

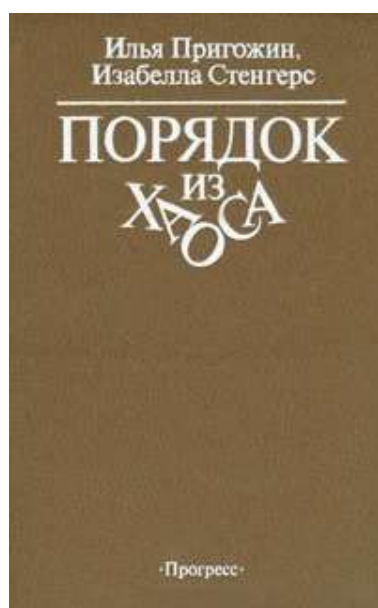
## Илья Пригожин. Порядок из хаоса

Авторы книги «Порядок из хаоса» показывают, что в машинный век традиционная наука уделяет основное внимание устойчивости, порядку, однородности и равновесию. Она изучает главным образом замкнутые системы и линейные соотношения, в которых малый сигнал на входе вызывает малый отклик на выходе. Пригожинская парадигма особенно интересна тем, что она акцентирует внимание на аспектах реальности, наиболее характерных для современной стадии ускоренных социальных изменений: разупорядоченности, неустойчивости, разнообразия, неравновесности, нелинейных соотношениях, в которых малый сигнал на входе может вызвать сколь угодно сильный отклик на выходе.

Работы Пригожина, образуют новую, всеобъемлющую теорию. В сильно упрощенном виде суть этой теории сводится к следующему. Некоторые части Вселенной действительно могут действовать как механизмы. Таковы замкнутые системы, но они в лучшем случае составляют лишь малую долю физической Вселенной. Большинство же систем, представляющих для нас интерес, открыты — они обмениваются энергией или веществом (можно было бы добавить: и информацией) с окружающей средой. К числу открытых систем, без сомнения, принадлежат биологические и социальные системы, а это означает, что любая попытка понять их в рамках механистической модели заведомо обречена на провал.

На мой взгляд книга Пригожина может быть интересна менеджерам, как еще один кирпичик формирования системного взгляда на организации (см. также [Джеймс Глейк. Хаос. Создание новой науки](#)).

Пригожин И., Стенгерс И. Порядок из хаоса: Новый диалог человека с природой. — М.: Прогресс, 1986. — 432 с.



Если воспользоваться терминологией Пригожина, то можно сказать, что все системы содержат подсистемы, которые непрерывно флуктуируют. Иногда отдельная флуктуация или комбинация флуктуаций может стать (в результате положительной обратной связи) настолько сильной, что существовавшая прежде организация не выдерживает и разрушается. В этот переломный момент (в точке бифуркации) принципиально невозможно предсказать, в каком направлении будет происходить дальнейшее развитие: станет ли состояние системы хаотическим или она перейдет на новый, более дифференцированный и более высокий уровень упорядоченности

Факты, обнаруженные и поняты в результате изучения сильно неравновесных состояний и нелинейных процессов, в сочетании с достаточно сложными системами, наделенными обратными связями, привели к созданию совершенно нового подхода, позволяющего установить связь фундаментальных наук с «периферийными» науками о жизни и, возможно, даже понять некоторые социальные процессы. (Факты, о которых идет речь, имеют не меньшее, если не большее, значение для социальных, экономических или политических реальностей. Такие слова, как «революция», «экономический кризис», «технологический сдвиг» и «сдвиг парадигмы», приобретают новые

оттенки, когда мы начинаем мыслить о соответствующих понятиях в терминах флуктуации, положительных обратных связей, диссипативных структур, бифуркаций и прочих элементов концептуального лексикона школы Пригожина.)

Подчеркивая, что необратимое время не абберация,<sup>1</sup> а характерная особенность большей части Вселенной, Пригожин и Стенгерс подрывают самые основы классической динамики. Для авторов выбор между обратимостью и необратимостью не является выбором одной из двух равноправных альтернатив. Обратимость (по крайней мере если речь идет о достаточно больших промежутках времени) присуща замкнутым системам, необратимость — всей остальной части Вселенной.

В доставшемся нам научном наследии имеются два фундаментальных вопроса, на которые нашим предшественникам не удалось найти ответ. Один из них — вопрос об отношении хаоса и порядка. Знамени 1-й закон возрастания энтропии описывает мир как непрестанно эволюционирующий от порядка к хаосу. Вместе с тем, как показывает биологическая или социальная эволюция, сложное возникает из простого. Каким образом из хаоса может возникнуть структура? Неравновесность — поток вещества или энергии — может быть источником порядка. Но существует и другой, еще более фундаментальный вопрос. Классическая или квантовая физика описывает мир как обратимый, статичный. Налицо явное противоречие между статической картиной динамики и эволюционной парадигмой термодинамики. Что такое необратимость? Что такое энтропия?

## **ВВЕДЕНИЕ. ВЫЗОВ НАУКЕ**

От каких предпосылок классической науки удалось избавиться современной науке? Как правило, от тех, которые были сосредоточены вокруг основополагающего тезиса, согласно которому на определенном уровне мир устроен просто и подчиняется обратимым во времени фундаментальным законам. Подобная точка зрения представляется нам сегодня чрезмерным упрощением. Поскольку окружающий нас мир никем не построен, перед нами возникает необходимость дать такое описание его мельчайших «кирпичиков» (т.е. микроскопической структуры мира), которое объясняло бы процесс самосборки.

Мы обнаружили, что в природе существенную роль играет далеко не иллюзорная, а вполне реальная необратимость, лежащая в основе большинства процессов самоорганизации. Обратимость и жесткий детерминизм в окружающем нас мире применимы только в простых предельных случаях. Необратимость и случайность отныне рассматриваются не как исключение, а как общее правило.

По своему характеру наша Вселенная плюралистична, комплексна. Структуры могут исчезать, но могут и возникать. Одни процессы при существующем уровне знаний допускают описание с помощью детерминированных уравнений, другие требуют привлечения вероятностных соображений. По существовавшей ранее традиции фундаментальные процессы было принято считать детерминированными и обратимыми, а процессы, так или иначе связанные со случайностью или необратимостью, трактовать как исключения из общего правила. Ныне мы повсюду видим, сколь важную роль играют необратимые процессы, флуктуации. Модели, рассмотрением которых занималась классическая физика, соответствуют, как мы сейчас понимаем, лишь предельным ситуациям. Их можно создать искусственно, поместив систему в ящик и подождя, пока она не придет в состояние равновесия. Искусственное может быть детерминированным и обратимым. Естественное же непременно содержит элементы случайности и необратимости. Это замечание приводит нас к новому взгляду на роль материи во Вселенной. Материя — более не пассивная субстанция, описываемая в рамках механистической картины мира, ей также свойственна спонтанная активность.

Ни один из вкладов в сокровищницу науки, внесенных термодинамикой, не может сравниться по новизне со знаменитым вторым началом термодинамики, с появлением которого в физику впервые вошла «стрела времени». Понятие энтропии для того и было введено, чтобы отличать обратимые процессы от необратимых: энтропия возрастает только в результате необратимых процессов. Замечательная особенность рассматриваемых нами процессов заключается в том, что при переходе от равновесных условий к сильно неравновесным мы переходим от повторяющегося и общего к уникальному и специфичному.

---

<sup>1</sup> Абберация — отклонение от нормы; ошибка, нарушение, погрешность.

В двух первых частях нашей книги мы рассматриваем два противоборствующих взгляда на физический мир: статический подход классической динамики и эволюционный взгляд, основанный на использовании понятия энтропии. Конфронтация вневременного подхода классической механики и эволюционного подхода стала неизбежной. Острому столкновению этих двух противоположных подходов к описанию мира посвящена третья часть нашей книги.

Имеется ли в структуре динамических систем нечто специфическое, позволяющее им «отличать» прошлое от будущего? Какова необходимая для этого минимальная сложность? Уже Больцман понимал, что между вероятностью и необратимостью должна существовать тесная связь. Различие между прошлым и будущим и, следовательно, необратимость могут входить в описание системы только в том случае, если система ведет себя достаточно случайным образом. Стрела времени является проявлением того факта, что будущее не задано.

Наш повседневный жизненный опыт показывает, что между временем и пространством существует коренное различие. Мы можем передвигаться из одной точки пространства в другую, но не в силах повернуть время вспять. Мы не можем переставить прошлое и будущее. Как мы увидим в дальнейшем, это ощущение невозможности обратить время приобретает теперь точный научный смысл. Допустимые («разрешенные») состояния отделены от состояний, запрещенных вторым началом термодинамики, бесконечно высоким энтропийным барьером.

## **ЧАСТЬ ПЕРВАЯ. ИЛЛЮЗИЯ УНИВЕРСАЛЬНОГО**

### **Глава 1. ТРИУМФ РАЗУМА**

Ньютон не пытался объяснить гравитацию — существование всемирного тяготения было принято Ньютоном как неоспоримый факт. Аналогичным образом любая другая дисциплина должна строиться таким образом, чтобы за ее исходную точку был принят некоторый центральный необъяснимый факт. Ободренные авторитетом Ньютона медики сочли возможным обновить виталистскую<sup>2</sup> концепцию и говорить о «жизненной силе», использование которой придало бы описанию жизненных явлений столь желанную последовательность и систематичность. Этой же цели призвано служить сродство — особая, сугубо химическая сила, якобы проявляющаяся при взаимодействии молекул.

Все остальное — не более чем изящная словесность (причем зачастую словесность ньютоновская): гармония, безраздельно царящая в мире звезд, избирательное сродство и столь же избирательная враждебность, порождающие видимость «общественной жизни» химических соединений, представляли как явления, распространяющиеся и на человеческое общество. Неудивительно поэтому, что тот период казался золотым веком классической науки. Не подлежит сомнению, однако, что золотой век классической науки миновал. Ныне мы начинаем более отчетливо видеть пределы ньютоновской рациональности. Возникает новая, более последовательная концепция науки и природы.

[Койре](#) пишет следующее: «...есть и нечто такое, за что ответственность может быть возложена на Ньютона или, точнее, не на одного Ньютона, а на всю современную науку, — раскол нашего мира на два чуждых мира». Я уже упоминал о том, что современная наука разрушила барьеры, отделявшие небо от Земли, объединила и унифицировала Вселенную. Все это так. Но я упоминал и о том, что, опрокидывая барьеры, наука подменяла наш мир качества и чувственного восприятия, мир, в котором мы живем, любим и умираем, другим миром — миром количества, воплощенной геометрии, миром, в котором, хотя он и вмещает в себя все, нет места для человека. Так мир науки — реальный мир — стал отчужденным и полностью оторванным от мира жизни. Наука не в состоянии не только объяснить этот мир, но даже оправдаться, назвав его «субъективным».

Трагедия современного разума, «разгадавшего загадку Вселенной», состоит в том, что одну загадку он заменил другой — загадкой самого себя.

---

<sup>2</sup> (от лат. *vitalis* — «жизненный») — учение о наличии в живых организмах нематериальной сверхъестественной силы, управляющей жизненными явлениями — «жизненной силы». Теория витализма постулирует, что процессы в биологических организмах зависят от этой силы, и не могут быть объяснены с точки зрения физики, химии или биохимии.

