

ВЕРНЕР ЭБЕЛИНГ,  
РАЙНЕР ФАЙСТЕЛЬ

**ХАОС И КОСМОС**  
**Принципы эволюции**

2003

# Оглавление

<b>Предисловие</b> . . . . .	4
<b>ГЛАВА 1. О физической картине мира</b> . . . . .	7
1.1. Система и состояние . . . . .	7
1.2. Принципы моделирования . . . . .	11
1.3. Физика и эволюция . . . . .	19
<b>ГЛАВА 2. Время, сложность и структурообразование</b> . . . . .	25
2.1. Простое и сложное . . . . .	25
2.2. Обратимость и необратимость . . . . .	27
2.3. Созидательный хаос . . . . .	32
2.4. Процессы структурообразования . . . . .	35
<b>ГЛАВА 3. Самоорганизация и эволюция</b> . . . . .	40
3.1. Необратимость и самоорганизация . . . . .	40
3.2. Диссипативные структуры . . . . .	42
3.3. Принципы самоорганизации . . . . .	45
3.4. Базовые модели процессов самоорганизации . . . . .	49
3.5. Эволюция: цепь процессов самоорганизации . . . . .	56
<b>ГЛАВА 4. Информация и ценность</b> . . . . .	61
4.1. Информация, состояние и обмен . . . . .	61
4.2. Информация и хаос . . . . .	69
4.3. ???Ценность — параметр порядка нового качества . . . . .	72
<b>ГЛАВА 5. Эволюция космоса и Земли</b> . . . . .	79
5.1. Большой Взрыв . . . . .	79
5.2. Восемь ***эпох эволюции протоплазмы . . . . .	84
5.3. Самоструктурирование ***вещественной материи . . . . .	93
5.4. ***Солнечная система и Земля . . . . .	99

ГЛАВА 6. <b>Эволюция климата</b> . . . . .	107
6.1. Земля в роли паровой машины . . . . .	107
6.2. ***Климатическая машина Океан . . . . .	116
6.3. Устойчивость климата . . . . .	125
ГЛАВА 7. <b>Эволюция жизни</b> . . . . .	133
7.1. Самоорганизация и жизнь . . . . .	133

# Предисловие

Демокрит, говорят, даже высказывался в том смысле, что он предпочел бы разгадать хотя бы одну из загадок мироздания, нежели стать правителем персов.

*Дионисий*

Уже при зарождении научного мировоззрения, основы которого были заложены более двух тысяч лет назад древнегреческими мыслителями, существовало занятное умопостроение, касающееся природы нашего мира:

*Космос возник из первоначального хаоса в процессе самоорганизации.*

Отец древнегреческой философии Гесиод видел это так:

Еще до появления небес и земной тверди существовал вездесущий хаос, «зияющая бездна», всепоглощающая пустота. Из хаоса возникла ночь, из ночи возник день и блистающее сияние Эфира, а Гея — Земля — породила небо, горы и море.

Вслед за Гесиодом древнегреческие мыслители понимали под *хаосом* некое первоначальное, лишённое формы и порядка состояние мира. У Гесиода *хаос* был пустым безразмерным пространством, предшествовавшим всему сущему; позднейшие мыслители — такие, как Анаксимен, Фалес и Гераклит — *хаосом* называли бесформенное первовещество (имея в виду воздух, воду и огонь), которое стало затем основой мироздания. в противоположность *хаосу* понятие *космос* (греч. «украшение, порядок») обозначало в греческой мифологии и в философии со времен Анаксимандра, Анаксагора, Пифагора и Эмпедокла «миропорядок», Вселенную. Под *космосом* древние греки понимали не только противоположную *хаосу* упорядоченность, но и красоту, порожденную гармонией такой упорядоченности; таким вот замечательным образом греки связывали понятие *космос* с понятиями *гармония* и *красота*. Греческая пара *хаос* — *космос* столь же комплементарна, сколь и привычные нам пары «волна — частица» и «тело — дух».

В представлении древнегреческих мыслителей переход от первозданного хаоса к упорядоченному космосу был процессом эволюционным. Придерживаясь тех же взглядов, мы хотели бы представить читателю этот процесс с точки зрения современной науки, интерпретируя путь к сегодняшнему состоянию нашего мира как результат последовательности циклов самоорганизации. Более двадцати лет назад, когда мы оба еще работали в нашей Alma Mater в Ростове, нас увлекли труды таких авторов, как Пригожин, Эйген и Хакен, разрабатывавших современные естественнонаучные основы процессов самоорганизации. При помощи различных моделей в этих работах было показано развитие из первоначального молекулярного хаоса пространственно-временных структур, а также определенных элементов биосистем. После того, как мы много лет провели, занимаясь изучением некоторых аспектов проблемы *хаос — космос* в берлинском университете им. Гумбольдта и в Институте по изучению Балтийского моря в Варнемюнде, нам хотелось бы в этой книге по возможности большему количеству читателей дать представление о наиболее важных (в том числе и о противоречивых или не до конца разработанных) идеях, существующих на сей счет в сегодняшнем научном сообществе; в особенности нам хотелось бы представить вниманию читателей плоды бесчисленных дискуссий, не прекращавшихся на протяжении многих лет.

