а наше взаимодействие с миром, способ делать из него историю, полную загадок и открытий?

**Жизнь в поисках своего определения: как приблизиться к её тайне?** Когда мы пытаемся понять, что такое жизнь, путь к ответу редко бывает прямым. Это не задача, которую можно решить одним махом. Вместо того чтобы сразу бросаться в бой, логичнее разбить проблему на части, перевести её на язык физики и химии и попытаться описать, как выглядит "жизнеподобное". И вот тут начинаются сюрпризы.

Первый соблазн — пойти по химическому пути: заявить, что все живое содержит воду, ДНК, аминокислоты. Но быстро становится понятно, что это — тупик. Почему? Да потому что наличие этих молекул само по себе не объясняет, что делает жизнь жизнью. Вода с аминокислотами, плавающими в ней, не оживают только потому, что их химический состав «подходит». Очевидно, жизненность — это не просто наличие строительных блоков, а их динамическое взаимодействие, согласованное в пространстве и времени.

Может, стоит начать с того, что объединяет всё живое? Одной из очевидных черт является **самовоспроизведение**. Каждый живой организм рождается от предшественника. Это динамическое поведение характерно для жизни. Но ключевое слово здесь — «характерно», а не «уникально». Ведь бывают случаи, когда нечто воспроизводит себя, но живым назвать это сложно.

Возьмём, к примеру, лесной пожар. Когда огонь охватывает соседние кусты, он словно «копирует» себя. Но назвать огонь живым? Это явное преувеличение. Тем не менее, способность воспроизводить себя создаёт ассоциацию с жизнью — гораздо сильнее, чем, скажем, растворение соли в воде или падение яблока на землю.

Ещё одна черта жизни — **ощущение целостного порядка**. Жизнь — это не случайное нагромождение частей, а скоординированная система, где элементы взаимодействуют в сложном, но гармоничном узоре. Это проявляется как в структуре (например, симметрия лепестков цветка), так и в динамике (например, согласованное движение хромосом при делении клетки). Когда мы наблюдаем такие явления, мы сталкиваемся с чувством неоспоримого порядка, почти геометрической точности.

И, наконец, важнейшая характеристика — **самовосстановление**. Живые организмы могут восстанавливаться после повреждений. Если вы порежете кожу, рана затянется. Эта способность к восстановлению встречается даже на подклеточном уровне, она шире, чем просто воспроизводство клеток.[[19]](#footnote-19)

Но вот возникает вопрос: что отличает это восстановление от других явлений в природе? Например, если мяч, поднятый на вершину холма, скатывается обратно в долину, «восстанавливается» ли он? Или если отверстие во льду снова замерзает, можно ли сказать, что пруд «исцелился»? Мы интуитивно чувствуем, что такие примеры не соответствуют концепции жизни. Но почему?

Чтобы понять это, нужно исследовать фундаментальные различия. Физика, объясняющая заживление раны, образование струпа или восстановление клетки, говорит о процессах, которые принципиально отличаются от замерзания льда или движения мяча. В этих различиях скрывается ключ к разгадке того, что делает жизнь жизнью.

Каждый новый шаг на этом пути — попытка раскрыть, как природа соединяет хаос и порядок, создавая удивительное зрелище, которое мы называем жизнью. И, возможно, лучший способ понять её — начать с того, чтобы внимательно всмотреться в сами её процессы, не упуская ни одной детали.

Живые существа уникальны. Они непрерывно собирают и потребляют вещества и энергию из окружающей среды, превращая их в топливо для своей активности. От гигантских секвой до крошечных москитов, от планктона до китов — все они имеют сложные потоки химических веществ, тепла и света, которые проходят через них. Эти процессы делают возможным питание, рост и выживание.

Подобно водяным колесам, живые организмы обладают структурой, которая обеспечивает управление этими потоками. У деревьев есть листья, у львов — зубы, и почти вся биология сосредоточена на изучении того, как форма живого организма приспособлена к его задачам: питания, переваривания, выделения.

Но есть нюанс: сама по себе способность поглощать энергию из окружающей среды ещё не делает что-то живым. Вот пример: представьте, как оперная певица берет высокую ноту, и хрустальный бокал резонирует с её голосом, поглощая часть энергии. Разве можно назвать бокал живым? Конечно, нет. И всё же трудно представить жизнь без этого важного свойства — взаимодействия с окружающим миром.

Ещё одна ключевая черта жизни — это способность чувствовать, предсказывать и реагировать на окружение. Примеры этой способности встречаются повсюду, от бактерии, которая обнаруживает сахар в своей среде, до лесного животного, которое находит укрытие перед бурей.

Но здесь начинается настоящая загадка. Как определить, что именно делает эти действия "живыми"? Человек берёт зонт, увидев тёмные облака, — это кажется очевидным примером осознанного предсказания. А как быть с более простыми организмами? Или с ещё более сложными системами, которые, возможно, вовсе не живые?

К примеру, любой объект реагирует на изменения в окружающей среде. Камень, который смещается, если на него наступить, тоже "реагирует". Но едва ли кто-то решится утверждать, что камень чувствует боль.

Ещё сложнее доказать, что действия объекта — камня, молекулы или клетки — действительно подразумевают осознание будущих событий. Может ли текущее поведение камня быть "предсказанием" того, что произойдёт с ним в дальнейшем? Мы склонны сказать "нет", но чем именно такая реакция отличается от поведения простейших живых организмов?

Эти вопросы подводят нас к самой размытой границе между жизнью и нежизнью. Где она проходит? Как физик описал бы эту тонкую линию, если бы захотел перевести её на язык формул и закономерностей?

Прежде чем искать ответы, нужно понять сложность этой границы. Возможно, ответы кроются не в одном свойстве, а в тонком сочетании множества факторов: потоков энергии, взаимодействий, чувствительности к среде, способности адаптироваться и восстанавливаться.

Чтобы заглянуть в глубину этой тайны, потребуется ещё не одна глава, но уже сейчас ясно: жизнь — это не просто химия. Это удивительный танец порядка, хаоса и взаимодействия, который по-прежнему остаётся одной из величайших загадок нашей Вселенной.

Создание копии себя кажется невероятно сложным процессом, особенно когда мы представляем, как одна-единственная клетка превращается в полноценного человека с глазами, пальцами и внутренними органами. Этот процесс поражает наше воображение, потому что мы не можем даже приблизительно представить, как его спроектировать.

Но вот что интересно: быть само-репликатором на самом деле гораздо проще, чем быть человеком. В самом общем смысле само-репликатором можно назвать любую структурированную массу материи, которая своим присутствием ускоряет образование новых масс с такой же структурой.

Давайте разберёмся на простом примере. Представьте «бульон» молекул, состоящий из атомов A, B, C и так далее, которые случайно сталкиваются друг с другом. Иногда такие столкновения приводят к реакциям: атомы соединяются или, наоборот, разделяются.

В любой ситуации, где химическая реакция, например A+B→AB протекает быстрее в присутствии нерасходуемого вещества C (как в случае C+A+B→C+AB), C называют катализатором этой реакции. Если же молекула способна катализировать собственное образование (например, AB+A+B→AB+AB, она называется автокатализатором. Автокатализ — это не свойство, присущее всем молекулам и реакциям, но оно встречается довольно часто, так как может быть реализовано с использованием относительно простых физических принципов.

Предположим, что A и B вступают в реакцию только тогда, когда находятся достаточно близко друг к другу в течение определённого времени. В этом случае молекула AB может легко стать автокатализатором, если окажется, что она «прилипает» к A и B, заставляя их проводить больше времени рядом. Присутствие AB увеличивает скорость, с которой из исходных материалов (A и B) образуются новые молекулы AB в окружающей среде. Таким образом, хотя это и не так впечатляюще, как рождение животного, AB всё же является самовоспроизводящейся системой, поскольку ускоряет создание других таких же молекул.

Автокаталитические процессы, хотя и не столь эффектные, как рождение живого существа, играют ключевую роль в химии. Возьмём, например, эксперимент, проведённый в лаборатории Сейбрена Отто в Университете Гронингена. Исследователи наблюдали, как молекулы присоединяются к концам длинных филаментов — цепочек из множества молекул. Эти филаменты легко ломаются, образуя новые короткие цепочки, которые сразу же начинают расти, присоединяя новые молекулы. Чем больше цепочек появляется, тем быстрее идёт их рост. Это простой, но захватывающий пример того, как автокаталитический процесс способен ускорять сам себя.[[20]](#footnote-20)

Но что, если мы перейдём от этих базовых процессов к сложным макромолекулам, таким как ДНК, РНК и белки? Эти молекулы представляют собой линейные полимеры, собранные из последовательностей строительных блоков. У ДНК и РНК есть четыре типа нуклеотидов, а у белков — двадцать видов аминокислот. Каждый из этих блоков словно «предпочитает» связываться с определённым типом других блоков, что позволяет создавать цепи, идеально подходящие для взаимодействия с молекулами определённой формы.

Особенно впечатляет процесс шаблонной сборки, который наблюдается у ДНК. Одна молекула ДНК может служить «матрицей» для создания точной копии самой себя. Этот процесс демонстрирует, как из простой химической логики вырастает фундамент сложных биологических систем.

Само-репликация, на самом деле, не такая уж недостижимая магия. Она начинается с базовых физических и химических законов, которые позволяют формировать и поддерживать упорядоченные структуры. Конечно, воссоздание человеческого организма остаётся одной из величайших тайн природы. Но понимание основ само-репликации даёт нам ключ к разгадке того, что лежит в самом центре жизни.



*В жидком растворе филаменты (палочки) формируются, когда мономеры (квадраты) необратимо присоединяются к концам филаментов один за другим (левая часть). Перемешивание раствора приводит к разлому длинных филаментов, обнажая больше концов палочек и тем самым ускоряя процесс формирования новых филаментов (правая часть). Чем больше количество филаментов, тем быстрее будет образовываться следующий новый филамент.*

В одном из экспериментов учёные Трейси Линкольн и Джеральд Джойс из Института медицинских исследований Скриппса смогли создать молекулу РНК, которая могла копировать саму себя.[[21]](#footnote-21) Эта РНК действовала как катализатор: она соединяла два более простых кусочка РНК, образуя свою точную копию. Успех эксперимента объяснялся особым устройством молекулы. Она имела две ключевые области, которые помогали ей «захватывать» нужные элементы и удерживать их в правильном положении, чтобы они могли соединиться. Это делало процесс сборки молекул быстрым и эффективным. Когда в системе было достаточно исходных материалов, количество таких РНК начинало стремительно расти, словно удваиваясь снова и снова.

Белковые молекулы, способные самовоспроизводиться, представляют собой ещё более загадочное явление. Их изучение началось с медицины, когда учёные пытались понять причины таких заболеваний, как болезнь коровьего бешенства и куру — редкой формы деменции. Выяснилось, что эти болезни вызываются прионами — особым типом белков, которые могут действовать как инфекционные агенты без участия вирусов или клеток.

Прионы представляют собой белковые цепочки, свернутые в стабильную форму. Эта форма служит своего рода «шаблоном», заставляя другие белки с таким же составом принимать ту же форму. Как только это происходит, количество прионов в клетке начинает быстро расти, достигая опасного уровня и заражая соседние клетки. Метафорически их можно сравнить с «зомби», которые превращают здоровые белки в себе подобных.[[22]](#footnote-22)

Однако, несмотря на их удивительные свойства, ни РНК, ни прионы не являются живыми организмами. Это всего лишь молекулы средней сложности, которые способны к самовоспроизведению только в строго определённых условиях. Они гораздо проще даже вирусов, которые считаются «недо-живыми». В основе их способности к воспроизведению лежит физический принцип: наличие «липких» участков, которые помогают фрагментам материала соединяться друг с другом и с шаблоном.

Настоящее чудо начинается с полимерных шаблонов — структур, которые могут собирать сложные молекулы с высокой точностью. Такие шаблоны не только упрощают процесс самовоспроизведения, но и делают его гораздо более эффективным. Особенно это важно, когда уже существуют отлаженные механизмы для сборки молекул из стандартных строительных блоков. Полимерные шаблоны лежат в основе многих биологических процессов. Возможно, именно они сыграли ключевую роль в эволюции жизни, обеспечив необходимую точность для сложных процессов воспроизведения.



*На рисунке показаны две формы белковых молекул:*

1. ***Native*** *(нативная форма) — это нормальная, функциональная форма белка, которая обычно выполняет свои биологические функции в организме. Такая структура стабильно свернута и имеет правильную пространственную конфигурацию.*
2. ***Prion*** *(прионная форма) — это патологическая, неправильно свернутая форма того же белка. Прионы обладают способностью заставлять нативные белки переходить в свою неправильную форму. Этот процесс приводит к накоплению неправильных белков, что может вызывать заболевания, такие как болезнь Крейтцфельдта — Якоба, куру или губчатую энцефалопатию.*

*Наверху изображен процесс, где прионная форма взаимодействует с нативной, вызывая её преобразование в такую же прионную форму.*

*Прионное состояние белка представляет собой способ сворачивания определенной полипептидной цепи таким образом, что другие «нативные», функциональные копии с той же аминокислотной последовательностью присоединяются к приону и подвергаются «шаблонированию» — то есть сворачиваются в прионное состояние.*

Но при этом стоит отметить, что прионы являются прекрасным примером более общего явления, чем саморепликация, а именно — положительной обратной связи. Каждый раз, когда какая-либо характеристика, свойство или качество в системе ускоряет темп своего собственного увеличения, появляется возможность для роста, который поддерживает сам себя. На социальном уровне положительная обратная связь может ускорять распространение моделей поведения, как, например, когда мемы "вирусно" распространяются в интернете. В случае лавины небольшие толчки могут приводить к более сильным грохотам, и так далее. Даже на уровне молекулярной формы или пропорций различных молекул в химической реакции петля обратной связи является одним из самых мощных механизмов, способных внезапно и резко изменить организацию системы с множеством компонентов. Более того, всякая обратная связь имеет характерный энергетический профиль и должна быть подключена к какому-то источнику энергии из окружающей среды. В следующей главе мы увидим, почему это так. Прежде чем углубляться в эту тему, будет полезно рассмотреть, как живые организмы формируются из своих составных частей.

Восхищение природой часто скрывает за собой глубокую истину: создать из материалов что-то, что ведет себя как живое, невероятно сложно. Будь то изящество крыльев колибри или величие кроны дерева, мы воспринимаем эти конструкции как результат гармоничного сочетания различных материалов, которые обеспечивают удивительную эффективность. Хотя инженеры черпают вдохновение в природных формах, попытки превзойти природу зачастую оказываются тщетными, особенно когда речь идет о создании сложных структур на молекулярном уровне.

Глубже кроется мысль о том, что случайно собранные структуры практически никогда не воспроизводят функциональность, присущую биологическим формам. Простой эксперимент — представить, что лягушку помещают в блендер. Хотя физический состав материала остается неизменным, он утрачивает способность к жизни: прыгать, квакать или ловить мух. Это гипотетическое, пусть и грубое, сравнение показывает, что живая форма — это не просто совокупность материалов, а результат чрезвычайно упорядоченной структуры.

Если разобрать лягушку до атомов и снова смешать их случайным образом, ожидать возвращения к исходной форме бессмысленно. Эта неудача раскрывает два фундаментальных понятия статистической физики, объясняющих, почему из случайных конфигураций не возникает жизнь.

Первое понятие — **макроскопическое укрупнение**. Оно предполагает, что множество микроскопических состояний материи может выглядеть одинаково на макроуровне, несмотря на различия в деталях. Представим физическую систему как совокупность всех ее частиц, описанную максимально подробно: положение каждой частицы в пространстве, направление и скорость движения. Это так называемое «микросостояние» содержит всю доступную информацию о системе и позволяет предсказывать ее поведение по законам Ньютона.

Однако именно упрощение этой информации до ключевых макроскопических характеристик, таких как температура или давление, делает возможным понимание сложных систем. Подобное упрощение помогает нам рассматривать биологические формы не просто как результат случайных взаимодействий, а как проявление уникальных закономерностей природы.

Чтобы описать снежинку, состоящую из 1021 атомов, нам бы понадобилось 6×1021 чисел: три для координат каждого атома в пространстве и три для характеристики направления и скорости его движения. Хотя практически невозможно получить доступ ко всей этой информации из-за квантовых ограничений, теоретически можно описать такое количество микроскопических данных. Это позволяет рассматривать различные атомные конфигурации как отдельные микросостояния системы.

**Макроскопическое укрупнение (coarse-graining)** — это метод, позволяющий объединить множество микросостояний в группы, которые выглядят одинаково с точки зрения определенных макроскопических параметров. Например, если мы измеряем только среднюю плотность атомов или их среднюю скорость, огромное количество микросостояний окажется эквивалентным, так как даст одинаковые результаты. Этот подход помогает выделить ключевые характеристики системы, игнорируя избыточные микродетали.

В повседневной жизни наше восприятие тоже основано на укрупненных параметрах. Мы чувствуем тепло или прохладу, что связано со средней скоростью молекул вокруг нас, но не знаем, как движется каждая отдельная молекула. Мы видим воду, равномерно заполняющую стакан, но не можем определить, где плотность атомов выше или ниже. Подобное упрощение — основа многих физических измерений: давление газа, показатель преломления или температура — всё это укрупненные величины, которые дают общее представление о системе, но не раскрывают микродинамику.

Исторически понятие укрупнения возникло для обработки измерений с помощью статистических методов. Оно позволяет учитывать флуктуации параметров, таких как давление, и связывать их с микроскопической моделью. Однако, по сути, укрупнение — это классификация множества микросостояний с использованием общих меток. Эти метки могут быть простыми числовыми величинами, такими как средняя скорость молекул. Но иногда классификация может быть более сложной, например, когда мы изучаем возможные состояния смеси атомов и задаемся вопросом: «Является ли это состояние здоровой лягушкой?»

Этот мысленный эксперимент демонстрирует, что классификация микросостояний может варьироваться от тривиальной до весьма сложной. Многие микросостояния окажутся далекими от лягушки, другие будут напоминать её внешне, но не будут живыми, а третьи будут полностью функциональными, но с легкими отклонениями, как у больной лягушки. Тем не менее, существует множество микросостояний, которые для наблюдателя окажутся неразличимыми и будут классифицированы как здоровая лягушка. Аналогично существуют "приграничные" состояния, включение которых в эту группу может быть спорным.

Таким образом, макроскопическое укрупнение — это не только метод понимания сложных систем, но и основа для глубоких размышлений о границах и возможностях нашего восприятия.



Представьте себе гипотетическое пространство, в котором каждая точка соответствует конкретному расположению и движению всех частиц, составляющих материальный объект. Это пространство описывается множеством координат x1, x2, x3 ​и далее, каждая из которых фиксирует положение или скорость частицы. В этом абстрактном мире точка означает уникальную конфигурацию материи.

Теперь сосредоточимся на «областях лягушки». Это крошечные зоны в пространстве конфигураций, которые соответствуют состояниям, способным функционировать как настоящая лягушка: прыгать, ловить мух и квакать. Эти зоны представляют собой нечто крайне редкое и необычайно упорядоченное среди океана возможных состояний. Если бы такие области были распространенными, то, теоретически, перемешивание лягушки в блендере (а затем восстановление случайного состояния материи) могло бы привести к ее воскрешению. Но реальность говорит об обратном.

Почему эти зоны настолько редки? Живые существа, как лягушка, представляют собой удивительное сочетание организации, где каждое атомное взаимодействие точно согласовано с общим функционалом организма. Малейшее нарушение порядка приводит к выходу за пределы этих областей — и функциональность утрачивается. Это объясняет, почему после разрушения структуры лягушка не может вновь «собраться» случайным образом: шанс вернуться в одну из этих редких зон практически равен нулю.

Этот мысленный эксперимент подчеркивает фундаментальную истину о природе жизни. Жизнь — это не просто совокупность атомов, а сложнейшая организационная схема, где каждый элемент подчинен строгим законам взаимодействия. Это делает живые существа не только уникальными, но и невероятно хрупкими перед лицом хаоса.

Рассуждения о микроскопическом составе лягушки приводят к важному выводу: даже полное знание всех физических параметров объекта не позволяет однозначно определить, лягушка это или нет. Для этого сначала необходимо ввести понятие «лягушка», а затем разделить возможные микросостояния на две категории — «Лягушка» и «Не лягушка». Такое деление основано не на физической реальности, а на нашей договоренности. Только после этого можно изучать физические свойства, которые отличают одну группу от другой, и пытаться понять, что придает объекту его «лягушковость».

Аналогичным образом мы подходим к понятиям «живое» и «неживое». Существует множество способов объединения атомов, которые можно назвать живыми, еще больше таких, которые таковыми не являются, и значительная область между ними, где грань становится размытой. После определения границ можно приступить к изучению перехода между состояниями.

Вероятность позволяет описывать такие переходы. Подобно подбрасыванию монеты, где мы предполагаем два исхода — «орел» или «решка», вероятность помогает объединять множество деталей в более общие категории. Например, возможны разные способы, как монета падает орлом или решкой вверх, но нас интересует лишь конечный результат, а не процесс. При этом для объяснения вероятности используется понятие энтропии, которая измеряет количество микроскопических способов достижения конкретного результата. Так, равномерное распределение воздуха в комнате вероятнее, чем его сосредоточение в одном углу, потому что существует больше способов расположения молекул, соответствующих равномерности.

Когда лягушка попадает в блендер, её упорядоченное состояние разрушено, и вероятность восстановления исходной структуры становится ничтожно малой. Это связано с тем, что число возможных хаотических конфигураций частиц значительно превосходит число тех, которые могли бы быть лягушкой. Таким образом, процесс превращения из состояния «Лягушка» в «Не лягушка» необратим, поскольку микросостояния хаоса гораздо многочисленнее.

Этот принцип показывает, почему разрушение порядка в природе происходит с неизбежной закономерностью. Жизнь — это редкий пример упорядоченности, невероятно сложный и чрезвычайно хрупкий. Когда структура разрушается, энтропия увеличивается, и возвращение к исходному состоянию становится практически невозможным.

Иными словами, можно сказать, что атмосфера, которая стремится избежать вакуума, имеет большую энтропию, чем та, которая не стремится этого делать. Однако точнее и понятнее будет сказать, что вероятность наблюдения спонтанного вакуума крайне низка, потому что на микроскопическом уровне существует сравнительно мало способов достичь такого макроскопического результата.



*Существует, по сути, только один способ плотно упаковать некоторое количество частиц в один угол комнаты, но есть множество способов равномерно распределить эти частицы по всему пространству. Поэтому мы говорим, что укрупненная совокупность состояний с равномерным распределением частиц имеет более высокую энтропию, чем «совокупность», состоящая из одного состояния, в котором частицы плотно упакованы.*

 Утверждение о равновероятности микросостояний работает только при определенных условиях. Например, для молекул воздуха в комнате: хаотичное движение и частые столкновения приводят к тому, что положение каждой молекулы становится случайным, без предпочтений для какого-либо конкретного положения. В таких ситуациях вероятность любого макросостояния (например, того, что больше молекул окажется в левой половине комнаты) определяется исключительно числом микросостояний, которые могут его породить. Сценарий с измельчённой лягушкой подчиняется тому же принципу: работа блендера хаотизирует частицы, делая все возможные микросостояния равновероятными. Именно поэтому микросостояний, не представляющих собой лягушку, чем представляющих ее, оказывается неизмеримо больше.

Но такие предположения не всегда применимы. Чтобы это понять, обратимся к примеру с замерзанием воды. Кристаллическая структура льда обладает низкой энтропией, так как количество возможных способов упорядочить молекулы гораздо меньше, чем хаотичных конфигураций жидкой воды. Тем не менее, при достаточно низкой температуре кристаллизация становится почти неизбежной, несмотря на то, что упорядоченных состояний меньше.

Что же приводит к такому переходу от беспорядка к порядку? Дело в силах, действующих между молекулами. Молекулы воды (H2O) имеют противоположные электрические заряды на своих концах, и эти заряды притягиваются друг к другу, подобно магнитам. При высокой температуре тепловые движения разрушают образующиеся связи, постоянно возвращая молекулы к хаотичному состоянию. Но при охлаждении эти связи становятся устойчивыми, и молекулы начинают выстраиваться в упорядоченные структуры. В результате формируется кристалл льда.

Представим этот процесс с точки зрения энергии. Каждое расположение молекул можно вообразить как шар, катящийся по горному ландшафту. Взаимодействия между молекулами создают своеобразные энергетические долины, куда система стремится «скатиться». В жидкой воде шар хаотично прыгает по склонам, не задерживаясь в одной точке. Но при охлаждении, когда энергия молекул падает, они «оседают» в низкоэнергетических долинах, формируя устойчивую структуру.

Таким образом, переход от хаоса к порядку — это баланс между силами притяжения, энергией молекул и внешними условиями. Лед, с его кристаллической упорядоченностью, побеждает хаотичную жидкость не из-за большего числа микросостояний, а благодаря внутренним силам, которые при определенных условиях превращают упорядоченность в наиболее вероятное состояние. Этот процесс показывает, что природа всегда движется в сторону энергетической стабильности, даже если для этого требуется временно уменьшить энтропию.

. 

*Потенциальная энергия (здесь обозначенная как* ***E*** *для энергии, но чаще обозначаемая как* ***U****) действует как ландшафт, по которому шар стремится скатиться вниз по склону. Каждое возможное положение шара соответствует полной многочастичной конфигурации кусочка материи. Случайные толчки от тепловых флуктуаций иногда поднимают объекты "вверх по склону", гарантируя, что ничто не останется навсегда запертым в одной "долине".*

При температуре ноль градусов Кельвина (–273°С) шар мог бы только скатываться вниз и застревать в ближайшей впадине. Однако при повышении температуры случайные толчки из окружающей среды постоянно подбрасывают шар "вверх по склону", создавая бесконечный танец падения вниз и подъема обратно вверх. Если молекулам удается находиться при постоянной температуре и, образно говоря, дать шару исследовать весь горный хребет в течение длительного времени, система достигает состояния, называемого термодинамическим равновесием. В этом состоянии можно назначить вероятность местоположения шара с помощью изящно простой формулы, известной как распределение Больцмана: при температуре **T** любое микросостояние молекулы — то есть любое положение на горном хребте — посещается с вероятностью, пропорциональной **1/a(E/T)**, где **a** — физическая константа, а **E** — энергия данного микросостояния. Другими словами, состояния с более высокой энергией всегда экспоненциально менее вероятны, чем состояния с более низкой энергией, но крутизна этого экспоненциального спада становится менее резкой с увеличением температуры и усилением толчков вверх.



*Распределение Больцмана устанавливает идеализированную математическую связь между энергией и вероятностью (показано серым цветом) в состоянии термодинамического равновесия, которое ожидается, когда вещество находится при постоянной температуре в течение длительного времени. Состояния с более высокой энергией экспоненциально менее вероятны, а крутизна этого экспоненциального спада становится более выраженной с понижением температуры.*

Распределение Больцмана является мощной теоретической концепцией, которая легла в основу успешных теорий в статистической термодинамике на протяжении более чем столетия. Оно позволяет делать самые разные точные количественные прогнозы о кристаллах, жидкостях, полимерах и газах, а также предоставляет элегантный и интуитивно понятный способ выражения противоборства между энтропией и энергией в единой концепции.

Если нужно определить больцмановскую вероятность заданного грубодискретного состояния, необходимо вычислить величину, известную как свободная энергия (F), которая определяется через энергию (E) и энтропию (S) по формуле: **F = E – TS**, где T — температура.

Низкая свободная энергия соответствует высокой вероятности, и наоборот. Это означает, что высокая вероятность может быть достигнута за счёт низкой энергии, высокой энтропии или их сочетания. Точный компромисс между этими факторами определяется температурой. Из этого сразу следует, что по мере снижения температуры к нулю жидкость с изначально высокой энтропией и энергией может стать неустойчивой и начать переходить в упорядоченную кристаллическую структуру с более низкой энергией.



*При высокой температуре многочисленность высокоэнергетических состояний берёт верх, и жидкость с высокой энтропией становится подавляюще более вероятной (серым обозначены области, где система имеет тенденцию находиться).*

Ещё более важно то, что таким же образом становится понятно, как разнообразные неупорядоченные части могут спонтанно собираться в стабильную, с низкой энтропией структуру. При условии, что у этих частей есть способ объединения, который обеспечивает значительно более низкую энергию по сравнению с хаотичным множеством других возможных перестановок, и окружающая среда не слишком горячая, они могут легко коагулировать без какой-либо внешней помощи (как это происходит при замерзании воды в пруду).

Примеры так называемой **самосборки в состоянии равновесия** в изобилии встречаются на переднем крае науки о материалах, вдохновлённой биологией. Например, это включают забавные трюки **ДНК-оригами** (которые используются для создания настраиваемых наноразмерных конструкций из нуклеиновых кислот, специфически сцепляющихся друг с другом) или **самосборку фотонных кристаллических массивов** из коллоидных частиц, украшенных нуклеотидными линкерами.[[23]](#footnote-23)

Общее между этими двумя примерами то, что они опираются на биологическое использование нуклеиновых кислот для создания высокоспецифических сил притяжения между молекулярными шаблонами. Эта специфичность используется для кодирования "чертежа" на более крупном масштабе. Таким образом, как и в случае с саморепликацией, решение проблемы специфичности межмолекулярных взаимодействий делает возможным достижение других впечатляющих, похожих на жизненные, явлений.



*При низкой температуре низкая энергия твёрдого состояния начинает доминировать в распределении вероятностей, и кристаллизация становится предпочтительной.*

Мы уже установили, что вы вряд ли сможете получить лягушку из лезвий бесконечно острого блендера. Мы предполагаем, что блендер создаст все возможные перестановки материи, сделав энтропию и вероятность синонимичными. Однако теперь возникает новый вопрос: как насчёт распределения Больцмана? В условиях теплового равновесия не все микросостояния одинаково вероятны, и иногда это означает, что молекулы с большой вероятностью могут объединиться в упорядоченное макросостояние с очень низкой энтропией. Стали ли мы ближе к тому, чтобы получить лягушку таким образом? Фактически, да, но не настолько, чтобы это стало возможным! Чтобы понять почему, нам нужно помнить, что тепловое равновесие — это состояние, которого система достигает только после того, как её материю оставили при постоянной температуре на долгое время, позволив "шарику" блуждать и исследовать различные возможные части энергетического ландшафта — другими словами, позволив атомам или молекулам многократно распадаться и рекомбинироваться в различные возможные формы.

Соответствующий сценарий для лягушки заключался бы в том, чтобы поместить её в закрытый контейнер, позволяющий теплу входить и выходить, и затем погрузить этот контейнер в ванну с постоянной температурой на триллион раз по триллиону лет или дольше. Теперь вопрос в следующем: что мы ожидаем найти, если откроем контейнер снова после всего этого времени?

Здравый смысл подсказывает, что при описанных условиях лягушка в запечатанном контейнере быстро погибнет, исчерпав запасы пищи или кислорода. Со временем её материальные остатки, вероятно, перестанут напоминать лягушку, так как случайные удары тепла от сталкивающихся молекул окружающей среды разрушат всё до мельчайших частей. Но почему это происходит? Почему не может быть так, чтобы при определённых условиях атомы, подобно замерзающему пруду, собрались сами собой в узор живого земноводного? Насколько абсурдным ни казался бы этот вопрос, он не так далёк от реальности, если сосредоточиться исключительно на том, как устроены живые существа.