**Ньютоновский синтез.** Что кроется за энтузиазмом современников Ньютона, их убеждением в том, что тайна мироздания, истина о природе наконец открыта? Прежде всего это представление о науке как о способе воздействия на окружающий мир. Ньютоновская наука — наука активная. Одним из ее источников стали знания, накопленные средневековыми ремесленниками, строителями машин. Она дает средства для систематического воздействия на мир, для предсказания и изменения хода протекающих в природе процессов, созидания устройств и механизмов, способных обуздать и использовать на благо человека силы и материальные ресурсы природы. Появление ньютоновской системы ознаменовало триумф новой универсальности: оно позволило унифицировать то, что до Ньютона казалось разрозненным и бессвязным.

**Экспериментальный диалог.** Для того чтобы осуществить намерение познать мир недостаточно с должным почтением относиться к наблюдаемым фактам. Открытый современной наукой экспериментальный диалог с природой подразумевает активное вмешательство, а не пассивное наблюдение. Перед учеными ставится задача научиться управлять физической реальностью, вынуждать ее действовать в рамках «сценария» как можно ближе к теоретическому описанию.

Экспериментальная процедура может становиться и орудием чисто теоретического анализа. Эта ее разновидность известна под названием «мысленного эксперимента». Один из наиболее знаменитых мысленных экспериментов был предложен Эйнштейном (так называемый «поезд Эйнштейна»). Представим себе наблюдателя, едущего в поезде и измеряющего скорость света, испускаемого фонарями на обочине дороги, т.е. движущегося со скоростью  $c$  в системе отсчета, относительно которой поезд движется со скоростью  $v$ . По классической теореме сложения скоростей наблюдатель, едущий в поезде, должен был бы приписать свету, распространяющемуся в направлении движения поезда, скорость  $c - v$ . Однако классические рассуждения содержат явную нелепость, выявить которую и должен предложенный Эйнштейном мысленный эксперимент. В теории относительности скорость света выступает как универсальная постоянная природы. В любой инерциальной системе отсчета скорость света всегда одна и та же.

**Миф у истоков науки.** Основатели современной науки прозорливо усматривали в диалоге между человеком и природой важный шаг к рациональному постижению природы. Но претендовали они на гораздо большее. Галилей и те, кто пришел после него, разделяли убеждение в том, что наука способна открывать глобальные истины о природе. По их мнению, природа не только записана на математическом языке, поддающемся расшифровке с помощью надлежаще поставленных экспериментов, но и сам язык природы единствен. Отсюда уже недалеко до вывода об однородности мира и, следовательно, доступности постижения глобальных истин с помощью локального экспериментирования. Сложность природы была провозглашена кажущейся, а разнообразие природы — укладывающимся в универсальные истины, воплощенные для Галилея в математических законах движения.

**Пределы классической науки.** Какое место занимает картина мира физиков-теоретиков среди всех возможных таких картин? Благодаря использованию языка математики эта картина удовлетворяет высоким требованиям в отношении строгости и точности выражения взаимозависимостей. Но зато физик вынужден сильно ограничивать свой предмет, довольствуясь изображением наиболее простых, доступных нашему опыту явлений, тогда как все сложные явления не могут быть воссозданы человеческим умом с той точностью и последовательностью, которые необходимы физико-теоретику. Высшая аккуратность, ясность и уверенность — за счет полноты. Но какую прелесть может иметь охват такого небольшого среза природы, если наиболее тонкое и сложное малодушно оставляется в стороне?

Когда же в физику в качестве объекта положительного знания входят случайность, сложность и необратимость, мы отходим от прежнего весьма наивного допущения о существовании прямой связи между нашим описанием мира и самим миром. Объективность в теоретической физике обретает более топкое значение.

## Глава 2. УСТАНОВЛЕНИЕ РЕАЛЬНОГО

**Законы Ньютона.** Со времен Галилея одной из центральных проблем физики было описание ускорения. На языке Ньютона найти ускорение означает определить различные силы, действующие на точки рассматриваемой системы. Вторым законом Ньютона ( $F = ma$ ) утверждает, что сила,

приложенная к любой материальной точке, пропорциональна производимому ею ускорению. Триумфом ньютоновской науки явилось открытие универсальности гравитации: одна и та же сила «всемирного тяготения», или гравитации, определяет и движение планет и комет в небе, и движение тел, падающих на поверхность Земли.

Интегрирование законов движения позволяет найти траектории, по которым движутся частицы. К числу основных характеристик траекторий относятся регулярность, детерминированность и обратимость. Общие законы движения позволяют вывести из заданного начального состояния бесконечную серию состояний, проходимых системой со временем, подобно тому, как логика позволяет выводить заключения из исходных посылок. Замечательная особенность траекторий динамической системы состоит в том, что, коль скоро силы известны, одного-единственного состояния оказывается достаточно для полного описания системы — не только ее будущего, но и прошлого. Общность законов динамики уравнивается произволом в выборе начальных условий.

Выяснилось, однако, что с присущим динамике свойством обратимости связана определенная трудность, всё значение которой было в должной мере осознано лишь после создания квантовой механики: воздействие и измерение принципиально необратимы.

Всякий знает, какие нелепости возникают на экране, если пустить киноленту от конца к началу: сгоревшая дотла спичка вспыхивает ярким огнем и, пылая, превращается в полномерную спичку с нетронутой серной головкой, осколки разбитой вдребезги чернильницы сами собой собираются в целую чернильницу, внутрь которой чудесным образом втягивается лужица пролитых было чернил, толстые ветви на дереве на глазах утончаются, превращаясь в тоненькие молодые побеги. В мире классической динамики все эти события считаются столь же вероятными, как и события, отвечающие нормальному ходу явлений. Мир, в котором все траектории обратимы, — поистине странный мир.

**Движение и изменение.** Принятием законов Ньютона природа становится законопослушной, покорной и предсказуемой вместо того, чтобы быть хаотичной, нерегулярной и непредсказуемой.

**Язык динамики.** В XIX в. формулировка второго закона Ньютона была обобщена с помощью введения новой функции — гамильтониана  $H$ . Функция Гамильтона есть не что иное, как полная энергия системы, т.е. сумма ее кинетической и потенциальной энергии. Но полная энергия представлена как функция не координат и скоростей, обозначаемых, по традиции, соответственно  $q$  и  $dq/dt$ , а так называемых канонических переменных — координат и импульсов, которые принято обозначать  $q$  и  $p$ . В простейших случаях, таких, как свободная частица, между скоростью и импульсом существует явное соотношение ( $p = mdq/dt$ ), но в общем случае скорость и импульс связаны более сложной зависимостью. Одна функция (гамильтониан)  $H(p, q)$  полностью описывает динамику системы. Вид функции  $H$  несет в себе все наше эмпирическое знание системы. Зная гамильтониан, мы можем (по крайней мере в принципе) решить все возможные задачи. Например, изменения координаты и импульса во времени равны просто производным от  $H$  по  $p$  и  $q$ . Гамильтонова формулировка динамики — одно из величайших достижений в истории науки.

Канонические уравнения обратимы: обращение времени математически эквивалентно обращению скорости. Канонические уравнения консервативны: гамильтониан, выражающий полную энергию системы в канонических переменных (координатах и импульсах), сохраняется при изменениях координат и импульсов во времени. В случае гамильтоновой динамики с самого первого мгновения значений различных инвариантов движения заданы. Ничего нового не может ни «случиться», ни «произойти». Так в гамильтоновой динамике мы сталкиваемся с одним из тех драматических моментов в истории науки, когда описание природы сводится почти к статической картине.

Открытие Брунса и Пуанкаре показало, что динамические системы не изоморфны. Простые интегрируемые системы допускают разложение на невзаимодействующие подсистемы, но в общем случае исключить взаимодействия невозможно.

**Демон Лапласа.** Проблематика демона Лапласа связана не с вопросом о том, возможно ли детерминистическое предсказание хода событий в действительности, а в том, возможно ли оно *de jure*. В контексте классической динамики детерминистическое описание может быть недостижимым на практике, тем не менее оно остается пределом, к которому должна сходить последовательность все более точных описаний.

### Глава 3. ДВЕ КУЛЬТУРЫ

**Дидро и дискуссия о живом.** Дидро считал, что, прежде чем возлагать надежды на достижение самосогласованного видения мира, науке необходимо понять, что такое жизнь. В противоположность рациональной механике, утверждающей, что материальная природа есть не что иное, как инертная масса и движение, Дидро апеллирует к одному из самых древних источников вдохновения физиков, а именно: к росту, дифференциации и организации эмбриона. Может ли инертная масса, пусть даже ньютоновская, «одушевленная» силами гравитационного взаимодействия, быть отправным пунктом для организованных активных локальных структур? Зрелище развивающегося зародыша вполне достаточно, чтобы опровергнуть претензии рациональной механики на универсальность.

Протесты химиков и медиков против сведения физиками процессов жизнедеятельности к мерному тиканью механизмов и спокойному проявлению универсальных законов приобрели во времена Дидро широкое распространение. Универсальные законы применимы к живому лишь в том смысле, что они обрекают все живое на смерть и разрушение. Материя, из которой состоят живые существа, настолько хрупка, настолько легко поддается распаду, что, если бы ею управляли только универсальные законы физики, то она ни на миг не могла бы противостоять разложению и тлену.

**Критическая ратификация научного знания Кантом.** По мнению Канта, существуют два уровня реальности: феноменальный, соответствующий науке, и ноуменальный, отвечающий этике. Феноменальный порядок создается человеческим разумом. Ноуменальный порядок трансцендентален по отношению к человеческому разуму; он соответствует духовной реальности, на которую опирается этическая и религиозная жизнь человека. По Канту, необходимо ввести различие между ощущениями, воспринимаемыми нами непосредственно из внешнего мира, и объективным «рациональным» знанием. *Ignoramus et ignorabimus* — лейтмотив позитивистов<sup>3</sup>

**Новое начало.** В первой части нашей книги мы описали, с одной стороны, диалог с природой, который сделала возможным классическая наука, а с другой стороны, ненадежное положение науки в системе культуры в целом. Существует ли вывод из создавшегося довольно затруднительного положения? В этой главе мы обсудили некоторые попытки достижения альтернативных способов познания. Мы рассмотрели также позитивистскую точку зрения, которая отделяет науку от реальности.

Для древних природа была источником мудрости. Средневековая природа говорила о боге. В новые времена природа стала настолько безответной, что Кант счел необходимым полностью разделить науку и мудрость, науку и истину. Этот раскол существует на протяжении двух последних столетий. Настала пора положить ему конец. Что касается науки, то она созрела для этого. Первым шагом к возможному воссоединению знания, как нам сейчас представляется, стало создание в XIX в. теории теплоты, открытие законов, или «начал», термодинамики. Именно термодинамика претендует на роль хронологически первой «науки о сложности».

## ЧАСТЬ ВТОРАЯ. НАУКА О СЛОЖНОСТИ

### Глава 4. Энергия и индустриальный век

**Тепло — соперник гравитации.** С момента появления теории теплопроводности математика, физика и ньютоновская наука перестали быть синонимами. В физике сосуществуют две универсалии: тепло и гравитация. Более того, как был вынужден признать позднее Кант, эти две универсалии — антагонисты. Гравитация действует на инертную массу, которая подчиняется гравитации, не испытывая ее действия иным путем, кроме как через движение, которое приобретает или передает. Тепло преобразует вещество, определяет изменения состояния и вызывает изменения внутренних свойств. Закон Фурье описывает постепенное установление равновесия. Теплопроводность приводит к все большему выравниванию распределения температуры до тех пор, пока распределение во всем теле не станет однородным. Всякий знает, что выравнивание температуры — процесс необратимый.