Важную роль в предлагаемом материале играют методы современной физики, теории самоорганизации и новейших исследований, касающихся теории хаоса. Однако главными все же будут не математические или технические аспекты рассматриваемой проблематики, а те самые «вопросы содержания», которые были поставлены еще древнегреческими мыслителями, и которые сегодня изучаются в русле междисциплинарной науки синергетики.

Возможно, кому-то из читателей при первом взгляде на название этой книги пришла в голову мысль о ставшем в последнее время столь популярным понятии «хаос», и теперь они готовы к прочтению еще одного введения в теорию хаоса. Во избежание каких бы то ни было недоразумений нам хотелось бы с самого начала подчеркнуть: приоритетом в нашей книге пользуется никак не эта, безусловно интересная, но уже неоднократно (и при том превосходно) описанная область; нашей первоочередной задачей является представление своего рода синопсиса, то есть общего, суммарного обзора, посвященного эволюции *хаоса* в *космос*.

Будучи физиками, в дальнейшем мы будем использовать, в основном, язык физики и свойственный физикам образ мышления. Однако сам материал предполагает все же изложение различных междисциплинарных аспектов проблемы, и мы надеемся, что наш синопсис окажется интересен

широкому кругу читателей, обладающих определенными основами естественнонаучных знаний. Главы 5, 10 и 11, впрочем, достаточно специальные, так что читатель, не желающий углубляться в детали, может названные главы просто пропустить.

В заключение нам хотелось бы сердечно поблагодарить за оказанную помощь и всяческую поддержку наших сотрудников и коллег. Особой благодарности заслуживают П. Аккерманн, ???К. Фрёммель, ???Э. Хаген, К. Ланниус и Б. Ронахер, которые прочли различные части этой книги и сделали ряд критических замечаний.

Берлин, Варнемюнде,  
февраль 1994

Вернер Эбелинг,  
Райнер Файстель

## ГЛАВА 1

# О физической картине мира

Предсказание некоего события в чувственном мире всегда сопряжено с определенной долей неуверенности, тогда как все события, описываемые физической картиной мира, протекают в согласии с определенными установленными законами.

*Макс Планк.*

Пути физического познания

### 1.1. Система и состояние

Попытки рассмотрения с точки зрения физики всего многообразия нашего мира и его возникновения из первоначального хаоса, безусловно, чрезвычайно многогранны, и многие из этих граней необыкновенно интересны. Одну из таких граней представляет тот факт, что изучение процессов эволюции напрямую сопряжено почти со всеми основополагающими проблемами физики и философии: сюда относятся вопросы о природе пространства, времени и материи, о взаимосвязи случайного и необходимого, каузальности и предсказуемости, духа, воли и познания. Именно эта взаимосвязь и будет продемонстрирована на страницах нашей книги при рассмотрении проблем эволюции. Нам хотелось бы убедить читателя в том, что наш мир представляет собой единство, различные формы проявления которого являются лишь отдельными проекциями реальности в пространстве нашего восприятия. Изучение целостной действительности потребует и целостного видения [?].

Мы исходим из того, что тип и границы нашего восприятия и наших знаний суть результат биологической и социальной эволюции жизни вообще и человечества в частности, и что то, каким образом мы пытаемся описать и понять окружающий нас мир, отражает, по сути, форму нашего существования и нашего становления. Этот замкнутый круг напоминает собой старую загадку и курице и яйце: чтобы разобраться в законах, лежащих

Рис. 1. Мария Эта Кастельянос (Веракрус). «Эволюция»

в основе физического мира, нам необходимо постичь сам образ постижения, способ познания. Чтобы понять, каким образом действует наш мозг, нам необходимо постичь суть пространства, времени и материи. Однако это обстоятельство ни в коем случае не означает, что проблемы, связанные с постижением этой сути, должны быть сочтены неразрешимыми, и нам сразу следует отбросить возможность когда-нибудь справиться с ними. Напротив, при ближайшем рассмотрении оказывается, что эволюционные системы обладают способностью, схожей со способностями барона Мюнхаузена, который сумел выбраться из болота, таща самого себя за волосы. Подобный образ действий по-разному проиллюстрирован разными художниками — как это сделали, например, Мориц Эшер в «Руках» или Мария Эта Кастельянос в «Эволюции» (рис. 1).