Большинство сухой массы в живой клетке состоит из белка, и, как упоминалось в Главе 2, белки — это цепи из различных типов аминокислот с разными химическими группами, отходящими от общего "скелета". Нобелевский лауреат Кристиан Анфинсен знаменит тем, что продемонстрировал: специфическая последовательность боковых цепей аминокислот в белке часто достаточна для того, чтобы при тепловом равновесии определить трёхмерную структуру цепи, которая позволяет белку выполнять свою функцию в клетке.[[24]](#footnote-24)

Для некоторых белков это означает позиционирование определённых химических групп в пространстве так, чтобы они могли действовать как катализатор для определённой химической реакции. Для других — это означает формирование структуры, которая может служить элементом в мультибелковых филаментах, придающих клетке её механическую устойчивость к внешним воздействиям. В любом случае, хотя многие белки действительно требуют активной помощи при формировании правильной структуры, широкий их спектр можно с уверенностью считать очень сложными родственниками замерзающего пруда: они восстанавливают свою идеально "сконструированную" конфигурацию, просто позволяя тепловым флуктуациям помочь им "скатиться вниз" к состоянию с низкой свободной энергией.[[25]](#footnote-25)



*Аминокислоты с различным химическим составом соединяются в цепь, образуя молекулу белка, и эта цепь называется первичной последовательностью. Многие последовательности аминокислот, благодаря их уникальным свойствам — липким и отталкивающим поверхностям, — способны направлять цепи, в которые они входят, к принятию особой конфигурации с низкой энтропией и исключительной архитектурой, необходимой для выполнения молекулой её биохимических функций в клетке. Эта конфигурация называется нативной третичной структурой белковой молекулы.*

Живые организмы построены на молекулярном уровне удивительным образом, который не может возникнуть в условиях теплового равновесия. Подобно кристаллам льда, они представляют собой низкоэнтропийные макросостояния, соответствующие редчайшим микросостояниям в огромном пространстве возможных конфигураций. Но, в отличие от льда, жизнь не находится на «низкой энергетической равнине». Наоборот, она как будто балансирует на узком горном перевале с высокой энергией, окруженном крутыми склонами. Если представить это через призму свободной энергии F=E−TS (где E — энергия, S — энтропия, T — температура), жизнь сочетает высокую энергию с низкой энтропией, что делает ее крайне маловероятной в условиях теплового равновесия.

Теперь представьте: вы открываете коробку и находите внутри живую лягушку. Чтобы такое случилось, бесчисленные случайные тепловые флуктуации должны были собрать лягушку буквально перед тем, как вы открыли крышку. Вероятность этого настолько мала, что мы не можем на нее рассчитывать. Жизнь требует большего, чем случайные процессы.

Возьмем, например, белки — основные молекулы жизни. Они обладают способностью самостоятельно сворачиваться в сложные формы, но при этом их свободная энергия остается высокой, что делает их термодинамически нестабильными. Пептидные связи, соединяющие аминокислоты в длинные цепи, лишь на первый взгляд кажутся прочными. Если поместить белок, например миозин (обнаруженный в мышцах), в стакан с водой, он останется целым годами. Но это только благодаря тому, что разрушение таких связей требует, чтобы молекулы «перепрыгнули» через энергетический барьер, прежде чем начнется распад. Это явление называется метастабильностью — балансом между устойчивостью и медленным движением к распаду.

Еще более поразителен тот факт, что белки уникальны не только своей химической структурой, но и последовательностью аминокислот. Существует около 20200 возможных комбинаций для типичного белка, состоящего из 200 аминокислот. Это колоссальное количество вариантов — больше, чем атомов во Вселенной. Однако лишь ничтожная доля этих последовательностей способна выполнять сложные задачи, такие как катализ химических реакций или создание механических движений.[[26]](#footnote-26)

Представьте, что вы строите модель самолета из конструктора. Случайное соединение деталей редко приведет к работающей модели. Точно так же случайные последовательности аминокислот не обладают нужными свойствами: они не сворачиваются в стабильные формы, не катализируют реакции и не выполняют функций, присущих белкам.[[27]](#footnote-27) Миозин, например, использует молекулярное топливо АТФ для создания движений, напоминающих моторный толчок, но его уникальная структура столь тонко настроена, что малейшая ошибка делает его нефункциональным.

Еще важнее то, что сама жизнь работает не только благодаря своим строительным блокам, но и благодаря их чрезвычайно точной организации. Любая часть организма — от белков до клеток — представляет собой низкоэнтропийное состояние, тщательно выстроенное для выполнения определенных задач. Если бы жизнь подчинялась только законам распределения Больцмана, она никогда бы не смогла собрать эти строительные блоки в работающую систему. Ведь термодинамика, основанная на случайности, всегда стремится к снижению энергии, но не способна выделить уникальные последовательности или структуры, которые делают жизнь возможной.[[28]](#footnote-28)

Жизнь напоминает сложнейший механизм, подобный изобретению инженера. Каждая деталь должна быть точно на своем месте, чтобы система заработала. Это как открыть швейцарские часы и увидеть, как множество мельчайших шестеренок, идеально подобранных и настроенных, работают в полной гармонии. Сами по себе шестеренки — это всего лишь кусочки металла. Но в собранной системе они превращаются в нечто большее, чем сумма их частей. Так же и с жизнью: это искусное сочетание химии, физики и энергии, которое, вопреки энтропии, поддерживает невероятный порядок.

Чтобы понять, как жизненные процессы могут возникать из хаотичного смешения неживых строительных блоков, нужно разобраться, какие физические условия способны изменить баланс и пересчитать вероятности. Обычная тепловая ванна, приводящая систему к термическому равновесию, слишком ограничивает движения частиц, устраняя высокоэнергетические микросостояния, но одновременно игнорирует различия между состояниями с одинаковой энергией. Очевидно, что для появления более сложных форм движения и организации требуется что-то большее, чем случайный тепловой обмен. Когда поток энергии добавляется в систему, открываются захватывающие возможности — система начинает следовать новым законам и развиваться в неожиданном направлении.

Снег, как явление, предлагает удивительное сочетание физической простоты и глубокой символичности. В масштабе горного склона снег представляет собой огромное множество взаимодействующих частиц, и даже небольшие возмущения в этой системе могут привести к лавине. Этот процесс напоминает нам о принципах коллективного поведения: как малые изменения способны вызывать драматические последствия. Разнообразие типов снега и его свойств подчеркивает, как тонкости в конфигурации элементов могут порождать уникальные качества, будь то хрупкость снежной корки или прочность плотного льда. А если мы обратим внимание на индивидуальные снежинки, то их симметрия, кажущаяся идеальной с расстояния, оказывается дополненной фрактальными, хаотичными границами, видимыми при ближайшем рассмотрении. В их формах скрыто нечто большее — ощущение порядка, который напоминает нам о жизни, хотя это всего лишь замерзшая вода.

Снег — это не только физическое явление, но и символ перехода от хаоса к порядку. Каждая снежинка уникальна, ее форма зависит от множества тонких факторов, включая температуру, влажность и даже крошечные возмущения воздуха. Эта неповторимость вызывает у нас ощущение, что в ней скрыт некий «характер» или «индивидуальность», пусть даже мы понимаем, что это не живое существо. Но стоит обратить внимание на сам процесс образования снежинки: как молекулы воды осаждаются на растущей кристаллической структуре, каждая из них добавляет что-то свое, формируя узор, который кажется созданным с определенным замыслом. И вот тут снег как будто пересекает границу между неживым и чем-то, напоминающим жизнь.

Эта неопределенность, разделяющая живое и неживое, вызывает глубокие вопросы. Ведь, по сути, жизнь — это лишь чрезвычайно сложная организация материи. Даже снежинка, несмотря на свою неподвижность, напоминает нам о том, как порядок может возникать из хаоса. Тонкая граница, отделяющая порядок от беспорядка, ожившее от мертвого, оказывается не такой уж четкой.

И здесь появляется пыль, как последний аккорд этой истории. Пыль — это остатки жизни, следы того, что когда-то было целым организмом. Кожа, волосы, листья, лепестки — все это, отделяясь от живого, превращается в мельчайшие частицы, которые напоминают нам, что мы собраны из тех же элементарных частиц, что и все вокруг. Когда мы умираем, эти части распадаются, теряют форму, но не исчезают, становясь пылью, которая путешествует по миру, смешиваясь с песком пустыни, древними костями или землей под нашими ногами. Каждый вид пыли несет в себе историю, уникальность. Красноватая буря в пустыне или пыль веков в древнем склепе — каждая из них по-своему показывает, что жизнь может быть разобрана и собрана снова.

Снег, иней, пыль — это метафоры нашей природы, объединяющие в себе упорядоченность и хаос, рождение и распад. Эти явления, хотя и не являются живыми, отражают удивительный баланс мира, где одно переходит в другое, создавая бесконечные возможности для новых форм и новых историй.

## Глава 4 Река и кровь

Возьми воду из Нила и вылей ее на сухую землю, и вода, которую ты возьмешь из реки, превратится в кровь

Исход 4:9

Жизнь — это движение. Мы привыкли замечать его в действиях животных: бег гепарда, полет птицы или прыжок лягушки. Но это далеко не единственные примеры. Распускающийся цветок, ветви дерева, тянущиеся к свету, или растущая колония бактерий в лабораторной чашке — всё это так же ярко демонстрирует, как живые существа меняются, развиваются, взаимодействуют с окружающим миром. Однако движение само по себе не делает объект живым. Камень, катящийся вниз по склону, или вращающийся йо-йо столь же динамичны, но очевидно, что они не живые. Тогда что же отличает движение живого от неживого?

Ключ к ответу кроется в направленности. Механические движения, такие как вращение или скольжение, симметричны: камень может катиться вниз или быть подброшенным обратно вверх, йо-йо движется по или против часовой стрелки, в зависимости от приложенной силы. Но жизнь движется иначе. Представьте семя, которое превращается в дерево, или эмбрион, развивающийся в новорожденного. Это движение однонаправленно. Дерево не становится обратно семенем, а человек не молодеет с возрастом. Это отсутствие обратимости выделяет жизнь из общей картины физического мира.

Такое свойство не случайно. Однонаправленные процессы, характерные для живых существ, намекают на глубокие законы природы. Они подчеркивают, что жизнь подчиняется не только физическим силам, но и внутренним механизмам, направленным на рост, развитие и поддержание порядка. Этот уникальный ритм жизни делает её отличной от всего остального в нашем мире, где движение чаще всего можно повернуть вспять.

Чтобы понять движение жизни, нужно начать с энергии. В физике энергия — это мера того, сколько движения тело может передать или поглотить. Однако способ распределения и использования энергии различает живое и неживое. Например, свежесрубленное бревно и кипящий чайник могут содержать одинаковое количество энергии, но лишь чайник будет горячим. Кипящий чайник и раскалённый двигатель могут быть одинаково горячими, но только двигатель сможет вращать колёса грузовика. Разница не в количестве энергии, а в её направлении и использовании. Этот принцип помогает объяснить, почему жизнь не "работает в обратном направлении", и раскрывает её уникальные свойства.

В повседневной жизни энергия часто представляется чем-то магическим — её можно хранить в батареях, передавать по проводам, питать машины или освещать города. Однако идея энергии возникла как математическая абстракция, введённая для учёта движения и взаимодействия тел. Исаак Ньютон показал, что частицы материи взаимодействуют через силы, и эти силы, в зависимости от их природы, могут сохранять или преобразовывать энергию.

Примером служит гравитация. Представьте пушечное ядро, выстреленное вертикально вверх. Оно начинает с высокой скоростью, постепенно замедляется, а затем на самой вершине своей траектории ненадолго останавливается, прежде чем начать падать вниз. Гравитация здесь работает как консервативная сила: она позволяет ядру подняться, обменяв кинетическую энергию (связанную со скоростью) на потенциальную энергию (связанную с высотой). Когда ядро начинает падать, процесс разворачивается в обратном направлении: потенциальная энергия снова превращается в кинетическую. В идеальном случае, без сопротивления воздуха, энергия остаётся неизменной, просто переходя из одной формы в другую.

Этот обмен энергией показывает, что физика неживых объектов симметрична — процесс можно обратить. Но жизнь работает иначе. Организмы используют энергию для создания порядка, роста и поддержания сложных структур. Эти процессы движутся только вперёд, потому что они основаны не на простом обмене, а на направленном использовании энергии. Этот однонаправленный поток энергии отличает живое от неживого и открывает перед нами уникальный физический мир жизни.

Рассматривать физические явления через призму закона сохранения энергии не только полезно, но и необходимо для понимания того, как происходят движения. Этот закон накладывает жёсткие ограничения на возможные процессы и позволяет делать точные предсказания. Например, если пушечное ядро, выстреленное вверх, при падении обратно на Землю движется медленнее, чем при старте, это означает, что в системе возникли дополнительные процессы. Мы можем сразу предположить, что энергия ядра была передана окружающему воздуху в ходе его полёта.

Каждое столкновение ядра с молекулами воздуха происходит под действием консервативных сил, однако результат оказывается другим. Кинетическая энергия ядра — мера его движения — постепенно уменьшается, передаваясь молекулам воздуха. Эта передача энергии не упорядочена, она распределяется случайным образом между множеством микроскопических движений молекул. Такое явление называется теплотой.

Теплота — это нечто большее, чем просто потеря скорости ядра. Это преобразование энергии из макроскопической формы, такой как движение пушечного ядра, в микроскопическую, где энергия оказывается «размазана» по хаотичным движениям молекул. Таким образом, сопротивление воздуха не уничтожает энергию, а лишь преобразует её, и этот переход от упорядоченного движения к хаотичному лежит в основе многих процессов в физике. Он также намекает на фундаментальные принципы работы живых систем, которые используют энергию не для хаотичного рассеивания, а для создания упорядоченности и поддержания жизненных процессов.



*Симметрия обратимости времени в ньютоновской физике представляет собой удивительное свойство природы: если движение может происходить в одном направлении, то, при определённом выборе начальных условий, оно также может произойти в обратном. Представьте себе мяч, который поднимается вверх, летит слева направо, а затем падает и приземляется справа. В ньютоновской механике законы движения позволяют воспроизвести это событие в обратной последовательности. Мяч может подниматься вверх, но теперь уже летя справа налево, чтобы затем упасть и приземлиться слева.*

Эта симметрия восхищает своей простотой: законы движения одинаково применимы в обоих временных направлениях. Однако в реальной жизни мы почти никогда не видим, чтобы события происходили «в обратную сторону». Это не противоречит ньютоновской механике, но подсказывает, что за видимой необратимостью наших наблюдений скрываются другие принципы, такие как рост энтропии. Ньютоновские уравнения дают возможность как для прямого, так и для обратного движения, но сами по себе они не объясняют, почему в реальности события идут только вперёд. Это несоответствие между теоретической обратимостью и фактической необратимостью лежит в основе многих фундаментальных вопросов о природе времени и движении.

Наблюдательный человек может заметить, что тепло играет ключевую роль в нарушении симметрии, но в условиях, где тепловое воздействие отсутствует, мир демонстрирует изящную симметрию движения. Представьте, что пушечное ядро выстреливается с поверхности Луны, где нет атмосферы. В отсутствие сопротивления воздуха энергия ядра не рассеивается, и его траектория приобретает идеальную форму. Оно стремительно поднимается вверх, постепенно замедляясь до полной остановки, а затем начинает падать, набирая скорость, чтобы достичь поверхности с той же величиной, с которой началось его движение, но в противоположном направлении.

Эти два движения — подъём и падение — идеально зеркальны. Если бы мы сняли этот процесс на видео, перевернутая запись выглядела бы так же правдоподобно, как оригинал. Это не просто удачное совпадение; это фундаментальное свойство, вытекающее из законов Ньютона. Его уравнения движения, выраженные через знаменитую формулу F=ma (где F — сила, m — масса, a — ускорение), допускают симметрию времени. Всё, что может произойти в одном направлении, может также произойти в обратном, если поменять порядок событий.

Такой идеальный мир демонстрирует, как природа могла бы быть полностью симметричной, если бы тепло и сопротивление не вмешивались. Однако в реальном мире, где присутствует взаимодействие с окружающей средой, эта симметрия нарушается, и движение становится необратимым. Это различие между теоретической симметрией и реальной необратимостью делает физику столь захватывающей и открывает двери к более глубокому пониманию роли энергии и времени.

На Земле все становится сложнее из-за тепловых потерь, вызванных сопротивлением воздуха. Это сопротивление, кажется, нарушает симметрию обратимости времени, столь очевидную в вакууме. Представьте, что ядро, выстреленное вверх, достигает определённой высоты. Когда оно начинает падать, его скорость при возвращении к Земле оказывается меньше той, с которой оно стартовало. Энергия утрачивается, и симметрия движения нарушается.

Но где же оказывается «потерянная» энергия? Ответ в том, что её вовсе не теряют. Молекулы воздуха, сталкиваясь с ядром, поглощают часть его кинетической энергии, нагреваясь и ускоряясь в процессе. Чтобы восстановить симметрию, нужно рассматривать не только ядро, но и воздух как единую систему. В теории, если бы молекулы воздуха начали возвращать ядру энергию точно так же, как они её забрали, симметрия была бы восстановлена. Ядро набрало бы скорость при падении обратно, точно повторяя движение вверх, но в обратном порядке.

Однако такая ситуация практически невозможна. Молекулы воздуха движутся хаотично, их взаимодействие с ядром неупорядочено, и энергия, переданная ими, быстро рассеивается в виде тепла. Несмотря на то, что законы Ньютона формально допускают такую обратимость, реальная динамика молекул делает её недостижимой. Сопротивление воздуха превращает движение в процесс, где симметрия времени размывается, а необратимость становится неизбежной чертой нашего повседневного опыта.

Этот пример показывает, как взаимодействие между объектом и окружающей средой, вводя хаотичные факторы, меняет простую физику на удивительно сложную. Мы видим, как мир из теоретически обратимого становится практическим, где направление времени задаётся законами термодинамики, а не только ньютоновскими уравнениями.

Абсурдность предположения о том, что молекулы воздуха могли бы организоваться так, чтобы ускорить пушечное ядро при падении, подчеркивает уникальную природу сопротивления воздуха: оно всегда действует против движения. Когда ядро поднимается вверх, сопротивление замедляет его, тянув вниз. Когда оно падает, сопротивление снова замедляет его, но уже тянув вверх. Это поведение кардинально отличается от гравитации, которая стабильно действует вниз, независимо от направления движения.

Вопрос в том, почему кажется таким невероятным, что воздух мог бы «помочь» ядру ускориться при падении? Ответ кроется в природе самой силы трения и связанных с ней процессов. С точки зрения ньютоновских уравнений, ничего принципиально не запрещает молекулам воздуха объединиться, чтобы ускорить ядро. Всё, что нужно для этого, — это задать точные начальные условия, идеально организовав положение, скорость и направление движения каждой молекулы. Однако вероятность того, что такое произойдёт естественным образом, практически равна нулю.

Это маловероятно, потому что процессы, связанные с трением и теплом, по сути случайны. Когда молекулы воздуха сталкиваются с ядром, энергия хаотично перераспределяется между их движениями. Тепло, возникающее при этом, — это проявление этой случайности. Для того чтобы молекулы начали действовать упорядоченно, нужно настолько сложное начальное состояние, что его реализация становится невозможной в реальных условиях.

Именно этот переход от строгой предсказуемости ньютоновских законов к вероятностной природе тепловых процессов объясняет нарушение симметрии обратимости времени. Законы движения остаются обратимыми в теории, но в реальности случайные процессы, сопровождающие сопротивление воздуха, делают обратимость практически недостижимой. Таким образом, трение открывает дверь в мир вероятностей, где ключевую роль играет не только энергия, но и то, как она распределяется между бесчисленными микроскопическими частицами.

Сопротивление воздуха никогда не действует в обратном направлении по простой причине: множество случайно движущихся молекул воздуха гораздо лучше рассеивают энергию, чем концентрируют её в одном месте. Это можно понять через карикатурную аналогию с группой людей, стоящих в центре футбольного стадиона. Представьте, что каждый из них держит монету. Каждую минуту они дважды подбрасывают свои монеты и делают шаг в определённом направлении в зависимости от результата: «орёл-орёл» ведёт на север, «орёл-решка» — на восток и так далее.

Через двадцать минут группа начнёт рассеиваться, занимая всё больше пространства на стадионе. Каждое индивидуальное случайное движение отдаляет людей от начальной точки, и в итоге они распределяются более-менее равномерно по всему стадиону. Это происходит потому, что случайное блуждание со временем делает каждую конфигурацию людей одинаково вероятной, а конфигураций, где участники рассредоточены, гораздо больше, чем тех, где они остаются сгруппированными.

Этот принцип легко понять с людьми, а с энергией он работает аналогично. Энергия, передаваемая от одного объекта другому, ведёт себя как сохраняемая величина, которая распространяется через взаимодействия. Когда тепло поступает в одну конкретную область газа, каждое столкновение молекул становится возможностью для маленькой части энергии переместиться дальше, распространяясь среди соседних молекул. Со временем тепло, как и люди в стадионе, рассеивается, стремясь к равномерному распределению.

Этот процесс — естественный результат случайности в движении молекул. Он объясняет, почему тепло так эффективно распространяется, но никогда не собирается обратно в одну точку. Таким образом, природа сопротивления воздуха и связанных с ним тепловых потерь сводится к универсальному закону: рассеяние намного вероятнее, чем концентрация. Это основа многих процессов, связанных с энергией, и ключ к пониманию необратимости тепловых явлений.

Если бы невероятное множество редких случайных событий произошло одновременно и в нужном порядке, мы могли бы наблюдать, как тепло собирается обратно. Однако чем более масштабным был бы этот эффект, тем менее вероятно его случайное возникновение. Это помогает объяснить, почему сопротивление воздуха неизменно действует против движения. Когда пушечное ядро передаёт часть своей энергии молекулам воздуха, те разлетаются в хаотичных направлениях, и энергия рассеивается в виде тепла. Чтобы произошло обратное, нужно было бы, чтобы движения огромного количества молекул неожиданно скоординировались. Представьте, что весь нагретый воздух в определённой области вдруг стал холоднее окружающего и начал дуть в одном направлении, толкая ядро. Такой сценарий сравним с тем, чтобы бесконечно подбрасывать монету и каждый раз получать «орёл». Даже за возраст Вселенной это не произойдёт ни разу.

Однако, что удивительно, физика даёт способ строго количественно оценить вероятность таких явлений. Здесь в игру вступает работа Гэвина Крукса из Национальной лаборатории Лоуренса Беркли, которая перевела эти редкие события в язык чисел и вероятностей. Его исследование связывает тепловые потоки с асимметрией между «прямыми» и «обратными» фильмами физического процесса. Представьте прямой фильм, в котором пушечное ядро поднимается, замедляется, передаёт энергию воздуху и падает обратно. В теории можно представить обратный фильм, где ядро набирает энергию от воздуха и возвращается в исходное состояние. Крукс доказал, что вероятность прямого фильма делённая на вероятность обратного фильма определяется специальным коэффициентом, который зависит от температуры системы.

Этот коэффициент, обозначаемый b(T), всегда больше единицы и возрастает с уменьшением температуры. Чем холоднее система, тем более выражена асимметрия между вероятностями прямого и обратного процессов. Это соотношение, известное как соотношение Крукса, опирается на распределение Больцмана и является ключом к пониманию того, почему в реальных системах процессы, связанные с теплом, всегда имеют привилегированное направление. Оно показывает, что хотя физические законы допускают обратимость, вероятность событий делает прямое направление практически единственно возможным.

*p(forward) / p(rewind)=b(T)Q*

где Q — количество тепла, выделяемого в окружающую среду во время "прямого фильма".[[29]](#footnote-29) Это уравнение утверждает, что при любой заданной температуре фильмы, изображающие процессы, выделяющие положительное количество тепла, экспоненциально более вероятны, чем их временно перевёрнутые версии (которые, напротив, поглощают то же самое положительное количество тепла). Более того, крутизна этого экспоненциального роста становится всё больше по мере того, как температура окружающей среды уменьшается. Иными словами, любое нарушение эквивалентности между прямым и обратным движением должно "оплачиваться" теплом. Чем больше тепла вы "платите", двигаясь вперёд, тем сильнее вы можете предпочесть этот "фильм" его обратной версии.

Уравнение Крукса, по сути, лишь строго количественно описывает интуитивное понимание: как только тепло рассеивается случайным образом, вероятность того, что оно «перепрыгнет» обратно и снова соберётся в одном месте, исчезающе мала. Это базовое осознание помогает объяснить такие явления, как движение пушечного ядра или катящегося камня. Камень, спускаясь по склону, превращает свою потенциальную энергию в кинетическую, а затем эта энергия переходит в тепло, которое безвозвратно рассеивается в окружающую среду. Камень останавливается, и процесс завершается, как будто история рассказана до конца.

Однако этот пример, хоть и полезен, остаётся тривиальным. Нам не нужно сложное объяснение о «фильмах» и их обратимости, чтобы понять, что материя стремится к состоянию с меньшей энергией — распределение Больцмана уже объяснило это. Истинная сила уравнения Крукса проявляется, когда мы смотрим на более сложные системы, которые активно нарушают симметрию времени, но не оказываются в состоянии низкой энергии, как камень в овраге.

Взгляните на биологические процессы. Сердце человека, бьющееся миллиарды раз за жизнь, направляет обогащённую кислородом кровь в артерии, а обеднённую кровь возвращает через вены. Здесь энергия системы не увеличивается и не уменьшается, но направление движения совершенно однозначно. Или возьмём цикл морской воды: испарение, дождь, стекание рек в океаны. Энергия воды остаётся неизменной, но движение идёт только в одном направлении. Если бы перемотать этот фильм, где капли дождя на земле поднимаются обратно в облака, он выглядел бы нелепо.

Ещё более поразителен рост дерева из семени. Это процесс, который явно идёт только в одном направлении: от малого к большому, от простого к сложному. Энергия, накапливаемая деревом, возрастает со временем, а обратное движение — возвращение дерева в форму семени — кажется невозможным. Даже песчаные дюны, хотя и более примитивны, демонстрируют подобное поведение. Под воздействием ветра они накапливают всё больше потенциальной энергии, перемещаясь по пустыне, но никогда не возвращаются к своему первоначальному состоянию.

Все эти примеры нарушают симметрию времени, и их движение кажется необратимым. Однако они подчёркивают, что природа направленного движения связана не только с потерей энергии, как в случае камня, но и с механизмами, которые упорядочивают и направляют энергию для достижения определённых целей. Это делает такие системы фундаментально отличными от простых процессов рассеяния тепла, раскрывая сложные закономерности мира, где каждый новый шаг оказывается более удивительным, чем предыдущий.

Каждый из приведённых примеров демонстрирует процессы, которые имеют чётко выраженное направление во времени. В соответствии с идеями Крукса, такие процессы неизбежно связаны с выделением тепла, либо с его эквивалентом, таким как передача тепла от более горячей области к более холодной. Но это вызывает вопрос: как такие системы, где общая энергия остаётся постоянной, всё же могут терять тепло? Ответ заключается в том, что каждая из этих систем получает энергию извне, и эта энергия преобразуется в тепло, которое рассеивается в окружающую среду.

Возьмём, например, дюны, перемещающиеся под воздействием ветра. Ветер выступает как внешний источник энергии, который передаёт её песчинкам, помогая им двигаться и постепенно изменять форму дюны. Аналогично, перекачка крови через тело обеспечивается энергией, поступающей от сокращений сердца, которые действуют как насос. В обоих случаях система функционирует как канал, преобразующий входящую энергию в движение, а затем в тепло, рассеивающееся в окружающую среду. Именно такой устойчивый поток энергии позволяет материям и системам проявлять направленное движение и даже демонстрировать свойства, которые мы могли бы назвать "живыми".

На молекулярном и клеточном уровнях такие процессы ещё более захватывающи. Дрожжевые клетки, например, преобразуют сахар в необходимые для выживания метаболические продукты с помощью цикла Кребса. Эта последовательность химических реакций, словно сложное химическое колесо, преобразует молекулы из одной формы в другую и обратно, генерируя энергию для клетки. Бактерии, двигаясь в вязкой среде, используют молекулярные моторы, которые циклически изменяют форму и вращают жгутик, продвигающий их вперёд. Это движение возможно только благодаря постоянному притоку энергии.

Но, пожалуй, самым впечатляющим примером является циркуляционная система млекопитающего. Сердце постоянно перекачивает кровь, направляя её в лёгкие и кишечник, чтобы насыщать организм кислородом и питательными веществами. Этот непрерывный поток поддерживается благодаря энергии сердечных сокращений. Таким образом, циркуляция крови не просто транспортирует полезные вещества, но и демонстрирует удивительный пример того, как устойчивый приток энергии позволяет системе сохранять направленность и сложность.

Эти циклы и движения, которые влекут за собой преобразование энергии и выделение тепла, являются основой того, что мы называем "живым" поведением. Они показывают, как материя может, используя энергию извне, создавать сложные и направленные процессы, поддерживающие жизнь и её многочисленные проявления.

Все эти циклы можно представить как примеры так называемых неравновесных стационарных состояний — удивительных систем, которые, хотя и не находятся в термическом равновесии, демонстрируют стабильность и предсказуемость. Частицы вещества в таких системах движутся упорядоченно, создавая иллюзию неизменности. Сердце, например, поддерживает постоянный ритм, а кровоток движется с заданной скоростью и направлением. Но если представить фильм, где этот процесс перемотан назад, — кровь, текущая в обратном направлении, выглядит не только нелепо, но и совершенно нефункционально. Такой процесс не смог бы доставить кислород и питательные вещества туда, где они необходимы.

В этом и заключается удивительная особенность неравновесных стационарных состояний: они выглядят совершенно иначе при обратимости времени. Это резко контрастирует с системами в термическом равновесии, такими как газ или кристалл. Фильм, перемотанный назад, показывающий случайные движения молекул газа, будет неотличим от оригинала. Только когда энергия и вещество направленно проходят через систему, динамика становится асимметричной, и время приобретает видимую «стрелу».

Соотношение Крукса помогает нам понять, что когда энергия покидает систему в процессе с временной асимметрией, часть её неизбежно уходит в тепло. Но откуда берётся сама энергия? Представьте ребёнка, который тянет деревянную игрушечную утку на верёвочке по кругу. Пока ребёнок продолжает тянуть, утка движется. Эта сила натяжения верёвки, толкающая утку вперёд, называется «работой» — так физики называют любой процесс, где сила заставляет что-то двигаться.

Работа — это упорядоченный способ передачи энергии в систему. Она задаёт движение, направляя энергию в конкретную часть системы. Однако, как только ребёнку надоедает играть и он отпускает верёвку, утка останавливается. Её кинетическая энергия рассеивается в виде тепла, и движение прекращается. Этот простой пример демонстрирует, как неравновесные стационарные состояния поддерживаются внешним источником энергии. Без работы, которая передаёт энергию, всё неминуемо приходит к остановке и равновесию.

Именно это делает такие системы столь увлекательными: они сопротивляются хаосу и энтропии, но только до тех пор, пока кто-то или что-то «тянет за верёвочку», направляя энергию.

Важно отметить, что утка теряла тепло не только после остановки, но и во время своего движения. Пока ребёнок тянул её по кругу, энергия работы, передаваемая через верёвку, непрерывно преобразовывалась в тепло из-за трения между уткой и землёй. Это тепло терялось в окружающую среду. Это ключевая характеристика всех неравновесных стационарных состояний: энергия поступает извне, запускает движение, а затем рассеивается в виде тепла.

Что делает многие такие состояния сложнее, чем движение игрушечной утки, так это переплетение множества циклов, взаимосвязанных и пересекающихся. В таких системах выбор того, какой цикл будет выполнен в каждый момент времени, часто определяется вероятностью и может быть случайным. Однако, если смотреть на эти процессы с точки зрения времени, становится ясно, что они обладают направленностью: энергия движется вперёд, преобразуется и теряется как тепло. Таким образом, всякий раз, когда мы видим систему, которая постоянно поглощает энергию и выделяет тепло, что-то в её движении неизменно указывает вперёд во времени.

Это объясняет, почему многие процессы, происходящие в живых организмах, кажутся необратимыми. Жизнь питается энергией, поступающей из внешней среды в форме химической работы (например, пищи) или солнечного света. Она преобразует эту энергию, направляя её на выполнение сложных биологических задач, и постоянно выделяет тепло. Это тепло делает процессы необратимыми, так как оно рассеивается и не может быть возвращено.

Однако мы настолько привыкли к этому постоянному потреблению и выделению энергии, что редко задаём очевидный вопрос: почему жизнь вообще должна потреблять энергию? Почему ни один живой организм не способен существовать, просто находясь в равновесии, как камень, лежащий на земле? Ответ на этот вопрос коренится в самой сущности жизни. Жизнь — это движение, рост, развитие, изменение, и всё это требует постоянного потока энергии. Жизнь не просто сопротивляется энтропии, она использует энергию, чтобы создавать порядок из хаоса, и именно в этом заключается её уникальность.