---

<sup>3</sup> [\*Ignoramus et ignorabimus\*](#) (лат. «не знаем и не узнаем») — ставшее крылатым выражение из доклада Эмиля Дюбуа-Реймона «О пределах познания природы». Смысл выражения заключается в том, что по мнению Дюбуа-Реймона, мы никогда не перейдем положенной человеческому духу границы познания природы.

**Принцип сохранения энергии.** В 1847 г. Джоуль понял, что связи, обнаруженные между выделением или поглощением тепла, электричеством и магнетизмом, протеканием химических реакций, а также биологическими объектами, носят характер «превращения». Идея превращения, опирающаяся на постулат о количественном сохранении «чего-то» при его качественных изменениях, обобщает то, что происходит при механическом движении. Как мы уже знаем, полная энергия сохраняется, в то время как потенциальная энергия переходит, превращается в кинетическую, и наоборот. Джоуль определил общий эквивалент для физико-химических трансформаций, что позволило измерить сохраняющуюся величину. Впоследствии эта величина стала известна как «энергия». Сохранение энергии при самых различных преобразованиях, претерпеваемых физическими, химическими и биологическими системами, стало путеводным принципом в исследовании новых процессов. Самый важный вклад термодинамики в естествознание — понятие необратимости.

**Тепловые машины и стрела времени.** Мир космология Томсона описывала как машину, в которой тепло превращается в движение лишь ценой определенных необратимых потерь и бесполезной диссипации (рассеивания). Соответственно уменьшались различия в природе, способные производить механический эффект. Мир использует эти различия при переходе от одного превращения к другому и стремится к конечному состоянию теплового равновесия — «тепловой смерти».

**Рождение энтропии.** В 1865 г. Клаузиус ввел новое понятие — энтропия. Первоначально Клаузиус намеревался четко разграничить понятия сохранения и обратимости. В отличие от механических превращений, для которых обратимость и сохранение совпадают, при физико-химическом превращении энергия может сохраняться даже в том случае, если преобразование необратимо. Это, в частности, относится к трению, когда движение превращается в тепло, нам необходимо выйти за рамки закона сохранения энергии и найти способ, позволяющий выразить различие между «полезными» обменов энергии в цикле Карно и «диссипированной» энергией, теряемой необратимо. Именно такую возможность и предоставляет введенная Клаузиусом новая функция, получившая название «энтропия» и обычно обозначаемая буквой  $S$ .

Для изолированных систем будущее всегда расположено в направлении возрастания энтропии. Какая система может быть изолирована лучше, чем наша Вселенная? Эта идея легла в основу космологической формулировки первого и второго начал термодинамики, предложенной Клаузиусом в 1865 г.: энергия мира постоянна; энтропия мира стремится к максимуму. Возрастающая энтропия перестает быть синонимом потерь. Теперь она относится к естественным процессам внутри системы. Под влиянием этих процессов система переходит в термодинамическое «равновесие», соответствующее состоянию с максимумом энтропии.

Обратимые преобразования принадлежат классической науке в том смысле, что определяют возможность воздействия на систему, управления системой. Динамическим объектом можно управлять, варьируя начальные условия. Аналогичным образом термодинамическим объектом, определяемым в терминах обратимых преобразований, можно управлять, изменяя граничные условия. Необратимость проявляется в форме неуправляемых изменений, происходящих в тех случаях, когда система выходит из-под контроля.

Необратимые процессы можно рассматривать как последние остатки самопроизвольной внутренней активности, проявляемой природой, когда человек с помощью экспериментальных устройств пытается обуздать ее. Таким образом, «отрицательное» свойство — диссипация — показывает, что в отличие от динамических объектов термодинамические объекты управляемы не до конца. Иногда они «выходят из повиновения», претерпевая самопроизвольное изменение.

Рассмотрим приращение энтропии  $dS$  за короткий интервал времени  $dt$ . В случае идеальной и реальной тепловой машины ситуация совершенно различная. В первом случае  $dS$  можно полностью выразить через теплообмен между машиной и окружающей средой. Можно поставить специальные опыты, в которых система будет отдавать тепло вместо того, чтобы поглощать его. Соответствующее приращение энтропии при этом лишь изменит знак. Такую составляющую полного приращения энтропии мы обозначим  $d_e S$ . Она обратима в том смысле, что может быть и положительной, и отрицательной. В реальных машинах мы сталкиваемся с совершенно иной ситуацией. В них, помимо обратимого теплообмена, происходят необратимые процессы: тепловые потери, трение и т.д. Они приводят к увеличению энтропии, или производству энтропии, внутри системы. Увеличение

энтропии, которое мы обозначим  $d_i S$ , не может изменять знак при обращении теплообмена с внешним миром. Как все необратимые процессы (например, теплопроводность), производство энтропии всегда происходит в одном и том же направлении. Иначе говоря, величина  $d_i S$  может быть только положительной или обращаться в нуль в отсутствие необратимых процессов.

Для термодинамической системы все изменения не эквивалентны. В этом и состоит физический смысл разложения  $dS = d_e S + d_i S$ . Самопроизвольное изменение  $d_i S$ , направленное к равновесию, отличается от изменения  $d_e S$ , определяемого и управляемого варьированием граничных условий (например, температуры окружающей среды). В случае изолированной системы равновесие выступает в роли притягивающего множества, или «аттрактора», неравновесных состояний. Следовательно, наше первоначальное утверждение допускает обобщение: эволюция к состоянию-аттрактору отличается от всех других изменений, в особенности от изменений, обусловленных варьированием граничных условий.

В природе невозможны те процессы, при которых природа дает меньшее предпочтение конечному состоянию, чем начальному. Предельный случай представляют обратимые процессы; в них природа испытывает одинаковое предпочтение как к начальному, так и к конечному состоянию, и поэтому переход из одного состояния в другое может происходить в обоих направлениях. Сколь чуждым выглядит такой язык по сравнению с языком динамики! В динамике система изменяется вдоль заданной раз и навсегда траектории, не забывая начальную точку (так как начальные условия определяют всю траекторию при любых значениях времени). В случае же изолированной системы все неравновесные ситуации порождают эволюцию к равновесному состоянию одного и того же типа. К моменту достижения равновесия система забывает свои начальные условия, т.е. способ, которым она была приготовлена.

Мы сталкиваемся, таким образом, с двумя принципиально различными описаниями: динамикой, применимой к миру движения, и термодинамикой, наукой о сложных системах, наделенных внутренней способностью эволюционировать в сторону увеличения энтропии.

**Принцип порядка Больцмана.** Второе начало термодинамики содержит два принципиально важных элемента: 1) «негативный», выражающий запрет на некоторые процессы, т.е. их невозможность (тепло может распространяться от горячего источника к холодному, но не от холодильника к нагревателю); 2) «положительный», конструктивный. Второй элемент является следствием первого: запрет на некоторые процессы позволяет нам ввести функцию (энтропию), монотонно возрастающую для изолированных систем. Энтропия ведет себя как аттрактор для изолированных систем.

Проблемы перехода от микроскопического уровня к макроскопическому оказались необычайно плодотворными для физики в целом. Первым вызов принял Больцман. Тонкая физическая интуиция подсказывала ему, что необходимо выработать какие-то новые понятия, которые позволили бы обобщить физику траекторий, распространив ее на системы, описываемые термодинамикой. Следуя по стопам Максвелла, Больцман принялся искать концептуальные новации в теории вероятности.

Больцман первым понял, что необратимое возрастание энтропии можно было бы рассматривать как проявление все увеличивающегося молекулярного хаоса, постепенного забывания любой начальной асимметрии, поскольку асимметрия приводит к уменьшению числа комплексов по сравнению с состоянием, отвечающим максимальному значению вероятности  $P$ . Придя к такому выводу, Больцман решил отождествить энтропию  $S$  с числом комплексов: каждое макроскопическое состояние энтропия характеризует числом способов, которым оно может быть достигнуто. Знаменитое соотношение Больцмана  $S = k \ln P^4$  выражает ту же идею количественно. Коэффициент пропорциональности  $k$  в этой форме — универсальная постоянная, известная под названием «постоянная Больцмана». Результаты Больцмана означают, что необратимое термодинамическое изменение есть изменение в сторону более вероятных состояний и что состояние-аттрактор есть макроскопическое состояние, соответствующее максимуму вероятности.

Забывание начальных условий возможно потому, что, как бы ни эволюционировала система, она, в конечном счете, перейдет в одно из микроскопических состояний, соответствующих макроскопическому состоянию хаоса и максимальной симметрии, поскольку именно такие

---

<sup>4</sup> Логарифм в этом выражении свидетельствует о том, что энтропия — величина аддитивная  $S_{1+2} = S_1 + S_2$ , тогда как число комплексов  $P$  мультипликативно  $P_{1+2} = P_1 * P_2$ .



макроскопические состояния составляют подавляющее большинство всех возможных микроскопических состояний. Коль скоро наиболее вероятное состояние достигнуто, система отклоняется от него лишь на небольшие расстояния и на короткие промежутки времени. Иначе говоря, система лишь флуктуирует около состояния–аттрактора.

**Карно и Дарвин.** Равновесные структуры можно рассматривать как результат статистической компенсации активности микроскопических элементов (молекул, атомов). На глобальном уровне равновесные структуры, по определению, инертны. По той же причине они «бессмертны»: коль скоро равновесная структура образовалась, ее можно изолировать и поддерживать бесконечно долго без дальнейшего взаимодействия с окружающей средой. Но при изучении биологической клетки или города мы сталкиваемся с совершенно другой ситуацией: эти системы не только открыты, но и существуют только потому, что они открыты. Их питают потоки вещества и энергии, которые поступают из внешнего мира. Мы можем изолировать кристалл, но если города и клетки отрезать от окружающей среды, они погибнут.

Как, например, совместить дарвиновскую эволюцию (статистический отбор редких событий) со статистическим исчезновением всех индивидуальных особенностей, всех редких событий, о котором говорит Больцман? Интерпретация Больцмана влечет за собой забывание начальных условий, «разрушение» начальных структур, тогда как дарвиновская эволюция ассоциируется с самоорганизацией, с неуклонно возрастающей сложностью.

Равновесная термодинамика была первым ответом физики на проблему сложности природы. Этот ответ получил свое выражение в терминах диссипации энергии, забывания начальных условий и эволюции к хаосу. Какое значение имеет эволюция живых существ в мире, описываемом термодинамикой и все более беспорядочном? Какова связь между термодинамическим временем, обращенным к равновесию, и временем, в котором происходит эволюция к все возрастающей сложности?

## Глава 5. Три этапа в развитии термодинамики

**Поток и сила.** Приращение энтропии допускает разложение в сумму двух членов: члена  $d_e S$ , связанного с обменом между системой и остальным миром, и члена  $d_i S$ , описывающего производство энтропии вследствие необратимых процессов внутри системы. Второй член всегда положителен, за исключением термодинамического равновесия, когда он обращается в нуль. Для изолированной системы ( $d_e S = 0$ ) состояние равновесия соответствует состоянию с максимумом энтропии.