Теория самоорганизации и эволюции — это продукт нашего мышления, и наше мышление, в свою очередь, — это продукт самоорганизации и эволюции. Поскольку этот замкнутый круг не имеет начала, оказывается весьма затруднительно отыскать некую определенную точку, с которой мы могли бы начать наш обзор. Однако эта книга является носителем информации, и ее предназначение заключается в том, чтобы донести знание от пишущего к читающему. В дальнейшем мы увидим, что этот процесс предполагает, что между передающей и принимающей сторонами должно существовать своего рода соглашение, касающееся самого сообщения: нам необходимо договориться о том, каким образом следует понимать использованные в сообщении знаки. Во время научных конференций между учеными часто возникают весьма бурные споры, единственной причиной которых является тот факт, что определенные обозначения наделены для представителей разных дисциплин различным смыслом. Как раз поэтому прежде всего оказывается необходимо договориться о том, каким именно языком мы будем пользоваться в дальнейшем. Вот этот момент и станет для нас началом: мы поговорим о вещах, представляющихся, на первый взгляд, чем-то само собой разумеющимся.

Часть окружающего нас мира, которую мы намерены описать, назовем *системой*. При этом мысленно распределим все объекты окружающего мира по двум классам: в первый попадут те из них, что являются составляющими описываемую нами систему, а во втором окажутся все остальные (они будут представлять собой «окружение»). В соответствии с правилами, такое распределение задается посредством выделения некоторой пространственно-временной области (например, объема, ограниченного стенами) (рис. 2).

Некоторые объекты мы часто обозначаем как принадлежащие опреде-



Рис. 2. Система и ее окружение, представленное на примере живых организмов и окружающей среды. [Umgebung = окружающая среда; thermische Absorption = поглощение тепла; Wärmeleitung = теплопроводность; thermische Emission = тепловая эмиссия; Atmung = дыхание; Nahrung = питание; Lebewesen = живые организмы; Stoffwechselprodukte = продукты обмена веществ; Arbeit = работа; Sonnenlicht = солнечный свет]

ленной системе — так, к примеру, множество всех живых существ является биологической системой. В этом случае вовсе не обязательно пространственное «соседство» всех элементов системы; они могут быть всего лишь связаны рядом общих характеристик. Строго говоря, все подобные системы являются системами открытыми: они взаимодействуют с окружением в процессе обоюдного обмена энергией и материей. Однако часто в качестве модели реальной открытой системы используется умозрительная система, называемая закрытой, поскольку ее развитие во времени определяется только составляющими ее элементами. Другим полезным умпостроением является полузакрытая (замкнутая) система, которая может обмениваться с окружением энергией (например, теплом), но не материей. Примером может служить Земля, рассматриваемая как единое целое; под воздействием потока лучистой энергии Солнца Земля порождает весьма и весьма сложные структуры. Обмен материей между Землей и ее окружением (солнечный ветер, газы, которые улетучиваются из верхних слоев атмосферы, падение метеоритов) играет в процессе образования упомянутых структур всего лишь второстепенную роль, и при многих исследованиях ее можно попросту проигнорировать.

Предположим, что некая система в каждый рассматриваемый момент времени находится в определенном *состоянии*. Из вышесказанного следует, что понятия *система* и *состояние* являются центральными. Система, по нашему определению, — это некоторое подмножество реальных объектов окружающего нас мира. Все остальные объекты, те, что не принадлежат рассматриваемой системе, образуют окружение. Система и ее окружение сопряжены друг с другом, в пространственно же компактной системе в роли сопряжения выступает какая-либо граница — поверхность или стенка. Через такую поверхность сопряжения и происходит в общем случае обмен энергией и/или материей между системой и окружением.

«Естественную» систему представляет собой весь окружающий нас мир. «Окружением» этой системы можно считать наблюдателя, вооруженного собственными органами чувств, измерительными приборами, инструментами и т. п., которые в этом случае представляют собой устройства сопряжения системы и окружения. Физика как наука принципиально ис-

ходит из предположения, что рассматриваемая система и соответствующее окружение находятся в определенных состояниях, и эти состояния определяют обмен между системой и окружением. Точнее говоря, состояния — это нечто, не поддающееся непосредственному определению; в наших силах оказывается лишь установление процессов обмена. Рассмотрим несколько примеров. Наблюдая отклонение стрелки измерительного прибора, мы воспринимаем состояние прибора; собственно, мы всего лишь воспринимаем определенным образом распределенный свет, попадающий на чувствительные клетки наших глаз, и экстраполируем это ощущение на состояние прибора, а точнее — на положение стрелки.

Выводы относительно состояния окружения, сделанные нашим мозгом на основании чувственного ощущения, по-видимому, жестко запрограммированы, так что все это происходит совершенно естественно. С точки зрения физики, однако, связь между величинами, характеризующими процессы обмена, и состоянием ни в коем случае нельзя считать ни тривиальной, ни очевидной; напротив, величины эти непременно должны быть отделены друг от друга тщательнейшим образом. В ходе всевозможных *экспериментов* — а под словом «эксперимент» мы подразумеваем всю совокупность взаимодействий между окружением (в роли которого в нашем случае выступает наблюдатель) и системой (представленной окружающим наблюдателя миром) — мы узнаём о том, что различные величины, характеризующие обменные процессы, взаимно обуславливают друг друга. Процесс обмена называется «процессом измерения», а величины, характеризующие его — «измеряемыми параметрами». Усилим эту обусловленность, создав модель наблюдаемой системы, основанную на вводе параметров состояния, которые взаимосвязаны между собой в соответствии с определенными законами, и позволяющую делать прогноз ожидаемых результатов измерения. Этот метод оказался настолько успешен, что мы рассматриваем его как не вызывающий ни малейших сомнений и применяем зачастую совершенно не задумываясь.