Жизнь нуждается в энергии по самой простой причине: она растёт. Деревья тянутся вверх, дети становятся крупнее, а клетки увеличиваются перед делением на две новые. Этот рост означает, что организму требуется больше материи, которая должна быть интегрирована в уже существующую структуру. Причём этот процесс не просто механический — он требует, чтобы новая материя накапливала энергию, извлечённую из окружающей среды. Например, деревья используют солнечный свет для превращения углерода в древесину, поднимая его выше в воздух и увеличивая потенциальную энергию. Эта энергия остаётся в химических связях древесины и освобождается в виде тепла и света, когда дерево сгорает.

Но откуда берётся эта энергия? Ответ прост: она поступает из внешней среды. Рост сам по себе делает жизнь «голодной» системой, постоянно потребляющей энергию. Однако потребность в энергии не ограничивается только ростом. Даже когда организм прекращает увеличиваться, его жизненные процессы продолжают требовать топлива.

Рассмотрим размножение. Хотя в природе оно обычно связано с ростом, теоретически воспроизведение могло бы быть энергетически нейтральным. Представьте робота, который собирает другого робота из разбросанных деталей. Если собранный робот не обладает большей или меньшей энергией, чем исходные части, процесс сборки, в принципе, мог бы не требовать дополнительной энергии. Тем не менее, если такой самовоспроизводящийся робот начинает размножаться экспоненциально, превращаясь из одного в двух, затем в четырёх, в восемь и так далее, потребуется постоянный приток энергии.

Соотношение Крукса объясняет это следующим образом: экспоненциальный рост обладает временной направленностью. Робот с большей вероятностью превратится из одного в двух, чем наоборот. Это создаёт асимметрию между прямым процессом и его обратным. Чтобы поддерживать такую направленность, система неизбежно должна выделять тепло в окружающую среду.[[30]](#footnote-30)

Факт, что скорость роста популяции самовоспроизводящихся систем определяется не только их способностью эффективно воспроизводить себя, но и энергетическими затратами, связанными с этим процессом, подчеркивает уникальность жизни. Тепло, выделяемое при каждом акте копирования, — это своеобразная "цена", которую приходится платить за экспоненциальный рост. Даже когда этот процесс кажется идеально упорядоченным, он всегда сопровождается неотъемлемым аспектом диссипации энергии.

Если структура, которую нужно скопировать, сама по себе нейтральна в энергетическом отношении, тепло может быть выделено только за счёт поглощённой из окружающей среды энергии. Таким образом, любое самовоспроизводящееся существо или молекула нуждаются в постоянном источнике топлива для поддержания своей экспансии. Этот принцип, казалось бы, прост, но имеет далеко идущие последствия для понимания первых шагов эволюции.

Рассмотрим молекулы РНК и ДНК — ключевых игроков в современной биологии. Обе молекулы уникальны в своей способности сохранять информацию в виде линейных последовательностей химических групп, которые служат инструкциями для клеточной деятельности. Однако РНК, благодаря своей гибкости и способности принимать ферментативные формы, рассматривается как возможный кандидат на роль первичной самовоспроизводящейся молекулы.

Интересно, что РНК имеет одно свойство, которое с первого взгляда кажется недостатком: она гораздо менее стабильна, чем ДНК. В водной среде молекулы РНК разрушаются в результате гидролиза в тысячи раз быстрее, чем молекулы ДНК. Это делает её более "хрупкой". Однако эта кажущаяся слабость может скрывать её эволюционное преимущество.

ДНК, более стабильная молекула, требует больших затрат энергии для своего копирования, так как её прочные связи нуждаются в большем количестве топлива для преодоления этих энергетических барьеров. РНК, напротив, за счёт своей меньшей стабильности способна копировать себя быстрее и с меньшими затратами энергии. В условиях, где скорость самовоспроизведения играла решающую роль, эта "хрупкость" могла дать РНК важное конкурентное преимущество.

Этот пример иллюстрирует, как то, что на первый взгляд кажется слабостью, может стать критическим фактором успеха. Энергетическая "экономичность" РНК могла обеспечить её лидерство в ранних этапах эволюции, когда ресурсы были ограничены, а скорость роста была решающим фактором. В мире, где гибкость, эффективность и адаптивность имеют такое же значение, как прочность, победа может принадлежать не самой стойкой молекуле, а той, которая лучше всего использует энергию окружающей среды.

Самовоспроизведение, на самом деле, является лишь частным случаем более широкого класса процессов, которые зависят от необратимых преобразований, сопровождаемых длительным пребыванием в достигнутом состоянии. Простейший пример такого изменения — замерзание воды. Когда жидкая вода охлаждается в замерзающем воздухе, молекулы начинают упорядочиваться, формируя кристаллическую решётку льда. Этот переход происходит с выделением тепла, так как лёд обладает более низкой потенциальной энергией, чем жидкая вода. Как только лёд сформирован, он остаётся в этом состоянии, пока температура остаётся ниже точки плавления.

Однако существуют и более сложные примеры необратимых процессов, где конечное состояние материала не обязательно обладает более низкой энергией, чем начальное, но всё же остаётся стабильным. Например, закалка керамики, перестановка мебели в комнате или переформатирование магнитного диска — все эти процессы требуют внешнего воздействия, чтобы система перешла из одного устойчивого состояния в другое. В каждом из этих случаев работа, выполненная для преобразования системы, частично преобразуется в тепло, рассеиваемое в окружающую среду.[[31]](#footnote-31) Это неизбежное свойство связано с фундаментальными ограничениями термодинамики.

Представьте себе, что каждое расположение частиц вещества можно описать набором координат, где каждая точка на карте определяет уникальную конфигурацию системы. Потенциальная энергия добавляет «третий измерение» в эту карту, подобно высоте на топографической карте. Теперь представьте шарик, катящийся по такому энергетическому ландшафту: его текущее положение соответствует текущей конфигурации системы.

Когда шарик скатывается вниз, преобразуя потенциальную энергию в кинетическую, его движение легко обратимо. Однако, чтобы поднять его вверх, требуется внешний источник энергии — «эскалатор», который выполняет работу, поднимая шар в новое состояние. После того как шар достигает вершины, он может остаться в этом высокоэнергетическом положении, если внешняя энергия компенсирует тепловые флуктуации, которые могли бы вернуть его обратно вниз.

Это объясняет, почему такие процессы, как замерзание, формирование структуры или переформатирование, всегда требуют внешнего воздействия: они связаны с необходимостью преодоления энергетических барьеров, преобразования работы в тепло и достижения стабильного конечного состояния.



*Если тепловые колебания слабы, подъём на вершину высокоэнергетического холма может быть очень медленным процессом. «Эскалатор», использующий подвод внешней работы для подъёма шара, может ускорить переход через пик, а эта энергия может рассеиваться в виде тепла от трения, когда объекты скатываются с другой стороны. Эта потеря энергии замедляет возвращение объектов в их первоначальное состояние*.

Шарик в энергетическом ландшафте, без внешней силы, перемещается исключительно благодаря случайным толчкам, получаемым от тепловых флуктуаций окружающей среды. Эти толчки могут быть достаточно сильными, чтобы выкатить шарик из одной долины, поднять его в гору, пересечь вершину и скатить вниз в соседнюю долину. Однако, если обе долины находятся на одинаковой энергетической высоте, вероятность того, что шарик вернётся обратно, поднимаясь через вершину в исходную долину, будет такой же, как вероятность его первоначального перемещения.

Соотношение Крокса объясняет, почему эти вероятности равны. Если единственным фактором движения шарика является тепловая ванна, то она отдаёт энергию, когда шарик поднимается, и поглощает её обратно, когда он катится вниз. В итоге, нет чистого выделения или поглощения тепла за цикл перемещения шарика из одной долины в другую и обратно. Это равновесие в передаче тепла означает, что движение одинаково возможно в обоих направлениях, а «фильм», где шарик катится в одну сторону, выглядит так же правдоподобно, как его обратная версия.

Таким образом, без вмешательства внешних сил или работы со стороны системы, шарик остаётся "жертвой" случайных тепловых толчков, которые не придают движению направленности и не нарушают симметрию обратимости времени.



*Когда шарик, поднятый эскалатором, скатывается вниз, тепловые флуктуации могут стремиться вернуть его в состояние с более низкой энергией. Однако эскалатор продолжает поднимать шарик обратно, расходуя энергию, чтобы поддерживать его в состоянии стабильности на вершине высокоэнергетической долины. Это постоянное внешнее воздействие нарушает симметрию системы, превращая её динамику в односторонний процесс.*

Эскалатор действует как внешний конвейер, поднимающий шарик — или совокупность частиц — из глубокой долины на вершину гребня. Этот процесс требует затраты работы и источника энергии извне. Как только шарик скатывается вниз с другой стороны, где нет аналогичного эскалатора, он оказывается в положении, из которого не может легко вернуться тем же путём. Таким образом, асимметрия между подъёмом и спуском обусловлена внешними силами, которые направляют систему в определённое энергетическое состояние, а не просто оставляют её под влиянием случайных тепловых движений.

Энергия, которую механизм поднимает для перемещения шара с одной стороны гребня, теряется в виде тепла, когда шар скатывается с другой стороны. Этот процесс превращает двусторонний барьер в одностороннюю дверь: обратное движение становится невозможным, так как энергия, необходимая для подъёма обратно, недоступна. Это ключевая иллюстрация того, как живые системы используют энергию для преодоления барьеров, преобразуя труднопроходимые границы в однонаправленные процессы.

В живых организмах перестройки происходят на всех уровнях и требуют энергии. На молекулярном уровне шапероны — специализированные белковые "наномашины" — помогают другим белкам складываться в точные функциональные формы, используя химическую энергию. Без этой энергии белки не смогли бы самостоятельно достичь таких сложных конфигураций. На макроуровне даже простое поднятие руки для указания направления требует затрат энергии. Это движение удерживает тело в новой позе, пока тепло, образовавшееся в процессе, не рассеется.

На уровне клеток взаимодействия, такие как нейронные импульсы, требуют значительных энергетических затрат. Мозг потребляет огромное количество энергии, чтобы поддерживать потоки электрических сигналов, называемых потенциалами действия. Эти сигналы нарушают симметрию времени, создавая направленные процессы, такие как усвоение новой информации или её хранение.

Связь между энергией и информацией особенно интересна, когда речь идёт о памяти и вычислениях.[[32]](#footnote-32) Рольф Ландауэр, физик IBM, задал простой, но фундаментальный вопрос: сколько энергии нужно, чтобы стереть один бит информации? Хранение информации в двоичном виде — 1 или 0 — можно представить как шар, находящийся в одной из двух долин, разделённых хребтом. Магнетизация, используемая в практике, является примером реализации этой концепции.

Когда бит установлен в 1 или 0, он остаётся в своём состоянии благодаря тому, что требуется дополнительная энергия, чтобы перевести его в противоположное. Это делает информацию устойчивой к случайным изменениям и позволяет многократно считывать её в будущем. Однако, если требуется изменить бит, например, стереть или переписать информацию, энергия должна быть затрачена на преодоление барьера между состояниями, и часть этой энергии неизбежно рассеивается в виде тепла.

Эта термодинамическая связь между энергией и информацией является основой современных исследований в области вычислений и обработки данных, а также биологических процессов. Она объясняет, почему информационные системы, будь то компьютеры или мозг, требуют постоянного энергоснабжения для работы.

Стирание информации — это действие, которое требует определённой энергетической платы, как бы тривиально оно ни казалось на первый взгляд. Представьте, что вы хотите переформатировать диск, установить все биты в состояние 0, независимо от их начального значения. Если бит уже равен 0, вам ничего не нужно делать. Но если бит равен 1, потребуется энергия, чтобы изменить его состояние и необратимо "застрять" в новой конфигурации. Этот процесс требует работы — энергии, которая затем рассеивается в виде тепла.

Подобные операции не ограничиваются только стиранием информации. Каждая вычислительная операция, включая сложение, сортировку и даже считывание данных, несёт энергетическую стоимость, обусловленную термодинамическими ограничениями. Это не просто абстрактная теория — это фундаментальный закон природы, который определяет, что любые попытки обработки информации, будь то биологические системы или компьютеры, всегда будут связаны с потреблением энергии и рассеиванием тепла.[[33]](#footnote-33)

Именно поэтому любое устройство, способное обрабатывать информацию, от робота до человека, должно иметь источник энергии, чтобы поддерживать постоянный диссипативный поток. Без этого направленного потока стрелы времени — механизма, который "записывает" изменения в системе, — сложное поведение, вроде мышления, адаптации или обучения, становится невозможным.

Теперь перейдём к самовосстановлению. Это понятие знакомо нам с детства: небольшие порезы или ссадины на коже заживают сами собой. Что поразительно, этот процесс не требует вмешательства, словно тело "знает", как восстановить себя. Сравните это с созданными человеком технологиями, которые, раз разрушившись, редко могут вернуть себе первоначальную форму.

Однако чтобы действительно понять, почему самовосстановление так впечатляет, нужно внимательно разобрать, что делает его уникальным. Представьте, например, отверстие во льду, выжженное огнём. Как только огонь гаснет и температура остаётся достаточно низкой, вода автоматически замерзает, восстанавливая поверхность льда. Это своего рода "самовосстановление", но оно не вызывает восторга, как заживление кожи. Почему?

Разница кроется в механизмах. Лёд застывает, потому что это наиболее выгодное термодинамическое состояние при низких температурах. Процесс спонтанен и не требует внешнего управления. В случае же кожи процесс восстановления требует скоординированного взаимодействия клеток, химических сигналов и энергии, направленной на формирование новых тканей. Это сложная цепочка событий, требующая управления и контроля, которые делают самовосстановление кожи примером высшего уровня организации материи.

Именно эта динамическая, управляемая адаптивность отличает живое самовосстановление от примитивных процессов вроде замерзания воды. Жизнь демонстрирует способность не только к спонтанному восстановлению, но и к целенаправленной перестройке, которая требует энергии, управления и "информационной осведомлённости" о состоянии системы.

С физической точки зрения образование льда иллюстрирует одну из граней упорядоченности в природе. Когда молекулы воды переходят из хаотического жидкого состояния в упорядоченную кристаллическую структуру, они как будто "скатываются вниз" по энергетическому склону. Этот процесс сопровождается высвобождением тепла, которое передаётся в окружающую среду. Поразительно, что такая упорядоченность, напоминающая самовосстановление, происходит без необходимости в дополнительной энергии: молекулы воды сами находят своё место в кристаллической решётке, словно следуя невидимым правилам.

В мире биологии есть множество примеров похожих процессов. Например, белки или молекулы ДНК способны собираться в сложные структуры благодаря специфическим взаимодействиям между их строительными блоками. Эти взаимодействия напоминают липкость молекул воды, только они гораздо точнее и "умнее". Представьте, что вирусные капсиды или сложные ДНК-оригами складываются сами собой, как головоломка, части которой идеально подходят друг к другу. Даже если структура будет временно разрушена, при подходящих условиях она сможет самовосстановиться, как если бы её "растопили" и затем дали остыть.[[34]](#footnote-34)

Однако в таких процессах есть ограничения. Самосборка, происходящая без постоянного притока энергии, требует наличия глубоких энергетических "ям". Это значит, что такие структуры устойчивы, но жёстки и инертны. Они напоминают драгоценный камень: красивый, прочный, но статичный. В условиях окружающей среды, где нужны гибкость и адаптация, эта стабильность становится недостатком. Живые организмы, напротив, должны быть чувствительными к изменениям и способными быстро реагировать на внешние вызовы. Здесь-то и проявляется разница между просто упорядоченными структурами, как лёд, и жизнью.

Лёд, как и самосборка вирусных капсидов, эффективен для создания специализированных, стабильных форм. Но он не может быстро адаптироваться или менять свою структуру в ответ на внешние изменения. Жизнь, с другой стороны, полна динамики: её элементы могут перестраиваться, реагировать на вызовы и приспосабливаться, а для этого требуется не только упорядоченность, но и постоянный поток энергии. Таким образом, жизнь выходит за рамки простой самосборки, создавая нечто гораздо более удивительное и сложное.

Жизнь, в своей удивительной способности к саморегенерации, представляет собой бесконечный цикл борьбы с разрушением. Представьте мяч, который постоянно скатывается вниз по склону, но каждый раз его поднимают обратно с помощью эскалатора. Этот процесс не прекращается, и каждый цикл требует энергии, которая поглощается на подъёме и рассеивается в виде тепла на спуске. Подобный механизм работает внутри каждого живого организма, только масштабы его настолько малы, что мы не замечаем происходящих процессов.

В отличие от стабильного кристалла льда, который пребывает в "низкоэнергетической яме", растение находится в состоянии постоянного движения. Оно словно балансирует на крутом склоне, ежедневно подвергаясь атакам тепловых флуктуаций, которые разрушают его структурные компоненты. Без света растение неизбежно приближается к смерти — состоянию, при котором энергия исчерпана, а структура разрушена. И хотя в темноте оно может бороться долго, конец неизбежен.

Но включите свет, и картина меняется. Энергия, поступающая от солнечного света, становится тем «подталкиванием вверх», которое компенсирует разрушение. Свет — это жизнь: он позволяет растению восстанавливать разрушенные молекулы, собирать энергию в химические топливные элементы и исправлять повреждения. Этот процесс идёт непрерывно на молекулярном уровне. Например, солнечная энергия используется для восстановления молекулы АТФ, необходимой для химических реакций, а молекулярные "шапероны" помогают белкам вернуться к своей правильной форме. Эти микроскопические механизмы обеспечивают самоподдержание и здоровье организма, не давая ему окончательно "сползти вниз".

Регенерация от крупных травм, таких как заживление раны, кажется значительным достижением, но это лишь редкое событие. Основная работа жизни — это бесконечное исправление мелких сбоев, которые происходят каждую секунду. Подобно тому, как эскалатор поднимает мяч на вершину горы, живые существа постоянно расходуют энергию на восстановление, поддержание и борьбу с разрушением. Именно эта микроскопическая работа позволяет жизни не только выживать, но и сохранять свою изумительную целостность.

Жизнь оказывается в удивительно затратной и энергозависимой ситуации, потому что её существование требует не только стабильности, но и способности адаптироваться. Представьте себе организм, который мог бы сохранить себя в кристаллоподобной, низкоэнергетической форме. Такая структура, хоть и прочная, была бы совершенно неподвижной и неспособной реагировать на изменения окружающей среды. В мире, где выживание зависит от быстрого реагирования на угрозы и возможностей, подобная негибкость была бы смертельной.

Возьмём актиновые филаменты в клетках животных. Эти длинные белковые цепочки создают прочный каркас, который помогает клеткам сохранять форму и сопротивляться внешним воздействиям. Но они также выполняют динамическую роль: актиновые филаменты участвуют в движении клетки, перестраиваясь на переднем крае мембраны, чтобы помочь клетке "течь" в определённом направлении. Это возможно только потому, что актин не является статической структурой. Он состоит из отдельных белков, каждый из которых потребляет химическую энергию клетки, чтобы поддерживать цикл согласованных изменений формы.[[35]](#footnote-35) Такая комбинация прочности и гибкости возможна только благодаря постоянному потоку энергии.[[36]](#footnote-36)

Этот принцип выходит за пределы биологии. Любая физическая система, через которую проходит поток энергии, начинает демонстрировать подобные самоподдерживающиеся свойства. Например, если мы направим ветер на песок, он начнёт формировать дюны, принимающие упорядоченные формы. Если мы заставим воду просачиваться через груду осадка, мы увидим, как формируются сложные сети каналов. Такие системы "самоподдерживаются" не в смысле жизни, но в смысле их устойчивости за счёт потока энергии. Без потока эти структуры теряют стабильность — песчаные дюны постепенно исчезают, когда ветер стихает, а сложные узоры каналов разрушаются, когда прекращается движение воды.

Этот баланс между сохранением и изменением делает такие системы уникальными. Они показывают, как постоянные энергетические потоки могут создавать формы и структуры, которые не возникают в состоянии теплового равновесия. Но это требует времени. Даже после прекращения внешнего потока, например, ветра, песчаные дюны не исчезают мгновенно — они продолжают существовать некоторое время, пока случайные тепловые флуктуации постепенно не разрушат их. Этот процесс — лишь одно из напоминаний о том, как сильно жизнь, как и другие неравновесные системы, зависит от постоянного притока энергии для поддержания своей формы и функций.

Жизнь — это ли всего лишь масса материи, которая распадается, если лишить её источника энергии? Вопрос кажется простым, но на самом деле поднимает сложные проблемы. Если жизнь просто поддерживается энергией, что отличает её от множества других систем, движимых потоками энергии? Ключ, возможно, заключается не только в том, что энергия поддерживает конфигурации, которые иначе были бы нестабильными, но и в том, что эти конфигурации часто выглядят удивительно хорошо приспособленными для выполнения сложных и специализированных задач.

Представьте себе вращающийся шарик в чаше. Пока чаша остаётся неподвижной, шарик покоится на её дне — это состояние равновесия. Но если начать вращать чашу, шарик поднимется к краю и начнёт катиться, поддерживаемый постоянным потоком энергии. Этот пример может служить метафорой для многих неравновесных процессов, поддерживающих движение. Однако, несмотря на схожесть с энергетическим самоподдержанием жизни, здесь отсутствует сложность и точность, которые характерны для живых систем. Шарик просто катается по кругу, лишённый изысканной организации.

Жизнь отличается именно тем, что её самоподдержание не только энергоёмкое, но и удивительно точное. Живые системы не просто противостоят энтропии, но делают это способом, который сохраняет их сложную многогранную форму. Они обладают способностью реагировать на изменения и поддерживать себя с поразительной координацией.

Пример, раскрывающий часть этой тайны, можно найти в разветвлённых сетях потоков, которые формирует вода, вытекая из подземных источников. Эти сети не возникают хаотично. Когда вода медленно прорезает осадки на поверхности, она формирует удивительно сложные паттерны — ветвящиеся каналы, которые кажутся одновременно случайными и строго организованными. Исследования, проведённые в лаборатории Дэна Ротмана в MIT, показали, что ветвления таких сетей обычно возникают под углом около 72 градусов. Этот угол — не случайность, а компромисс между двумя задачами: он позволяет новой ветви эффективно распространяться в неосвоенные участки и при этом не терять доступ к потоку воды, питающему исходную развилку.[[37]](#footnote-37)

Этот процесс напоминает фундаментальный принцип жизни: поиск баланса между расширением и сохранением, адаптацией и устойчивостью. Точно так же, как ветвления каналов формируются под действием потока воды, живые организмы используют энергию для формирования сложных структур и выполнения задач, которые могут показаться невозможными без их уникальной организации. Жизнь не просто использует энергию — она делает это с невообразимой точностью и изяществом.

Вся система принимает форму удивительно самоподобной фрактальной структуры, где каждая часть отражает уменьшенную версию целого. Эта закономерность поражает своей устойчивостью: даже если засыпать сеть новым слоем грунта, со временем узор восстанавливается. Это явление объясняется тем, что сложная форма создаётся на основе простых физических принципов, управляющих направленным потоком воды через почву.

Будь то ручьи, снежинки или иные формы, рождающиеся из неравновесных процессов, они вызывают чувство, что эти явления близки к жизни. Однако в этих примерах нет движения, свойственного живым организмам. Мы видим изящество структур, поддерживаемых потоками энергии, но остаётся загадкой, чем их связь с этими потоками отличается от привычной физической организации. Как показывают дальнейшие исследования, жизнь удивительным образом адаптировала и направила такие физические процессы для создания не просто сложных, но уникально целенаправленных систем.

Рассмотрение грязи может показаться обыденным, но именно она завершает важный круг размышлений. Даже используя одну и ту же почву, соотношение воды и земли может породить всё — от текучей субстанции до упругого материала. Этот переход от частей к целому подводит нас к ключевому моменту: сочетание компонентов порождает новые свойства, которые невозможно предсказать только из анализа их отдельных частей.

Когда к этому добавляется кровь, текст из Исхода 4:9 приобретает ещё более глубокий смысл. Кровь — это не просто жидкость, а символ жизни. Сопоставление крови с грязью в этом отрывке словно утверждает, что сама жизнь — лишь более изощрённое проявление того принципа, который грязь демонстрирует на своём примитивном уровне. Качественная новизна, столь свойственная жизни, оказывается неотделимой от базовых физических взаимодействий, которые лежат в основе любых сложных систем.

Важно осознать, что эта грязь формируется из воды реки — воды, которая непрерывно движется. Эта связь заставляет нас взглянуть на взаимодействие реки с её окружением по аналогии с кровью в организме. Кровь питает каждый уголок тела, создавая связанную и скоординированную систему. Подобным образом текущая река образует разветвлённую сеть взаимосвязанных каналов, структура которых отражает координацию и взаимозависимость. Такие паттерны поведения присущи многим неравновесным системам, которые демонстрируют удивительную согласованность и целостность на глобальном уровне.

Биение сердца, качающее кровь, — это физический аналог неравновесных потоков, которые поддерживают уникальные формы организации материи. Без постоянного поступления энергии такие системы неизбежно теряют свою структуру. Подобно тому, как конечность, лишённая кровотока, утрачивает жизнеспособность, самоорганизованные системы требуют непрерывной подпитки, чтобы сохранять своё существование. Это движение вперёд, поддерживаемое внешними источниками энергии, создаёт порядок, который невозможен в равновесных условиях.

Река, питаемая дождём, представляет собой ещё один пример: её воды движутся направленно, перенося материю и энергию, не замирая и не возвращаясь в прежнее состояние. Этот постоянный поток напоминает, что динамические системы не просто устойчивы, но способны к развитию и восстановлению. Они зависят от подпитки извне, и благодаря этому их структура остаётся целостной.

Эти системы обладают потенциалом для удивительных трансформаций. Через взаимодействие с потоками материи и энергии они обретают новую физическую организацию, которая превосходит прежние состояния своей гибкостью и адаптивностью. Но наиболее захватывающее — это то, что неравновесные движения открывают перед материей возможность не только адаптации, но и, как мы вскоре увидим, способности к обучению.

Глава 5 Горы и меч

*И он погнал стадо далеко в пустыню и пришёл к горе Божьей, к Хориву*

*Исход 3:1*

Каждое физическое взаимодействие между одним и другим объектом всегда несет в себе возможность передачи энергии. Будь то столкновение одного бильярдного шара с другим или воздействие падающего луча света, который запускает не только химическое преобразование в листьях деревьев и кустарников, а и, к примеру, изменения в молекулах сетчатки глаза - энергия всегда должна быть извлечена из окружающей среды, чтобы неподвижный объект начал двигаться или менять форму. Наивно можно представить, что доступность энергии — это просто свойство объекта, который её несёт: катящийся шар обладает определённой кинетической энергией, но она недоступна, пока этот шар не столькнется с рукой или другим шаром, лишь в этом случае осуществится передача энергии.

На самом деле такие объекты, как шары и пули, являются специализированными технологиями. Их можно назвать созданными так, чтобы безразборно делиться своей энергией со всем, что попадётся на пути. Тем не менее результаты могут быть неожиданно разнообразными. Например, если пуля рикошетит и летит обратно, большая часть её энергии остается при ней, даже если направление движения изменилось. Но если она застревает в мишени и распадается, вся её энергия высвобождается и распределяется, иногда с разрушительными последствиями.

Общая ситуация оказывается такой, где способность двух взаимодействующих систем обмениваться энергией может зависеть от их конструкции и характера движения. Конечно, есть исключения из этого принципа: тепло, например, гарантированно передаётся от горячего объекта к холодному практически в любых условиях. Теплопроводность, будь то в металлической сковороде или керамической плитке космического корабля, будет продолжаться до тех пор, пока температуры не выравняются. Тем не менее мир полон примеров, когда энергия передаётся от одного источника к другому только при правильном совпадении между поставщиком энергии и её получателем. Брошенное в костёр полено усиливает пламя, но полено, брошенное в холодную кучу хвороста, этого не сделает. Ребенок, раскачивающийся на качелях с нужным ритмом, может раскачиваться всё выше, но если он будет двигаться слишком быстро или слишком медленно, качели будут двигаться с не столь ширкоим размахом. А в самом удивительном случае замена нескольких атомов в молекуле ДНК бактерии может определить, сможет ли она переварить банку сахара или не сможет обработать даже одну молекулу.[[38]](#footnote-38) Часто именно состояние объектов определяет, насколько хорошо они способны поглощать энергию от определённых источников. Мы уже говорили о том, что поглощение энергии может быть ключевым фактором нахождения стабильных форм. Но есть такие формы, которые особенно хороши в поглощении энергии.

Когда мы молоды, мы узнаем, что бутылки издают звук, если в них дуть, а резинки издают щелчок, если их натянуть и отпустить. Мы замечаем, что высота звука различается в зависимости от наполненности бутылки или натяжения резинки. Постепенно становится понятно, что музыкальные инструменты используют эти эффекты систематически: высота звука отражает частоту колебаний, а такие параметры, как форма и размер полости, длина и натяжение струны, прямо влияют на то, какие частоты предпочтительны для вибрирующего объекта.

Причина, по которой эти факторы влияют на высоту слышимых звуков, заключается в том, что частота полностью связана с временными параметрами. Когда натянутая струна вибрирует, точное количество циклов, которые она проходит за одну секунду, зависит от того, с какой скоростью колебание на одном конце струны может достичь другого конца. Эта скорость, в свою очередь, определяется расстоянием между концами и силой натяжения, растягивающей струну. Подобные соображения применимы и в случае звуковых волн, распространяющихся в воздухе внутри бутылки. Любой вибрирующий объект может колебаться с различными частотами в зависимости от того, как на него воздействуют; однако самая низкая допустимая частота (так называемая основная частота) примерно определяется временем, за которое возмущение проходит от одной стороны объекта к другой. Математически этот принцип объясняется тем, что стоячие волны можно рассматривать как одновременные комбинации движущихся влево и вправо возмущений, которые распространяются с определенной скоростью, заданной свойствами среды. Серия других, более высоких частот, называемых гармониками, также определяется этими же физическими законами, создающими более коротковолновые "морщинки" в среде, которые проходят быстрее.[[39]](#footnote-39)

Мы впервые сталкиваемся с идеей, что разные объекты предпочитают определенные частоты колебаний, когда слышим звуки, которые они издают. Однако особенно интересный момент заключается в том, что эти же принципы применимы к звукам, которые материя способна поглощать. Бокал производит характерный звук, если по нему постучать, но он также может слегка вибрировать, если рядом настойчиво напевать с определённой высотой звука. Небольшой эксперимент с объектом (или полостью), который хорошо поддерживает вибрации, показывает, что степень, до которой мы можем заставить объект двигаться, зависит от высоты звука. Оперная дива может пением разбить стеклянный бокал, и можно ошибочно предположить, что единственное, что имеет значение, — это громкость её голоса. Однако на самом деле её песня могла бы не повлиять на бокал, если бы музыкальная партия была написана в другой тональности, даже если она пела бы с той же громкостью.

Таким образом, частота звука имеет значение, и это легко понять. Стеклянный бокал разбивается, когда его форма деформируется настолько, что возникающее напряжение заставляет различные части сосуда раскалываться друг от друга. Чтобы это произошло, на бокал должно быть оказано давление, и именно это делают звуковые волны в воздухе. Тогда возникает вопрос: "Соответствует ли частота песни предпочтительной частоте движений бокала?"

Помните, что у бокала есть свои уникальные размеры, форма и материал, которые определяют его реакцию на звуковые волны. Эти свойства задают его основную частоту, а также более высокие гармоники. Если частоты звуковой волны в песне совпадают с материальными свойствами бокала, его колебания могут усиливаться за счет поглощения энергии звука: когда бокал изгибается влево, воздух толкает его влево; когда бокал изгибается вправо, воздух толкает его вправо.

Если же частоты колебаний звукового поля не синхронизированы с предпочтительными движениями бокала, возникает гораздо менее эффективное взаимодействие. В таком случае звуковое поле лишь частично способствует движению бокала, а в другое время противодействует ему, что приводит к "раздраженному" столкновению, препятствующему накоплению энергии для разрушения.