Могут ли химические процессы дать нам ключ к постижению различия между поведением кристалла и клетки? Нельзя не отметить принципиальное концептуальное различие между физикой и химией. В классической физике мы можем, по крайней мере, представлять себе обратимые процессы, такие, как движение маятника без трения. Пренебрежение необратимыми процессами в динамике всегда соответствует идеализации, но, по крайней мере, в некоторых случаях эта идеализация разумна. В химии все обстоит совершенно иначе. Процессы, изучением которых она занимается (химические превращения, характеризуемые скоростями реакций), необратимы. По этой причине химию невозможно свести к лежащей в основе классической или квантовой механики идеализации, в которой прошлое и будущее играют эквивалентные роли.

**Линейная термодинамика.** Линейная термодинамика описывает стабильное, предсказуемое поведение систем, стремящихся к минимальному уровню активности, совместимому с питающими их потоками. Из того, что линейная неравновесная термодинамика так же, как и равновесная термодинамика, допускает описание с помощью потенциала, а именно производства энтропии, следует, что и при эволюции к равновесию, и при эволюции к стационарному состоянию система «забывает» начальные условия. Каковы бы ни были начальные условия, система рано или поздно перейдет в состояние, определяемое граничными условиями.

**Вдали от равновесия.** До тех пор пока состояние–аттрактор определяется минимумом потенциала (например, производство энтропии), его устойчивость гарантирована. Правда, флуктуация может вывести систему из этого минимума. Но тогда второе начало термодинамики вынудит систему вернуться в исходный минимум. Таким образом, существование термодинамического потенциала

делает систему «невосприимчивой» к флуктуациям. Располагая потенциалом, мы описываем «стабильный мир», в котором системы, эволюционируя, переходят в статичное состояние, установленное для них раз и навсегда. Но когда термодинамические силы, действуя на систему, становятся достаточно «большими» и вынуждают ее покинуть линейную область, гарантировать устойчивость стационарного состояния или его независимость от флуктуации было бы опрометчиво.

В таких состояниях определенные флуктуации вместо того, чтобы затухать, усиливаются и завладевают всей системой, вынуждая ее эволюционировать к новому режиму, который может быть качественно отличным от стационарных состояний, соответствующих минимуму производства энтропии. Такого рода явления хорошо известны в гидродинамике — теории течений. Например, давно известно, что при определенной скорости ламинарное течение может смениться турбулентным.

Долгое время турбулентность отождествлялась с хаосом или шумом. Сегодня мы знаем, что это не так. Хотя в макроскопическом масштабе турбулентное течение кажется совершенно беспорядочным, или хаотическим, в микроскопическом масштабе оно высокоорганизовано. Множество пространственных и временных масштабов, на которых разыгрывается турбулентность, соответствует когерентному поведению миллионов и миллионов молекул. С этой точки зрения переход от ламинарного течения к турбулентности является процессом самоорганизации. Принцип порядка Больцмана устанавливает связь энтропии с вероятностью (числом комплексов  $P$ ). Применимо ли это соотношение в данном случае? Когерентное движение означает, что многие молекулы движутся почти с одинаковыми скоростями (разброс скоростей мал). Такому распределению соответствует столь малое число комплексов  $P$ , что вероятность возникновения самоорганизации почти равна нулю. В сильно неравновесных условиях понятие вероятности, лежащее в основе больцмановского принципа порядка, становится неприменимым: наблюдаемые структуры не соответствуют максимуму комплексов. Тенденция к выравниванию и «забыванию» начальных условий перестает быть общей тенденцией.

Мы ввели новое понятие — *диссипативная структура*, чтобы подчеркнуть тесную и на первый взгляд парадоксальную взаимосвязь, существующую в таких ситуациях, с одной стороны, между структурой и порядком, а с другой — между диссипацией, или потерями.

**За порогом химической неустойчивости.** Еще раз подчеркнем, как сильно спонтанное образование пространственных структур противоречит законам равновесной физики и принципу порядка Больцмана. Число комплексов, соответствующих таким структурам, чрезвычайно мало по сравнению с числом комплексов, отвечающих равномерному распределению. Но неравновесные процессы могут приводить к ситуациям, кажущимся немыслимыми с классической точки зрения.

**Первое знакомство с молекулярной биологией.** Образование колоний коллективных амёб — типичный пример того, что можно было бы назвать «порядком через флуктуации»: возникновение «центра притяжения», испускающего циклическую АМФ,<sup>5</sup> сигнализирует о потере устойчивости нормальной питательной среды, т.е. об исчерпании запаса питательных веществ. То, что при нехватке пищевого ресурса любая амёба может начать испускание химических сигналов — циклической АМФ — и, таким образом, стать «центром притяжения» для остальных амёб, соответствует случайному характеру флуктуации. В данном случае флуктуация усиливается и организует среду.

**Бифуркации и нарушение симметрии.** Рассмотрим более подробно, как возникает самоорганизация и какие процессы начинают происходить, когда ее порог оказывается превзойденным. В равновесном или слабо неравновесном состоянии существует только одно стационарное состояние, зависящее от значений управляющих параметров. Обозначим управляющий параметр через  $\lambda$  (им может быть, например, концентрация вещества  $B$  в брюсселяторе.<sup>6</sup> Проследим за тем, как изменяется состояние системы с возрастанием значения  $B$ . Увеличивая концентрацию  $B$ , мы как бы уводим систему все дальше и дальше от равновесия. При некотором значении  $B$  мы достигаем

---

<sup>5</sup> Циклическая АМФ (цАМФ) — вещество, встречающееся во многих биохимических процессах, например в процессах гормональной регуляции.

<sup>6</sup> Брюсселятор — нелинейная модель, придуманная Пригожиным; названа в честь города Брюссель, где он работал.

порога устойчивости термодинамической ветви. Обычно это критическое значение называется *точкой бифуркации*.

Рассмотрим некоторые типичные бифуркационные диаграммы. В точке бифуркации  $B$  термодинамическая ветвь становится неустойчивой относительно флуктуации (рис. 1). При критическом значении  $\lambda_c$  управляющего параметра  $\lambda$  система может находиться в трех различных стационарных состояниях:  $C$ ,  $E$  и  $D$ . Два из них устойчивы, третье неустойчиво. Очень важно подчеркнуть, что поведение таких систем зависит от их предыстории. Начав с малых значений управляющего параметра  $\lambda$  и медленно увеличивая их, мы с большой вероятностью опишем траекторию  $ABC$ . Наоборот, начав с больших значений концентрации  $X$  и поддерживая постоянным значение управляющего параметра  $\lambda$ , мы с высокой вероятностью придем в точку  $D$ . Таким образом, конечное состояние зависит от предыстории системы. До сих пор история использовалась при интерпретации биологических и социальных явлений. Совершенно неожиданно выяснилось, что предыстория может играть роль и в простых химических процессах.

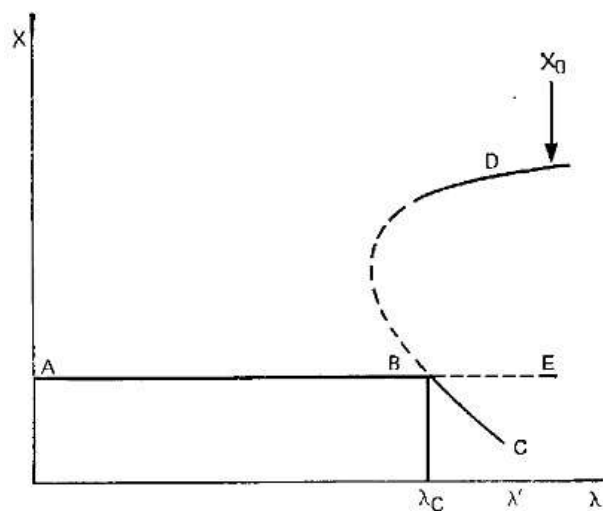


Рис. 1. Бифуркационная диаграмма. Стационарные значения переменной  $X$  представлены на диаграмме как функции параметра бифуркации  $\lambda$ . Сплошные линии соответствуют устойчивым, штриховые — неустойчивым стационарным состояниям. Чтобы достичь ветви  $D$ , необходимо выбрать начальную концентрацию  $X_0$  выше значений  $X$ , соответствующую ветви  $E$ .

Рассмотрим бифуркационную диаграмму, изображенную на рис. 2. От предыдущей диаграммы она отличается тем, что в точке бифуркации появляются два устойчивых решения. В связи с этим, естественно, возникает вопрос: по какому пути пойдет дальнейшее развитие системы после того, как мы достигнем точки бифуркации? У системы имеется «выбор»: она может отдать предпочтение одной из двух возможностей, соответствующих двум неравномерным распределениям концентрации  $X$  в пространстве.

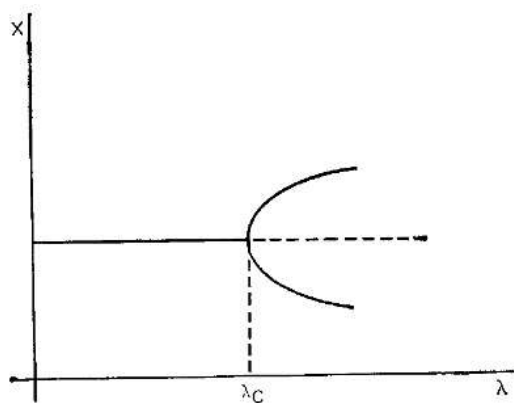


Рис. 2. Симметричная бифуркационная диаграмма.  $X$  как функция параметра бифуркации  $\lambda$ . При  $\lambda < \lambda_c$  существует только одно стационарное состояние, которое устойчиво. При  $\lambda > \lambda_c$  существуют два стационарных состояния при любом значении  $X$  (прежнее устойчивое стационарное состояние теряет устойчивость).

**Каскады бифуркаций и переходы к хаосу.** В некоторых случаях последовательность бифуркаций приводит к необратимой эволюции и детерминированность характеристических частот порождает все большую случайность, обусловленную огромным числом частот, участвующих в процессе. Сравнительно недавно внимание ученых привлек необычайно простой путь к хаосу, получивший название последовательность Фейгенбаума. Обнаруженная Фейгенбаумом закономерность относится к любой системе, поведение которой характеризуется весьма общим свойством, а именно: в определенной области значений параметров система действует в периодическом режиме с периодом  $T$ ; при переходе через порог период удваивается и становится равным  $2T$ , при переходе через следующий порог период в очередной раз удваивается и становится равным  $4T$  и т.д. Таким образом, система характеризуется последовательностью бифуркаций удвоения периода. Последовательность Фейгенбаума — один из типичных маршрутов, ведущих от простого периодического режима к сложному аperiodическому, наступающему в пределе при бесконечном удвоении периода. Фейгенбаум открыл, что этот маршрут характеризуется универсальными постоянными, значения которых не зависят от конкретных особенностей механизма, коль скоро система обладает качественным свойством удвоения периода. (Подробнее о работе Фейгенбаума см. [Джеймс Глейк. Хаос. Создание новой науки.](#))

При значении управляющего параметра порядка  $\lambda_c$  система может находиться в большом числе устойчивых и неустойчивых режимов, «историческая» траектория, по которой эволюционирует система при увеличении управляющего параметра характеризуется чередованием устойчивых областей, где доминируют детерминистические законы, и неустойчивых областей вблизи точек бифуркации, где перед системой открывается возможность выбора одного из нескольких вариантов будущего. И детерминистический характер кинетических уравнений, позволяющих вычислить заранее набор возможных состояний и определить их относительную устойчивость, и случайные флуктуации, «выбирающие» одно из нескольких возможных состояний вблизи точки бифуркации, теснейшим образом взаимосвязаны. Эта смесь необходимости и случайности и составляет «историю» системы.