Одной из величин, характеризующих процессы обмена, является сила, непосредственно воспринимаемая нами при манипуляциях (движение, изменение формы) различными предметами. Другая такая величина — тепло, ощущаемое нами при прикосновении. Параметром состояния является энергия системы, которую непосредственно нельзя ни ощутить, ни измерить, и в существовании которой мы убеждены лишь благодаря достижениям ученых в создании физической модели мира. Другим параметром, характеризующим состояние, является энтропия — мера «обесценивания» находящейся в системе энергии. Энтропия изменяется в процессе теплообмена между системой и ее окружением. Следует особо отметить тот факт,

что принципиально доступны для измерения только величины, характеризующие обмен, но не параметры состояния. Конечно, в простых случаях они оказываются взаимозависимыми: если система, обладающая определенной массой, вступает с окружением в процесс обмена материей, то «масса» как параметр обмена равна разности определяющих массу системы параметров состояния до и после процесса обмена. Величина энтропии, по Клаузиусу, пропорциональна поделенному на температуру количеству тепла, участвовавшего в процессе обмена. Действительно, мы не можем измерить параметры состояния «масса» и «энтропия»; измерениям поддаются только косвенные воздействия (такие, к примеру, как сила инерции или сила тяготения), из которых мы и выводим действительную массу. Таким же образом обстоят дела и с энергией; именно из-за невозможности проведения непосредственных измерений знаменитая эйнштейновская формула  $E = mc^2$  и не была открыта раньше.

## 1.2. Принципы моделирования

Как мы имели возможность убедиться, далеко не все так уж очевидно. Это обязывает нас с особым тщанием отнестись к рассмотрению даже самых основ. Научное описание процессов, протекающих в окружающем нас мире, оперирует определенными моделями, часть из которых сформулирована на языке математики. Ну а поскольку мы намерены использовать здесь математические методы лишь в очень скромном объеме, наиважнейшей нашей задачей должна стать именно формулирование моделей. Какими же принципами мы будем руководствоваться? Какие принципы послужат для наших моделей критериями истинности? Исходя из всего вышесказанного, такие принципы мы можем извлечь опять-таки лишь из совокупного опыта общения с миром, в котором мы живем. В качестве «очевидных» установим следующие принципы:

1. *Непротиворечивость*. Результаты измерений, полученные отдельными элементами модели, не должны противоречить друг другу.
2. *Полнота*. Внутри данного класса экспериментов все результаты измерений должны быть (по крайней мере, в принципе) предсказуемы.
3. *Независимость*. В модели в качестве основополагающих должны присутствовать только такие параметры состояния и законы, которые не могут быть математически или логически выведены из других величин или законов методом дедукции.

4. *Категориальность*. Различные представления модели должны быть преобразуемы друг в друга путем взаимно-однозначных отображений (ковариантность).

Вышеперечисленные требования позаимствованы из условий, применяемых обычно к математическим системам аксиом. Основанием для подобного заимствования служит тот факт, что системы аксиом представляют собой наиболее абстрактные и завершенные модели мира. Требования, перечисленные ниже, выставлены уже физикой; математика ими не пользуется в силу излишней их «приземленности».

5. *Объективность*. Временные изменения состояния системы зависят, по существу, лишь от состояния самой системы и параметров обмена. Непосредственная зависимость таких изменений от состояния окружения (например, от состояния наблюдателя) отсутствует; косвенная же является результатом обмена между системой и окружением. Отсюда, в частности, следует, что если окружение состоит, к примеру, из множества наблюдателей, то ими независимо друг от друга могут быть сделаны одинаковые (или хотя бы схожие) прогнозы относительно будущих результатов измерений.
6. *Делимость*. Каждая система может быть разложена на две подсистемы, взаимодействующие посредством процессов обмена. В обеих системах действительны одни и те же параметры состояния и законы движения. Результаты будущих измерений не зависят от того, каким образом произведено разделение на подсистемы.

Теперь подробнее рассмотрим понятие «процесс». Процессами принято называть временные изменения состояний. Для количественного описания состояний используются «параметры состояния» — величины, характеризующие состояние системы. Различают скалярные, векторные и тензорные величины, в зависимости от того, насколько много чисел необходимо для характеристики некоторой величины, и от того, какими математическими свойствами эта величина обладает. Например, векторная величина  $x$  характеризуется следующим выражением:

$$x = x_1, x_2, \dots, x_d.$$

Целое число  $d$  называется размерностью процесса. Совокупность возможных состояний мы обозначаем как пространство состояний, или фазовое пространство. Наблюдаемое состояние может быть представлено в виде

Рис. 3. Траектория движения точки, представляющей состояние системы, в фазовом пространстве. На больших отрезках времени при определенных обстоятельствах могут наблюдаться как устойчивые стационарные точки, так и устойчивые предельные циклы.