*Одна и та же масса материала (в данном случае стекло) может быть сформирована по-разному, и эти формы, как правило, будут различаться по тому, как они вибрируют в ответ на внешние воздействия. Соответственно, один и тот же звук с одинаковой частотой или высотой тона может передавать достаточно энергии, чтобы разрушить одну форму стекла, но гораздо слабее резонировать с тем же материалом, представленным в другой форме.*

Координированное взаимодействие, которое возникает, когда песня и стекло колеблются в унисон, называется резонансом. Ключевой момент заключается в том, что он позволяет колебательному движению, вызванному песней, приводить к гораздо более значительным деформациям формы стекла. В конце концов, сила, которая толкает в направлении вашего движения, ускоряет вас, позволяя подняться выше по потенциальному энергетическому холму, прежде чем придется развернуться. Наиболее знакомый пример этого эффекта — качели на детской площадке: если ребенок раскачивает ноги в такт движению качелей вперед и назад, он поднимается все выше и выше. При этом легко заметить, что, если двигать ноги слишком медленно или быстро, качели останутся на меньшей высоте, которая не столь увлекательна. Доведение стекла до разрушения аналогично тому, как качели достигают максимальной высоты. Таким образом, согласование тона певицы с резонансной частотой стекла может стать решающим фактором между целым сосудом и кучей осколков.

В примере со стеклом, которое разбивается, естественно говорить о том, чтобы изменить способ пения певицы: если она изменит высоту тона, стекло может колебаться больше или меньше, чем на предыдущей частоте. Но можно рассмотреть и другую ситуацию, когда песня или "воздействующая среда" остаются неизменными, а форма стекла варьируется. Резонанс — это согласование между источником энергии в окружающей среде и материалом, который принимает эту энергию. Таким образом, улучшить это согласование можно либо изменив сам материал (стекло), либо настроив источник (голос). В результате одна и та же масса атомов может быть подготовлена в разных начальных состояниях, и некоторые из этих состояний могут лучше резонировать с колебаниями окружающей среды, чем другие. Следовательно, вопрос о том, сколько энергии может быть поглощено из окружающей среды материалом, может зависеть от его текущего состояния.

Если бы формы были статичными объектами, различавшимися только своей способностью поглощать энергию из окружающей среды, то история могла бы закончиться здесь как предмет праздного любопытства. Однако важность этого процесса заключается в том, что, как и в случае с резонирующим стеклом, разбивающимся на куски, энергия, поглощенная материалом, имеет силу преобразовать его в новое состояние. Мы уже говорили об этом, но стоит повторить: вся энергия либо вызывает движение, либо является потенциальной причиной движения. Если силы воздействия в окружающей среде достаточно сильны, свойства материала в форме A, определяющие его способность поглощать энергию, могут стать решающим фактором того, преобразуется ли он позже в форму B. Таким образом, путь, по которому материал исследует пространство возможных форм, будет предвзятым в зависимости от того, насколько конкретные формы могут эффективно использовать энергетические ресурсы своей среды.

Чтобы лучше понять этот процесс, стоит вернуться к скатывающемуся шару из предыдущей главы. Тогда мы сосредоточились на том, как эскалаторы делают некоторые горные перевалы похожими на односторонние двери в ландшафте потенциальной энергии: поглощение работы поднимает вас на одну сторону горы, а катание, отскакивание и скольжение вниз рассеивают эту энергию в виде тепла, закрывая путь обратно, если не появится другой эскалатор. Однако факторы, определяющие точное расположение и направление каждого эскалатора, тогда не рассматривались. Теперь, в свете таких эффектов, как резонанс, мы можем исследовать новый вид последствий для эскалаторов, вытекающий из того, что не все способы сборки одного и того же материала одинаково хорошо поглощают рабочую энергию из окружающей среды. В частности, оказывается, что не все склоны горного массива шара будут снабжены эскалаторами. Точный узор расположения этих источников внешнего воздействия определяет, каким будет извилистое путешествие шара.



Утверждение, что разные формы вещества по-разному поглощают энергию из одной и той же среды, похоже на утверждение, что, выбирая среду, мы выбираем определённый набор эскалаторов для установки в энергетическом ландшафте. Как только наш шар начинает исследовать пространство возможного, может оказаться, что эти эскалаторы направляют его путь к определённым состояниям, чьи структуры обладают уникальными свойствами в отношении поглощения энергии (то есть в отношении доступа к эскалаторам).

Вопрос, к которому мы пришли, заключается в том, как мы должны понять, какие конфигурации для данного набора являются хорошими или плохими в поглощении энергии из конкретной среды. Однако прежде чем обращаться к этой проблеме в широком смысле, будет полезно остаться на более узком уровне и снова рассмотреть случай механического резонанса. Хотя резонансная вибрация является лишь одним из многих способов, с помощью которых текущее состояние куска материи может существенно повлиять на то, сколько энергии оно поглощает из внешнего воздействия, это один из самых важных способов из-за широкого спектра условий, в которых он может быть актуален. В примерах, которые мы обсуждали до сих пор (например, струна музыкального инструмента), легко создать впечатление, что существует одна фундаментальная частота, которая влияет на то, что мы слышим, когда вещи начинают вибрировать, и это та частота, которая будет иметь значение для вопросов поглощения энергии. На самом деле, почти любое большое собрание взаимодействующих частиц способно поддерживать вибрации множества разных частот. Более того, конкретный набор допустимых частот (называемых естественными частотами) действует как своего рода отпечаток пальца или штрих-код, который суммирует точные особенности конкретного набора элементов, из которых они возникают.

Чтобы понять, как возникают естественные частоты, вспомним, что каждая форма, которую мы можем построить из большого набора частиц, соответствует местоположению в ландшафте потенциальной энергии, и некоторые из этих мест находятся в самом низу долины. В нормальной долине в реальном горном хребте есть только два перпендикулярных способа идти в гору: по оси север-юг и по оси восток-запад. Для системы с большим количеством частиц существует сопоставимое количество перпендикулярных направлений в долине потенциальной энергии, и каждое из них соответствует немного другому перестроению многих или всех частиц в структуре.

Можно перемещаться вдоль любого из этих направлений на небольшое расстояние. Более того, в каждом из этих направлений долина будет казаться имеющей определенное количество кривизны или крутизны — иногда больше, иногда меньше. Если мы начнем со стабильной конфигурации, а затем сдвинем каждую частицу в каком-то случайном направлении на небольшое расстояние, вещи будут пытаться вернуться на место, и возврат может быть резким или мягким. Результат таков: не все способы незначительного изменения частиц для изменения формы приведут к одинаковому перемещению массы на небольшую высоту. Более медленные частоты возникают, если перемещаются тяжелые частицы в пологих направлениях, а более быстрые частоты — если перемещаются легкие частицы в крутых направлениях. В целом, специфический способ, с помощью которого разные массы связаны друг с другом и совместно расположены в пространстве, всегда дает определенный и уникальный набор «нормальных мод» вибрационных движений, доступных структуре, и каждая из них способна поглощать много энергии через резонанс, если она возбуждена на своей естественной частоте.

Возвращаясь к идее естественных частот в контексте обсуждения эскалаторов, мы, наконец, начинаем видеть аргумент с далеко идущими последствиями. Напомним, что траектория шара зависит в значительной степени от того, где расположены эскалаторы, ведущие внутрь и наружу, — другими словами, серия форм, которые принимает собрание материи, будет зависеть от того, какие изменения формы могут быть активированы благодаря энергии работы, поставляемой окружающей средой. Однако, если каждая форма, которую может принять материя, имеет свой уникальный «отпечаток пальца» естественных частот, с которыми она может резонировать, это говорит нам о многом о том, где будут расположены эскалаторы, а где их не будет. Если окружающая среда колеблется с определенной частотой, то формы, которые хорошо вибрируют на этой частоте, смогут поглощать большое количество энергии из «песни» за счет резонанса. Эффект этого резонансного движения заключается именно в том, чтобы поднять вещи из их текущей долины и спустить их по другому склону в новую форму, *у которой есть другой набор нормальных мод и естественных частот*.[[40]](#footnote-40)

Самый простой способ оценить влияние этого эффекта — сравнить его с более наивной моделью того, как материя может исследовать пространство возможных форм. Представим ландшафт, состоящий из сетки долин, все из которых одинаково связаны с соседними долинами подъемниками, расположенными по обе стороны гребня. Если каждое местоположение имеет равный, двусторонний доступ ко всем соседним местоположениям, мы ожидаем, что исследование этого ландшафта будет происходить случайным, беспристрастным образом. Следовательно, мы не ожидаем, что процесс исследования в конечном итоге выразит какое-либо предпочтение одной долине перед другой. Переведя это в термины, где каждая долина соответствует форме коллекции частиц, это означало бы, что ни одна особенная форма не может быть более стабильной, чем любая другая.

Однако в типичном реальном случае количество подъема в каждой долине чувствительно зависит от доступности внешней энергии работы в данном конкретном месте и от того, в каких направлениях действуют внешние движущие силы. В результате траектория движущегося шара теперь может стать предвзятой. Есть определенные моменты, когда наиболее вероятно, что шар будет поднят в новую долину, где нет сопоставимого подъема в обратном направлении, и эти конкретные моменты, скорее всего, будут теми, когда текущая сила подъема исключительно высока, так что ее сила обычно уменьшается, как только пересечен другой гребень. Переводя снова, результат заключается в том, что моменты времени, когда система оказывается в форме, способной к резонансу, будут особенно значимыми во всей истории того, как развивается структура материи со временем, поскольку энергия работы, предоставленная резонансом в эти ключевые моменты, необходима для питания необратимых изменений формы, которые оставляют наиболее длительные следы на любой стабильной форме, появляющейся со временем.

Совпадение здесь с биологией становится полезным для понимания того, как развиваются события. Организм с определённой последовательностью генов развивается по определённому шаблону, в результате чего появляются различные черты, которые могут помогать или препятствовать его выживанию и размножению в текущей среде. Мутации, происходящие во время размножения, могут приводить к появлению новых организмов с похожими, но отличающимися наборами черт — и вся известная история дарвиновского отбора сводится к тому, что некоторые из этих мутаций улучшают шансы на выживание и размножение, тогда как другие нет. Мы часто обсуждаем естественный отбор с точки зрения индивидуума и его потомков, но иногда проще рассматривать эволюционный процесс на уровне целой популяции или вида. Текущее состояние такой совокупности описывается длинным списком генетических последовательностей («генотипов») и их связанных черт («фенотипов»). В любой момент времени отдельные организмы рождаются или умирают, и мутация у одного индивидуума может рассматриваться как небольшое изменение генетического состава популяции в целом.

При таком подходе можно заметить важные параллели с тем, как физическая динамика коллекции частиц исследует пространство форм. Когда происходит мутация, генетическое состояние популяции изменяется. Эта мутация может исчезнуть в следующем поколении так же легко, как она возникла (в этом случае её называют «нейтральной»). Но, с другой стороны, мутация может повлиять на выживание и размножение. Если мутация оказывается очень вредной, она, скорее всего, быстро исчезнет из популяции — что можно рассматривать как восстановление прежнего состояния генетического запаса популяции. Если же мутация благоприятна, она, вероятно, распространится и возобладает, поскольку организмы с этой полезной чертой начнут передавать своё преимущество в размножении своим детям и внукам и так далее. Подобное «избирательное доминирование» можно рассматривать как необратимое изменение генетической конфигурации популяции. [[41]](#footnote-41)

Эволюция структур частиц, поглощающих энергию из своей среды, имеет ключевое сходство с этим процессом в том, что «мутации» от одной формы к другой могут быть обратимыми или необратимыми в зависимости от того, как система взаимодействует со своей средой до и после изменений. Однако в случае частиц есть два важных отличия. Во-первых, в биологии генотипы и фенотипы явно различаются, а физическая форма материи объединяет эти два понятия. Она одновременно представляет пространство возможных форм для исследования (как генотип) и демонстрирует свойства, которые сами по себе составляют движение, ведущее к исследованию (как фенотип). Более того, во втором случае нельзя заранее предположить, как необратимость изменений формы повлияет на взаимодействие системы с окружающей средой в долгосрочной перспективе. Живые организмы воспроизводят себя, что, по определению, означает, что новые поколения в основном похожи на своих родителей и дедушек с бабушками. Действительно, естественный отбор объясняет впечатляюще адаптивные черты современных живых существ тем, что предки этих хорошо адаптированных организмов выглядели очень похожими, когда они успешно размножались. В отличие от этого, совокупность частиц не имеет родителей или предков, только формы, которые она принимала в прошлом. Более того, хотя текущая форма может напоминать недавнюю в некоторых аспектах, успешное, необратимое изменение формы совсем не гарантирует, что новая обнаруженная форма будет иметь те же отношения с окружающей средой, что и предыдущая форма, которая поглощала энергию для преобразования.

Чтобы полностью осознать значение этого последнего утверждения, достаточно снова обратиться к нашему знакомому примеру с вибрирующим, резонирующим стеклом. Если стекло случайно оказывается сформированным таким образом, что оно может поглощать большое количество дополнительной энергии из окружающего звука через резонанс, оно может деформироваться и изгибаться настолько сильно, что вся конструкция разлетается на осколки. Мы, как правило, не задумываемся о том, что происходит после этого, но, в принципе, предполагается, что груда осколков всё ещё способна изменять свою конфигурацию. Однако на практике, как только система больше не резонирует, в ней больше не остаётся движений, достаточно сильных, чтобы разбить осколки ещё больше — или соединить их обратно. Эти события могут в некоторой степени происходить благодаря тепловым флуктуациям, но ожидается, что это займёт намного больше времени. Таким образом, стекло необратимо перешло в состояние, которое гораздо хуже поглощает энергию и, следовательно, гораздо более статично, чем было до начала разрушительного звука. В то же время, хотя поглощение энергии уменьшилось, осколки всё ещё сохраняют гораздо больше информации о своей истории сильного резонансного движения, чем если бы мы их расплавили или бросили в вращающийся блендер. Теоретически, хотя это может быть сложной задачей, особенно если осколков слишком много, мы могли бы сопоставить края этих кусочков и склеить их обратно без особых затруднений. Несмотря на то, что груда осколков сама по себе не способна к резонансу, её всё же можно считать особым, редким расположением составляющих атомов, которое несёт на себе следы, так сказать, энергичного резонансного события в её прошлом.

Если определённый вид бактерий хорошо усваивает питательные вещества из окружающей среды, мы склонны считать эту способность функционально значимой и называем её адаптацией. Теперь мы можем распознать аналогичную возможность для соответствий между совокупностями вещества и их более примитивными физическими свойствами, особенно в отношении того, как энергия поглощается. Однако стоит отметить, что существует множество способов, которыми текущее состояние материала может влиять на его способность поглощать и рассеивать энергию из окружающих источников.

Возможно, самый простой вопрос, который можно задать в этом контексте, заключается в том, насколько легко тепло может проходить через материал — войти с одного конца и выйти с другого. Теплопроводность измеряет способность материала служить каналом для переноса тепла от горячего конца к холодному и может значительно различаться в зависимости от того, как атомы материала упорядочены. На наномасштабе тепло выглядит как случайное подергивание атомов и молекул, и когда такая группа частиц собирается вместе, существует множество способов, которыми влияние подергивания в одном месте может передаваться в различные, удалённые участки. Кроме того, способ передачи тепла через среду может зависеть от разницы температур между горячим и холодным концами. Например, некоторые жидкости способны формировать так называемые конвекционные ячейки Релея-Бенара, когда их нижняя поверхность значительно горячее верхней. При достаточной разнице температур уменьшение плотности жидкости при нагревании приводит к подъёмной силе, которая вызывает поток жидкости, переносящий тепло от горячего к холодному быстрее, чем если бы оно передавалось через молекулярные столкновения.

Нагрев также может иметь механические последствия для поглощения энергии. Любой, кто был в кузнице, знает, что иногда полезно нагреть металл до свечения, чтобы затем изменить его форму ударами молота. Но почему так? По сути, это можно объяснить терминами топографии: с энергетической точки зрения, холодный металл находится в очень глубокой долине и требует огромного подъёма, чтобы выйти из неё, тогда как горячий металл уже находится ближе к гребню. Холодный металл оказывается намного более жёстким, возвращая большую часть энергии удара молоту в виде упругого отскока, а горячий металл становится более пластичным и может двигаться под воздействием молота, рассеивая энергию этого движения в виде тепла, вместо того чтобы сопротивляться движению инструмента. Горячий металл способен поглощать и рассеивать работу таким образом, который легче приводит к необратимым структурным изменениям при ударе.

Внимательный читатель может заметить, что способность горячего металла поглощать энергию работы, похоже, не зависит от точности, с которой металл подвергается воздействию. Более высокая восприимчивость материала к внешним источникам энергии работы связана лишь с его общей пластичностью, так что практически любое воздействие будет успешнее, чем при работе с холодной версией того же материала. И это отличается от случая механического резонанса по нормальным модам — например, со стеклом, которое разбивается, — потому что резонанс требует более специфического соответствия между способом воздействия окружающей среды на систему и тем, как система склонна двигаться, учитывая свою структуру. Однако механический резонанс, подобный случаю со стеклом, является лишь одним из нескольких способов, которыми структура может влиять на поглощение энергии.

Возможно, самым распространённым способом является влияние структуры на поглощение и рассеяние света. Любой свет несёт энергию, которую он может передать веществу, с которым взаимодействует. Кроме того, свет может быть весьма сложным, варьируясь по спектру цветов, интенсивности в разных областях пространства, а также по двум другим тонким характеристикам: поляризации и фазе. Все эти факторы могут влиять на то, будет ли свет проходить через материал, отражаться или поглощаться, превращаясь в другую форму энергии, например в тепло. Структура объекта, на который падает свет, также имеет большое значение. Фотохимически то, как атомы соединены на молекулярном уровне, может существенно влиять на то, какие цвета или поляризации света поглощаются или пропускаются, а также как молекулы могут изменять свою структуру в результате поглощения света. Оптически общая форма объекта на большем масштабе может влиять на то, как падающие световые волны отражаются, преломляются или дифрагируют. Таким образом, в любой ситуации, где структурированный источник света передаёт энергию объекту, форма вещества может быть изменена под воздействием этих оптических и фотохимических эффектов.

Однако самым значительным и глубоким способом, которым форма вещества может влиять на его отношение к потоку энергии, является химия — независимо от того, задействован свет или нет. Химические вещества определяются тем, как различные типы атомов соединяются в полустабильные структуры различных форм и размеров. Химические реакции могут управлять потоками энергии, так как различные конфигурации атомов содержат различные количества запасённой потенциальной энергии, наподобие заводных механизмов, ожидающих высвобождения. Когда химическая реакция преобразует одно химическое вещество в другое, часть этой энергии может быть высвобождена и преобразована в другие формы.

Мы все знакомы с простейшими примерами такого эффекта: когда кислород взаимодействует с древесиной или бензином, молекулы этих веществ распадаются на более мелкие части, высвобождая энергию, которая разгоняет эти частицы, создавая ощущение увеличения температуры. Мы воспринимаем это как пламя.

Горючие материалы характеризуются своей лёгкостью вступать в реакции и реорганизовываться так, чтобы их энергия хаотично высвобождалась в окружающую среду. Многие вещества могут гореть, и этот процесс кажется повсеместно дезорганизующим, проявляющимся примерно одинаково для любого топлива. Однако существуют и другие способы высвобождения химической энергии, которые используют потенциал для структурной избирательности и точности, закодированных в геометрических и физических свойствах молекул. Разнообразие архитектурных возможностей, возникающих при соединении множества атомов, столь велико, что химические реагенты могут начать «отказываться» взаимодействовать, если не получают правильного «рукопожатия» от других молекул.

Эти рукопожатия заключаются в точной организации положительно и отрицательно заряженных частей атомов на определённых поверхностях, что создаёт оптимальные условия для реакции. Почти вся биохимия полагается на такие явления, особенно на ключевую роль ферментов.

Простейшее определение фермента заключается в том, что это белковая цепь, которая сворачивается в форму, предоставляющую специфический узор химических групп в трёхмерном пространстве. Эти группы расположены так, чтобы ускорять — или катализировать — химическую реакцию, которая без них проходила бы значительно медленнее.

В терминах топографии ландшафта можно представить молекулу типа A в виде шара, находящегося в долине с одной стороны высокого гребня. Этот гребень отделяет долину от другой, соответствующей молекуле типа B. A может преобразовываться в B, но это происходит редко, поскольку гребень слишком высок, и на подъём потребовалась бы колоссальная энергия. В отсутствие «эскалатора» и в силу значительной высоты гребня приходится ждать бесконечно долго, пока случайные термические толчки позволят шару подняться достаточно высоко, чтобы пересечь гребень и скатиться вниз в долину B.



*«Пассивный» фермент (энзим) ускоряет химическую реакцию как в прямом, так и в обратном направлениях. Он достигает этого путём снижения так называемого энергетического (или свободно-энергетического) барьера активации — это высота энергетической вершины, которую необходимо преодолеть, чтобы перейти от одного химического состояния к другому.*

**Добавление фермента в смесь открывает новый, более низкий "горный перевал" от состояния А к состоянию В, что ускоряет переход веществ между этими состояниями в обоих направлениях.** Этот эффект может быть чрезвычайно мощным, так как скорость взаимопревращения изменяется экспоненциально в зависимости от высоты барьера, поэтому снижение этого барьера, скажем, вдвое, может легко ускорить реакцию в тысячу раз или более.[[42]](#footnote-42) Кроме того, благодаря тому, что форма молекулы А и фермента имеют специфическое, "рука в перчатке", соответствие, фермент можно добавить в смесь, не ожидая, что это существенно повлияет на другие реакции (включающие молекулы С, D или Е) одновременно.

Ферменты составляют основу метаболизма на уровне клетки; действительно, когда бактерия способна или не способна перерабатывать какой-либо вид сахара в окружающей среде, это обычно связано с наличием или отсутствием фермента, который способен ускорить расщепление молекулы питательного вещества определённой формы и состава. Мы обычно не думаем о бактерии как о совокупности атомов, которые можно собрать по-разному. Однако, глядя через эту призму, мы можем понять, что строительные блоки микроба и то, как они организованы, могут определять, окажет ли химический источник энергии в окружающей среде существенное влияние на движение и поведение бактерии. Малейшее изменение в структуре белков может стать границей между изобилием и голодом! Хотя легко оценить этот эффект в контексте жизни, оказывается, что материя вне биологической сферы может действовать аналогично по тем же физико-химическим причинам: независимо от доступного химического топлива, остаётся вопрос, может ли материя рядом с ним вступить с ним в реакцию, и если да, то как энергия этой реакции изменит или переместит материю.

Так называемые частицы Януса предоставляют наиболее наглядный пример того, как этот принцип может работать в условиях, явно не связанных с жизнью. Многие экспериментальные физики сейчас используют микроскопические шарики, или "коллоидные частицы", которые получили название в честь мифологического двухликого Януса, так как их химическое покрытие покрывает только половину поверхности.[[43]](#footnote-43) Эти частицы обычно помещают в жидкость с химическим топливом, которое само по себе относительно стабильно, а покрытие на поверхности частиц действует как катализатор для расщепления топлива. Поскольку реакция происходит только на одной стороне частицы, а другая сторона остаётся инертной, возникает давление, толкающее частицу в противоположную сторону от реактивной поверхности. Таким образом, частица Януса способна преобразовывать выделение энергии — через расщепление топлива — в миниатюрный "ракетный" толчок. Замечательно, что, хотя эти частицы нельзя назвать живыми, их смесь демонстрирует удивительную степень самоорганизации. Просто благодаря специфической структуре, которая позволяет выделять химическую потенциальную энергию из окружающей среды, частицы, которые при термическом равновесии никак не взаимодействуют друг с другом, могут формировать динамические кристаллические структуры, которые сохраняются в течение длительного времени, прежде чем распасться. Этот любопытный феномен будет объяснён подробнее в седьмой главе.[[44]](#footnote-44) Иными словами, наличие структуры, способной выделять химическую потенциальную энергию из окружающей среды, может влиять на движение материи и на то, как она в результате организуется.

Возможно, самый убедительный пример этого принципа даёт архитектура и функция молекулярных двигателей, найденных в живых клетках. Моторные белки — такие как миозин, который позволяет нашим мышцам сокращаться и двигаться, — это ферменты, катализирующие расщепление химического топлива, называемого аденозинтрифосфатом (АТФ), на составляющие части: аденозиндифосфат (АДФ) и фосфат.Что отличает моторные белки от многих других ферментов, так это то, что они не просто катализируют расщепление топлива пассивно, как мехи кузнеца, которые циркулируют кислород, ускоряя реакцию. Напротив, они гораздо сложнее: моторные белки связывают химическую реакцию с согласованным движением. Благодаря силам, которые молекулы оказывают друг на друга при связывании, каждая форма, к которой может стремиться миозин, зависит от того, прикреплён ли АТФ к его специально сформированному каталитическому активному центру, уже расщепился ли АТФ, или выпали ли из активного центра молекулы АДФ или фосфата, оставляя его частично или полностью пустым. Склонность белка переходить из одной формы в другую в процессе связывания или отщепления топлива создаёт возможность использовать энергию от расщепления молекулы топлива для выполнения мощного рабочего движения. Хотя на наноуровне всё выглядит гораздо более хаотично и частично случайно, сущность такого поведения можно сравнить с использованием энергии пружины в коробке с "чёртиком", чтобы немного прокрутить ось колеса.[[45]](#footnote-45) Очевидно, что для создания подобного механизма в макромасштабе понадобилось бы тщательно продумать размещение всех его частей. Преимущество химической архитектуры в том, что она позволяет молекулам с их разнообразием форм создавать специализированные ниши и поверхности, которые дают возможность химическим реакциям не только происходить, но и быть направленными на выполнение определённого движения.

Именно поэтому неудивительно, что жизнь с её кажущейся бесконечной сложностью и уникальностью архитектуры достигает своих результатов, максимально используя химическое разнообразие. Используя специфику формы как способ контроля реакций и движения через правильные "рукопожатия" или "пароли" между участниками процесса, управляемый поиск химического пространства может быть невероятно направленным и целенаправленным. Однако остаётся вопрос: к чему в итоге ведёт этот управляемый путь? Достаточно сказать, что моменты, когда материя поглощала энергию и претерпевала необратимые изменения, существенно влияли на её текущее состояние. Но можно ли быть более точным в описании того, каким образом выглядит это текущее состояние? С увеличением числа исследований становится всё очевиднее, что ответ на этот вопрос — утвердительный. Исследуя последствия описанных физических принципов чуть глубже, мы можем начать понимать появление удивительного диапазона "жизнеподобных" явлений.

Холмы – это места, где небольшие толчки в ту или иную сторону могут сильно повлиять на то, куда мы в конечном итоге попадем. Даже если бы мы не имели всей энергетической терминологии, которая направляет наше понимание неравновесных систем, мы, вероятно, всё равно стали бы использовать образы гор и вершин для объяснения того, что значит пересечь "точку невозврата" и скатиться вниз по другой стороне.

Хорив, что можно перевести с иврита как «Меч», — это гора, на которой Моисей встречает горящий куст, и поэтому мы вынуждены задаться вопросом, какое отношение мечи имеют к тому, что он там наблюдает. Знаки, данные ему на горе Меча, заставляют нас задуматься о том, что делает жизнь отличной от неживой материи, но остаётся вопрос, как это состояние достигается: когда возникают жизнеподобные свойства, и как выглядит этот процесс? Мы в первую очередь склонны думать о том, что может сделать меч: он указывает и пронзает, разрубает и рассекает. Он создан для того, чтобы проникать в границы живого существа, расчленяя его на составляющие. Но ещё важнее для нашего обсуждения — то, как формируется клинок. Легко представить себе кузнеца, размахивающего молотом и ударяющего по раскаленному добела металлу. Иными словами, внешняя сила применяется к материалу, чтобы необратимо изменить его форму. При этом важно помнить, почему металл был разогрет до такой степени, что он раскалился. Горячий металл мягче холодного, и один и тот же удар молота вызовет гораздо более сильное и постоянное изменение формы, если он ударяет по мягкому материалу, а не по твёрдому и неподатливому. Таким образом, концепция меча демонстрирует нам систему, в которой не все возможные состояния материала одинаково хорошо подходят для поглощения энергии работы, приводящей к изменениям формы.

В данном случае простейший и повседневный способ, с помощью которого материал может стать более способным к поглощению энергии и к изменениям, вызванным внешними воздействиями, заключается в том, чтобы находиться в горячем состоянии, а не в холодном. Энергетически говоря, горячий металл находится выше по «высоте» энергетического ландшафта и ближе к точкам перехода, где небольшие усилия могут вызвать значительные изменения. Удивительно, но библейский текст добавляет дополнительные коннотации в другой части: первое упоминание кузнечного дела в Книге Бытия (4:22) связывает его изобретение с Тувалкаином, сыном Ламеха. В том же стихе упоминаются его братья, Явал и Ювал. Первый, как сказано, изобрёл пастушество, а второй — музыкальные инструменты. В этом удивительно точном сочетании мы встречаем три взаимосвязанные идеи: коллективное поведение (стада), необратимые изменения под действием внешней силы (кузнечное дело) и зависимость поглощения энергии от формы (музыка). Эти понятия объединяются в эмблеме меча, который, в свою очередь, становится именем горы, где Моисей начинает осознавать нечто важное о том, как начинается и заканчивается жизнь.

Глава 6 Пламя и дерево

*И вот куст горел огнём, но куст не сгорал*

*Исход 3:2*

Мы все слышали вопрос, что было раньше: курица или яйцо, но нужно приложить немного усилий, чтобы понять, есть ли в этом известном парадоксальном клише что-то действительно научно интересное. Вооружившись эволюционным мышлением, можно провести предполагаемую бесконечную регрессию назад и выяснить, что предки кур, вероятно, были другими видами организмов. Однако основная проблема, с которой мы сталкиваемся, заключается в том, что, хотя объяснить происхождение кур и яиц относительно просто, нам всё же нужно предположить существование какой-то формы клеточной жизни, чтобы создать такое объяснение вообще.

Все куры, а также все птицы и откладывающие яйца животные, которых мы знаем, являются невероятно сложными структурами молекул. То же самое касается и их яиц. То, что нас действительно интересует и что требует усилий для понимания, — это как вся эта сложность даже самых простых живых существ могла возникнуть из контекста, который изначально был более примитивно организован. Эмпирический опыт и здравый смысл говорят нам, что гораздо легче получить больше биологической сложности из некоторой её части, чем получить её вообще из ничего. Мы можем легко представить себе мир задолго до появления яиц, полный одноклеточных организмов, таких как бактерии, которые питались, росли и делились на новые копии самих себя в удивительно скоординированном молекулярном танце. Как только процесс самовоспроизведения начался, сопровождаемый процессом естественного отбора, он, по сути, мог объяснить, как новые адаптивные успехи в биологической структуре могли быть открыты и интегрированы в постоянно расширяющийся арсенал жизни. Тем не менее, это описание заставляет нас задаться вопросом: откуда появились первые самокопирующиеся, биологически сложные организмы?

Существует как минимум два способа справиться с этим затруднением. Первый, более очевидный, по сути, заключается в том, чтобы просто отклонить его основное предположение. Правда, что современные примеры самовоспроизводящихся биологических систем поражают своей способностью перестраивать окружающую среду в образец, соответствующий их собственной форме. Тем не менее, возможно, существует некая серая шкала сложности самовоспроизводящихся систем, простирающаяся вниз до самого основания, и что запуск процесса воспроизведения в самом начале не нужно считать сложным. Если это так, то, возможно, как камень, начинающий скатываться вниз по склону горы, неумолимый марш дарвиновского отбора и адаптации мог начаться с самого начала без какого-либо счастливого стечения обстоятельств или специальной помощи, чтобы всё привести в движение.

Другой выход из этого затруднения заключается в том, чтобы отвергнуть другое предположение задачи, а именно, что эмерджентная жизненная сложность не может начать проявляться до тех пор, пока на неё не начнёт воздействовать естественный отбор. Многие части живого существа, с точки зрения внимательного наблюдателя, кажутся идеально сформированными и построенными для выполнения очень конкретных задач, которые помогают всему организму выживать и размножаться. Действительно ли каждая из этих частей стала выглядеть хорошо построенной для какой-то конкретной функциональной цели только после того, как стала частью живого целого, нуждающегося в самокопировании? Или, возможно, некоторые из них уже "хорошо справлялись" с частью того, что мы теперь называем их целью, ещё до того, как стали частью чего-то, что можно назвать живым?