**От Евклида к Аристотелю.** Одной из наиболее интересных особенностей диссипативных структур является их когерентность. Система ведет себя как единое целое и как если бы она была вместилищем далекодействующих сил. Несмотря на то что силы молекулярного взаимодействия являются короткодействующими (действуют на расстояниях порядка  $10^{-8}$  см), система структурируется так, как если бы каждая молекула была «информирована» о состоянии системы в целом. Жизнь — результат спонтанной самоорганизации, происходящей при благоприятных условиях.

Сильно неравновесная система может быть названа организованной не потому, что в ней реализуется план, чуждый активности на элементарном уровне или выходящий за рамки первичных проявлений активности, а по противоположной причине: усиление микроскопической флуктуации, происшедшей в «нужный момент», приводит к преимущественному выбору одного пути реакции из ряда априори одинаково возможных. Следовательно, при определенных условиях роль того или иного индивидуального режима становится решающей. Обобщая, можно утверждать, что поведение «в среднем» не может доминировать над составляющими его элементарными процессами. В сильно неравновесных условиях процессы самоорганизации соответствуют тонкому взаимодействию между случайностью и необходимостью, флуктуациями и детерминистическими законами. Мы считаем, что вблизи бифуркаций основную роль играют флуктуации или случайные элементы, тогда как в интервалах между бифуркациями доминируют детерминистические аспекты.

## Глава 6. ПОРЯДОК ЧЕРЕЗ ФЛУКТУАЦИИ

**Флуктуации и химия.** От детерминистических, обратимых процессов физика движется к стохастическим и необратимым процессам. Это изменение перспективы оказывает сильнейшее влияние на химию. Химические процессы, в отличие от траекторий классической динамики, соответствуют необратимым процессам. Химические реакции приводят к производству энтропии. Между тем классическая химия продолжает опираться на детерминистическое описание химической эволюции. Основным «оружием» теоретиков в химической кинетике являются дифференциальные уравнения, которым удовлетворяют концентрации веществ, участвующих в реакции. Зная эти концентрации в некоторый начальный момент времени (а также соответствующие граничные

условия, если речь идет о явлениях, зависящих от пространственных переменных, например о диффузии), мы можем вычислить их в последующие моменты времени. Интересно отметить, что такой детерминистический взгляд на химию перестает соответствовать действительности, стоит лишь перейти к сильно неравновесным процессам.

Когда система, эволюционируя, достигает точки бифуркации, детерминистическое описание становится непригодным. Флуктуация вынуждает систему выбрать ту ветвь, по которой будет происходить дальнейшая эволюция системы. Переход через бифуркацию — такой же случайный процесс, как бросание монеты. Возможно только статистическое описание. Такая ситуация в корне меняет традиционное представление об отношении между микроскопическим уровнем, описываемым в терминах атомов и молекул, и макроскопическим уровнем, описываемым в терминах таких глобальных переменных, как концентрация. Во многих случаях флуктуации вносят лишь малые поправки.

В качестве примера рассмотрим газ,  $N$  молекул которого заключены в сосуд объемом  $V$ . Разделим этот объем на две равные части. Чему равно число молекул  $X$  в одной из них? Здесь  $X$  — «случайная» переменная, и можно ожидать, что ее значение достаточно близко к  $N/2$ . Основная теорема теории вероятностей (так называемый закон больших чисел) позволяет оценить ошибку, вносимую флуктуациями. По существу, закон больших чисел утверждает, что при измерении  $X$  мы можем ожидать значение порядка  $N/2 \pm \sqrt{N/2}$ . При большом  $N$  ошибка, вносимая флуктуациями, может быть также большой, но относительная ошибка, вносимая флуктуациями, стремится к нулю при больших  $N$ . Как только система становится достаточно большой, закон больших чисел позволяет отличать средние значения от флуктуации (последние становятся пренебрежимо малыми).

В случае неравновесных процессов встречается прямо противоположная ситуация. Флуктуации определяют глобальный исход эволюции системы. Вместо того чтобы оставаться малыми поправками к средним значениям, флуктуации существенно изменяют средние значения.

Некоторым читателям, должно быть, известны соотношения неопределенности Гейзенберга, выражающие несколько неожиданным образом вероятностный аспект квантовой теории. Возможность одновременного измерения координат и импульса в квантовой теории отпадает, тем самым нарушается и классический детерминизм. Считалось, однако, что это никак не сказывается на описании таких макроскопических объектов, как живые системы. Но роль флуктуаций в сильно неравновесных системах показывает, что это не так. Случайность остается весьма существенной и на макроскопическом уровне.

**Флуктуации и корреляции.** Закон больших чисел позволяет нам вычислять корреляции между числом молекул  $X$  в двух точках пространства, находящихся на заданном расстоянии друг от друга. Как показывают вычисления, в равновесных условиях такая корреляция не существует. Вероятность одновременно найти молекулу  $X$  в точке  $r$  и молекулу  $X'$  в точке  $r'$  (отличной от точки  $r$ ) равна произведению вероятности найти молекулу  $X$  в точке  $r$  и вероятности найти молекулу  $X'$  в точке  $r'$  (мы рассматриваем случай, когда расстояние между точками  $r$  и  $r'$  велико по сравнению с радиусом межмолекулярного взаимодействия). Один из наиболее неожиданных результатов недавних исследований состоял в том, что в неравновесной области ситуация резко изменяется. Появляются дальнедействующие корреляции. Частицы, находящиеся на макроскопических расстояниях друг от друга, перестают быть независимыми. «Отзвуки» локальных событий разносятся по всей системе.

Дальнедействующие корреляции организуют систему еще до того, как происходит макроскопическая бифуркация. Мы снова возвращаемся к одной из главных идей нашей книги: к неравновесности как источнику порядка. В данном случае ситуация особенно ясна. В равновесном состоянии молекулы ведут себя независимо: каждая из них игнорирует остальные.

Активность материи связана с неравновесными условиями, порождаемыми самой материей.

**Усиление флуктуации.** Как показывают теоретические исследования и численное моделирование, критические размеры ядра возрастают с эффективностью механизмов диффузии, связывающих между собой все области системы. Иначе говоря, чем быстрее передается сигнал по «каналам связи» внутри системы, тем выше процент безрезультатных флуктуации и, следовательно, тем устойчивее система. Этот аспект проблемы критического размера означает, что в подобных ситуациях «внешний мир», т.е. все, что окружает флуктуирующую область, всегда стремится погасить флуктуации. Затухнут

ли флуктуации или усилятся, зависит от эффективности «канала связи» между флуктуирующей областью и внешним миром. Таким образом, критические размеры определяются конкуренцией между «интегративной силой» системы и химическими механизмами, приводящими к усилению флуктуации. Описанная нами модель применима, в частности, к результатам, полученным в последнее время *in vitro*<sup>7</sup> при экспериментальных исследованиях зарождения раковых опухолей. В этих исследованиях отдельная раковая клетка рассматривается как флуктуация, способная спонтанно и непрерывно появляться и размножаться, посредством репликации. Возникнув, раковая клетка сталкивается с популяцией цитотоксических клеток и либо погибает, либо выживает. В зависимости от значений различных параметров, характеризующих процессы репликации и гибели раковых клеток, мы можем предсказывать либо регресс, либо разрастание опухоли.

Вопрос о пределах сложности системы поднимался довольно часто. Действительно, чем сложнее система, тем более многочисленны типы флуктуаций, угрожающих ее устойчивости. Позволительно, однако, спросить, как же в таком случае существуют такие сложные системы, какими является экологическая или социальная структура человеческого общества? Каким образом им удается избежать перманентного хаоса? Частичным ответом на подобные вопросы может быть ссылка на стабилизирующее влияние связи между частями систем, процессов диффузии. В сложных системах, где отдельные виды растений, животных и индивиды вступают между собой в многочисленные и разнообразные взаимодействия, связь между различными частями системы не может не быть достаточно эффективной. Между устойчивостью, обеспечиваемой связью, и неустойчивостью из-за флуктуации имеется конкуренция. От исхода этой конкуренции зависит порог устойчивости.

**Структурная устойчивость.** В нашей книге отношению между микроскопическим и макроскопическим уделяется немало внимания. Одной из наиболее важных проблем в эволюционной теории является возникающая в итоге обратная связь между макроскопическими структурами и микроскопическими событиями: макроскопические структуры, возникая из микроскопических событий, должны были бы в свою очередь приводить к изменениям в микроскопических механизмах. Как ни странно, но в настоящее время наиболее понятные случаи относятся к ситуациям, возникающим в человеческом обществе. Когда мы прокладываем дорогу или строим мост, мы можем предсказать, как это скажется на поведении окрестного населения, а оно в свою очередь определяет изменения в характере и способах связи внутри региона. Такие взаимосвязанные процессы порождают очень сложные ситуации, и это обстоятельство необходимо сознавать, приступая к их моделированию.

**Логистическая эволюция.** Понятие структурной устойчивости находит широкое применение в социальных проблемах. Следует, однако, подчеркнуть, что всякий раз речь идет о сильном упрощении реальной ситуации, описываемой в терминах конкуренции между процессами саморепликации в среде с ограниченными пищевыми ресурсами. В экологии классическое уравнение, описывающее такую проблему, называется *логистическим уравнением*. Оно описывает, как эволюционирует популяция из  $N$  особей с учетом рождаемости, смертности и количества ресурсов, доступных популяции. Логистическое уравнение можно представить в виде  $dN/dt = rN(K-N) - mN$ , где  $r$  и  $m$  — характерные постоянные рождаемости и смертности,  $K$  — «несущая способность» окружающей среды. При любом начальном значении  $N$  система со временем выходит на стационарное значение  $N = K - m/r$ , зависящее от разности между несущей способностью среды и отношением постоянных смертности и рождаемости. При достижении этого стационарного значения наступает насыщение: в каждый момент времени рождается столько индивидов, сколько их погибает.

---

<sup>7</sup> *In vitro* (лат. «в стекле») — это технология выполнения экспериментов, когда опыты проводятся «в пробирке» — вне живого организма. Этот термин противопоставляется термину *in vivo* — эксперимент на живом организме (на человеке).

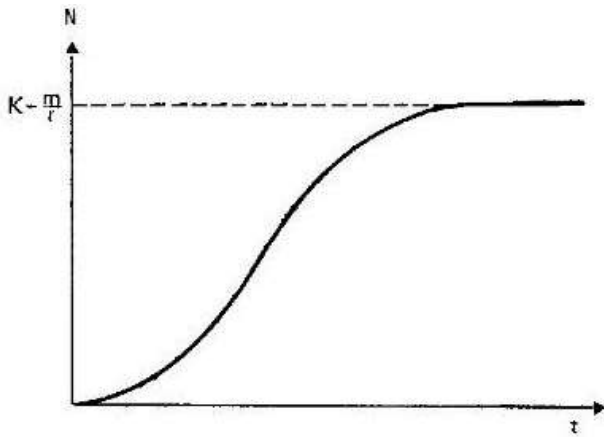


Рис. 3. Эволюция популяции  $N$  как функция времени  $t$ , описываемая логистической кривой. Стационарное состояние  $N = 0$  неустойчиво, а стационарное состояние  $N = K - m/r$  устойчиво относительно флуктуации величины  $N$

Мэй обратил внимание на одну замечательную особенность таких уравнений: несмотря на их простоту, они допускают необычайно много решений. При значениях параметра  $0 < r < 2$  наблюдается монотонное приближение к равновесию. При значениях параметра  $2 < r < 2,444$  возникает предельный цикл: наблюдается периодический режим с двухлетним периодом. При еще больших значениях параметра  $r$  возникают четырех-, восьмилетние и т.д. циклы, пока периодические режимы не переходят (при значениях  $r$  больше 2,57) в режим, который может быть назван только хаотическим. Мы имеем здесь дело с переходом к хаосу через серию бифуркаций удвоения периода. Возникает ли такой хаос в природе? Как показывают последние исследования, параметры, характеризующие реальные популяции в природе, не позволяют им достигать хаотической области.