точки в фазовом пространстве; движение такой точки во времени  $x(t)$  изображено в виде траектории на рис. 36

Если величина зависит не только от времени, но и от положения в пространстве, то говорят о полевых величинах. Такой полевой величиной является, например, гидродинамическая скорость воздушного потока. При описании процесса нам, кроме параметров состояния, необходимы еще и так называемые «параметры обмена», или «текущие величины», характеризующие взаимодействие между элементами системы или процессы обмена между системой и окружением. Для многих важных параметров можно вывести балансовые уравнения, выражающие временные изменения параметров состояния в виде суммы всех изменений (увеличений и уменьшений) этих параметров и скорости их приращения (или убывания). Примером тому могут служить масса и энергетический баланс: согласно закону сохранения, приращение массы и энергии всегда равно нулю. Однако и при рассмотрении балансов, к примеру, для отдельных компонентов веществ при химических и ядерных реакциях мы наблюдаем ту же картину.

Если некоторой величине присвоено численное значение, следует определить «представление» этой величины: например, установить исходную точку и единицу измерения. Физики охотно оперируют «свободными» величинами. Допустим, речь идет о температуре  $T$  некоторого тела; произведя измерения, исследователь представляет эту величину численным значением, которое, естественно, зависит от того, какая температурная шкала была использована при измерениях — Кельвина, Цельсия или Фаренгейта. Одна из догм физики как раз и заключается в том, что физические законы не зависят от выбора представления различных величин. К основным величинам в физике относится масса  $M$  системы, измеряемая в граммах или килограммах. Следует отметить, что эта величина подчиняется закону сохранения:

*Масса не может быть ни произведена, ни уничтожена; она может быть только получена или отдана или преобразована из одной формы в другую.*

Другой — не менее значимой — фундаментальной физической величиной является энергия. Энергия также подчинена закону сохранения:

*Энергия не может быть ни произведена, ни уничтожена. Энергия*

*может существовать в различных формах — таких, как теплота и работа. Энергия может быть преобразована из одной формы в другую или передана в процессе обмена между системами.*

Заслуживает внимания тот факт, что в теории относительности Эйнштейна масса  $M$  и энергия  $E$  жестко взаимосвязаны, что свидетельствует об эквивалентности этих величин:

$$E = Mc^2.$$

Совершенно особыми величинами в физике являются пространственные и временные координаты. Для их представления используется система координат (например, трехмерная система координат  $(x, y, z)$ ), начало отсчета которой в каждый рассматриваемый момент времени находится в определенном образом заданной точке; оси этой координатной системы имеют определенное направление и поделены на определенные отрезки, обозначающие длину, время и т. п. Уже упоминавшееся выше простое требование (физические законы не должны зависеть от выбора представления) при последовательном применении определило саму сущность общей теории относительности и важнейших выводов из нее. Из-за своего радикального характера сделанные Эйнштейном выводы об изменяемости течения измеряемого времени вызвали у современников глубокий скепсис. Ученый был вынужден подробно объяснять, что относительность времени ни в коем случае не означает нарушения каузальности. Каузальность подразумевает, что следствие никогда не может по времени предшествовать вызвавшей его причине. Таким образом, мы лицом к лицу сталкиваемся с вопросами, остающимися открытыми для современной физики. Причина, следствие и каузальность — это физические понятия, не имеющие, собственно, четких определений; в классической теоретической физике они существуют отнюдь не эксплицитно. Выражение «предшествовать по времени» означает, по сути, что время обладает определенной направленностью, своего рода «стрелкой», и что течение процессов возможно только в одном направлении — в направлении этой «стрелки», вперед, но никак не назад. Однако в теории относительности такая «стрелка» отсутствует, и оба направления времени (точно так же, как и любые пространственные координаты) оказываются эквивалентны. В дальнейшем мы вновь и вновь будем сталкиваться с проблемой направленности времени и существования прошлого, настоящего и будущего.

В физике есть область, «признающая» существование односторонней стрелы времени. Речь идет о термодинамике. Рудольф Клаузиус

в 1850 году так сформулировал первый запретительный принцип для тепловой формы энергии:

*Невозможен спонтанный перенос теплоты от тела более холодного к телу более теплomu.*

Используя введенное Клаузиусом в 1865 году понятие энтропии, этот принцип можно сформулировать следующим образом:

*Величина, характеризующая энтропию, никогда не может обратиться в нуль. Невозможны процессы, величина энтропии в которых равна нулю. Строжайше запрещена спонтанная передача теплоты от более холодного тела к более теплomu, а также работа, производимая путем одного лишь охлаждения какого-либо тела.*

Перед нами второй закон термодинамики. При интерпретации энтропии как меры обесценивания находящейся в некотором теле энергии мы можем сформулировать следующий совершенно очевидный принцип:

*Невозможны процессы, которые спонтанно (без затрат) приводят бы к приращению энергии в системе.*

Эта чрезвычайно общая формулировка выражает уже не основной закон термодинамики, а, скорее, общий закон физики, поскольку данный запретительный принцип может считаться действительным для всех без исключения процессов. На этом пока и остановимся, поскольку в дальнейшем вышеперечисленные проблемы еще не раз станут предметом нашего исследования.