После того как мы проделали большой путь от начала этой книги, чтобы разработать необходимые концепции, мы наконец-то находимся в положении, позволяющем сказать что-то значимое по этим темам, и, по сути, мы увидим, что оба этих объяснения в определённой степени могут быть истинными. Самовоспроизведение — это процесс, который может неожиданно легко появляться в контекстах, которые кажутся довольно общими и неструктурированными, что делает разговоры о яйцах и курах излишними. В то же время, создание копий самого себя — это лишь один из множества характерно "живых" типов поведения, которые мы хотели бы понять, и вскоре мы увидим, что многие другие из них могут иногда возникать спонтанно в системах, где нормальный дарвиновский механизм полностью отсутствует. В совокупности эти идеи не делают начало жизни таким же очевидным, как открытая книга, но они помогают уточнить наше понимание вероятности того, как разные части этой головоломки могли сложиться воедино.

Правильно ли мы думаем, что самовоспроизведение — это сложный процесс? Конечно, когда речь идёт о примерах, которые предлагает биология, есть нечто просто ошеломляющее в том, как невероятно сложные структуры могут обладать способностью превращать "сырьё" из окружающей среды в собранную форму, аналогичную или идентичную их собственной конструкции. Особенно в эру, когда технологии, которые мы создаём, сами по себе являются весьма сложными, легко представить примеры тщательно разработанных сложных форм, которые вовсе не могут клонировать себя; трудно даже представить, чтобы смартфон можно было модифицировать так, чтобы он мог воспроизводить больше подобных себе устройств.

Тем не менее, нам следует внимательно подумать о том, что именно кажется таким невозможным в этом фантастическом сценарии, потому что в некотором смысле смартфоны оказались превосходными самовоспроизводителями! Изначально их было всего несколько, но те немногие, что существовали, произвели такое впечатление на человечество, что спрос на них вырос, и, таким образом, было произведено больше. Глядя на вселенную с дарвиновской точки зрения, можно было бы подумать, что люди являются материальным процессом, работающим в фоновом режиме, чтобы создавать больше копий тех брендов и моделей, которые лучше справляются с мобилизацией производственных ресурсов для их воспроизводства.

Конечно, рассматривать творения человеческой индустрии с этой точки зрения — это преднамеренно абсурдно, но анализ причин этого может помочь нам яснее сформулировать, что именно делает биологические примеры самовоспроизведения такими впечатляющими. Вирусы, в конце концов, столь же паразитичны и манипулятивны, как смартфоны, в том смысле, что они сами по себе не содержат фабрики, которая должна быть использована для их копирования. Вместо этого они захватывают механизмы клеток, которые они заражают, и используют чужие питательные вещества и протеиновую сборочную линию, чтобы создавать своё потомство. Что отличает вирусы от смартфонов, так это то, что вирусы содержат закодированный набор молекулярных инструкций для своего собственного воспроизведения. Благодаря этому отдельный вирион может более непосредственно и локально вызвать появление новых вирусных копий, и это, возможно, более значительное достижение, чем просто становление популярным потребительским продуктом. Более того, этот сравнительный анализ привлекает наше внимание к аспекту, который делает биологические самовоспроизводящиеся организмы настолько впечатляющими, а именно к их высокой портативности и способности относительно автономно воспроизводить себя в ограниченном пространственном масштабе.

В то же время, важно помнить, что самовоспроизведение — это лишь один пример более общего класса явлений, называемых положительной обратной связью. Существуют величины в мире, которые могут изменяться со временем так, что их рост ускоряется пропорционально их текущему размеру. Популяция самовоспроизводящихся организмов работает именно так, поскольку увеличение общего числа особей обычно ведёт к увеличению числа тех, кто рождает потомство в любой данный момент. Более того, любой, кто когда-либо использовал рации или микрофоны со сценическими усилителями, знает о пронзительном визге, возникающем, когда источник электрической энергии усиливает выходной сигнал, который затем возвращается в тот же канал как входной. Примеры такой обратной связи не ограничиваются тем, что может быть достигнуто с помощью современных технологий: большинство из нас знакомо с мультяшным клише снежного кома, который скатывается с горы, увеличиваясь в размере за счёт собранных снежных хлопьев, и, следовательно, катится всё быстрее и более неудержимо. И, что ещё более важно, все мы знаем о явлении огня.

Огонь — это, пожалуй, наиболее базовый пример процесса положительной обратной связи, который демонстрирует черты самовоспроизведения. Завораживающее и часто пугающее в пламени то, что оно может распространяться из одного локализованного места на множество соседних областей. Таким образом, наличие огня в одном месте может быстро привести к гораздо более широкому возгоранию. Является ли огонь "живым"? Конечно, нет. Тем не менее, физика, описывающая его работу, та же самая, которая необходима для понимания самовоспроизведения в более общем смысле.

Удивительным образом огонь можно объяснить как химическую версию снежного кома, катящегося вниз по склону. Химическое топливо, такое как древесина или трава, находится на высоком уровне потенциальной энергии, как будто на вершине горы. В холодном состоянии ничего особо не катится вниз, но как только подаётся достаточно тепла, чтобы достичь воспламенения, скорость процессов ускоряется. Ключевое заключается в том, что, «скатываясь вниз» — то есть сжигая древесину в химической реакции с кислородом, — огонь выделяет больше тепла, соприкасаясь с новым топливом, что, в свою очередь, ускоряет его движение вниз по энергетическому ландшафту.

Процесс, который мы только что описали, является простым примером автокаталитического цикла — серии реакций, в которых хотя бы один из участников становится более обильным в продуктах, чем был в реагентах. Как упоминалось ранее, самая простая версия автокаталитического цикла происходит, когда молекула типа A реагирует с молекулой типа B, образуя вторую молекулу типа A и какой-то другой продукт, который можно назвать C. Горение и аналогичные процессы горения следуют именно этому паттерну, за исключением того, что тепло, которое они производят, нужно рассматривать как реагент (A), поскольку именно оно является ингредиентом, ускоряющим дальнейшие реакции. Механизм такого рода — это палка о двух концах, поскольку тепло одновременно крайне дестабилизирует и крайне универсально: оно приводит к случайному перемешиванию частиц и повышает энтропию системы, делая это практически с любым материалом, потому что практически любое вещество, состоящее из множества взаимодействующих молекул, способно поглощать и проводить тепло. Это означает, что огонь, как только разгорается, способен сжигать множество вещей, но то, что остаётся после него (то есть пепел), не особо интересно.

Оказывается, однако, что та же автокаталитическая структура описывает гораздо более широкий спектр ситуаций, когда материя начинается на вершине потенциального энергетического ландшафта. Точно так же, как огонь помогает своему топливу «найти путь вниз» к более низкому энергетическому состоянию, выделяя при этом тепло, иногда химические вещества могут способствовать другому виду «спуска», где выделяемое тепло не является существенным или даже важным входом для дальнейших реакций. Вместо этого в автокаталитическом цикле ключевым ингредиентом является химическое вещество — специфическая молекула, которая может преобразовывать окружающие её вещества в новые копии самой себя благодаря специфическим взаимодействиям, напоминающим систему "ключ-замок". Мы уже обсуждали подобный пример такого поведения в третьей главе, когда упоминали молекулу РНК, которая может служить шаблоном для соединения двух базовых строительных блоков РНК в копию самой себя. Этот первый случай указывает на то, что заставить молекулы действовать автокаталитически с высокой степенью специфичности изначально кажется требующим крайне искусственно созданных условий, где «строительные блоки» должны быть тщательно сформированы для точного соответствия, как кусочки оригами. Этот подход снова приводит нас к неудовлетворительной позиции курицы и яйца, заставляя задуматься, как могла развиться химическая автокатализ без необходимости изначально вручную задавать такую специфичность.

Мы находимся на ранних стадиях решения этого вопроса, но несколько недавних исследований начали намечать путь вперёд. Чтобы распутать этот узел, полезно немного «отдалиться» и рассмотреть систему в целом. Автокатализ кажется сложным, если требуется, чтобы одна единственная молекула была построена именно таким образом, чтобы оказывать необходимое влияние на своё окружение и создавать копии самой себя. Хитрость в том, чтобы вместо этого думать о целой «группе» различных молекул и всех способах, которыми они могут взаимодействовать друг с другом. В реакционном сосуде, содержащем даже всего несколько сотен атомов, количество различных способов их возможной комбинации просто колоссально. Хотя не все реакции, которые возможны в теории, будут происходить достаточно быстро, чтобы иметь значение, существует множество различных типов химических соединений, которые могут образоваться. Более того, ни одна из этих молекул не существует в изоляции: их судьба во многом определяется наличием или отсутствием других молекул разных типов, с которыми они могут взаимодействовать. Некоторые молекулы мешают друг другу, так что молекула типа A может препятствовать способности B превращать C в D. Тем не менее, с таким множеством различных возможных типов химических видов и столькими способами их влияния друг на друга, становится проще представить, как начинает «катиться снежный ком». Система, находящаяся на вершине энергетического ландшафта, больше не вызывает вопроса: «Может ли одна конкретная молекула копировать саму себя?» Теперь вопрос в том, существует ли какая-либо коллекция различных химических соединений, которые могли бы сотрудничать таким образом, чтобы генерировать больше самих себя (и некоторые побочные продукты) через серию реакций, снижающих энергию системы. Хотя такая подгруппа химических видов, вероятно, будет очень редкой и, казалось бы, специально отобранной, также верно и то, что количество возможностей для реакционного сосуда «сделать это правильно» огромно. Количество уникальных подгрупп из двадцати элементов, которые можно выделить из набора всего в сто молекул, превышает миллиард миллиардов. Среди всех этих группировок вероятность того, что каждая из них будет хорошо взаимодействовать, может быть низкой. Однако всё равно не исключено, что две или больше таких групп окажутся способными эффективно взаимодействовать, а затем начать доминировать. Когда в системе присутствует случайная обратная связь между многими видами, оказывается, что положительная обратная связь может быть обнаружена не так уж и сложно.

Простая иллюстрация этой идеи появилась недавно в теоретической работе Зораны Зеравчич и Майкла Бреннера из Гарвардского университета.[[46]](#footnote-46) Они рассматривали коллекцию взаимодействующих видов коллоидных кластеров — маленьких сгустков микроскопических шариков, которые различаются по степени и специфичности их сцепления друг с другом. Исследователи продемонстрировали, что в разнообразной популяции таких кластеров, слабо склонных к формированию шаблонов друг друга, тенденция к самоподдерживающемуся росту обычно берёт верх и экспоненциально развивается благодаря сотрудничеству различных видов. Недавние проекты в моей собственной лаборатории продвинули эту идею ещё дальше, моделируя сети химических реакций среди видов, использующих один и тот же набор атомных строительных блоков. Мы обнаружили, что при достаточно общих условиях, если химические реактанты не слишком «разбросаны» и не используются во многих различных реакциях, формирование автокаталитических циклов с возможностью использовать доступное топливо становится весьма вероятным.[[47]](#footnote-47) Даже если источник энергии в окружающей среде доступен с трудом, вероятность того, что редкое и уникальное сочетание строительных блоков объединится и начнёт самовоспроизводиться, возрастает, если позволить нескольким простым реакциям в сети произойти хотя бы несколько раз.

Несколько экспериментальных исследований подтвердили эффективность этой основной идеи: разнообразные группы молекул действуют как экосистемы, в которых возрастает вероятность того, что некоторые комбинации химических веществ случайным образом обнаружат, что они способны формировать успешный и растущий набор. Нилеш Вайдья и его коллеги из Университета штата Орегон продемонстрировали этот эффект, создав пул автокаталитических молекул РНК с различными последовательностями, которые все использовали одни и те же строительные блоки для роста. Вместо того чтобы одна единственная молекула побеждала, несколько из них, как правило, образовывали устойчивый и эффективный автокаталитический набор, способный доминировать в реакционной среде.[[48]](#footnote-48) Эти тенденции к самовоспроизведению в молекулярных составах — это ещё не совсем «курицы или яйца», но они указывают на то, что возникновение самокопирующихся систем может быть вполне объяснимым явлением. Если рассматривать химические реакции как экосистемы молекул, практически гарантированно находящие путь вниз по энергетическому ландшафту, становится легче понять, как всё это могло начаться. Такой первый сложный самовоспроизводящийся организм мог начаться как децентрализованная смесь более простых видов, поддерживающих друг друга, а задача объединения их всех в одну компактную структуру могла быть отложена на более поздний этап."

Только что изложенное позволяет предположить, что создание самовоспроизводящейся сущности может быть не таким сложным, как кажется, особенно в её относительно примитивной версии. Для некоторых это уже может удовлетворить их жажду объяснений, как могла возникнуть биологическая сложность. Естественный отбор действительно предоставляет тестируемый — и на деле доказанный — способ объяснить, как новые функциональные возможности могут открываться «вслепую» с течением времени. В наши дни инженеры белков используют эти принципы в так называемых экспериментах направленной эволюции, где селективное давление целенаправленно применяется к мутантным бактериям, чтобы помочь им обнаружить ферменты с новыми свойствами.[[49]](#footnote-49) Разумеется, изложить контуры того, как работает такой процесс молекулярного совершенствования в лаборатории, гораздо проще, чем детализировать, как он мог разворачиваться в течение миллионов лет. Легко понять, как несколько мутаций в белке могут привести к увеличению или уменьшению его связываемости с химическим субстратом. Но гораздо труднее даже представить шаги, необходимые для преобразования тела мягкого морского существа в позвоночное, готовое вылезти на сушу. Тем не менее, хотя аргументы, основанные на естественном отборе, в настоящее время оставляют множество тонких моментов эволюции жизни неудовлетворительно неопределёнными, основная причина этих пробелов лежит, скорее, в ограничениях нашего воображения. Тот факт, что мы пока не можем, а возможно, и никогда не сможем заполнить все промежутки между бактерией и лягушкой, не является доказательством недостаточности дарвиновской картины, так же как наша неспособность предсказать погоду не подрывает точность законов Ньютона. Действительно, когда речь идёт о моделировании погоды, по крайней мере, доступно множество данных, тогда как попытки моделировать далёкое эволюционное прошлое всегда сталкиваются с фрагментарностью оставшихся подсказок и следов. Влияние селективного давления может пока не объяснять каждый аспект того, как сформировался биологический мир, но отсутствие полного успеха не равнозначно провалу. Огромное количество вопросов и загадок, связанных с возникновением и эволюцией жизни, по-прежнему остаются (в науке наличие множества нерешённых вопросов — это норма), но отсутствие полной ясности само по себе не может быть расценено как доказательство необходимости создания какой-то новой теории.

Тем не менее, независимо от того, какие объяснения прошлого мы пытаемся построить, мы всегда опираемся на предположения о возможном, основанные на том, что наблюдаем в настоящем. Существенно важно понимать, что новые открытия о том, какие формы поведения, напоминающие жизнь, могут возникать, если материя подвергается определённым физическим условиям, могут радикально изменить наши попытки построить правдоподобное повествование о раннем возникновении жизни. Стоит задуматься, что суть проблемы заключается в оценке вероятностей. Почему нас не устраивает утверждение: «Первая жизнь просто возникла из атомных строительных блоков в результате случайного столкновения беспорядочных частиц»? Только потому, что мы приписываем столь смехотворно низкую вероятность этому событию, мы отбрасываем его как противоположность объяснению.[[50]](#footnote-50) Соответственно, вопрос, который следует задать сейчас, заключается в том, могут ли новые знания о том, как материя принимает формы, напоминающие жизнь, изменить наше представление о вероятности или невероятности окончательного появления жизни.

Эта новая возможность становится очевидной, если внимательно поразмышлять о том, какие специализированные структуры могут демонстрировать поведение, похожее на жизнедеятельность. Мы обычно рассматриваем жизнь как способную к поглощению энергии: всем, в конце концов, нужно питаться. Однако столь же важно говорить о самоупорядочении, которое, кажется, действует противоположным образом — о склонности материи, находящейся под воздействием, самоорганизовываться так, чтобы поглощение энергии было минимальным. На первый взгляд, этот тип явления может показаться совершенно неуместным в списке свойств, связанных с жизнедеятельностью. Но есть весьма фундаментальная причина, по которой это упрощённое интуитивное представление оказывается ошибочным.

Чтобы понять это, достаточно вспомнить, что энергия и движение неразрывно связаны. Вся энергия, которую поглощает живой организм, может рассматриваться либо как энергия в движении, либо как аналог сжатой пружины, готовой высвободить свою силу при правильном запуске. Несомненно, жизнь требует множества видов движения для своего поддержания — от извивающихся червей в почве до химических потоков, циркулирующих в циклах при метаболизме питательных веществ. Однако столь же важно то, что все живые существа не смогли бы сохранять свою целостность, если бы некоторые их части не оставались относительно неподвижными. Органы должны быть правильно соединены друг с другом, ткани — сохранять свою целостность на клеточном уровне, а белки — оставаться сложенными в специфические формы, которые позволяют им выполнять свои уникальные функции. Иными словами, есть такие формы движения, которые можно описать как разрушительные — например, столкновения или повреждения, — и такие движения явно не способствуют выживанию живого существа. Именно поэтому люди могут потреблять сахар, но не динамит; растения могут использовать солнечный свет, но не выдерживают интенсивного гамма-излучения. Жизнь нуждается в энергии, но она должна поглощать её определёнными способами, которые активируют «здоровые» движения и избегают «нездоровых».

Чтобы объяснить это немного технически, полезно помнить, что живые существа находятся в крайне специализированных, исключительно редких конфигурациях их составляющих частей, которые не могли бы легко быть найдены при случайном и беспристрастном поиске среди всех возможных вариантов их расположения. Ключевой вопрос при оценке поступающей энергии заключается в том, насколько случайным выглядит результатирующее движение. Метаболизм множества молекул сахара в живой клетке представляет собой удивительно скоординированный процесс, при котором определённые шаги химической реакции катализируются в определённом порядке, так что распад сахара через его реакцию с кислородом может быть связан должным образом с генерацией других молекул универсального топлива для клетки. В то же время большинство частей клетки вообще не реагируют с сахаром. Напротив, когда электрически заряженная, высокоэнергетическая альфа-частица из радиоактивного распада сталкивается с той же клеткой, бесчисленное множество белков, молекул воды и нуклеиновых кислот (чтобы упомянуть лишь некоторых «подозреваемых»!) поглощают часть этой энергии и разлетаются во множестве непредсказуемых направлений. Ионизирующее излучение может так легко вызвать гибель клетки, потому что оно превращает коллекцию вещества в высоко упорядоченной форме в множество резких и, казалось бы, случайных изменений этой формы одновременно. В подобной ситуации практически неизбежно, что вещи будут выглядеть немного более случайными и менее исключительными после этого. Велосипед способен выдержать воздействие кросс-кантрийской гонки гораздо лучше, чем выстрел из крупнокалиберного оружия в его механизмы.

Однако что делает жизнь намного интереснее велосипеда, так это то, что она не является технологией, созданной людьми для определённой цели, а представляет собой разнообразное собрание различных природных явлений, каждое из которых появляется в своём собственном уникальном экологическом контексте. Мы не находим синих китов на вершинах гор — так же как сосны не растут на дне океана — и поэтому интересно заметить, что для любого данного организма существует не только источник энергии, к которому он хорошо приспособлен, но и то, что этот источник энергии неизбежно совпадает с набором внешних факторов, которые организм испытывает в своей естественной среде. Растения не уничтожаются химическими процессами под воздействием солнечного света; вместо этого они используют его энергию, чтобы поддерживать себя в борьбе с химическим разрушением, несмотря на хаотичное воздействие тепловых флуктуаций. Легко объединить эту исключительную способность с другими аспектами жизни, которые, вероятно, были усовершенствованы естественным отбором. Однако в данном случае можно задать вопрос, не является ли такое совпадение между организованной структурой и её внешним источником энергии примером более общего физического явления, которое не требует Дарвина для объяснения через естественный отбор.

Именно в этом аспекте может быть нечто важное, что можно сказать, опираясь на новое понимание физики самоорганизации, которое начало развиваться в последние годы. На протяжении всей книги основное внимание уделялось построению концептуальной основы для объяснения в физической терминологии механизма возникновения живого поведения, который не основан на самовоспроизведении и естественном отборе. На данном этапе полезно пересмотреть различные составляющие этого подхода, чтобы увидеть, как они соотносятся друг с другом.

Первый момент заключался в попытке определить с точки зрения физики, что делают живые существа, что кажется наиболее отличительным, поскольку «жизненность» на самом деле распадается на ряд отдельных видов активности. Живые организмы создают свои копии и извлекают энергию из источников в своей среде, которые трудно использовать; как мы видели, оба этих явления можно понять как результат позитивных обратных связей, которые могут возникать спонтанно в смесях частиц, взаимодействующих по простым правилам — химическим или механическим. Однако не менее важно то, что жизнь также использует поглощаемую энергию удивительными способами, будь то поддержание и восстановление себя в исключительной структурной форме или действия, основанные на точных прогнозах будущей среды, выведенных из того, что ощущается в настоящем и прошлом.

Чтобы попытаться понять эти явления в новом свете, мы ввели идею крупнозернистого подхода, который сводится к объединению множества микроскопических форм на основе какого-либо общего свойства, присущего всем им. Из этого обсуждения возникла идея, что некоторые крупные свойства больших коллективов частиц материи встречаются крайне редко и могут быть достигнуты только тогда, когда строительные блоки расположены относительно друг друга необычным образом, который не был бы легко обнаружен случайным образом. Этот способ мышления стал особенно интересным, когда мы начали обсуждать системы, через которые постоянно проходит энергия, поскольку одним из способов, которым материя может быть исключительной в своих крупнозернистых свойствах, является её способность или неспособность поглощать энергию от внешних движущих сил. Поток энергии естественным образом выходит на первый план в этом обсуждении, потому что энергия — это движение, и при достаточно низких температурах доступность энергии от внешнего источника может существенно повлиять на возможность кусочка материи изменять свою форму и динамически эволюционировать.

Теперь мы можем поставить следующий сценарий. Представим, что у нас есть коллекция частиц, которые могут собираться в множество разнообразных конфигураций, и изначально они находятся при какой-то температуре, при которой структурные изменения происходят очень медленно. Теперь предположим, что мы делаем энергию доступной из внешнего источника, который воздействует на материю определённым, уникальным образом — возможно, только на подмножество частиц или через колебания определённой частоты, направленные в определённом направлении. Приток энергии из внешнего источника активирует движение и ускоряет темп структурных изменений. Изначально и, в общем, можно предположить, что для системы с множеством гетерогенно взаимодействующих частей это активированное движение будет выглядеть, по крайней мере частично, случайным. Такое случайное движение, в свою очередь, может позволить системе исследовать пространство возможных форм несколько хаотично, совершая непредсказуемые скачки в различных направлениях этого пространства форм. Это можно сравнить с ситуацией, где мяч, скользящий по горному ландшафту, сталкивается с множеством эскалаторов различной мощности, которые то ускоряют его, то замедляют.

Возникает важный вопрос: где этот мяч в конечном итоге "застрянет"? Иными словами, в какой момент эта движущаяся, активируемая энергия система прекратит значительные изменения в своей конфигурации? Будет ли она продолжать случайные блуждания бесконечно или найдёт состояния, в которые легче попасть, чем из них выбраться?

Неудивительно, что ответ на этот вопрос разделяется на несколько случаев, из которых одни более очевидны, чем другие. Очевидно, что для того, чтобы описанный выше сценарий был интересным, мы должны предположить, что движущая сила достаточно сильна, чтобы активировать движение; однако если она будет слишком мощной, то само движение станет довольно скучным. В случае экстремально интенсивного воздействия можно ожидать, что значительное количество энергии будет преобразовано в тепло из-за хаотичного движения частиц материала, вызванного трением, в результате чего система нагреется и останется горячей. Микроскопическое движение, которое является квазислучайным и довольно интенсивным, уже знакомо нам по работам физиков XIX века: это состояние теплового равновесия при высокой температуре, где любая упорядоченность, характерная для множества частиц, нарушается в пользу высокоэнтропийного исследования случайных конфигураций. У мяча в этом случае оказывается так много "эскалаторов", что его перемещение по ландшафту может продолжаться бесконечно, без предпочтения или склонности к определённым формам.

Но в случае более умеренного воздействия открывается новый вид возможностей. В довольно общих условиях внешнее воздействие может активировать движение в конфигурациях, которые хорошо поглощают энергию, но это движение остается лишь слегка энергичным, так что многие локальные барьеры в энергетическом ландшафте остаются слишком высокими и крутыми, чтобы их преодолеть. В результате вступает в силу принцип отбора: если система находится в состоянии, которое хорошо поглощает энергию от воздействия, её движения охватывают более широкий диапазон, и она с большей вероятностью подвергнется драматическим, а возможно, и необратимым изменениям формы; области в пространстве конфигураций, которые плохо поглощают энергию, не демонстрируют такой же склонности к перестройке, что означает, что, однажды оказавшись в таком состоянии, система, скорее всего, останется там на долгое время.

Чтобы представить этот принцип отбора в терминах альпинизма, можно вообразить ландшафт с множеством глубоких ущелий, в которых можно застрять. Если данное ущелье соответствует состоянию, которое сильно поглощает энергию, то там, вероятно, будут мощные "эскалаторы", способные перенести мяч через высокие перевалы в новые, неизведанные области. Если же ущелье соответствует состоянию с очень небольшим доступом к внешней энергии, то такие подъемники недоступны. Такая ситуация может быть особенно значимой, если соседнее состояние может получить доступ к внешнему источнику энергии. В этом случае становится возможным подняться на одну сторону горы и упасть в ущелье с другой стороны, с небольшими шансами выбраться обратно.

Помимо основного момента, что доступный поток энергии влияет на то, насколько легко система может изменить свою форму, стоит упомянуть ещё одну тонкость, которая может оказать значительное дополнительное влияние. До сих пор мы говорили о энергии воздействия, как если бы она просто активировала случайное исследование, но на самом деле конкретный способ, которым система подвергается воздействию, приводит к определённому набору откликающих движений. Это особенно верно, если само воздействие является более упорядоченным, например, осцилляция, в отличие от шумовой непредсказуемости тепловых флуктуаций. В этом случае вопрос о том, как система может быть ограничена в определённой форме или конфигурации при воздействии, заключается не только в том, сколько энергии проходит через систему, но и в том, какие именно движения в системе активируются этим потоком энергии и способны ли они привести к масштабной, необратимой перестройке. Можно представить, например, ситуацию, где мяч застрял на дне ущелья, которое мелкое на востоке и западе, но глубокое на севере и юге. Если в этом месте имеются только подъёмники, работающие в направлении севера-юга и не обладающие достаточной мощностью, чтобы достичь вершины, то мяч останется в ловушке. Другими словами, определённая конфигурация материи может оставаться в текущем состоянии, даже если доступен значительный поток энергии от внешнего воздействия, —всё, что для этого нужно, чтобы воздействие происходило таким образом, который активирует только те направления, которые наиболее эффективно удерживаются внутренними силами взаимодействия строительных блоков.

Для коллекции строительных блоков, исследующих своё пространство возможных конфигураций с таким уклоном, при котором доступ к внешней энергии сильно влияет на их способность продолжать исследования, можно ожидать заметной тенденции к обнаружению и закреплению в формах, которые могут быть весьма нетипичными в способе, которым они поглощают энергию от внешнего воздействия. На этом этапе полезно сделать шаг назад, чтобы снова изложить принцип отбора, описанный здесь, и эволюционный аргумент, который из него вытекает. Мы начинаем с инертной массы частиц, застрявшей в одной форме, и начинаем подвергать её воздействию определённого рода — например, колебаниям с определённой частотой или стимуляции некоторых химических компонентов. Поток энергии, поступающий от воздействующей силы, способствует исследованию пространства возможных конфигураций, где материя делает небольшие локальные перемещения, меняя способ, которым её составляющие части собраны относительно друг друга. Если взаимодействия между частицами дают достаточно новизны через комбинации коллективных физических свойств, то каждое малое перестроение может привести к изменениям в том, как внешняя энергия поглощается, как в терминах её количества, так и в терминах типов движения, которые она вызывает. С течением времени система посещает всё больше состояний и, в конечном итоге, сталкивается с возможностью закрепиться в одном из них, которое особенно хорошо позволяет материи оставаться в одной и той же форме, несмотря на постоянные физические "атаки", которые она испытывает от внешнего воздействия.[[51]](#footnote-51) Этот успех в сохранении стабильности в одной конкретной форме или группе форм является результатом либо достаточно низкого поглощения энергии, либо движения, которые идеально согласуются с собранной структурой, предотвращая её разрушение. Так или иначе, подвергая неодушевлённую материю внешним структурированным воздействиям, мы в конечном итоге ожидаем увидеть спонтанное появление структуры с энергетическими свойствами, которые кажутся "тонко настроенными" и особыми по сравнению со случайной перестановкой тех же строительных материалов.

**После стольких абстракций и предположений очень полезно рассмотреть простой пример**, где можно увидеть обсуждаемую физику в действии. Прежде чем обратить наше внимание на эксперименты, однако, полезно сначала рассмотреть, что можно сделать в симуляциях. Помните нашу гипотезу: что строительные блоки с разнообразными возможностями отклика на данное воздействие должны спонтанно организовываться таким образом, чтобы либо снижать своё поглощение энергии, либо направлять её на поддержание упорядоченного, регулярного движения. Чтобы проверить эту идею в заданной системе, нам необходимо чётко понимать, как текущая форма системы определяет способ, которым энергия проникает внутрь. В типичных экспериментальных условиях разобраться с этим может быть довольно сложно, поскольку часто энергия может входить, проходить через систему и покидать её по множеству маршрутов. Однако в смоделированном мире можно сделать очень хорошо контролируемые предположения, которые значительно упрощают задачу.

Мы можем начать, например, с предположения, что мы помещаем коллекцию частиц в вязкую жидкость на плоской поверхности и соединяем их вместе случайно выбранной сетью упругих связей. Каждая связь является неразрушимой, но способна переключаться между более длинным и более коротким состоянием в зависимости от того, как на неё воздействуют её соседи. Представьте, что переключение между состояниями этих связей соответствует энергетическому ландшафту с двумя долинами, расположенными рядом друг с другом: одна из них имеет минимум энергии на короткой длине связи, а другая — на более длинной. Таким образом, хотя короткие и длинные связи могут оставаться стабильными, находясь в своих минимальных состояниях, связь промежуточной длины нестабильна и вскоре "щёлкнет", полностью переходя либо в длинное, либо в короткое состояние.

В результате такой конструкции эта сетка обладает множеством различных способов, которыми она может резонировать и вибрировать, в зависимости от того, какие связи в данный момент длинные, а какие короткие. Для системы с 30 связями существует 230 возможных комбинаций (порядка миллиарда). Таким образом, мы получаем игрушечную модель, которая имитирует основные физические черты, которые мы хотим изучить: множество частиц, которые могут образовывать множество различных форм с соответствующими различиями в откликах на внешние воздействия. Эти различия определяются частотами, на которых система предпочитает резонировать, проходя через различные виды деформаций. Рассчитывать движение такой системы при низких температурах относительно просто; мы можем использовать второй закон Ньютона для определения эффектов упругих сил, действующих между частицами, и силы вязкого сопротивления жидкости, которая действует на каждую частицу во время её движения. Если оставить систему в покое, единственное, что она может сделать, — это расслабить свои пружины до тех пор, пока не окажется в форме, где все внутренние силы уравновешены, и движение прекратится. Однако ситуация становится намного интереснее, если мы выбираем одну из частиц и начинаем двигать её с помощью внешней силы. Мы можем, например, перемещать её по заранее заданной траектории с определённой скоростью или прикладывать к ней силу, которая колеблется со временем, словно звуковая волна определённого тона воздействует на частицу.