**Моделирование сложности.** Несмотря на свою простоту, наша модель довольно точно передает некоторые особенности эволюции сложных систем. В частности, она проливает свет на природу трудностей «управления» развитием, зависящим от большого числа взаимодействующих элементов. Каждое отдельное действие или локальное вмешательство в систему обретает коллективный аспект, который может повлечь за собой совершенно неожиданные глобальные изменения. В настоящее время мы еще мало знаем о наиболее вероятной реакции системы на то или иное изменение. Очень часто отклик системы на возмущение оказывается противоположным тому, что подсказывает нам наша интуиция. Наше состояние обманутых ожиданий в этой ситуации хорошо отражает введенный в Массачусетском технологическом институте термин *контринтуитивный*.<sup>8</sup>

Например, программа ликвидации трущоб вместо того, чтобы улучшить, еще более ухудшает ситуацию. Новые здания, построенные на месте снесенных, привлекают в район большее число людей, но если их занятость не обеспечивается, то они продолжают оставаться бедными, а их жилища становятся еще более перенаселенными. Мы приучены мыслить в терминах линейной причинности, но теперь нуждаемся в новых «средствах мышления».

Взять хотя бы различие, проводимое экологами между  $K$ -стратегиями и  $r$ -стратегиями ( $K$  и  $r$  – параметры, входящие в логистическое уравнение). Типичной для популяции жертв эволюцией является увеличение рождаемости  $r$ , а для популяции хищников – совершенствование способов ловли жертв, т.е. увеличение коэффициента  $K$ . Но повышение  $K$  в рамках логистической модели влечет за собой последствия, выходящие за круг явлений, описываемых логистическими уравнениями.  $K$ -стратегия подразумевает, что индивид все более повышает свою способность обучаться на опыте и хранить накопленную информацию в памяти. Иначе говоря, индивиды становятся все более сложными и со все более долгим периодом созревания и обучения. В свою очередь это означает, что индивиды становятся все более «ценными», представляющими более крупные вложения «биологического капитала» и уязвимыми на протяжении более продолжительного периода. Развитие «социальных» и «семейных» связей является, таким образом, логическим следствием  $K$ -стратегии.

<sup>8</sup> Джамшид Гараедаги в книге [Системное мышление. Как управлять хаосом и сложными процессами](#) говорит о контринтуитивности, как об одном из основных системных принципов (наряду с открытостью, целеустремленностью, многомерностью и эмерджентностью).

К моделированию сложных явлений следует относиться с осторожностью: в сложных системах дефиниция самих сущностей и взаимодействия между ними в процессе эволюции могут претерпевать изменения. Не только каждое состояние системы, но и само определение системы в том виде, в каком ее описывает модель, обычно нестабильно.

**Открытый мир.** Традиционная интерпретация биологической и социальной эволюции весьма неудачно использует понятия и методы, заимствованные из физики, — неудачно потому, что они применимы в весьма узкой области физики и аналогия между ними и социальными или экономическими явлениями лишена всякого основания. Первый пример тому — парадигма оптимизации. И управление человеческим обществом, и действие селективных «воздействий» на систему направлены на оптимизацию тех или иных аспектов поведения или способов связи, но было бы опрометчиво видеть в оптимизации ключ к пониманию того, как выживают популяции и индивиды. Те, кто так думает, рискуют впасть в ошибку, принимая причины за следствия, и наоборот. Модели оптимизации игнорируют и возможность радикальных преобразований (т.е. преобразований, меняющих самую постановку проблемы и тем самым характер решения, которое требуется найти), и инерциальные связи, которые, в конечном счете, могут вынудить систему перейти в режим функционирования, ведущий к ее гибели.

Подобно доктринам, аналогичным «невидимой направляющей руке» Адама Смита, или другим определениям прогресса в терминах критериев максимизации или минимизации, модели оптимизации рисуют утешительную картину природы как всемогущего и рационального калькулятора, а также строго упорядоченной истории, свидетельствующей о всеобщем неукоснительном прогрессе. Для того чтобы восстановить и инерцию, и возможность неожиданных событий, т.е. восстановить открытый характер истории, необходимо признать ее фундаментальную неопределенность.

## ЧАСТЬ ТРЕТЬЯ. ОТ БЫТИЯ К СТАНОВЛЕНИЮ

### Глава 7. Переоткрытие времени

**Возникновение квантовой механики.** Первой физической теорией, действительно порвавшей с прошлым, стала квантовая механика. Она не только поместила нас в природу, но и присвоила нам атрибут «тяжелые», т.е. состоящие из макроскопически большого числа атомов. Дабы придать большую наглядность физическим следствиям из существования такой универсальной постоянной, как скорость света, Эйнштейн вообразил себя летящим верхом на фотоне. Но, как показала квантовая механика, мы слишком тяжелы для того, чтобы ездить верхом на фотонах или электронах.

Открытие дискретности, или квантованности, энергии оставалось вне связи с другими физическими явлениями до тех пор, пока Эйнштейн не предложил первую общую интерпретацию постоянной Планка. Эйнштейн понял, к сколь далеко идущим последствиям приводит открытие Планка для природы света, и выдвинул радикально новое понятие: дуализм волна — частица (для света).

Световая волна характеризуется частотой  $\nu$  и длиной волны  $\lambda$ . Постоянная Планка позволяет переходить от частоты и длины волны к таким механическим величинам, как энергия  $\epsilon$  и импульс  $p$ . Соотношения между  $\nu$  и  $\lambda$ , а также между  $\epsilon$  и  $p$  очень просты ( $\epsilon = h\nu$ ,  $p = h/\lambda$ ), и оба содержат постоянную Планка  $h$ . Через двадцать лет после Эйнштейна Луи де Бройль обобщил дуализм волна — частица со света на материю. Это открытие послужило исходным пунктом современной формулировки квантовой механики. Атом (и это весьма существенно!) может находиться лишь на дискретных энергетических уровнях, соответствующих различным орбитам электронов.

Основная идея квантовой механики состоит в том, что гамильтониан так же, как и другие величины классической механики, например координаты  $q$  или импульсы  $p$ , надлежит рассматривать как операторы.

**Соотношения неопределенности Гейзенберга.** В квантовой механике каждой физической величине соответствует оператор, который действует на функции. Особенно важную роль играют собственные функции и собственные значения интересующего нас оператора. Собственные значения соответствуют допустимым численным значениям величины. В классической механике координаты и импульсы независимы в том смысле, что мы можем приписывать координате любое численное значение совершенно независимо от того, какое значение приписано нами импульсу. Но



существование постоянной Планка  $h$  приводит к уменьшению числа независимых переменных. Следовательно, координаты и импульс квантовомеханической частицы уже более не являются независимыми переменными, как в классической механике. В квантовой механике не существует состояний, в которых эти две физические величины (т.е. координата  $q$  и импульс  $p$ ) имели бы вполне определенное значение. Эту ситуацию, неизвестную в классической механике, выражают знаменитые соотношения неопределенности Гейзенберга. Мы можем измерять координату и импульс, но неопределенности в их значениях  $\Delta q$  и  $\Delta p$  связаны между собой неравенством Гейзенберга  $\Delta q \Delta p \geq h$ . Если неопределенность  $\Delta q$  в положении частицы сделать сколь угодно малой, то неопределенность  $\Delta p$  в ее импульсе обратится в бесконечность, и наоборот.

Соотношение неопределенности Гейзенберга с необходимостью приводит к пересмотру понятия причинности. Мы можем определить координату с абсолютной точностью, но в тот момент, когда это происходит, импульс принимает совершенно произвольное значение, положительное или отрицательное. Это означает, что объект, положение которого нам удалось измерить абсолютно точно, тотчас же перемещается сколь угодно далеко. Локализация утрачивает смысл: понятия, составляющие самую основу классической механики, при переходе к квантовой механике претерпевают глубокие изменения.

Из того, что квантовая механика вынуждает нас говорить менее определенно о локализации объекта, следует, как часто подчеркивал Нильс Бор, необходимость отказа от классической физики. Для Бора постоянная Планка определяет взаимодействие между квантовой системой и измерительным устройством как единым целым, включая взаимодействие в процессе измерения, в результате которого мы получаем возможность приписывать измеряемым величинам численные значения. Все измерения, по Бору, подразумевают выбор измерительного устройства, выбор вопроса, на который требуется дать ответ. В этом смысле ответ, т.е. результат измерения, не открывает перед нами доступ к данной реальности. Нам приходится решать, какое измерение мы собираемся произвести над системой и какой вопрос наши эксперименты зададут ей. Следовательно, существует неустранимая множественность представлений системы, каждое из которых связано с определенным набором операторов. В свою очередь это влечет за собой отход квантовой механики от классического понятия объективности, поскольку с классической точки зрения существует единственное объективное описание. Оно является полным описанием системы «такой, как она есть», не зависящим от выбора способа наблюдения.

Бор сформулировал принципа дополненности, который можно рассматривать как обобщение соотношений неопределенности Гейзенберга. Мы можем измерить либо координаты, либо импульсы, но не координаты и импульсы одновременно. Физическое содержание системы не исчерпывается каким-либо одним теоретическим языком, посредством которого можно было бы выразить переменные, способные принимать вполне определенные значения. Различные языки и точки зрения на систему могут оказаться дополнительными. Все они связаны с одной и той же реальностью, но не сводятся к одному-единственному описанию.

Реальный урок, который мы можем извлечь из принципа дополненности (урок, важный и для других областей знания), состоит в констатации богатства и разнообразия реальности, превосходящей изобразительные возможности любого отдельно взятого языка, любой отдельно взятой логической структуры. Каждый язык способен выразить лишь какую-то часть реальности. Реальность, изучаемая физикой, есть не что иное, как конструкция нашего разума, а не только данность. Необходимо проводить различие между абстрактным понятием координаты или импульса, представляемых математически операторами, и их численной реализацией, достигаемой посредством эксперимента. Одна из причин противопоставления «двух культур», по-видимому, кроется в убеждении, что литература соответствует некоторой концептуализации реальности, чему-то вымышленному, в то время как наука выражает объективную реальность. Квантовая механика учит нас, что ситуация не столь проста. Существенный элемент концептуализации подразумевается на всех уровнях реальности.

**Временная эволюция квантовых систем.** Квантовая механика использует лишь половину переменных классической механики, поэтому классический детерминизм становится неприменимым, и в квантовой физике центральное место занимают статистические соображения. Мы снова сталкиваемся с весьма важным отклонением от классической теории: предсказуемы только вероятности, а не отдельные события. Второй раз за историю физики вероятности были

привлечены для объяснения некоторых фундаментальных свойств природы. Впервые вероятности использовал Больцман в своей интерпретации энтропии. Однако предложенная Больцманом интерпретация отнюдь не исключала субъективную точку зрения, согласно которой «только» ограниченность наших знаний перед лицом сложности системы служит препятствием на пути к полному описанию.