Еще более своеобразно выглядит ситуация, сложившаяся в разделах физики, занятых изучением микромира. Количественное описание состояния системы и в квантовой механике производится при помощи соответствующих величин; здесь также возможно произвольное представление этих величин. Однако принцип, согласно которому состояние системы не должно зависеть от характера представления, претерпевает при этом глубокие изменения. В нашем, «нормальном», мире система всегда либо находится в каком-то определенном состоянии, либо нет, однако утверждение такого рода применительно к квантовым объектам имеет смысл лишь условно.

Одной из сложнейших интеллектуальных проблем, стоящих перед человеком, взявшимся поразмышлять о физике, является соотношение частиц

и волн в квантовой механике. За прошедшие десятилетия на эту тему немало написано и сказано, однако — если уж честно — следует признать, что, несмотря на множество новых экспериментов и фактов, картина в целом все так же неясна, как и прежде. Большинство физиков занимает прагматическую позицию: им известно, что результаты их вычислений совпадают с результатами экспериментов. Это положение остается действительным даже в тех случаях, когда оно резко противоречит здравому смыслу (эксперимент с двойной щелью, кошка Шрёдингера, ЭПР-парадокс, множественные миры Эверетта и т. д.).

Здесь мы не будем подробнее останавливаться на этих примерах; мы займемся другим аспектом проблемы. Термины, в которых мы мыслим и говорим, являются абстракциями, понятиями отвлеченными, ритуализированными, и мы можем спросить себя: где истоки наших представлений о частицах и волнах? Где корни того «здравого смысла», который ведет нас по жизни, успешно справляясь с повседневностью, но плачевно отказывая, когда дело доходит до физики — как физики мельчайших частиц, так и физики, занятой весьма и весьма крупными объектами? Ведь если и существует проблема с квантами или с относительностью, то существует она не в природе, а в наших головах. Каковы же наши обыденные представления?

Частицы — это «нормальные», обычные предметы и существа: камни, инструменты, оружие, растения, животные, люди. Частицы твердые, имеют форму и цвет, могут рассматриваться как «индивидуумы», чью историю можно проследить, они могут расти или изнашиваться. Все эти объекты отличаются друг от друга по форме или по расположению в пространстве. Самым важным объектам такого рода люди даже дают «личные» имена — кошке, собаке, особо замечательной горной вершине, старому дубу. Волны — совсем другое дело. Примером могут служить волны на море или в полях. Волны олицетворяют непреходящесть преходящего, они возникают ниоткуда и вновь исчезают, они не стареют, их невозможно отличить друг от друга, они мгновенны и безличны.

Корни такого разделения мира объектов надвое — на относительно стабильные, осязаемые и мимолетные, едва уловимые — в их полезности и доступности для нас. Никому не придет в голову всерьез провозгласить своей собственностью дуновение ветра или звать по имени морскую волну. Из множества вещей, формирующих нашу практическую жизнь со времен становления человечества, постепенно зарождались идеальные и абстрактные научные предметы. О том, насколько глубоко закрепилась в наших представлениях эта древняя «каинова печать», свидетельствует резкое противопоставление ньютоновской механики, закрепившей на каждом предмете неотвязную зловещую «стрелку», и максвелловской электродинамики,



расставившей по всему пространству крошечные «стрелочки», отмечающие колебания волн и течений.

Плененные повседневным опытом, люди долгое время думали, что мир и не может быть другим, что все на свете — любой предмет и любое явление — относится к одной из двух категорий, и не могли понять того, что не кто иной, как они сами, люди, пытаются навязать природе эту своего рода «сегрегацию». Человек не только собственными представлениями о существовании божьих тварей создает по своему подобию, он и картину мира в своем воображении рисует, опираясь на свой житейский опыт, в соответствии с собственными деяниями.

Наше исторически сложившееся расщепленное восприятие природы находит отражение во многих разделах физики. Рассмотрим пример из акустики. В геометрической акустике — чрезвычайно полезной вспомогательной дисциплине, используемой при решении множества технических задач, — громкоговоритель, посылающий звук во всех направлениях, представляется как своего рода «дробовик». «Звуковые частицы», как бильярдные шары, «отталкиваются» от стен, теряя при этом со временем свою силу, и некоторые из них в конце концов достигают ушей слушателя. Каждая из этих «звуковых частиц» имеет свою собственную судьбу: зародившись в громкоговорителе, она летит, пока не натолкнется на одну из стен, и, потеряв при этом столкновении часть энергии, вновь оказывается летящей и т. д. В волновой акустике ситуация, с точки зрения человека, совершенно иная. Всё помещение наполнено стоячими волнами (собственными функциями волнового уравнения), каждая из которых может быть возбуждена только определенной энергией. Громкоговоритель питает эти функции энергией в точно отмеренных дозах, стены (благодаря трению), в свою очередь, лишают волны энергии, и ушей слушателя достигают волны с локально заданными амплитудами и фазами. Звук, воспринимаемый слушателем, не имеет, с этой точки зрения, вообще никакой индивидуальной истории. Не существует способа отследить в пространстве полученное звуковое ощущение, чтобы изучить влияние на него каждой из стен. Однако же нет ни малейшего сомнения в том, в обоих вышеописанных случаях речь идет об одном и том же звуке: звук не двуличен, мы просто рассматриваем его с двух сторон.