Такая система, описанная и смоделированная, идеально подходит для вычислительных экспериментов с потоками энергии, поскольку существует только один путь, по которому новая работа может быть выполнена над системой, и этот процесс находится под нашим полным контролем. Внешняя сила, которую мы выбираем, может толкать движущуюся частицу, придавая ей новую кинетическую или потенциальную энергию, которая затем либо распределяется между остальными частицами, либо рассеивается в виде тепла через вязкое трение. Таким образом, аргумент о **диссипативной адаптации**, изложенный ранее, должен приводить к ясному предсказанию относительно того, что должно произойти с такой сеткой пружин. Для внешнего воздействия, достаточно сильного, чтобы связи начали "щёлкать", система получает возможность исследовать своё огромное пространство возможных состояний с различными свойствами отклика. Принцип отбора, который мы выдвигаем для такого сценария, заключается в том, что система находит и остаётся в состояниях, которые поглощают меньше энергии от воздействия, а также направляют энергию, которую они поглощают, в упорядоченные движения, специально приспособленные для сохранения стабильности общей формы.

Недавно я работал с моими коллегами Хридешем Кедия, Денгом Паном и Жан-Жаком Слотином из MIT над статьёй, в которой мы продемонстрировали, что именно такой принцип отбора действует на структуру описанной выше сетки, когда одна из её частиц подвергается внешнему воздействию.[[52]](#footnote-52) Мы сначала исследовали случай, когда сила, действующая на частицу, представляла собой простое колебание с известной частотой и амплитудой. В такой механической системе достаточно просто вычислить все естественные частоты резонанса для любой заданной формы, а также движения, связанные с этими нормальными модами. Мы обнаружили, что после длительного воздействия внешней силы связи постепенно перестраивают свои длины так, чтобы все нормальные моды движения, включающие приводимую частицу, были особенно неэффективны для резонанса с заданной частотой воздействия. Это означает, что после продолжительного периода воздействия система оказывается "застрявшей" в редком, исключительном состоянии, которое намного более устойчиво и стабильно, чем случайно выбранная форма.



*Изначально система, состоящая из множества частиц, имеет случайное начальное расположение и демонстрирует общий спектр частот, на которых она предпочитает резонировать. После воздействия выбранной частоты принудительной силы (серой линии) сеть бистабильных механических связей самоорганизуется таким образом, чтобы меньше резонировать на этой частоте, создавая заметное снижение в спектре нормальных мод в предсказуемом месте.*



*Даже более удивительно, что динамическое поведение частиц оказывается крайне упорядоченным. Несмотря на то, что в системе несколько десятков частиц, их траектория через некоторое время становится высококоординированной. Подобно тому, как наконечник дирижерской палочки описывает дуги в воздухе, их движение следует определенной одномерной траектории в гораздо более многомерном пространстве, которое описывает все положения частиц. Когда одна частица движется определенным образом, каждая другая частица следует специфической хореографии в ответ. И, возможно, самое значительное заключается в том, что это упорядоченное движение имеет измеримые последствия для стабильности структуры системы. Движение, возникающее под воздействием внешнего источника, действительно связано с постоянным поглощением энергии, что позволяет считать, что частицы находятся в более "возбужденном" или энергетически высоком состоянии по сравнению с состоянием, когда внешнее воздействие отключено. Однако способ, которым энергия поглощается во время наблюдаемого упорядоченного движения, согласуется с реактивными свойствами выбранной формы, что предотвращает разрушение или перестройку структуры под воздействием потока энергии.*

Мы можем проверить это, проводя дополнительные "эксперименты". Зная количество энергии, которое поглощается в адаптированном состоянии системы под воздействием конкретного внешнего источника, мы можем задаться вопросом: что произойдет, если изменить среду, сохранив то же количество подводимой энергии? Например, можно изменить частоту внешнего воздействия или направление приложения силы таким образом, чтобы работа, совершаемая над системой, оставалась неизменной. В этом случае результат обычно состоит в том, что форма, адаптированная к предыдущей среде, становится нестабильной и разрушается, а система эволюционирует в новое состояние, соответствующее новому воздействию. Иными словами, подобно тому, как живые организмы "питаются", упорядоченное движение адаптированной формы было специально отобрано для того, чтобы противостоять разрушительным изменениям при подаче энергии в определенной форме. Когда характер подачи энергии изменяется, ее влияние становится более случайным и разрушительным, по крайней мере до тех пор, пока система не "найдет" новую адаптированную форму, соответствующую новым условиям.

На момент написания этой книги механизм точной настройки, который мы рассматриваем в этой главе, является достаточно новой концепцией, поэтому он в основном изучается в моделировании, где легче всего проводить точные проверки. Однако более широкий взгляд на экспериментальные данные дает обнадеживающие признаки того, что мы на верном пути. В следующих главах мы обсудим некоторые из этих результатов и покажем удивительные связи с обучением и вычислительными процессами, которые начали выходить на первый план.

**Пламя отражает хрупкость жизни, поскольку это процесс, который нуждается в постоянной "пище", чтобы не превратиться во что-то холодное и неподвижное.** В то же время идея о хрупком живом существе, которое может пережить огонь, кажется нам чудесной, потому что мы ожидаем, что пламя уничтожит нечто тщательно сконструированное, разорвав его на части, оставив лишь дым и пепел. Любая форма энергии может причинить такой же ущерб, как пламя, если высвободить ее в неподходящем контексте, и настоящее чудо заключается в том, что существует "подходящий" контекст, где поток энергии лечит и восстанавливает, а не разрушает. Видение, представленное Моисею в горящем кусте (Исх. 3), подчеркивает разрушительный потенциал самого потока энергии, который поддерживает жизнь. Оно ставит важнейший вопрос: как именно эта конкретная жизнь (куст) может выдерживать вихрь, который способен разорвать на части столь многие другие упорядоченные структуры? Подразумеваемый ответ, который мы теперь можем осознать, заключается в том, что с точки зрения живого существа определенный набор воздействующих на него сил не выглядит пламенем, потому что в этих силах присутствует узор, который жизнь была «рождена» распознавать. Вместо случайного, дезорганизующего влияния окружающая среда, к которой адаптировано живое существо, является его неотъемлемой частью; в этом смысле каждая жизнь как бы «горит» в пламени, которое помогло ей возникнуть.

Глава 7 Ветер и дыхание

*И дуновение Божье носилось над поверхностью вод*

*Бытие 1:2*

*И создал Господь Бог человека из праха земного, и вдохнул в лицо его дыхание жизни*

*Бытие 2:7*

Одно дело – принять аргумент о том, как может работать самоорганизация в теории. Совсем другое – найти реальные примеры в окружающем мире, которые могли бы подчиняться таким принципам. Однако, вооружившись пониманием, которое дает теоретизация, мы можем начать замечать интересные примеры повсюду.

В своей сути идея диссипативной адаптации заключается в том, что система, состоящая из множества частей, получает энергию из внешнего источника по-разному, в зависимости от того, как эти части расположены. При этом поглощаемая энергия также влияет на то, как расположение частей системы может изменяться со временем. Когда этот цикл влияния проходит через несколько итераций, возникает возможность для формирования структур, которые явно отражают связь между формой и потоком энергии в данной системе. Иногда это приводит к состояниям, которые кажутся исключительно эффективными в поглощении энергии, а иногда – наоборот, к устойчивым состояниям, которые особенно хорошо избегают разрушительных воздействий потоков энергии. В любом случае, когда экспериментатор подходит к этому вопросу, первым шагом является анализ структуры эволюционирующей неравновесной динамической системы, чтобы выявить эти характерные признаки.

Одним из ранних и наиболее очевидных экспериментально наблюдаемых примеров такого явления является эффект выжигания спектральных дыр – частотно-специфическое подавление спектра поглощения среды. Как в оптических свойствах твердых материалов, облученных лазерами, так и в аналогичных экспериментах с переохлажденными жидкостями, подвергающимися воздействию переменных напряжений, экспериментаторы смогли измерить тенденцию коллективного поведения большого числа взаимодействующих атомов осциллировать вместе на определенных частотах.[[53]](#footnote-53) После интенсивного воздействия на систему на определенной частоте ее склонность к осцилляциям на этой частоте (или близких к ней) ослаблялась. Хотя такие явления известны уже десятилетиями – даже в таких биологических контекстах, как фотосинтетические реакционные центры хлоропластов растений, – до сих пор не было единой теоретической рамки для понимания столь разнообразных проявлений этого эффекта.[[54]](#footnote-54) Тем не менее, сейчас появляется соблазн предположить, что физической общей чертой, связывающей все эти случаи, может быть роль частотно-зависимого поглощения энергии в ускорении структурных изменений медленно движущихся элементов системы.

Более свежий пример, который также внушает оптимизм, пришел из лаборатории фотоники Калифорнийского университета в Беркли.[[55]](#footnote-55) Исследователи взяли пластиковую трубку, наполнили её вязкой жидкостью и добавили туда несколько десятков пластиковых частиц, которые плавали в жидкости. Затем они использовали громкоговоритель, чтобы направить тон определенной частоты через трубку. Звуковые волны оказывали воздействие на частицы, и они начали дрейфовать через жидкость под воздействием осциллирующего давления в воздухе. После эксперимента пространственное расположение частиц было проанализировано с точки зрения их способности проводить волны разных частот, и было обнаружено, что система утратила способность пропускать волны в определенном диапазоне частот, который соответствовал частоте звука, воспроизводимого громкоговорителем. Другими словами, система надежно самоорганизовалась в состояние, поглощающие и пропускающие свойства которого были определены временной характеристикой внешнего воздействия.

Более недавно та же лаборатория продемонстрировала аналогичные явления с передачей света в фотонных кристаллах, чьи оптические свойства менялись в зависимости от того, насколько сильно нагревались кристаллы при поглощении света.[[56]](#footnote-56)

Появление свойств, зависящих от частоты осциллирующего воздействия в этих системах, безусловно, требует дальнейшего изучения, но само по себе это не является доказательством того, что наблюдаемые эффекты связаны с предполагаемой нами физикой. Стоит помнить, что необходимо искать гораздо более широкий спектр экспериментальных результатов, которые могут содержать намеки на значительный эффект диссипативной адаптации. Резонанс — это лишь один из способов, с помощью которого коллекция частиц может контролировать доступ к энергии. Есть обстоятельства, в которых другие механизмы, зависящие от формы поглощения энергии, могут выйти на первый план.

В главе 5 упоминались частицы Януса — крошечные шарики с химическими реактивными двигателями, которые заставляют их двигаться в случайных направлениях, постепенно меняя траекторию из-за вращения. Известно, что частицы "активной материи" такого типа могут конденсироваться в так называемое "живое кристаллическое" состояние, в котором они упаковываются в упорядоченные массивы, способные внезапно и резко разрушаться и вновь собираться. Идея о том, что частицы, изначально разрозненные, могут образовывать кристаллы под воздействием источника случайного движения, кажется странной, пока не начнешь думать с точки зрения того, как легко внешнее воздействие производит движение в системе.[[57]](#footnote-57) Когда каждая частица находится отдельно, она движется быстро и случайно, как будто ищет новое коллективное состояние для системы. Однако, когда частицы образуют кристалл, большинство из них прижаты друг к другу и ощущают силы окружающей толпы, которые со временем усредняются до нуля. Иными словами, чрезвычайно упорядоченное кристаллическое состояние менее способно преобразовывать химическую энергию в движение, чем состояние, в котором частицы рассредоточены, и поэтому становится стабильным состоянием, которое предпочитает система.[[58]](#footnote-58)

Хотя загадка самоорганизации в движущейся материи пока не решена, существует огромный потенциал для расширения наших эмпирических знаний о возможностях этих систем, а также для углубления теоретического понимания. Перед лицом столь разнообразных взаимодействующих частиц с энергией, поступающей из различных источников, исследователи, стремящиеся определить общие принципы их организации, могут чувствовать себя вдохновленными. Будущее выглядит многообещающим, особенно в отношении экспериментов с активной материей, и если сосредоточиться на сценариях, где процесс диссипативной адаптации может происходить в ответ на сложные воздействия окружающей среды, потенциал становится ещё больше.

На данный момент, описывая способы как может адаптироваться движущаяся материя, чтобы поразительно соответствовать паттерну окружающей среды, мы фокусировались на том, что происходит, а не на том, как это происходит. Случайная сеть пружин может преобразоваться в форму, которая предпочитает колебаться в такт определенному ритму, воздействующему на неё, и мы можем найти это «достижение» замечательным, не вникая при этом в механистические детали, объясняющие, почему именно эта форма склонна определённым образом откликаться на свою среду.[[59]](#footnote-59)

Аналогично в биологии, это как разница между знанием того, что корова может переваривать траву, и пониманием анатомии или биохимии, объясняющих, как это делает животное.

В то же время мы обсуждали примеры диссипативной адаптации, демонстрирующие достаточно простой вариант точной настройки между системой и средой, так что так называемый анатомический вопрос кажется несущественным. Интересно ли знать, что именно нужно, чтобы быть кучей частиц, особенно плохо или хорошо резонирующей на частоте 2,3 Гц? Возможно, для определённого типа любопытных умов это может быть увлекательным направлением для дальнейшего изучения, но история, которую мы уже рассказали, о том, откуда берутся физические давления, приводящие к возникновению такой настройки, кажется более важной.

И всё же стоит остановиться и поразмышлять о том, как звучит этот же процесс, если немного расширить границы. Когда сила изменяется с течением времени простым, периодическим образом, большая часть того, что происходит, может быть описана единственным числом, измеряющим время, необходимое для завершения цикла. Аналогично, поведение, которое чрезвычайно хорошо соответствует такому паттерну, может быть относительно простым для достижения: в мире существует множество структур с аналогичной периодичностью в их склонности к вибрации.

Однако некоторые паттерны по своей природе более сложны. Будь то цифры числа пи или изменение средней температуры с одного дня на другой, существует множество частично или даже полностью предсказуемых паттернов, которые могут показаться случайными при поверхностном взгляде.

Этот способ мышления подводит нас к вопросу о том, как мы должны определять, является ли данный источник энергии случайным или нет. На обоих концах спектра мы можем придумать карикатурные примеры, которые помогают понять базовую концепцию: ветер крутит ветряную мельницу, не ломая её, но одинаково энергичная бомба разрушит практически всё. Однако даже в рамках повседневных примеров есть слегка более тонкие нюансы. Поджог бензина может вызвать взрыв, но приведёт ли это к безразборному разрушению или упорядоченному вращению колеса автомобиля, зависит целиком от того, где находится бензин и частью какой структуры он является.

Обобщая эту идею, мы можем осознать, что степень, в которой энергия, поступающая в систему, может считаться рандомизирующим влиянием, является не только свойством самого источника энергии, но и результатом соответствия между источником и системой, которую он приводит в движение.



*Изначально многочастичная система в случайной начальной конфигурации обладает общей спектром частот, на которых она склонна резонировать. Когда запутанная сеть эластичных связей или «уловочных связей» подвергается воздействию на выбранной частоте, резонанс становится самоусиливающимся, и спектр нормальных мод спонтанно перестраивается, чтобы поглощать больше энергии, создавая пик, соответствующий частоте воздействия.*



В среде, которая выглядит случайной, но на самом деле таковой не является, становится особенно важно спросить, что будет означать поведенчески для группы движущейся материи проявление адаптационного поведения в присутствии тонкого влияния. Если неумолимые физические принципы склоняют постепенное исследование пространства форм так, что объекты приобретают специализированное соответствие неявному паттерну, это означает, что динамика рассматриваемой материи должна была "разобраться" в чем-то сложном, касающемся обнаружения этого паттерна. Если бы нам поручили выявить этот паттерн, нам пришлось бы использовать интуицию или абстрактные математические манипуляции либо написать компьютерную программу, способную заменить эти действия численными расчетами. В любом случае, будь то человеческий или искусственный интеллект, мы, скорее всего, сказали бы, что здесь применяется какой-то вид интеллекта. Здесь же возникает вопрос: можно ли в отсутствие мозга, уравнений или алгоритмов справедливо сказать, что самонастраивающаяся группа частиц выполняет нечто, называемое вычислением, или, возможно, обучением?

Постановка вопроса в таком ключе должна напомнить нам более раннюю точку зрения, когда мы задавались вопросом, можно ли сказать, что пруд, который снова замерзает после частичного таяния, "исцеляет" или "восстанавливает" себя. Очевидно, что для таких примитивных примеров подобная терминология перегружена и вводит в заблуждение — то же самое относится и к утверждению, что шар, скатывающийся с холма, "обучается" понижать свою высоту. Однако в данной критике мы упускаем случай, когда задача оптимизации своего взаимодействия с окружающей средой становится гораздо менее тривиальной, а сама среда предполагает регулярность, которая вовсе не очевидна. Когда созданный нами компьютер ведет себя так, что выдает точное предсказание сложного сигнала, мы называем это вычислением. Если группа частиц, структура которых не была нами спроектирована, все же демонстрирует поведение, столь же успешное с точки зрения задачи предсказания, нам, возможно, не стоит называть это вычислением. Однако в таком случае мы все равно должны признать, что это явление выполняет нечто столь же полезное, как и вычисление.

Например, в работе Вейшуна Чжуна, Дэвида Шваба и Арвинда Муругана из Университета Чикаго симулировалась равновесная самосборка множества частиц с градиентной серой окраской, чьи межчастичные силы были спроектированы так, чтобы размещать их в виде пикселей для воссоздания узнаваемых фотографических изображений (например, фотографии Эйнштейна).[[60]](#footnote-60) Авторы показали, что, когда такой "суп" из липких строительных блоков подвергался воздействию фрагментарных остатков оригинального изображения (через некоторую паттернизованную, но статичную внешнюю силу), коллектив мог реконструировать целое изображение, используя минимальную информацию из фрагментов для выбора соответствующего состояния изображения и его сборки. С одной стороны, физика происходящего в этом исследовании всегда остается лишь высокоразмерным аналогом шара, скатывающегося с холма (где фрагментарные образы выступают в роли наклона ландшафта, помогающего шару катиться в нужном направлении). С другой стороны, процесс запоминания и реконструкции изображения звучит как нечто полезное, что мы ожидаем от программного обеспечения. Уход от теплового равновесия, теоретически, должен лишь расширить доступные нам сценарии и типы поведения, физически допустимые в системе. Этот факт немедленно вызывает вопрос: могут ли самособирающиеся, неравновесные системы из множества частиц быть направлены на выполнение других задач, для которых предназначены компьютерные программы.

Подобные размышления могут показаться далекими от реальности, но имеются как теоретические, так и эмпирические причины относиться к ним серьезно. В симуляциях мы можем изучать поведение "хаотичных" систем с множеством частиц, которые подвергаются воздействию гораздо более тонких паттернов, чем простые колебания, и результаты на данный момент демонстрируют значительный потенциал. Например, случайные спиновые стекла представляют собой материалы, состоящие из атомов, взаимодействующих как крошечные магнитные стрелки. Каждый атом имеет северно-южное направление, обусловленное поведением его электронов, и любая стрелка испытывает влияние от других стрелок ближайших атомов.

Что делает эти материалы случайными, так это беспорядок в способах их взаимодействия: пара соседних стрелок может стремиться выровняться "север к северу", тогда как другая пара может стараться выстроиться противоположно, "север к югу". В большом беспорядке таких атомов очень сложно удовлетворить все силы одновременно, потому что одна стрелка может указывать вверх из-за влияния одного соседа, но это может быть противодействием другой силы, оказываемой другим соседом. Соответственно, процесс переключения направления отдельной стрелки, когда система пытается снизить свою энергию, может быть крайне сложным и непредсказуемым.

Эксперименты со спиновыми стеклами уже продемонстрировали любопытные эффекты памяти: если охлаждать такое стекло с помощью внешней среды, температура которой постепенно снижается и на какое-то время стабилизируется на нескольких выбранных вами уровнях, то магнитные свойства материала на этих уровнях температур при обратном нагреве заметно отличаются, как будто в конфигурациях всех стрелок сохранился "эхо" изначального воздействия.[[61]](#footnote-61)

Аспирант факультета математики MIT Джейкоб Голд и я решили развить эту идею и смоделировали случайное спиновое стекло в "штрихкодовой" среде, параметры которой изменялись во времени. Помимо сил, действующих между атомами, примерно половина атомов подвергалась воздействию внешних сил, случайно направляющих некоторые стрелки вверх, а другие вниз. После определенного промежутка времени генерировался новый набор случайных сил (т.е. новый «штрихкод» или «баркод»), и конфигурация стрелок в смоделированном материале продолжала эволюционировать.[[62]](#footnote-62)

Если в симуляции постоянно показывать атомам новые случайные штрихкоды, направляющие стрелки вверх или вниз, то поведение системы практически неотличимо от случайных тепловых флуктуаций при температуре, превышающей окружающую. Иными словами, система ведет себя так, как будто трение ее разогревает. Однако ситуация меняется, если в набор включить ограниченное количество штрихкодов и многократно их перетасовывать. Каждый текущий штрихкод выбирается случайным образом без определенного порядка, но на длительном интервале времени одни и те же несколько штрихкодов повторяются.

Первое, что можно заметить (и, возможно, уже не удивляет), — это то, что скорость поглощения энергии со временем снижается. Хотя штрихкодовые силы изначально "выглядят" случайными для материала, со временем он адаптируется к шаблону и находит конфигурацию, которая поглощает меньше энергии из окружающей среды. Однако что произойдет, если внезапно ввести новый штрихкод, который система никогда раньше не встречала? Естественно, скорость поглощения энергии резко возрастает, так как система еще не адаптировалась к шаблону, включающему это новое состояние окружающей среды.



*Набор атомов соединён случайным образом таким образом, что пары атомов, связанные чёрными линиями, стремятся направить свои магнитные стрелки в одном направлении (+ +), в то время как пары, соединённые серыми линиями, предпочитают направлять свои магнитные стрелки в противоположных направлениях (+ –). Каждый атом также испытывает внешнюю силу, пытающуюся направить его стрелку вверх (белый) или вниз (чёрный), причём набор таких сил зафиксирован в виде штрихкода, показанного ниже.*

Подведём итоги: Хаотичный набор атомов подвергается воздействию множества различных сил из окружающей среды, каждая из которых описывается уникальным штрихкодом. Поглощение энергии адаптируется и снижается, но резко возрастает, если система подвергается новому воздействию, с которым она ещё не сталкивалась.

Возможно, мы случайно создали то, что можно назвать детектором новизны.

Состояние системы после адаптации воплощает в себе неявное предсказание о будущем, а именно: «Я ожидаю увидеть это, это или это, но не то». Таким образом, сам факт того, что эти атомы подверглись воздействию определённого шаблона, приводит их в состояние, которое, по-видимому, научилось различать между чем-то знакомым и чем-то новым и неожиданным. И что интересно, если бы мы разработали компьютерную программу для выполнения такого рода задачи, мы, вероятно, назвали бы её машинным обучением.



*Когда выбран набор штрихкодов для случайного переключения, магнитные стрелки атомов перераспределяются, и скорость поглощения энергии работы со временем снижается. Однако при введении нового набора штрихкодов в процесс поглощение энергии резко возрастает, что указывает на то, что система спонтанно научилась обнаруживать новые и неожиданные особенности в своей среде.*

За последнее десятилетие наблюдается значительный рост мощности и разнообразия так называемых технологий машинного обучения, которые обладают гибкой способностью к точному моделированию сложных взаимосвязей, ранее считавшихся исключительно прерогативой человеческого разума. Распознавание лиц и обработка языка — два наиболее известных примера, но общий принцип большинства этих приложений заключается в том, что длинный список числовых параметров, описывающих способ отображения входных данных в выходные, обучается с использованием больших наборов данных (будь то фотографии лиц, корпус текстов или что-то другое). На практике это означает, что алгоритм пытается искать в пространстве параметров высокой размерности уникальные и оптимальные значения, которые позволяют модели достичь высокого качества соответствия данным для обучения.

Если это звучит знакомо, то это потому, что параллели между машинным обучением и механизмом диссипативной адаптации, описанным в предыдущей главе, многочисленны и значимы. Множество взаимодействующих частиц имеет форму или структуру, описываемую многомерным пространством возможных конфигураций, подобно тому, как алгоритм обучения имеет пространство параметров, определяющих, как он отображает входные данные в выходные. Алгоритм машинного обучения стремится со временем изменять параметры, чтобы уменьшить функцию ошибки, измеряющую, насколько плохо он моделирует взаимосвязи в данных; а управляемая механическая система, которая постепенно снижает уровень поглощения энергии, делает это за счет изменения своей формы и отклика на внешние воздействия. Более того, так же, как машинное обучение отображает наблюдаемые входные данные в вычисленные выходные, управляемая механическая система преобразует входящие внешние силы в выходные динамические процессы. Означает ли это, что все управляемые многокомпонентные системы выполняют форму машинного обучения? Вероятно, нет, если только не расширить определение этого термина до чрезмерности. Однако сравнение этих двух случаев бок о бок показывает, что математическая структура происходящего во многом схожа, что намекает на возможность еще не изученных вариантов, лежащих между этими двумя крайностями.

Несмотря на кажущуюся фантастичность таких идей, экспериментальные исследования, подтверждающие их, уже удивительно конкретны. Несколько лет назад группа исследователей из Швейцарской высшей технической школы Цюриха сделала революционный шаг, используя систему с «щупальцами осьминога» для решения систем нелинейных дифференциальных уравнений.[[63]](#footnote-63) Экспериментальная установка состояла из резервуара с водой, в который были погружены искусственные щупальца осьминога. Мягкие силиконовые щупальца были оснащены датчиками движения и соединены у основания с механическим приводом, который мог двигаться в соответствии с заданным программным шаблоном. При внешнем воздействии, определяемом движением привода, щупальца изгибались в произвольных направлениях, демонстрируя, казалось бы, случайные и непредсказуемые маневры. Их движение определялось сложным взаимодействием собственных гибких свойств щупалец и иногда турбулентного движения воды вокруг них. Никто на Земле не может точно предсказать, как будут двигаться эти щупальца при заданном шаблоне воздействия, но исследователи, создавшие эту установку, попытались использовать эту странную систему в качестве вычислительного устройства.

Решение нелинейных дифференциальных уравнений требует значительных вычислительных ресурсов, но с подходящей программой это возможно. В данном исследовании был задан следующий вопрос: могут ли щупальца осьминога выполнить вычисления, которые упростят решение такой системы нелинейных уравнений? Каждый раз, когда исследователи задавали системе определённый шаблон внешнего воздействия в качестве входных данных, они записывали наблюдаемую динамику в качестве результата. Затем тот же самый шаблон вводился в компьютерную программу, решавшую сложную систему нелинейных дифференциальных уравнений. В итоге было продемонстрировано, что с помощью простой математической трансформации, описываемой всего несколькими параметрами, можно преобразовать движения щупалец осьминога в поведение, соответствующее решению этой системы уравнений. Иными словами, вместо того чтобы использовать сложный алгоритм на обычном компьютере для решения уравнений, можно подать те же входные данные в резервуар с водой и переплетающимися щупальцами, а затем извлечь правильный ответ из физической динамики с помощью значительно более простого вычисления. Если взглянуть на это под определённым углом, становится очевидным, что свободная физическая динамика неструктурированного механизма выполняла некие вычисления, связанные с шаблонами окружающей среды, и единственный вопрос заключается в том, достаточно ли мы изобретательны, чтобы извлечь результат.

После всех этих рассуждений о физике вероятности, необходимо признать, что в обсуждении почти не было биологии. Разумеется, интересно осознавать, что множество систем, состоящих из взаимодействующих компонентов, обладают способностью напоминать жизнь в определённых аспектах, которые мы бы никогда не заметили без соответствующего анализа их физических свойств. Тем не менее, когда чувство изумления немного угасает, можно справедливо задаться вопросом: как это всё связано с внутренними процессами в действительно живых организмах? Одно дело — утверждать, что скопление частиц, демонстрирующих диссипативную адаптацию, выполняет вычисления и прогнозирует окружающий мир, но, говоря прямо, в какой момент это приводит к появлению таких вещей, как ДНК, клетки и руки? И, что более важно, есть ли в живых организмах что-то, что мы могли бы лучше понять, используя этот подход? Изучая вариации в последовательностях оснований ДНК различных родственных организмов, филогенетики могут убедительно доказать общее происхождение различных видов; если диссипативная адаптация способствовала зарождению жизни, оставила ли она подобные следы в том, как устроены живые существа?

Первое, что стоит отметить, это уже упоминавшаяся мысль: рассматривать эволюцию с точки зрения термодинамики — это не значит заменять роль естественного отбора в дарвиновском понимании. Скорее, это видение таких процессов как особых случаев более общего класса физических явлений. Если в системе есть объекты, способные к самовоспроизведению (например, живые организмы), то их способность создавать копии напрямую связана с их способностью поглощать энергию, будь то питание или поглощение солнечного света. Это означает, что в той мере, в какой естественный отбор помогает объяснить развитие сложных адаптаций в ходе длительной истории жизни, перевод этих событий в язык поступления работы и диссипации тепла не даёт дополнительной объяснительной силы. Иными словами, дарвиновская эволюция через естественный отбор — это явный пример диссипативной адаптации. Однако в случаях, где эволюционная биология уже предоставляет достаточные объяснения, физическая сторона этого процесса не становится главной. Мы не исчерпываем возможности понимания, говоря исключительно о тепловой энергии, высвобождаемой из рыбы, которую съел и переварил дельфин; важно также подчеркнуть другой, независимый аспект — тот факт, что дельфины с лучшими плавниками могут съесть больше рыбы и, следовательно, передать эти плавники большему числу потомков.

Есть как минимум два аспекта, в которых размышления о диссипативной адаптации могут предложить новый взгляд на биологическое понимание, особенно в тех случаях, где новое физическое описание помогает нам выявить явления, которые язык дарвиновской теории не охватывает. Первый из этих аспектов не связан с происхождением жизни, но касается того, как жизнь функционирует сейчас, в настоящее время. Каждая живая клетка переполнена миллионами белков, и каждая из этих крошечных молекулярных машин состоит из множества аминокислот, связанных друг с другом, словно бусы на шнуре. Точный способ, которым эта цепочка белков складывается в трёхмерном пространстве, определяет многие её физико-химические свойства: к чему она прилипает, с чем она вступает в химические реакции и так далее. В целом, любой белок может менять свою форму в результате присоединения других белков к его поверхности или поглощения химического топлива, из которого он получает энергию, сжигая его в процессе реакции.

Возникает вопрос: как выглядит это коллективное поведение? Классический подход в биохимии заключается в том, чтобы приписывать конкретные функции отдельным белкам, основываясь на их взаимодействии с несколькими другими специфическими партнёрами, с которыми они случайно встречаются в хорошо перемешанном клеточном интерьере. Однако мы только что обсуждали возможность того, что такие активно стимулируемые коллективы различных макромолекулярных строительных блоков могут быть подвержены эффектам диссипативной адаптации и демонстрировать групповое поведение, которое решает глобальные проблемы потока энергии способами, которые можно рассматривать как вычисление чего-то нетривиального о внешней среде. Эта концепция поведения клетки ближе к экономическому пониманию свободного рынка, чем к инженерному восприятию плана небоскрёба: внезапно в поведении системы появляется гораздо больше места для спонтанной креативности и адаптивности.

С этой точки зрения стоит задаться вопросом, существует ли молекулярный порядок в пространстве клетки, который может быть высокоспециализированным, и если да, то использует ли клетка этот порядок для биологически значимых функций. Тот факт, что все свойства клеток подвергались отбору на уровне способности родительских организмов к воспроизводству, означает, что биология неизбежно превращается в дарвиновское обсуждение. Но является ли вся клеточная функция результатом естественного отбора, или же её часть могла быть более спонтанно самоорганизованной? Этот вопрос особенно актуален, поскольку недавно были открыты новые адаптивные и гибкие внутриклеточные "капельные" структуры, демонстрирующие потрясающую способность белков реорганизовываться в пространстве в соответствии с текущими потребностями. Пока слишком рано делать это соединение строгим, но можно задаться вопросом, сможет ли неравновесная статистическая термодинамика в какой-то момент помочь заложить теоретическую основу для понимания субклеточной архитектуры.

Также следует учитывать, что структуры, оптимизированные для одной цели, часто оказываются полезными для других. Я вспоминаю, как в детстве слышал лекцию выдающегося эволюционного биолога Стивена Джея Гулда, где он говорил о концепции "эволюционных спандрелей" — формах в природе, чьё текущее использование даёт вводящее в заблуждение представление о селекционном давлении, способствовавшем их возникновению. На лекции он привёл яркий пример вида нелетающих африканских птиц, которые используют свои крылья для создания тени над водой, чтобы лучше видеть рыбу.[[64]](#footnote-64) Хотя трудно доказать, что это верно в общем случае, здравый смысл подсказывает, что многие вещи, которые мы считаем функциональными успехами в архитектуре, могли быть достигнуты за счёт переосмысления и использования ранее созданных структур.