Как и во времена Больцмана, использование вероятностей в квантовой механике оказалось неприемлемым для многих физиков (в том числе и для Эйнштейна), стремившихся к «полному» детерминистическому описанию. Существование в квантовой механике обратимости и необратимости свидетельствует о том, что классическая идеализация, описывающая мир как замкнутую систему, на микроскопическом уровне невозможна. Необратимость входит в классическую физику, когда идеализация, в основе которой заложено понятие траектории, становится неадекватной.

## Глава 8. Столкновение теорий

**Больцмановский прорыв.** Больцман намеревался дать «механическую» интерпретацию энтропии. Но особенно велико достижение Больцмана с концептуальной точки зрения в том, что он различие между обратимыми и необратимыми процессами, лежащее в основе второго начала термодинамики, низвел с макроскопического на микроскопический уровень. Изменение распределения скоростей из-за свободного движения молекул соответствует обратимой части, а вклад, вносимый в изменение распределения столкновениями, — необратимой части. Именно в этом и был, с точки зрения Больцмана, ключ к микроскопической интерпретации энтропии. Больцмановский прорыв стал решающим этапом в формировании нового научного направления — физики процессов. Временную эволюцию в уравнении Больцмана больше не определяет гамильтониан, зависящий от типа сил. В больцмановском подходе движение порождает функции, связанные с процессом, например сечение рассеяния.

## Глава 9. Необратимость – энтропийный барьер

**Энтропия и стрела времени.** Люди в нерешительности колебались между двумя крайностями: исключением необратимости из физики (сторонником этого направления был Эйнштейн) и признанием необратимости как важной особенности природных явлений (выразителем этого направления стал Уайтхед со своей концепцией процесса). В настоящее время ни у кого не вызывает сомнений, что необратимость существует на макроскопическом уровне и играет важную конструктивную роль. Следовательно, в микроскопическом мире должно быть нечто проявляющееся на макроскопическом уровне, подобное необратимости. Микроскопическая теория должна учитывать два тесно связанных между собой элемента. Прежде всего в своих попытках построить микроскопическую модель энтропии, монотонно изменяющейся со временем, мы должны следовать Больцману. Именно такое изменение должно задавать стрелу времени. Возрастание энтропии изолированной системы должно выражать старение системы.

**Необратимость как процесс нарушения симметрии.** Мы можем сформулировать внутренний смысл второго начала. Оно обретает статус принципа отбора, утверждающего, что в природе реализуется и наблюдается лишь один из двух типов решений. В тех случаях, когда оно применимо, второе начало термодинамики выражает внутреннюю поляризацию природы. Оно не может быть следствием самой динамики. Второе начало является дополнительным принципом отбора, который, будучи реализованным, распространяется динамикой.

Мы можем констатировать, что существует тесная взаимосвязь между неустойчивостью и вероятностью.

**Энтропийный барьер.** Время течет в одном направлении: из прошлого в будущее. Теперь мы лучше понимаем, почему время невозможно «повернуть назад». Бесконечно высокий энтропийный барьер отделяет разрешенные начальные состояния от запрещенных. Барьер этот никогда не будет преодолен техническим прогрессом: он бесконечно высок. Нам не остается ничего другого, как расстаться с мечтой о машине времени, которая перенесет нас в прошлое.

Тепло и механическая энергия эквивалентны с точки зрения сохранения энергии, но отнюдь не второго начала. Кратко говоря, механическая энергия более «высокого сорта» (более когерентна), чем тепло, и всегда может быть превращена в тепло. Обратное неверно. Аналогичное различие существует на микроскопическом уровне между столкновениями и корреляциями. С точки зрения динамики столкновения и корреляции эквивалентны. Столкновения порождают корреляции, а корреляции могут разрушать последствия столкновений. Но между столкновениями и корреляциями имеется существенное различие. Мы можем управлять столкновениями и порождать корреляции, но мы не в состоянии так управлять корреляциями, чтобы уничтожить последствия, вызванные столкновениями в системе. Этого существенного различия недостает в динамике, но его можно учесть в термодинамике. Следует заметить, что термодинамика нигде не вступает в конфликт с динамикой. Термодинамика вносит важный дополнительный элемент в наше понимание физического мира.

**Энтропия как принцип отбора.** Нельзя не удивляться тому, как сильно микроскопическая теория необратимых процессов напоминает традиционную макроскопическую теорию. И в той, и в другой теории энтропия имеет негативный аспект. В макроскопической теории энтропия запрещает некоторые процессы, например перетекание тепла от холодного предмета к теплему. В микроскопической теории энтропия запрещает некоторые классы начальных условий. Различие между тем, что запрещено, и тем, что разрешено, поддерживается во времени законами динамики. Из негативного аспекта возникает позитивный: существование энтропии вместе с ее вероятностной интерпретацией. Необратимость не возникает более, как чудо, на некотором макроскопическом уровне. Макроскопическая необратимость лишь делает зримой ориентированную во времени поляризованную природу того мира, в котором мы живем. Как мы уже неоднократно подчеркивали, в природе существуют системы с обратимым поведением, допускающие полное описание в рамках законов классической или квантовой механики. Но большинство интересующих нас систем, в том числе все химические и, следовательно, все биологические системы, ориентированы во времени на макроскопическом уровне. Их отнюдь не иллюзорная однонаправленность во времени отражает нарушение временной симметрии на микроскопическом уровне. Второе начало приводит к новой концепции материи, к описанию которой мы сейчас переходим.

**Активная материя.** Свядав энтропию с динамической системой, мы тем самым возвращаемся к концепции Больцмана: вероятность достигает максимума в состоянии равновесия. Структурные единицы, которые мы используем при описании термодинамической эволюции, в состоянии равновесия ведут себя хаотически. В отличие от этого в слабо неравновесных условиях возникают корреляции и когерентность. Здесь мы подходим к одному из наших главных выводов: на всех уровнях, будь то уровень макроскопической физики, уровень флуктуации или микроскопический уровень, источником порядка является неравновесность.

Подведем итоги достигнутого. В первой и второй части нашей книги неоднократно подчеркивалось, что на уровне макроскопических систем первостепенное значение имеет второе начало (и связанное с ним понятие необратимости). В третьей части мы стремились показать, что в настоящее время открывается возможность выхода за рамки макроскопического уровня, и продемонстрировать, что означает необратимость на микроскопическом уровне. Переход от макроскопического уровня к микроскопическому требует коренного пересмотра наших взглядов на фундаментальные законы физики. Только полностью избавившись от классических представлений (как в случае достаточно нестабильных систем), мы можем говорить о «внутренней случайности» и «внутренней необратимости».

Ситуация, с которой мы сталкиваемся, очень напоминает ситуацию, сложившуюся в квантовой механике. Существуют два возможных описания: либо мы выбираем точку в фазовом пространстве и тогда не знаем, какому разбиению она принадлежит и, следовательно, каков ее внутренний возраст, либо мы знаем внутренний возраст, но тогда нам известно только разбиение, а не точная локализация точки. После того как мы ввели внутреннее время  $T$ , энтропию можно использовать как принцип отбора для перехода от начального описания с помощью функции распределения  $p$  к новому описанию с помощью функции распределения  $p'$ , которая обладает внутренней стрелой времени, согласующейся со вторым началом термодинамики. Основное различие между  $p$  и  $p'$  проявляется в разложениях этих функций по собственным функциям оператора  $T$ . В функцию  $p$  все внутренние возрасты независимо от того, принадлежат ли они прошлому или будущему, входят

симметрично. В функции  $p'$  в отличие от  $p$  прошлое и будущее играют различные роли: прошлое входит в  $p'$ , а будущее остается неопределенным. Асимметрия прошлого и будущего означает, что существует стрела времени. Новое описание обладает важной особенностью, заслуживающей того, чтобы ее отметить: начальные условия и законы изменения перестают быть независимыми. Состояние со стрелой времени возникает под действием закона, также наделенного стрелой времени и трансформирующего состояние, но сохраняющего стрелу времени.

Две великие революции в физике XX в. связаны с включением в фундаментальную структуру физики двух запретов, чуждых классической механике: невозможности распространения сигналов со скоростью больше скорости света и невозможности одновременного измерения координат и импульса. Неудивительно, что и второе начало, также ограничивающее наши возможности активного воздействия на материю, приводит к глубоким изменениям в структуре основных законов физики. Нам бы хотелось закончить третью часть нашей книги предостережением. Феноменологическую теорию необратимых процессов ныне можно считать вполне сложившейся. В отличие от нее «микроскопическая теория» необратимых процессов делает лишь первые шаги.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ. С земли на небо: новые чары природы**

**Открытая наука.** Наука, несомненно, подразумевает активное воздействие на природу, но вместе с тем она является попыткой понять природу, глубже проникнуть в вопросы, которые задавало не одно поколение людей. Один из этих вопросов звучит как лейтмотив (почти как наваждение), на страницах этой книги, как, впрочем, и в истории естествознания и философии. Речь идет об отношении бытия и становления, неизменности и изменения. В начале нашей книги мы упоминали о вопросах, над которыми размышляли еще философы-досократики. Не накладывается ли изменение, порождающее все вещи и обрекающее их на гибель, извне на некую инертную материю? Не является ли изменение результатом внутренней независимой активности материи? Необходима ли внешняя побуждающая сила или становление внутренне присуще материи? Естествознание XVII в. встало в оппозицию к биологической модели спонтанной и автономной организации живых существ. Но тогда же естествознанию пришлось столкнуться с другой фундаментальной альтернативой. Является ли природа внутренне случайной? Не является ли упорядоченное поведение лишь преходящим результатом случайных столкновений атомов и их неустойчивых соединений?

Одним из главных источников неотразимой привлекательности современной науки было ощущение, что она открывала вечные законы, таившиеся в глубине нескончаемых преобразований природы, и тем навсегда изгнала время и становление. Открытие порядка в природе рождало чувство интеллектуальной уверенности. Мы искали общие, всеобъемлющие схемы, которые допускали бы описание на языке вечных законов, но обнаружили время, события, частицы, претерпевающие различные превращения. Занимаясь поиском симметрии, мы с удивлением обнаружили на всех уровнях — от элементарных частиц до биологии и экологии — процессы, сопровождающиеся нарушением симметрии. Мы описали в нашей книге столкновение между динамикой с присущей ей симметрией во времени и термодинамикой, для которой характерна односторонняя направленность времени. На наших глазах возникает новое единство: необратимость есть источник порядка на всех уровнях. Необратимость есть тот механизм, который создает порядок из хаоса.

**Время и времена.** На протяжении более трех столетий в физике господствовало мнение о том, что время по существу представляет собой геометрический параметр, позволяющий описывать последовательность динамических состояний.