Остановимся ради еще одного примера, весьма схожего с первым. На этот раз обратимся к оптике. Со школьной скамьи всем известно, что такое линза и каково устройство телескопа. Световой луч с параллельными осями проходит сквозь линзу, преломляется в фокусе, затем попадает на зеркало... Так или примерно так, должно быть, звучало школьное объяснение. И тут в жизнь нашего луча потихоньку вкралось нечто, именуемое каузальность;

преломление луча теперь оказывается следствием, а существование линзы — причиной. В действительности же не существует каузальной связи между линзой и световым лучом. При участии линзы свет распределяется в пространстве иначе, чем в отсутствие оной; каузальность же в гораздо большей степени касается нашего прагматического образа мышления и образа действия. Посудите сами: если мы вставим в телескоп отсутствующую в нем линзу (причина), соответственно изменится и проходящий через эту линзу свет (следствие). Каузальная связь существует между событиями, но никак не между свойствами, характеризующими объекты. Различные характеристики, естественно, могут обуславливать друг друга, но обуславливание — это не смещенная во времени причинность.

Еще раз вернемся к связи между частицами и волнами. Не только при рассмотрении квантов, но уже в гидродинамике мы обнаруживаем некую двойкую сущность. Текущая жидкость может быть описана двумя эквивалентными способами: по Эйлеру и по Лагранжу. (Хотя оба способа, собственно, открыты Леонардом Эйлером, общепринят один из них все же приписывать Лагранжу, сделавшему решающий вклад в разработку этого способа.) Формулировка Эйлера напоминает электродинамику: в каждой точке пространства расположены измерительные приборы, постоянно регистрирующие давление и поток. Уравнение Эйлера (как и уравнение Навье–Стокса) выражает универсальную взаимосвязь этих параметров. Интерпретация же Лагранжа следует образцам механики и закрепляет «стрелку» на каждой капле воды, а затем задается вопросом о том, каким же путем движется капля (как в детской книжке «Путешествие Капельки»). В гидродинамике обе точки зрения согласованы: и та, с которой можно проследить индивидуальную судьбу отличных друг от друга капель-частиц, и та, с которой видна лишь безликая флуктуирующая жидкая масса, способная ответить только на вопросы, касающиеся сил и потоков, но никак не на простые «откуда» и «куда». В первом случае капли имеют траектории; пространственные координаты являются зависимыми переменными, а время, выраженное независимой переменной, отражает процесс «старения» капель. Во втором случае у нас есть пространственный эпюр скоростей, где и пространство, и время являются независимыми координатами.

На следующем классическом примере мы хотели бы продемонстрировать, насколько близок образ действия нашей так называемой «чистой теории» рецептам, составленным прагматиками. Закон Ньютона гласит, что сила равна массе, умноженной на ускорение:

$$F = m \cdot a.$$

Это уравнение часто толкуется как закон каузальности, и сила при этом представляется как причина изменения движения. Такая интерпретация, в принципе, верна, но она освещает значение уравнения Ньютона лишь с одной стороны. Сила не возникает на краткий промежуток времени перед ускорением (иначе закон Ньютона нарушался бы в этом промежутке времени), а существует постоянно и непосредственно вместе с ускорением. Таким образом, сила и ускорение — это две формы проявления одних и тех же физических условий. Причиной для подобной «каузальной интерпретации» является происхождение понятия «сила», ведь оно родилось из нашего повседневного опыта. Если мой автомобиль встал, я должен его сдвинуть. Мои усилия, мои действия будут причиной движения автомобиля, но ускорение — это не воздействие силы.

Теория служит (сначала непосредственно, позднее — все более опосредованно и обособленно) в качестве инструмента для прогнозирования последствий, которые возымеют наши собственные действия. Такие прогнозы нужны нам, ведь предпринимая действия, мы преследуем некую цель. Однако цель — это нечто, порождаемое только жизнью и информацией; мы вернемся к этому позднее, при обсуждении самоорганизации информации. Принимая во внимание все эти сложные взаимосвязи, мы приходим к мнению, что человеческий здравый смысл и есть продукт и свидетель нашей собственной самоорганизации. Мозг был создан не для того, чтобы постичь мир, а прежде всего для того, чтобы люди могли действовать целесообразно.