Углубляясь в эти размышления, мы можем также задаться вопросом о том, как потенциал к полезной самоорганизации мог проявляться до появления клеточной жизни. Как мы уже говорили, пальцы и пальцы ног не требуют термодинамики для их объяснения, так как мы представляем их появление намного позже развития сложной жизни. Но что насчёт ДНК, этой великолепной молекулы, кодовая структура которой делает возможным сборку наномашин жизни? Представить себе возможность доказать что-либо определённое о том, что должно было произойти так давно, чрезвычайно сложно, но с этой точки зрения диссипативная адаптация хотя бы помогает нам осознать, насколько мало мы знаем о таком простом, казалось бы, вопросе, как последовательность событий. Мы склонны говорить о ДНК — и её аналоге, РНК — как о начале всего, потому что мы обнаружили их как сообщения, которые копируются и транслируются: вся причина, по которой стало известно, что ДНК имеет значение, заключалась в том, что было установлено, что она является наследственным материалом, молекулой, необходимой для передачи генетических признаков от одного поколения к другому. Менее часто отмечается, что ДНК также является чрезвычайно стабильной и централизованной координирующей молекулой: внутри одной клетки относительно небольшое количество атомов ДНК практически никогда не изменяется, но при этом они оказывают огромное влияние на поведение значительно большего числа атомов, составляющих основную массу клетки. Если вы измените всего несколько десятков атомов в ДНК одной клетки, это может вызвать рак у всего организма и в конечном итоге привести его к гибели, тогда как изменения тысяч атомов в белках одной клетки могут легко остаться незамеченными в биологическом смысле. ДНК — это главный управляющий, и в этом свете примечательно, что диссипативная адаптация предсказывает появление медленной подгруппы свойств в активируемом коллективе, которые оказывают непропорционально большое влияние на более быстрые динамические процессы оставшихся частиц. Это, конечно, не доказывает, откуда взялась ДНК, но как минимум заставляет нас задуматься: обязательно ли предшественник ДНК должен был появиться сначала как закодированное сообщение, как мы обычно представляем, или же он был чем-то вроде молекулярного "мозга," управляющего некой доклеточной структурой, ещё неспособной к самокопированию. Идентификация таких возможностей может оставить множество вопросов открытыми на долгое время. Тем не менее, это должно одновременно вдохновлять нас на новые мечты о возможностях, которые ещё только предстоит исследовать, и вызывать большее смирение перед тем, что мы, возможно, слишком поспешно считали невозможным.

МЫ ОБЫЧНО НЕ ВИДИМ ВОЗДУХ; практически всё остальное в нашем восприятии мира кажется более вещественным, определённым и видимым. Поэтому дыхание и ветер легко воспринимаются как символы абсолютно нематериального. Однако воздух — это материя, пусть и менее предсказуемая или понятная, чем громоздкие объекты, которые мы можем взять в руки. Его прикосновение может быть разрушительно мощным, когда бушуют штормы, а в более мелких проявлениях он постоянно влияет на ход событий — как больших, так и малых. Когда снежинки или листья подхватываются вихрем, мы внезапно замечаем сложный и многогранный характер движения, а также можем оценить, насколько сложным было бы описание ветра в конкретном месте и в конкретный момент времени. Более того, такие наблюдения позволяют понять как случайность, так и более масштабный упорядоченный порядок, который может существовать в одном потоке воздуха, распространяющемся в пространстве на различных масштабах. Почти неизбежно, ветер заставляет нас задуматься, насколько по-другому могли бы развернуться события в мире, если бы несколько случайных завихрений турбулентности вдруг сложились в одном направлении в ключевой момент. Иными словами, сталкиваясь с упорядоченными массивами облаков и дюн, которые с лёгкостью формируются под постоянным бризом, мы начинаем задаваться вопросом, какие ещё формы ветер мог бы создать и оживить, если бы дул с достаточно сложным узором.

Мысль о скрытых структурах, содержащих информацию в ветре, неизбежно приводит нас к размышлениям об одном часто упускаемом аспекте дыхания: а именно, о способности ощущать запахи в окружающей среде. Обоняние — это удивительный орган чувств благодаря своей специфичности, целостности и мгновенности в распознавании. Запахи, как правило, представляют собой композиции, состоящие из множества отдельных влияний, одновременно воздействующих на наши носовые рецепторы. Однако мы воспринимаем аромат в первую очередь как нечто целостное, что трудно разложить на отдельные части. Кроме того, каждый отдельный запах обладает способностью оставлять настолько яркое впечатление в нашем сознании, что мы можем испытывать безошибочное чувство узнавания — как при сопоставлении отпечатка пальца или сканировании штрихкода. Ветер и дыхание символизируют самый загадочный аспект того, что такое жизнь, не потому, что они не являются её материальной частью, а потому, что часть материального мира скрывает свою организацию в корреляциях множества переменных, которые одновременно наблюдаются, ощущаются или переживаются. Жизнь рождается как ответ на вызовы, которые предъявляет ей окружающий мир. Однако для того, чтобы осознавать самые тонкие из этих вызовов, необходимо уметь улавливать сложную предсказуемость, которая может быть спрятана прямо на виду.

Глава 8 Голос и слово

*И Посланник явился среди огня*

*Бытие 3:2*

НАШИ ИССЛЕДОВАНИЯ БИОЛОГИИ И ФИЗИКИ УВЕЛИ нас далеко от исходной точки, до такой степени, что легко потерять из виду вопрос, с которого началось это путешествие. На самом деле, можно даже сказать, что новое понимание, которое мы развили на протяжении этих страниц, предполагает иной способ формулировки вопроса. Ранее мы могли спросить: «Объясняет ли физика, как могла возникнуть жизнь?» Но более точная формулировка может быть ближе к сути вещей: «Какие физические условия необходимы для того, чтобы поведение, подобное жизненному, надежно появлялось в материи, где оно изначально отсутствовало?»

В попытке дать ответ на этот вопрос мы собрали коллекцию различных концепций. Мы начали с осознания того, что биологические и физические способы описания представляют собой два разных языка для обсуждения одних и тех же явлений, и важно помнить, на каком из этих языков ведется речь. Это позволило нам определить ряд отдельных физических свойств, которые тесно связаны с жизнью, и понять, что их изучение по отдельности может помочь пролить свет на вовлеченную физику. Чтобы яснее определить эти свойства, нам пришлось рассмотреть различие между микроскопическим и укрупненным поведением в коллективах частиц, а также то, как редкость и разнообразие этих поведений зависят от взаимодействий микроскопических частей, которые могут быть собраны множеством способов. Изучение этого пространства возможных способов организации материи оказалось процессом, который лучше всего понимается через поток энергии через данную материю — в частности, как структура материи влияет на то, как энергия поглощается, используется и рассеивается. В конечном итоге именно эта взаимосвязь — между тем, как энергия течет, и как среда, через которую она проходит, трансформируется под ее влиянием — объясняет появление структур, которые повторяют разные качества, ассоциируемые с живыми организмами. Этот эффект может быть особенно впечатляющим в случаях, когда источники энергии содержат тонкий паттерн, порождающий столь же тонкие корреляции в возникающих структурах.

Однако, наряду с этим, мы открыли нечто еще. Как я писал в начале книги, попытка понять, откуда могла появиться жизнь, подталкивает нас к началу разговора, охватывающего гораздо больше, чем просто физику. Чтобы дать себе шанс разобраться в таком разговоре, для меня как практическая необходимость, так и вопрос личного убеждения — твердо укоренить дискуссию в интерпретации библейского текста. Таким образом, мы увидели, как отдельные отрывки из текста выражают удивительно глубокое понимание многих концепций, из которых мы в итоге сплели историю жизненных проявлений в языке физики. Разумеется, Библия ни в коем случае, ни в какой форме не является справочником по физике, и бесспорно, она говорит на своем уникальном языке (или даже языках). Однако, благодаря своей характерной манере обращаться в первую очередь к качественным аспектам повседневного опыта, знакомым технически непросвещенной аудитории, Писание оказывается насыщенным и многогранным комментарием о материальной основе жизни, описанным языком, которым владеет большинство обычных людей. Посох и змей демонстрируют, что одно и то же явление может выглядеть по-разному в зависимости от того, как его описывать. Белоснежная кожа заставляет задуматься о границах между категориями, а также между живыми существами и их окружением, напоминая, что сложные структуры могут быть собраны из простых частей, конденсирующихся вместе. Сравнение речной тины с кровью поднимает наш взгляд к разнообразию возможных результатов, когда различные материальные компоненты находятся в постоянном движении, а кузнечный горн напоминает нам, как скопления материи подвергаются изменениям в зависимости от их текущего состояния.

Как я упомянул в начале, цель здесь не в том, чтобы утверждать, что древний священный текст тайно «объясняет» все технические детали современных физических теорий. В определенном смысле он, конечно, этого не делает, поскольку реальное содержание этих теорий выражается на языке однозначных уравнений, которым Библия явно не пытается говорить. Однако важно помнить, что и эта книга не является научным трактатом. Она представляет собой попытку перевести специализированные идеи из физики на более доступный язык, и в этом отношении чтение Писания таким образом, как мы делали здесь, помогает показать, что одна и та же концептуальная основа удивительно доступна разумной интуиции человека, глубоко размышляющего о различных природных явлениях.

Вопрос о том, как осмысливать, что такое жизнь, с этой точки зрения, не является случайно выбранным аспектом того, что можно понять о мире, размышляя как физик. Некоторые аспекты того, что физика открыла нам, могут быть хорошо подтвержденными научными открытиями, но при этом они существуют в сфере, полностью оторванной от эмпирического опыта обычного человека. Квантовая механика — это прекрасная теория, добившаяся удивительных успехов в предсказаниях, например, поглощения и излучения света газами различных атомов и молекул. Общая теория относительности также является грандиозным достижением абстрактной математики: она начинается с размышлений о возможности изгиба света при его путешествии через пространство и заканчивается объяснением, почему ньютоновские расчёты иногда дают небольшие ошибки в движении планет. Однако на практике способность обычного человека напрямую воспринять эти объяснения о природе мира практически равна нулю, так как такие теории обращаются к явлениям, которые становятся обнаружимыми только после обработки чисел, полученных из специально сконструированных приборов, и их тщательного анализа.

Природное явление жизни является полной противоположностью абстрактным и далёким от реальности вещам, таким как квантовое туннелирование или гравитационные волны. Каждый человек, кто хоть раз задумывался о том, что такое жизнь, сам является её носителем и, следовательно, постоянно воспринимает богатый поток сенсорной информации о её сути. Конечно, живые организмы тоже содержат скрытые миры молекулярных событий, которые становятся видимыми только в лаборатории при помощи сложных технологий. Но, несмотря на это, часто можно найти параллели между тем, что мы наблюдаем на уровне организма, и тем, что происходит на самых мельчайших масштабах. Мы можем мало знать о нашей собственной ДНК без помощи современных методов молекулярной биологии, но каждому известно, что родители передают своим детям черты, такие как цвет волос или рост. Точно так же мы, возможно, не видим, как атомы кислорода присоединяются к гемоглобину в нашей крови, когда мы вдыхаем, но прекрасно понимаем, насколько опасно перестать дышать.

Есть и другой смысл, в котором физика, наиболее актуальная для изучения возникновения жизненных процессов, не является фантастической и противоречащей интуиции, как это бывает с некоторыми аспектами физики. В наши дни космолог, рассказывающий широкой аудитории о том, какие частицы могли существовать в разные эпохи, охватывающие крошечные доли секунды после Большого взрыва, часто звучит как харизматичный мистик, обращающийся к потенциальным последователям нового культа. Это происходит не (хочется надеяться) из-за намерения учёного ввести слушателей в какое-то психоделическое пространство, а потому, что в повседневной жизни нет ничего, что могло бы подтвердить или опровергнуть сказанное. Детали того, как именно одна фундаментальная частица заставляет другую иметь больший или меньший вес, по сути, являются полностью техническим вопросом, сводящимся к необходимости согласования множества различных высокоточных и специализированных измерений. Возможно, итоговое объяснение можно облечь в метафорические термины, которые попытались бы сделать математическое обсуждение более доступным (например, поскольку обычный человек действительно видит, как волны плещутся между лодками в гавани и т. д.), но яркость таких метафор совершенно не устраняет полной недоступности для большинства людей обсуждения, почему такие описания мира являются более или менее правильными.

Как читатель, возможно, заметил в этой книге, мы в основном говорили о вещах, с которыми человек часто сталкивается, прогуливаясь на улице. Когда мяч катится вниз по склону и останавливается, физика, задействованная в этом процессе, абсолютно та же, что мы представляем для одного из наших метафорических шаров, исследующих более сложный ландшафт. Когда бурная океанская волна разбивает песчаный замок, кажущийся случайным способ, которым песчинки разлетаются, является довольно точным аналогом того, как белок может термически дрожать, случайным образом изменяя свою форму со временем. И когда несколько молекул воды соединяются в конденсирующуюся жидкость, это вполне разумно сравнить с тем, что может произойти в куче узловатых магнитных игрушек, разбросанных на полу ребенком. Конечно, в различных тонких деталях все эти сравнения неточны, и именно поэтому мы не используем детские игрушки для количественных прогнозов о физико-химических свойствах воды. Тем не менее, когда дело доходит до того, как скапливающиеся частицы, через которые протекает энергия, могут быть собраны, эмпирическая интуиция, которую мы получаем, живя в этом мире с инеем на окнах и спутанными брелоками для ключей, та же самая суть, что лежит в основе любого более технического понимания предмета. Хорошее владение естественными науками может помочь в точности обсуждения таких процессов и разработке хороших тестов для четко сформулированных гипотез, но даже эксперты должны действовать осторожно; слишком многое из того, что лежит за физикой «живости», — это просто странно забытая разновидность общего знания.

Вывод в том, что общее знание не обязательно должно быть выражено через многовариантное исчисление и дифференциальные уравнения, и потому мы определенно были бы глупцами, ожидая, что Библия будет говорить с нами на таких терминах. Математические формулировки термодинамики или законы Ньютона — это высокоспецифичные способы изложения, относящиеся к определенным, трансформационным моментам интеллектуальной истории. Напротив, разнообразные качественные различия между инеем, огнем и грязью — это истины, с которыми любой человек мог столкнуться лично с тех пор, как люди стали людьми. Это гораздо более универсальные термины и концептуальные опоры, которые могут быть использованы для обсуждения материальной основы жизни так, чтобы это выглядело вне времени. И поскольку вопрос о том, из чего состоит жизнь, может быть чрезвычайно важным для размышления о человеческом состоянии в целом, вдруг становится очевидным, что Библия не только способна, но и стремится дать комментарий.

Какой же комментарий? Современному читателю можно простить, если он настолько увлечён текущими дебатами о «религии и науке», что само по себе кажется интересным, что библейский текст способен продемонстрировать своё понимание вопроса о происхождении жизни. Мы так часто слышим, что «вера» подразумевает отрицание истин, открытых научным разумом, что можем ошибочно предположить, что основная цель Библии в этом обсуждении — защитить себя от обвинений в невежестве по отношению к неопровержимым фактам о мире. Признаюсь, достаточно интересно обнаружить доказательства того, что концептуальная утончённость текста в отношении материальной основы жизни больше, чем это могло показаться на первый взгляд, и не настолько не совпадает с тем, что могла бы сказать научная точка зрения. Однако если бы это было единственной целью, то можно было бы задаться вопросом, чего достигает Еврейская Библия, говоря об этом таким образом. Если в её стихах скрыт какой-то трактат о естественной философии, то зачем скрывать это понимание за завуалированной поэзией, если те же идеи можно выразить более прямо? Более того, не кажется ли несколько разочаровывающим, что итоговое раскрытие заключается лишь в том, что Писание приблизительно подходит к тому, что наука уже выражает совершенно точно? Остаётся ли наука вершиной, к которой должны стремиться все остальные формы понимания?

Чтобы разрешить это противоречие, необходимо помнить, зачем существует Библия. Само собой разумеется, что Моисей и другие еврейские пророки не пытались создать учебник, альманах или какое-либо другое хранилище случайных и, возможно, полезных фактов. Непоколебимая цель текста — от начала до конца — это призвать израильский народ и всё человечество к поклонению и служению Богу. В этом свете становится понятно, что любая затронутая тема — будь то закон, рассказ, песня или любой другой жанр, встречающийся на её страницах — стремится научить как отдельных людей, так и народы находить смысл жизни через праведность. Зачем же тогда говорить о материалах и природных явлениях, которые содержат ключи к тому, что делает жизнь возможной? Обсуждение этой темы может преследовать разные цели, но, безусловно, одной из них должно быть опровержение одного из самых часто повторяемых и убедительных аргументов о том, что жизнь бессмысленна и полностью лишена ценности.

Живые существа умирают, и, умирая, распадаются на составные части, которые по отдельности кажутся совершенно незначительными. Задолго до того, как человечество приобрело специализированные знания в биологии, химии или физике, должно было быть предельно ясно любому вдумчивому человеку, что его собственное тело состоит хотя бы частично из веществ, которые становятся такими же безжизненными, как камни и песок под ногами, когда они отделены от целого. Еврейская Библия, безусловно, не уклоняется от подчёркивания этой истины («Ты прах, и в прах возвратишься», Бытие 3:19). Однако древние предлагали множество других рассказов о начале человечества, где упоминается некоторая версия этой идеи, представляя человека фигурой, созданной из камня или глины. Более того, это основное осознание, которое было частью базового человеческого опыта на протяжении всей истории, может быть для кого-то немного тревожным. Отдельные частицы пыли и неодушевлённого мусора неизбежно рассматриваются как самые близкие к абсолютному ничтожеству — как незначительные фрагменты хлама, которые никому не принадлежат и с которыми можно поступать как угодно. Столкнувшись с этим сравнением, многие люди могут начать немного задумываться, почему живые груды пыли должны так сильно отличаться в своём обращении от других, менее жизнеспособных, более хаотичных собраний тех же строительных материалов. Действительно, Авраам, возможно, выражал более беспокойное чувство, чем просто смирение, когда сказал Богу: «Я прах и пепел» (Бытие 18:27).

Современная и более техническая версия этого философского дискомфорта лишь немного сложнее. Начинается всё с того, что мир рассматривается с точки зрения физика, через положения и скорости всех частиц, из которых состоят вещи. При детальном рассмотрении каждой частицы в отдельности никогда не кажется, что она "виновата" в том, что находится именно здесь и движется именно туда, и в этом нет особого смысла, независимо от того, предсказуемо ли её движение или частично случайно. И в живом существе, и в куче пепла могут действовать одни и те же общие законы, определяющие взаимодействие различных частей друг с другом. Частицы сталкиваются, некоторые соединяются, некоторые разрушаются: и что с того? Если микроскопическое физическое описание выглядит как слепой каприз случайности или бездушное действие автомата, следующего простым, аморальным правилам, как тогда возможно, что один вид столкновения множества частиц может иметь куда больше морального значения, чем другой? Физическое описание предполагает охват всего существующего в единой, тотализирующей структуре, и, делая это, смысл и моральные ценности, кажется, исчезают с поля зрения. Были ли они всегда лишь иллюзией или физика где-то допустила ошибку?

Здесь часто предлагается распространённый ответ, который часто рассматривается как позиция Еврейской Библии, и, надо признать, вероятно, это действительно позиция значительной части того, что можно назвать библейской религией. Стандартное разрешение этой проблемы заключается в том, что физика — это теория поведения материальной вселенной, но мир также имеет духовные измерения, которые функционируют по своей логике. Если бы люди были всего лишь "мешками из мяса и костей" — рассуждают сторонники этого подхода, — то действительно было бы справедливо сказать, что их истории не важнее, чем истории камней и ледников. Однако, помимо тел, у людей есть души, и именно этот по сути божественный и духовный аспект человеческого существования автоматически наполняет ценностью и смыслом осязаемую оболочку, предоставленную физикой и биологией. Цель этой книги не в том, чтобы углубляться в детали того, как обсуждаются души в разных религиозных традициях, которые, несомненно, сильно различаются, даже если ограничиться только различными направлениями внутри иудаизма и христианства. Нас в данный момент интересует лишь то, как сам текст Еврейской Библии трактует тему того, что иногда называют "духом", и согласуется ли этот подход с чётким разделением физических и духовных миров.

Как уже можно было предвидеть из комментариев в предыдущей главе, ответ почти наверняка категоричное "нет". Вместо того чтобы предоставлять своего рода руководство по различию между физическими и духовными материалами, библейский текст неоднократно демонстрирует противоположное отношение, делая это различие как можно более неясным. Любая явная ссылка на якобы духовные вещи использует обыденное еврейское слово — например, ветер, дыхание, пар, дым, облако, туман — которое всегда имеет очевидные природные и материальные соответствия. Вполне возможно, что в некоторых случаях использование этих терминов нацелено на попытку описать что-то несовершенно через аналогию с чем-то более привычным; таким образом, "сильный восточный ветер", который разделил море Суф, мог сбить с курса больше птиц, чем "дух Бога", давший Иосифу, сыну Иакова, его великое прозрение (Исх. 14:21; Быт. 41:38). Тем не менее ничего в тексте однозначно не указывает на то, что более необычная версия ветра, о которой говорится во втором случае, имеет менее материальную основу, чем те ветры, что двигают парусники по воде. Хотя некоторые могут пожелать увидеть в этом мистическое объяснение гениальности Иосифа, не менее логично предположить, что упоминание ветра подразумевает бурные ассоциации с largely невидимым ураганом различных сталкивающихся явлений — качеств, которые могут быть хорошо знакомы любому, кто немного размышлял над тем, как работает ум в материальном смысле.

Справедливо также спросить, можно ли вообще считать мистическое объяснение объяснением. Разделение всего творения на физическую и духовную сферы только ставит вопрос о том, как эти два типа сущностей должны взаимодействовать и что можно узнать о том, как должны работать духовные вещи. Если духовные вещи не ведут себя познаваемым и предсказуемым образом, то их введение в описание становится чисто магическим действием, цель которого — остановить попытки понять. С другой стороны, если духовные вещи обладают отдельным естественным порядком, отличным от физического, то их изучение превращается в своего рода дуализм, который, по сути, отвергает единство Бога, о котором библейский текст заявляет столь решительно и многократно. И, возможно, самое важное, для человека, обеспокоенного тем, что жизнь балансирует на грани бессмысленности, уверение в том, что духовные явления могут восполнить этот пробел, подозрительно мало чему учит о том, откуда берутся смысл и ценность. Что такое душа, если сам факт её существования может наделить всё высшей значимостью, не объясняя при этом, что именно значимо?

Таким образом, возможно, несколько неожиданно, мы оказываемся в положении, когда утверждаем, что, хотя Еврейское Писание, безусловно, стремится противостоять нигилизму, который может возникнуть из размышлений о материальной природе жизни, оно избегает соблазна решить проблему, просто призвав к дуалистической духовности. Вместо этого, в тех же самых знамениях, которые Бог явил Моисею на Хориве и которые мы уже использовали для размышлений о том, как жизнь собирается воедино, Писание также вплетает параллельный комментарий о том, как реагировать на эту биофизическую перспективу. Посох, превращающийся в змея, кожа, становящаяся белой как снег, ил Нила, который становится кровью, и горящий, но не сгорающий куст — мы показали, как каждое из этих чудес вызывает размышления о границе между биологическим и физическим. Читая их в более широком контексте Пятикнижия Моисея, мы теперь можем увидеть совершенно новые аспекты их значения.

Нарративная обстановка демонстрации чудес, которые Бог являет Моисею, — это разговор об освобождении израильтян из рабства в Египте. Уже одно это обстоятельство задаёт сцену, противопоставляя идею рабства — которое напоминает механистическое подчинение физическим законам — шансу на освобождение — состоянию, в котором люди сами решают, как жить. Каким-то образом эти знамения должны указать путь от чувства ограничения и рабства к ощущению свободы и самоопределения, что кажется удивительно точно соответствующим отчаянию человека, уверенного, что люди — это просто хаотично движущиеся скопления мельчайших частиц. Интересно, что упоминание о реальном порабощении людей египетскому фараону вовсе не лишено значения в этом контексте, поскольку идеологии, отказывающиеся признавать внутреннюю ценность личности, гораздо чаще используют мужчин и женщин как тягловых животных или жертвенных пешек в каком-нибудь великом, принудительном проекте. Если взглянуть на это под таким углом, можно неожиданно заметить, что отправка Моисея с миссией освобождения, возможно, требует научить его, как спорить с дегуманизирующим уклоном некоторых версий физического материализма.

Способ, которым Бог учит Моисея, заключается в использовании знамений, начиная с посоха, превращающегося в змею. Здесь важно вспомнить, что первая змея, появляющаяся в Библии, возникает в Книге Бытия, когда мужчина и женщина живут в Эдемском саду. В этом контексте этот хитрый и разговорчивый рептилий известен тем, что искушает женщину съесть плод, запрещённый Богом. Таким образом, змея, явленная Моисею, неизбежно вызывает как минимум две ассоциации: во-первых, что кажущаяся безмолвной часть природы может оказаться носителем значимого послания, и, во-вторых, что люди способны выбирать поступки, которые их Создатель запрещает им совершать. Появление змеи говорит нам о том, что иногда в том, что изначально кажется бессмысленным, можно обнаружить смысл. Более того, вопросы моральной значимости о том, что человек должен делать, в отличие от того, что он может делать, также могут быть частью этого смысла.

Если рассматривать роль посоха, превращающегося в змею, с этой точки зрения, то примечательно, что этот момент уже был почти понятен нам из анализа знамения в чисто биофизическом контексте, обсуждаемом ранее. Переход от мира неодушевлённых предметов и материалов (посох) к миру живых существ с непредсказуемым поведением (змея) достаточно полезен как способ привлечь внимание к различию между физическим и биологическим подходами к научному мышлению и необходимости осторожности при переводе между этими языками. Однако рассмотрение змеи в её нарративном контексте придаёт этой идее ещё больший вес, так как теперь становится очевидно, что физические материалы не лишены морального смысла; напротив, так же, как наблюдатель может выбрать использование биологического языка для описания чего-то истинного, что трудно выразить физическими терминами, он или она могут сделать аналогичный выбор, открывающий дверь к моральному смыслу.

Но откуда берётся этот смысл? Знамение змеи может в общем смысле указывать на возможность существования смысла, но остаётся жгучий вопрос: как мы узнаём, что именно он означает? Остальные два знамения, данные Моисею, завершают этот аргумент, и чтобы понять, как это происходит, лучше начать с третьего. Как мы уже отмечали, кровь неизбежно вызывает ассоциацию с целостностью. Восприятие организма как единого, цельного явления, которое превосходит множество составляющих его более простых частей, уже частично утверждает, что что-то в системе может иметь значение, выходящее за рамки узкого списка её физических свойств. Однако решающим моментом становится образ крови, пролитой на сухую землю, что неизбежно отсылает нас к истории Каина и Авеля, где земля проклинается за то, что «раскрыла уста свои», чтобы принять кровь одного брата из рук другого. Упоминание Нила также добавляет ассоциацию с детоубийством, так как фараон приказал бросать в реку младенцев-мальчиков из народа евреев в начале Книги Исход. Убийство и кровопролитие в целом — это ярчайшие примеры явлений, которые кажутся значительными в плане, выходящем за пределы их материальной основы, и, тем самым, это действия, которые могут быть легче совершены теми, кто убедил себя, что человеческая форма не отличается от других кучек пыли. Таким образом, знамение крови напоминает нам о ставках этого разговора.

В центре этой последовательности из трёх знамений находится самое загадочное и легко упускаемое из виду — снежно-белая, поражённая кожа. Хотя обсуждение её биофизических аспектов уже может навести нас на мысль, что это чудо каким-то образом связано с обозначением границ, его неясные и, казалось бы, случайные детали создают головоломку. Удивительно, но, проследив нить этого явления через различные упоминания в законах Левита, мы быстро обнаруживаем, что именно оно является ключевым элементом, поддерживающим два других знамения. Ведь как кровь, так и змея могут оставить нас с вопросом о том, как вообще устанавливаются идеи морали и проступка. Можно сказать, что моральные измерения можно распознать, взглянув на вещи с определённой точки зрения, но как научиться это делать? Моральному человеку легко увидеть разницу между грязью и кровью, но как спорить с аморальным скептиком, который настаивает, что грязь — это всё, что существует?

Поражение, явленное Моисею, иногда переводят как проказу, но правильнее назвать его его еврейским именем — цараат, потому что, по сути, этот термин обозначает состояние «полуживости», не имеющее аналогов или эквивалентов за пределами библейского описания. Цараат подробно рассматривается в книге Левит из-за его важности для законов ритуальной чистоты: существуют процедуры для идентификации цараата, для изоляции людей, тела которых поражены этим состоянием, для определения, прошло ли оно, и для возвращения человека, чья болезнь завершилась, в общину. На каждом этапе разработана довольно сложная система ритуальных процедур: только священник может идентифицировать цараат, и он должен использовать строго определённые критерии, основанные на внешнем виде поражения или аномалии, которые изначально привлекли внимание. Если священник решает, что цараат присутствует, пострадавший изолируется различными способами на семь дней, а в конечном итоге проводится ритуал очищения, включающий птиц, растения и огонь.

Тем, кто ищет медицинский или физический эквивалент цараата, придётся столкнуться с трудностями и остаться неудовлетворёнными. Это не дерматологическое явление; напротив, оно стремится быть его противоположностью: цараат, можно сказать, вводится в библейский закон, чтобы стать высшим примером «правового вымысла как реальности» — если создать согласованную систему критериев и процедур для оценки и реагирования на мир определённым образом, то это приведёт к выражению нового измерения того, что представляет собой мир. Физическая реальность оценивается по одному набору процедур, а медицинская — по другому. Более того, обе эти оценки до некоторой степени взаимопереводимы, поскольку они основаны на схожих научных подходах к наблюдению. Цараат предлагает совершенно иной способ разговора о мире, который по своей природе более субъективен (поскольку только священник может его идентифицировать) и более социально ориентирован (поскольку тот же закон, который определяет цараат, требует, чтобы человек, у которого он проявляется, был подвергнут особому обращению). Этот новый способ описания кожи напрямую поднимает вопрос о том, как выглядят нормальные или аномальные границы человеческого тела, но делает это специально, чтобы сформулировать библейский слой опыта, полностью отсутствующий в описаниях реальности, которые может предоставить естественная наука.

О цараате можно сказать гораздо больше, но для наших целей важно то, что он представлен в центре встречи Моисея у горящего куста. Как мы уже видели, другие знамения одновременно вызывают биофизические и иные измерения, но оставляют нас в недоумении, как мы должны объединить оба этих способа восприятия мира в единое целое. В эпицентре этого шторма разрозненных понятий цараат стремится стать примером, который решает головоломку. С одной стороны, он укоренён в эмпирическом наблюдении за живым существом и его тактильными и визуальными свойствами; с другой стороны, цараат заботится исключительно о применении человеческого суждения и регулировании человеческой деятельности в рамках определённых назначенных ролей. Суть в том, что человек не делает этого или того из-за того, чем уже является цараат (так, как изолируют больных, чтобы предотвратить распространение инфекции, из-за природы вируса). Напротив, действия и слова, совершаемые согласно правилам, являются единственным определением того, что такое цараат: ключевое понятие в сложной социальной системе практик.