**Энтропийный барьер.** Мы описали второе начало как принцип отбора: каждому начальному условию соответствует некоторая «информация». Допустимыми считаются все начальные условия, для которых эта информация конечна. Но для обращения времени необходима бесконечная информация; мы не можем создавать ситуации, которые переносили бы нас в прошлое! Чтобы предотвратить путешествия в прошлое, мы возвели энтропийный барьер. Нельзя не отметить интересную аналогию между энтропийным барьером и представлением о скорости света как о максимальной скорости передачи сигналов. Такой барьер необходим для придания смысла причинности. Энтропийный барьер также необходим для того, чтобы придать смысл передаче сигналов. Необратимость и передача сигналов тесно связаны между собой. Норберт Винер убедительно показал, к каким ужасным последствиям привело бы существование двух направлений

времени. Именно энтропийный барьер гарантирует единственность направления времени, невозможность изменить ход времени с одного направления на противоположное.

Только объединение динамики и термодинамики с помощью введения нового принципа отбора придает второму началу фундаментальное значение эволюционной парадигмы естественных наук. Применяя естественнонаучные понятия к социологии или экономике, необходимо соблюдать осторожность.

**Актеры и зрители.** [Мерло-Понти](#) утверждал, что «философские» открытия естествознания, концептуальные преобразования его основ нередко происходят в результате негативных открытий, служащих толчком к пересмотру сложившихся взглядов и отправным пунктом для перехода к противоположной точке зрения. Доказательства невозможности, или несуществования (будь то в теории относительности, квантовой механике или термодинамике), показали, что природу невозможно описывать «извне», с позиций зрителя. Описание природы — живой диалог, коммуникация, и она подчинена ограничениям, свидетельствующим о том, что мы — макроскопические существа, погруженные в реальный физический мир.

Ситуацию, какой она представляется нам сегодня, можно условно изобразить в виде диаграммы (рис. 4). Мы начинаем с наблюдателя, измеряющего координаты и импульсы и исследующего, как они изменяются во времени. В ходе своих измерений он совершает открытие: узнает о существовании неустойчивых систем и других явлений, связанных с внутренней случайностью и внутренней необратимостью. Но от внутренней необратимости и энтропии мы переходим к диссипативным структурам в сильно неравновесных системах, что позволяет нам понять ориентированную во времени деятельность наблюдателя. Не существует научной деятельности, которая не была бы ориентированной во времени. Подготовка эксперимента требует проведения различия между «до» и «после». Распознать обратимое движение мы можем только потому, что нам известно о необратимости. Из нашей диаграммы видно, что, описав полный круг, мы вернулись в исходную точку и теперь видим себя как неотъемлемую часть того мира, который мы описываем. Для того чтобы макроскопический мир был миром обитаемым, в котором живут «наблюдатели», т. е. живым миром, Вселенная должна находиться в сильно неравновесном состоянии.

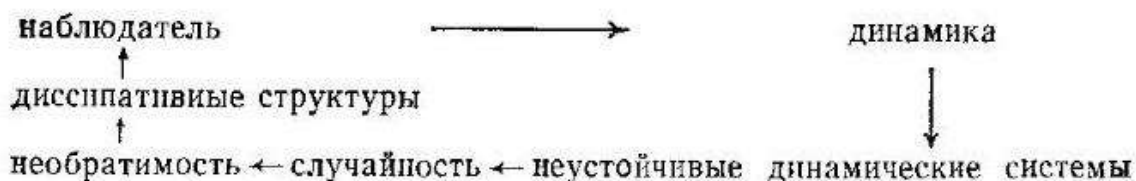


Рис. 4. Наблюдатель и природа

**Вихрь в бурлящей природе.** [Чарлз С. Пирс](#): «Вы все слышали о диссипации энергии. Обнаружено, что при любых трансформациях энергии часть ее превращается в тепло, а тепло всегда стремится выровнять температуру. Под воздействием собственных необходимых законов энергия мира иссякает, мир движется к своей смерти, когда повсюду перестанут действовать силы, а тепло и температура распределяться равномерно... Но хотя ни одна сила не может противостоять этой тенденции, случайность может и будет препятствовать ей. Сила в конечном счете диссипативна, случайность в конечном счете концентративна. Диссипация энергии по непреложным законам природы в силу тех же законов сопровождается обстоятельствами, все более и более благоприятными для случайной концентрации энергии. Неизбежно наступит такой момент, когда две тенденции уравновесят друг друга. Именно в таком состоянии, несомненно, находится ныне весь мир».

**За пределами тавтологии.** Мир классической науки был миром, в котором могли происходить только события, выводимые из мгновенного состояния системы. Классическая наука отрицала становление и многообразие природы. Объекты классической динамики замкнуты в себе. Они ничего не узнают извне. Каждая точка системы в любой момент времени знает все, что ей необходимо знать, а именно распределение масс в пространстве и их скорости. Каждое состояние содержит всю истину о всех других состояниях, совместимых с наложенными на систему связями; каждое может быть использовано для предсказания других состояний, каково бы ни было их относительное расположение на оси времени.

Коренное изменение по взглядах современной науки заключается в переходе к темпоральности и множественности. И на макроскопическом, и на микроскопическом уровнях естественные науки более не используют концепцию объективной реальности, из которой следовала необходимость отказа от новизны и многообразия во имя вечных и неизменных универсальных законов. Естественные науки избавились от слепой веры в рациональное как нечто замкнутое и отказались от идеала достижимости окончательного знания, казавшегося почти достигнутым. Ныне естественные науки открыты для всего неожиданного, которое больше не рассматривается как результат несовершенства знания или недостаточного контроля.

**Состояние внутреннего мира.** Идеалом классической науки была «прозрачная» картина физической Вселенной. В каждом случае предполагалась возможность указать причину и ее следствие. Но когда возникает необходимость в стохастическом описании, причинно-следственная часть усложняется. Мы не можем говорить более о причинности в каждом отдельном эксперименте. Имеет смысл говорить лишь о статистической причинности.

**Обновление природы.** Идеи, которым мы уделили в книге достаточно много внимания, — идеи о нестабильности флуктуации — начинают проникать в социальные науки. Ныне мы знаем, что человеческое общество представляет собой необычайно сложную систему, способную претерпевать огромное число бифуркаций, что подтверждается множеством культур, сложившихся на протяжении сравнительно короткого периода в истории человечества. Мы знаем, что столь сложные системы обладают высокой чувствительностью по отношению к флуктуациям. Это вселяет в нас одновременно и надежду, и тревогу: надежду на то, что даже малые флуктуации могут усиливаться и изменять всю их структуру (это означает, в частности, что индивидуальная активность вовсе не обречена на бессмысленность); тревогу — потому, что наш мир, по-видимому, навсегда лишился гарантий стабильных, непреходящих законов.

Мы живем в опасном и неопределенном мире, внушающем не чувство слепой уверенности, а лишь то же чувство умеренной надежды, которое некоторые талмудические тексты приписывают богу Книги Бытия: Двадцать шесть попыток предшествовали сотворению мира, и все они окончились неудачей. Мир человека возник из хаоса обломков, оставшихся от прежних попыток. Он слишком хрупок и рискует снова обратиться в ничто. «Будем надеяться, что на этот раз получилось», — воскликнул бог, сотворив мир, и эта надежда сопутствовала всей последующей истории мира и человечества, подчеркивая с самого начала этой истории, что та отмечена печатью неустранимой неопределенности.

## **Послесловие. ЕСТЕСТВОЗНАНИЕ И РАЗВИТИЕ: ДИАЛОГ С ПРОШЛЫМ, НАСТОЯЩИМ И БУДУЩИМ** *В. И. Аршинов, Ю. Л. Климонтович, Ю. В. Сачков*

Настоящее послесловие ставит своей целью поделиться некоторыми мыслями и соображениями, возникшими после прочтения книги, с тем чтобы подключить читателя к самостоятельному размышлению над рассматриваемыми в книге проблемами, к активному диалогу с ее авторами.

Процессы в физических, химических и биологических системах подразделяются на два класса. К первому классу относятся процессы в замкнутых системах. Они ведут к установлению равновесного состояния, которое при определенных условиях отвечает максимально возможной степени неупорядоченности. Такое состояние мы называем физическим хаосом. Современные представления о равновесном состоянии восходят к замечательным работам Больцмана и Гиббса, которые показали, что энтропия, введенная в термодинамику Клаузиусом, служит одной из важных характеристик статистической теории — мерой неупорядоченности, или хаотичности, состояния системы.

Ко второму классу можно отнести процессы в открытых системах, в ходе которых из физического хаоса рождаются структуры — диссипативные структуры. Возникновение диссипативных структур в ходе временной эволюции в открытых системах через последовательность все более упорядоченных диссипативных структур характерно для процессов самоорганизации. Проблема самоорганизации в различных системах не является, разумеется, новой. Различным аспектам этой проблемы посвящено много выдающихся работ. Особое место среди них занимают работы Чарлза Дарвина о естественном отборе в процессе эволюции.

Одно время бытовало мнение, что существует явное противоречие между теорией Дарвина и вторым законом термодинамики. Действительно, по Дарвину, в процессе биологического развития происходит усложнение структур и степень упорядоченности возрастает. Согласно же второму закону термодинамики, в любой замкнутой системе в процессе эволюции степень хаотичности (энтропия) возрастает. Это кажущееся противоречие отпало с осознанием того факта, что существуют два принципиально различных (указанные выше) процесса эволюции: процессы в замкнутых системах ведут к тепловому равновесию (физическому хаосу, в нашей терминологии), а процессы в открытых системах могут быть процессами самоорганизации.

По представлениям Платона и его учеников, хаос (если говорить современным языком) есть такое состояние системы, которое остается по мере устранения возможностей проявления ее свойств. Понятие «структура» также является чрезвычайно общим. Структура есть некоторый вид организации и связи элементов системы.

На вопрос «Что такое турбулентность?» ответить не просто. Многим представляется почти очевидным, что переход от ламинарного течения к турбулентному есть переход от упорядоченного движения к хаотическому. «Долгое время турбулентность отождествлялась с, хаосом или шумом. Сегодня мы знаем, что это не так. Хотя в макроскопическом масштабе турбулентное течение кажется совершенно беспорядочным, или хаотическим, в микроскопическом масштабе оно высокоорганизовано. Множество пространственных и временных масштабов, на которых разыгрывается турбулентность, соответствует когерентному поведению миллионов и миллионов молекул. С этой точки зрения переход от ламинарного течения к турбулентности является процессом самоорганизации. Часть энергии системы, которая в ламинарном течении находилась в тепловом движении молекул, переходит в макроскопическое организованное движение.

Необходима теория, позволяющая количественно оценивать степень упорядоченности различных состояний в открытых системах, т.е. степень упорядоченности структур, возникающих из хаоса. Она, разумеется, должна базироваться на современной статистической теории неравновесных процессов.

Вопрос о выборе (определении) управляющих параметров в теории самоорганизации является одним из наиболее существенных и вместе с тем трудных. При наличии нескольких параметров порядка возможны различные пути самоорганизации – различные «сценарии» возникновения порядка из хаоса. При этом возникает возможность оптимального управления. В качестве одной из характеристик степени упорядоченности можно использовать (при определенных дополнительных условиях) энтропию Больцмана – Гиббса.

Возможность использования энтропии Больцмана – Гиббса для количественной характеристики степени упорядоченности при процессах самоорганизации в открытых системах не представляется очевидной. В одном случае в изолированной системе происходит эволюция к равновесному состоянию. При этом энтропия системы монотонно возрастает и остается неизменной при достижении равновесного состояния. В другом случае рассматривается совокупность стационарных состояний, отвечающих различным значениям управляющего параметра. Начало отсчета управляющего параметра может быть, в частности, выбрано таким образом, что его нулевому значению будет отвечать «состояние равновесия».