В современной эпохе часто проводится различие между неизменными материальными реалиями, такими как гравитация и рак, и чисто конструктивными аспектами социального взаимодействия, такими как долг и развод. Более того, мы всё чаще придаём первой группе большее значение в плане их окончательной авторитетности; считается, что человеческие игры изменчивы и произвольны, а природные факты остаются природными фактами. Однако когда разговор заходит о таких вещах, как убийство, многие из нас оказываются в затруднительном положении, потому что это крайнее преступление требует крайней значимости, но вся идея о том, что такое убийство, выглядит скорее как ещё одна юридическая «фикция», чем проявление природного закона. Другими словами, нам свойственно думать, что запрет и наказание за убийство вызваны чем-то естественно неприемлемым в его сути, а не просто являются очередной социальной конструкцией, подобной браку или налогам. Идея цараата даёт нам инструменты, чтобы взглянуть на этот вопрос по-новому. В стороне от эмоциональных крайностей, которые неизбежно вызывают смерть и кровопролитие, нам предлагается пример другого понятия, определение которого одинаково важно как для состояния физического тела, так и для того, как люди говорят и относятся друг к другу. Убийство функционирует именно таким образом, поскольку его совершение требует от нас не только обсуждения того, что является живым, а что — нет, но и определённых действий людей в зависимости от того, кто, как считается, лишил кого жизни. Когда кровь на земле у ног Моисея напоминает убийство Авеля рукой Каина, ключевой вопрос заключается в том, почему эта ситуация «вопиет» так, как не может грязь, и как моральный слой нашей реальности может казаться таким твёрдым и неоспоримым. Цараат помогает осознать, что так называемая ценность человеческой жизни — это не факт, который мы принимаем заранее, чтобы понять, почему мы должны действовать определённым образом. Напротив, то, как мы настаиваем на том, чтобы говорить и действовать (будь то изменение поведения из-за заявления священника о состоянии кожи человека или задержание и привлечение к суду убийц), служит для установления смысла нашего существования. Иными словами, наша человечность приобретает ценность и смысл в той мере, в какой мы совместно соглашаемся относиться к ней как к ценному и значимому явлению.

В карикатурном изложении Библию иногда описывают как сборник моральных абсолютов: сперва вы полностью принимаете и признаёте предпосылку, что она дана человечеству Царём и Творцом мира, а затем находите на её страницах всё, что, по определению, является греховным. Однако здесь мы делаем утверждение, которое звучит шокирующе противоположно этому. Убийство неправильно только потому, что некоторые люди согласились вести себя так, будто это неправильно? Если бы они изменили своё мнение, могло бы оно стать правильным? Что мы здесь затрагиваем, так это трудность выбора, какими символами пользоваться, сталкиваясь с бескрайней возможностью. Каждый язык ещё не выразил всё, что может, и существует бесконечное множество новых языков, которые ещё предстоит создать. Отзвук морального релятивизма неоспорим в рассказе о морали, которая изображается как произвольная игра социальных соглашений, популярных в данный момент.

Для некоторых людей чистый холст, на котором можно создавать новые виды смысла в обществе, может показаться захватывающим, тогда как другие справедливо зададутся вопросом, возможно ли вообще существование общества, если некоторые вещи не зафиксированы с самого начала. Последний подход и берёт на вооружение сама Библия, стремящаяся быть подробной дорожной картой для нации, которая хочет определить себя в отношении к Богу, причём каждый закон и ритуал в ней направлены на эту цель. Дерзкое утверждение состоит в том, что эти законы — это не просто один из многих способов иметь культуру и общие практики со своими соседями. Вместо этого это конкретные условия договора, переданного рукой нашего Творца, а вещи, происходящие в этом созданном мире, должны стать нашим способом оценить, соблюдает ли Он свою часть соглашения.

Один или даже несколько томов можно было бы посвятить обсуждению вопроса, почему мир со всей его историей и природными свойствами свидетельствует или не свидетельствует о воле такого Творца; никто не должен притворяться, что это простой вопрос для решения.[[65]](#footnote-65) Однако стоит отметить, завершая, что выбранный нами отрывок из книги Исход, возможно, сам по себе намекает, как лучше всего подойти к этой загадке. Помните, что всё началось, когда Моисей заметил куст, горящий огнём, который почему-то не сжигал его. Этот образ представляет собой процесс интенсивной, многослойной перестройки, который обычно ведёт к превращению дерева в пепел, но в данном случае — нет. Другими словами, текст показывает нам через этот неуничтожающий огонь идею сложного движения, которое, кажется, должно разорвать изысканную структуру живого растения в клочья, но почему-то этого не делает. Мы говорим, таким образом, о множестве маломасштабных воздействий на это живое растение, которые поверхностно выглядят случайными, как обычное пламя, но, должно быть, каким-то образом тщательно скоординированы, чтобы сохранить изысканную форму живого существа нетронутой.

Как мы уже отмечали, сама жизнь, кажется, функционирует подобным образом, но теперь мы можем сосредоточить своё внимание на том, что для Моисея этот момент также стал моментом встречи. Пламя, которое не уничтожает, говорит с Моисеем, пока он смотрит на него с трепетом. Неожиданно и удивительно, этот странный огонь напоминает нам, что если мы начнём с готовности признать что-то не такое уж случайное в том, как переплетаются нити мира, у нас может появиться шанс услышать что-то — голос, послание — которое мы иначе не смогли бы воспринять.

1. Очевидно, что если мы хотим начать играть с определением жизни и расширять его далеко за пределы известных нам конкретных деталей форм жизни, даже это первое предложение может вызвать споры. На данный момент суть в том, что, по всей видимости, сразу после Большого взрыва не существовало клеток с ДНК и белками. [↑](#footnote-ref-1)
2. Ричард Докинз — яркий пример тех, кто придерживается этой точки зрения. См., например, Ричард Докинз, «Каковы пять лучших причин, почему Бога нет», SVT/NRK/Skavlan, YouTube, опубликовано 3 декабря 2015 года, <https://www.youtube.com/watch?v=RyYPPTcoCiU>. [↑](#footnote-ref-2)
3. Джеффри Л. Бада и Антонио Ласкано, «Первичный бульон — переосмысление эксперимента Миллера», Science 300, no. 5620 (2003): 745–746. Знаменитый эксперимент Юри-Миллера вызвал фантазию о подобной луже, где определённая «химически восстанавливающая» среда приводила к образованию аминокислот из более простых химических компонентов. Однако, хотя обнаружение возможности получения сложных биологических компонентов из простых химических реагентов при относительно примитивной форме внешнего воздействия (а именно электрических разрядов) может быть информативным, весьма сложно доказать, насколько такой сценарий соответствует тому, как выглядел мир в далёком прошлом. [↑](#footnote-ref-3)
4. Джереми Л. Ингланд, «Статистическая физика самовоспроизведения», Journal of Chemical Physics 139, no. 12 (2013): 09B623\_1. В списке ссылок этой статьи можно найти работы о спонтанном распаде ДНК, РНК и пептидных связей. [↑](#footnote-ref-4)
5. Джеймс Д. Уотсон и Фрэнсис Х. Крик, «Молекулярная структура нуклеиновых кислот», Nature 171, № 4356 (1953): 737–738; Курт Вютрих, «Определение структуры белков в растворе методом ЯМР-спектроскопии», Journal of Biological Chemistry 265, № 36 (1990): 22059–22062; Майкл Дж. Раст, Марк Бейтс и Сяовэй Чжуан, «Изображения с разрешением ниже дифракционного предела методом стохастической оптической реконструкционной микроскопии (STORM)», Nature Methods 3, № 10 (2006): 793. [↑](#footnote-ref-5)
6. Редукциони́зм (от лат. reductio — возвращение, приведение обратно) — методологический принцип, согласно которому сложные явления могут быть полностью объяснены с помощью законов, свойственных явлениям более простым (например, социологические явления объясняются биологическими или экономическими законами). [↑](#footnote-ref-6)
7. Роберт Б. Лафлин и Дэвид Пайнс, «Теория всего», Proceedings of the National Academy of Sciences 97, № 1 (2000): 28–31; Филип У. Андерсон, «Большее — это другое», Science 177, № 4047 (1972): 393–396.

Стоит отметить, что ни Андерсон, ни Лафлин не утверждают, что системы с большим количеством компонентов полностью непредсказуемы; напротив, их карьеры были посвящены открытию закономерностей в таких исключительно сложных системах. Однако в так называемом мире твёрдых конденсированных сред (например, металлов и более экзотических твёрдотельных материалов) способ увидеть порядок в хаосе заключается в понимании того, что коллективное поведение определяется определёнными симметриями рассматриваемой системы.

Это может стать довольно сложным математически, но, для простоты, представим плоскую решётку, где стрелки указывают в произвольных направлениях. Предположим, энергия каждой стрелки ниже, если она направлена так же, как её соседи. Очевидно, что минимальная энергия достигается, когда все стрелки направлены в одном направлении. Однако симметрия указывает, что состояние с минимальной энергией не должно демонстрировать предпочтение к какому-либо одному направлению, поскольку общая энергия системы остаётся неизменной при вращении нашего взгляда. Решение состоит в том, чтобы понять, что существует бесконечно много эквивалентных состояний с минимальной энергией, где все стрелки выровнены, но каждая коллективно выровненная система направлена в разном направлении. [↑](#footnote-ref-7)
8. Следует задаться вопросом, почему вообще могла появиться столь странная идея, как использование квантовой теории для предсказания фондового рынка. Дело в том, что с точки зрения физика все люди, документы, компьютеры, телефоны, заводы, шахты, леса, ветры (и всё остальное), влияющее на цену акций, состоят из атомов. То, как эти атомы объединяются в молекулы, довольно хорошо описывается известными уравнениями, управляющими взаимодействием электрических зарядов, света и материи на самых малых масштабах. Так почему бы не попробовать предсказать фондовые рынки (а также все события в мире, влияющие на них) с использованием этих уравнений?

Причина в том, что вычислительная сложность такой задачи — с учётом мельчайших деталей — выходит далеко за пределы наших возможностей. Более того, у нас нет точных данных для ввода в модель. Таким образом, как акционеры могут не знать всех проблем публичной компании, так и мы, по умолчанию, знаем слишком мало о том, что делает каждая молекула на планете. Вместо того чтобы пытаться измерить все эти детали, гораздо лучше создавать модели, упрощающие реальность, например, предполагать, что цены определяются балансом спроса и предложения. [↑](#footnote-ref-8)
9. Ханс В. Хорн, Уильям К. Суоуп и Джед В. Питера, «Характеристика водной модели TIP4P-Ew: давление пара и температура кипения», Journal of Chemical Physics 123, № 19 (2005): 194504. [↑](#footnote-ref-9)
10. Д. А. Маккуарри, Статистическая механика (Саусалито, Калифорния: University Science Books, 2000). [↑](#footnote-ref-10)
11. Р. К. Патрия, Статистическая механика (Нью-Йорк: Pergamon, 1984). [↑](#footnote-ref-11)
12. Магнитные кристаллы — это материалы, в которых атомы упорядоченно выстраиваются в трехмерные решетки, а их магнитные моменты (наподобие крошечных магнитов) взаимодействуют между собой. Например, при изменении температуры эти магнитные моменты могут резко перестроиться, что напоминает фазовый переход, подобный кипению.

Липидные бислои, в свою очередь, представляют собой двойные слои молекул жиров (липидов), которые являются основным компонентом клеточных мембран. Эти слои также могут испытывать фазовые переходы: например, переход от более упорядоченного (жёсткого) состояния к менее упорядоченному (жидкому) при повышении температуры.

Несмотря на различия в природе этих систем — от жидкости до твердого материала или даже структуры клетки, — математические закономерности, управляющие их фазовыми переходами, оказываются универсальными. Это указывает на глубинные связи в поведении сложных систем, независимо от их состава или масштаба. [↑](#footnote-ref-12)
13. Маккуарри, Статистическая механика; Аурелия Р. Хонеркэмп-Смит, Бенджамин Б. Махта и Сара Л. Келлер, «Экспериментальные наблюдения динамических критических явлений в липидной мембране», Physical Review Letters 108, № 26 (2012): 265702; Альберто Стриоло, Корай М. Колина, Кит Э. Губбинс, Никола Элвассоре и Лео Люэ, «Привлечение между парами коллоидных частиц в полимерном растворе», Molecular Simulation 30, № 7 (2004): 437–449; Патрия, Статистическая механика. [↑](#footnote-ref-13)
14. Пауль Хойннинген-Хуэне, «Доводы Нильса Бора о нередуцируемости биологии к физике», в Нильс Бор и современная философия, ред. Дж. Фей и Х. Фолс (Дордрехт: Springer, 1994), 231–255. [↑](#footnote-ref-14)
15. Эрвин Шрёдингер, Что такое жизнь? Физический аспект живой клетки и разума (Кембридж: Cambridge University Press, 1944). [↑](#footnote-ref-15)
16. Людвиг Витгенштейн, Логико-философский трактат (Лондон: Routledge, 2013). [↑](#footnote-ref-16)
17. К.Брэндон и Дж. Туз, Введение в структуру белков, 2-е изд. (Нью-Йорк: Garland, 1999). [↑](#footnote-ref-17)
18. Николас Георгеcку-Роген, "Закон энтропии и экономический процесс" (Кембридж, Массачусетс: Издательство Гарвардского университета, 1971). [↑](#footnote-ref-18)
19. Юджин Е. Ким, Марк С. Хипп, Андреас Брачер, Манджит Хайер-Хартль и Ф. Ульрих Хартль, "Функции молекулярных шаперонов в сворачивании белков и протеостазе", Annual Review of Biochemistry 82 (2013): 323–355. [↑](#footnote-ref-19)
20. Матье Коломб-Дельсук, Элио Маттиа, Ян В. Садовник и Сейбрен Отто, **"Экспоненциальное самовоспроизведение, обеспеченное механизмом удлинения/разрыва волокон",** Nature Communications 6 (2015): 7427. [↑](#footnote-ref-20)
21. Трейси А. Линкольн и Джеральд Ф. Джойс, "Самоподдерживающаяся репликация фермента РНК", Science 323, no. 5918 (2009): 1229–1232. [↑](#footnote-ref-21)
22. Чарльз Вайссманн, "Состояние приона", Nature Reviews Microbiology 2, no. 11 (2004): 861. [↑](#footnote-ref-22)
23. Джанетт Нангрив, Донгран Хан, Ян Лю и Хао Ян, "ДНК-оригами: история и текущая перспектива", Current Opinion in Chemical Biology 14, no. 5 (2010): 608–615; Дэниел Дж. Парк, Чуань Чжан, Джесси К. Ку, Ю Чжоу, Джордж С. Шац и Чад А. Миркин, "Плазмонные фотонные кристаллы, реализованные через ДНК-программируемую сборку", Proceedings of the National Academy of Sciences 112, no. 4 (2015): 977–981. [↑](#footnote-ref-23)
24. Кристиан Б. Анфинсен, Эдгар Хабер, Майкл Села и Ф. Х. Уайт-младший, "Кинетика формирования нативной рибонуклеазы во время окисления восстановленной полипептидной цепи", Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 47, no. 9 (1961): 1309. [↑](#footnote-ref-24)
25. Ким и др., "Функции молекулярных шаперонов". [↑](#footnote-ref-25)
26. Георгеcку-Роген, "Закон энтропии" [↑](#footnote-ref-26)
27. Энтони Д. Кифи и Джек В. Состак, "Функциональные белки из библиотеки случайных последовательностей", Nature 410, no. 6829 (2001): 715; Алан Р. Дэвидсон и Роберт Т. Сауэр, "Свернутые белки часто встречаются в библиотеках случайных аминокислотных последовательностей", Proceedings of the National Academy of Sciences 91, no. 6 (1994): 2146–2150; Йинан Вэй и Майкл Х. Хехт, "Белки с ферментативной активностью из неотобранной библиотеки спроектированных аминокислотных последовательностей", Protein Engineering Design and Selection 17, no. 1 (2004): 67–75. [↑](#footnote-ref-27)
28. Джереми Р. Ноулз и У. Джон Албери, "Совершенство катализа ферментов: энергетика триозофосфатизомеразы", Accounts of Chemical Research 10, no. 4 (1977): 105–111. [↑](#footnote-ref-28)
29. Гэвин Э. Крукс, "Теорема флуктуаций производства энтропии и соотношение неравновесной работы для разности свободных энергий", Physical Review E, том 60, № 3 (1999): 2721. [↑](#footnote-ref-29)
30. Джереми Л. Инглэнд, "Статистическая физика самовоспроизведения", Journal of Chemical Physics, том 139, № 12 (2013): 09B623\_1. В цитируемых источниках этой статьи можно найти работы, посвящённые спонтанному распаду ДНК, РНК и полипептидных связей. [↑](#footnote-ref-30)
31. Шикхар К. Джха, Син Ли Фуах, Джиан Ло, Костас П. Григоропулос, Хайян Ван, Эдвин Гарсия и Б. Риджа-Джаян, "Эффекты внешних полей в спекании керамики", Journal of the American Ceramic Society, том 102, № 1 (2019): 5–31. [↑](#footnote-ref-31)
32. Рольф Ландауэр, "Необратимость и генерация тепла в вычислительном процессе", IBM Journal of Research and Development, том 5, № 3 (1961): 183–191. [↑](#footnote-ref-32)
33. Хуан М.Р. Паррондо, Джордан М. Хоровиц и Такахиро Сагава, "Термодинамика информации", Nature Physics, том 11, № 2 (2015): 131–139.

Самым известным мысленным экспериментом, иллюстрирующим центральную роль информации и вычислений в понимании термодинамики, является эксперимент с демоном Максвелла. Представьте себе два сосуда с газом одинаковой температуры, разделённые стеной с дверью, которая может открываться и закрываться. У двери сидит крошечный привратник (демон), который наблюдает за молекулами и принимает решения о том, какие из них пропустить через дверь.

Если молекула с высокой скоростью движется слева направо, демон открывает дверь и пропускает её, а затем быстро закрывает. Медленные молекулы он задерживает. Со временем быстрые молекулы накапливаются с одной стороны, а медленные с другой, что приводит к созданию горячего и холодного сосудов. Такой тепловой поток можно использовать для работы двигателя, что на первый взгляд кажется нарушением второго закона термодинамики.

Однако решение парадокса заключается в том, что для управления дверью демон должен обрабатывать информацию. Для этого требуется энергия, которая преобразуется в тепло. Таким образом, учёт энергии, затраченной на обработку информации, восстанавливает согласованность с законами термодинамики. [↑](#footnote-ref-33)
34. Арвинд Муруган, Зорана Зеравчич, Майкл П. Бреннер и Станислас Лейблер, "Смеси для многообразной сборки: системы, позволяющие восстановление разнообразных хранимых структур", Proceedings of the National Academy of Sciences, том 112, № 1 (2015): 54–59. [↑](#footnote-ref-34)
35. Т. Дж. Митчисон и Л. П. Креймер, "Движение клеток на основе актина", Cell, том 84, № 3 (1996): 371–379. [↑](#footnote-ref-35)
36. Роберт Марсланд III и Джереми Инглэнд, "Активная регенерация объединяет характеристики высокой и низкой температуры в кооперативной самосборке", Physical Review E, том 98, № 2 (2018): 022411. [↑](#footnote-ref-36)
37. Оливье Девошель, Александр П. Петров, Хансйорг Ф. Зейбольд и Дэниел Х. Ротман, "Разветвление потоковых сетей", Proceedings of the National Academy of Sciences, том 109, № 51 (2012): 20832–20836. [↑](#footnote-ref-37)
38. Jeffrey E. Barrick и Richard E. Lenski, «Динамика генома во время экспериментальной эволюции», Nature Reviews Genetics, том 14, выпуск 12 (2013): 827–839. [↑](#footnote-ref-38)
39. Существует множество видов волновых возмущений, распространяющихся в пространстве (x) с течением времени **(t),** и не все они подчиняются одному и тому же волновому уравнению. Однако типичное уравнение, относящееся к такому сценарию, выглядит как с2$\frac{ δ^{2} h(x,t)}{δx\^2}+\frac{δ^{2} h(x,t)}{δt\^2}=0$, где **h(x,t)** — смещение среды от положения покоя во время вибрации, а **c** — скорость распространения волны. Решения этого уравнения включают волны, которые одновременно распространяются в пространстве с длиной волны **L** (расстояние между гребнями волны) и осциллируют вверх и вниз во времени с частотой **f** (количество колебаний в секунду). Уравнение волны требует соблюдения дисперсионного соотношения **c/L=f**, то есть чем короче длина волны (чем сильнее "скомканы" колебания), тем выше частота **f**. Обратное также верно: более быстрые осцилляции (которые звучат как более высокий тон) соответствуют движениям среды с более короткой длиной волны. [↑](#footnote-ref-39)
40. Более тонкий аспект, который мы можем заметить, заключается в том, что для эффективной работы нужна система с большим количеством состояний и "хаотичностью". Чем больше система является неоднородной коллекцией разнообразных взаимодействующих частей, тем больше вероятность, что различные "долины" в энергетическом ландшафте станут библиотекой уникальных нормальных частот, которые можно исследовать. В системах с ограниченным количеством частиц или высокой регулярностью компонентов такие резонансные частоты изменяются с трудом. [↑](#footnote-ref-40)
41. **Martin A. Nowak,** Evolutionary Dynamics (Кембридж, Массачусетс: Harvard University Press, 2006). [↑](#footnote-ref-41)
42. Зависимость скорости химической реакции от температуры и высоты энергетического барьера описывается законом Аррениуса. Согласно ему, для реакции, преодолевающей барьер высотой U при температуре T, логарифм скорости реакции R определяется как log⁡R=−aU/T+b, где a и b — константы. Поскольку логарифм скорости реакции имеет простую зависимость от U (высоты барьера) и T (температуры), это означает, что с каждым увеличением отношения U/T на единицу скорость реакции возрастает на постоянный мультипликативный фактор. Таким образом, даже небольшое изменение высоты барьера может значительно ускорить реакцию, вплоть до того, что она из состояния почти невозможной становится практически мгновенной. Например, ферменты пищеварительной системы человека катализируют разрыв пептидных связей в белках пищи, которые в чистой воде разлагались бы крайне медленно. Это позволяет организму быстро расщеплять белки до аминокислот, которые затем используются для синтеза новых белков.

Хотя уравнение Аррениуса может показаться на первый взгляд сложным, его физическая основа интуитивно понятна. Экспоненциальная зависимость от энергии и температуры связана с распределением Больцмана, поскольку вся суть заключается во взаимодействии тепловых флуктуаций и вероятности. Скорость химической реакции определяется тем, как часто случайные тепловые "толчки" помогают системе преодолевать барьер, поднимаясь к вершине, откуда она может "скатиться" вниз.

По сути, вопрос о том, как часто это происходит, сводится к изучению распределения Больцмана в каждой "долине" энергетического ландшафта. Скорость реакции по Аррениусу пропорциональна вероятности нахождения системы на самом краю долины, рядом с гребнем барьера.

Кроме того, закон Аррениуса позволяет изучать процессы в условиях нарушения симметрии обратимости времени. В термодинамическом равновесии вероятность нахождения системы в двух долинах одинакового размера определяется разницей их высот (энергий). В кольцевой цепи долин с одинаковой высотой вероятность переходов по часовой стрелке и против неё должна быть равной, и сам по себе эффект теплового равновесия не способен создать смещение в одну сторону. Однако если в системе наблюдается предпочтение в одном направлении, это означает, что добавляется внешняя энергия (или "эскалатор"), которая способствует движению, например, по часовой стрелке. Логарифм отношения скорости прямых и обратных переходов позволяет с помощью закона Аррениуса количественно оценить, сколько дополнительной работы "эскалатор" выполняет на каждом шаге. [↑](#footnote-ref-42)
43. Andreas Walther и Axel H.E. Müller, «Частицы Януса», Soft Matter, том 4, выпуск 4 (2008): 663–668. [↑](#footnote-ref-43)
44. Jeremie Palacci, Stefano Sacanna, Asher Preska Steinberg, David J. Pine и Paul M. Chaikin, «Живые кристаллы коллоидных "серферов", активируемых светом», Science, том 339, выпуск 6122 (2013): 936–940 [↑](#footnote-ref-44)
45. Steven M. Block, «Пятьдесят способов полюбить свой рычаг: моторы миозина», Cell, том 87, выпуск 2 (1996): 151–157 [↑](#footnote-ref-45)
46. Зорана Зеравчич и Майкл П. Бреннер, «Спонтанное возникновение каталитических циклов с коллоидными сферами», Proceedings of the National Academy of Sciences, 114, no. 17 (2017): 4342–4347. [↑](#footnote-ref-46)
47. Джордан М. Хоровиц и Джереми Л. Ингланд, «Спонтанная точная настройка к окружающей среде в химических реакционных сетях с множеством видов», Proceedings of the National Academy of Sciences, 114, no. 29 (2017): 7565–7570; Сумантра Саркар и Джереми Л. Ингланд, «Дизайн условий для самовоспроизведения», Physical Review E, 100, no. 2 (2019): 022414.

В нашем исследовании мы начали с физической модели, где различные типы частиц могли объединяться в кластеры, энергии которых определялись попарными взаимодействиями между типами частиц. Параметры этих взаимодействий задавались случайным образом для имитации разнообразия молекулярных комбинаций атомов. После того как энергии кластеров были известны, мы использовали закон Аррениуса для расчёта скоростей реакций, преобразующих один тип кластера в другой через обмен атомами. Эти скорости реакций позволили составить систему дифференциальных уравнений, описывающую изменение концентраций химических веществ с течением времени. Таким образом, физическая модель взаимодействий атомов стала основой для анализа кинетики системы, а затем послужила входными данными для динамической модели, позволяющей изучить, как популяции химических видов эволюционируют со временем.

Вопрос, касающийся самовоспроизведения, заключался в том, может ли динамика химических концентраций в такой системе привести к экспоненциальному росту одного или нескольких видов химических соединений, участвующих в автокаталитическом цикле. [↑](#footnote-ref-47)
48. Найлеш Вайдья и др., «Спонтанное формирование сетей среди кооперативных РНК-репликаторов», Nature, 491, no. 7422 (2012): 72. [↑](#footnote-ref-48)
49. Майкл С. Пакер и Дэвид Р. Лю, «Методы направленной эволюции белков», Nature Reviews Genetics, 16, no. 7 (2015): 379–394. [↑](#footnote-ref-49)
50. Примечательно, что многие аргументы против дарвинизма часто используют «соломенное чучело» — намеренно упрощённую и неправдоподобную модель естественного отбора, чтобы затем доказать её несостоятельность. Но это не является доказательством невозможности создания более точной модели. Как отмечают критики теории разумного замысла (ID), их неспособность предложить альтернативную модель не доказывает невозможности её существования. [↑](#footnote-ref-50)
51. Джереми Л. Ингланд, «Диссипативная адаптация в управляемой самоорганизации», Nature Nanotechnology, 10, no. 11 (2015): 919; Николай Перунов и др., «Статистическая физика адаптации», Physical Review X, 6, no. 2 (2016): 021036; Павел Чвыков и Джереми Л. Ингланд, «Минимизация беспорядка через обратную связь», Physical Review E, 97, no. 3 (2018): 032115. [↑](#footnote-ref-51)
52. Хридеш Кедия и др., «Специфическая адаптация в неупорядоченных механических сетях с бистабильными пружинами», *arXiv preprint arXiv*:1908.09332 (2019). [↑](#footnote-ref-52)
53. W. E. Moerner (ред.), Persistent Spectral Hole-Burning: Science and Applications (Берлин: Springer, 1988); B. Schiener, R. Böhmer, A. Loidl и R. V. Chamberlin, «Несогласованный спектральный хелл-бернинг в медленном диэлектрическом отклике переохлажденных жидкостей», Science, 274, № 5288 (1996): 752–754. [↑](#footnote-ref-53)
54. Койт Мауринг, Индрек Ренге и Рейн Авармаа, «Спектральный хелл-бернинг длинноволновых форм хлорофилла a в зеленеющих листьях при 5 К», FEBS Letters, 223, № 1 (1987): 165–168. [↑](#footnote-ref-54)
55. Николя Башелар, Чад Ропп, Марк Дюбуа, Ронгкуо Чжао, Юань Ван и Сян Чжан, «Появление принудительного фононного запрещённого диапазона в неравновесном псевдокристалле», Nature Materials, 16, № 8 (2017): 808. [↑](#footnote-ref-55)
56. Чад Ропп, Николя Башелар, Дэвид Барт, Юань Ван и Сян Чжан, «Диссипативная самоорганизация в оптическом пространстве», Nature Photonics, 12, № 12 (2018): 739. [↑](#footnote-ref-56)
57. Жереми Палачи, Стефано Саканна, Ашер Преска Штейнберг, Дэвид Дж. Пайн и Пол М. Чайкин, «Живые кристаллы светочувствительных коллоидных серферов», Science, 339, № 6122 (2013): 936–940. [↑](#footnote-ref-57)
58. Габриэль С. Реднер, Апарна Баскаран и Майкл Ф. Хаган, «Фазовое поведение с повторным появлением у активных коллоидов с аттракцией», Physical Review E, 88, № 1 (2013): 012305. [↑](#footnote-ref-58)
59. Тал Качман, Джереми А. Оуэн и Джереми Л. Ингланд, «Самоорганизованный резонанс при поиске разнообразного химического пространства», Physical Review Letters, 119, № 3 (2017): 038001.

Это исследование стало первым примером изучения самоорганизованного увеличения поглощения энергии через диссипативную адаптацию в управляемых системах с многими телами. Моделировалась сеть «сцепляющихся связей», которые, подобно банджикордам, более устойчивы под натяжением. Применяя колебательную силу на выбранной частоте, система находила резонансное состояние, что увеличивало поглощение энергии и стабилизировало натянутые связи. Этот процесс демонстрирует, как самоорганизация возникает благодаря стабилизации выгодных конфигураций. [↑](#footnote-ref-59)
60. Вейшун Чжун, Дэвид Дж. Шваб и Арвинд Муруган, «Ассоциативное распознавание образов через макромолекулярную самоорганизацию», Journal of Statistical Physics, 167, № 3–4 (2017): 806–826. [↑](#footnote-ref-60)
61. Т. Йонссон, К. Йонссон, Петра Йонссон и П. Нордблад, «Неравновесная динамика в трёхмерном спин-стекле», Physical Review B, 59, № 13 (1999): 8770. [↑](#footnote-ref-61)
62. Джейкоб М. Голд и Джереми Л. Ингланд, «Самоорганизованное обнаружение новизны в управляемых спин-стеклах», arXiv preprint, arXiv:1911.07216 (2019). [↑](#footnote-ref-62)
63. Кохей Накаджима, Хельмут Хаузер, Тао Ли и Рольф Пфайфер, «Обработка информации через физическое мягкое тело», Scientific Reports, 5 (2015): 10487. [↑](#footnote-ref-63)
64. Стивен Дж. Гулд и Ричард К. Левонтин, «Пандусы Сан-Марко и панглоссовская парадигма: Критика адаптационистской программы», Proceedings of the Royal Society of London. Series B. Biological Sciences, 205, № 1161 (1979): 581–598. [↑](#footnote-ref-64)
65. Очевидно, что существуют умные люди, которые, наблюдая величие хромосом, галактик и всего, что можно постичь во Вселенной, убеждаются в идее, что это — творение трансцендентного Создателя. Очевидно, что есть также множество умных людей, которые, видя те же самые явления, приходят к противоположному выводу. Так что, да, существует точка зрения, лучше всего выраженная словами из 104-го псалма царя Давида: «Как многочисленны дела Твои, Господи! Всё Ты устроил с премудростью», которая легко сочетает научные данные о Вселенной с мировоззрением, воздающим должное Богу. Однако не стоит притворяться, что эта точка зрения является неизбежным выводом для любого, кто разумно размышляет о мире и его явлениях; слишком много умных людей полагают, что идея Бога вовсе не обязательна для объяснения того, как всё устроено.

Вместе с тем попытки опровергнуть рассказ, содержащийся в еврейской Библии, или насмешливо утверждать, что нет никаких доказательств в её поддержку, равным образом выглядят и наивными, и софистическими. Библия не представляет себя в виде набора утверждений, которые можно проверить опытным путём; напротив, в некоторых аспектах, заявляя то, что может звучать как утверждения (например, что «на седьмой день Он почил»), она стремится научить новому способу интерпретации человеческой истории и личного опыта. Этот новый язык осваивается через обратный перевод: принимая за данность, что библейский текст остаётся верным своему описанию событий, даже несмотря на всё, что известно о мире, человек погружается в кропотливую работу по выстраиванию аргументов о том, что именно могло означать Писание, когда оно что-то утверждает.

Возможно, не каждый захочет заниматься этой работой, но те, кто громко насмехается, даже не попытавшись, рискуют выглядеть несколько глупо, так как их требования доказательств и подтверждений упускают суть этого подхода. [↑](#footnote-ref-65)