### 1.3. ФИЗИКА И ЭВОЛЮЦИЯ

В предисловии мы уже упоминали о том, что цель естественнонаучного исследования эволюции *космоса* из первоначального *хаоса* была поставлена еще в глубокой древности. Хотя концепция, разработанная Гесиодом, Анаксименом, Фалесом, Гераклитом и другими мыслителями, и оказалась принципиально верной, сформулировать проблему в терминах естествознания все же стало возможно только в XVIII–XIX веках. Началом научного изучения проблемы мы считаем работу Канта «Всеобщая естественная история и теория неба»<sup>1</sup>. Иммануил Кант (1724–1804) предпринял в ней попытку объяснить в соответствии с законами естествознания возникновение мира и выдвинул программное требование:

Необходимо обнаружить систему, связующую воедино всю бесконечность звеньев великого творения, и вывести образование самих мировых тел и

---

<sup>1</sup>Kant I. *Allgemeine Naturgeschichte und Theorie des Himmels*.

происхождение их движения из первичного состояния природы, используя законы механики.

Тем самым Кант в своих требованиях шагнул даже дальше, чем Ньютон, чью механику философ, впрочем, использовал при возведении фундамента собственных построений. Кант был глубоко убежден в том, что наша планетная система есть продукт соответствующего законам природы процесса исторического развития. Жан Батист Ламарк (1744-1829) своей книгой «Философия зоологии» заложил основы биологической теории происхождения видов. И хотя его главное предположение (а он предполагал, что эволюция видов основана на «наследовании приобретенных признаков») впоследствии оказалось неверным, плодотворные идеи Ламарка внесли значительный вклад в теорию биологической эволюции. Свою настоящую форму эта теория приобрела благодаря Чарлзу Дарвину (1809-1882) и Алфреду Уоллесу (1823-1913), труды которых привели к революции в биологии. Рождением эволюционных идей в рамках геологии мы обязаны британскому исследователю Чарлзу Лайелю (1797-1885), создавшему динамическую геологию, которая дальнейшее развитие получила в работах Альфреда Вегенера (1880-1939).

Физика для эволюционных исследований является своего рода базовой наукой. Без вклада, производимого физикой, невозможно понимание подлинной сути эволюционных процессов; однако одной физики явно не достаточно. Физики при строительстве здания, именуемого «наукой об эволюционных процессах», выступают в роли ???статиков: без физиков оно развалилось бы, однако и в одиночку возвести это сооружение они, естественно, не в состоянии.

Положение физиков в «ансамбле» исследователей эволюционных процессов очень образно описано Николисом и Пригожиным [?]:

Мы в определенном смысле находимся в роли пришельца с другой планеты, нагкнувшего на дом в пригороде и желающего разобраться в том, что этот дом собой представляет. Само собой, существование дома не противоречит законам механики, так как иначе он попросту разрушился бы. Главная причина интереса пришельца к дому заключается, естественно, не в этом; интерес, скорее, вызывает технология, которой пользовались строители, потребности жителей этого дома и т. п. Пришелец не сумеет разобраться во всем этом, если будет исследовать дом вне культуры, породившей это сооружение.

Точно так же, как пришелец с другой планеты сначала должен исследовать обнаруженный им объект в культурно-историческом контексте, физик

должен быть готов взглянуть на проблему с новой точки зрения. «Нормальные» объекты в физике (такие, к примеру, как атомы, молекулы, газы, жидкости и твердые тела) могут рассматриваться независимо от их индивидуальной истории, от их происхождения, местоположения и прежнего применения. Характеристики типичной физической системы определяются только состоянием данной системы и не зависят от ее истории. Изучать же типичные продукты эволюции — будь то животные, растения или человек — невозможно, если исходить при этом лишь из действительного состояния; для понимания подобных систем необходимо знать не только характеристики текущего состояния, но и предысторию системы. Биологические объекты обладают индивидуальностью, несущей на себе отпечаток индивидуальной истории данного объекта. Историчность — это одна из важнейших черт, характеризующих эволюционные процессы, а потому при их исследовании мы должны использовать и исторические методы. Точно так же, как историк должен работать с архивами, ученый, исследующий процессы эволюции, должен использовать все имеющиеся в его распоряжении источники, проливающие свет на историю изучаемого объекта.

История объектов исследования ученого представляет собой саму суть эволюционных процессов. Слово «история», как известно, имеет несколько значений. В применении, скажем, к геологии, изучающей состоящие из различных веществ почвы и недра, оно означает «историю поверхности Земли»; наука, называемая «история», занимается историческими событиями в самом общем смысле этого слова, изучая и «историю» человечества, и «историю» Земли, космоса и т. д. И наконец, термин «история» используется и для жанровых определений в литературоведении. В последнем случае происхождение термина совершенно ясно: истории, рассказываемые людьми с давних времен, и стали источником, из которого зародилась литература, и такого рода «обмен информацией», рассказ о приобретенном опыте, всегда был чрезвычайно важен. В некотором смысле, и геологические пласты тоже «рассказывают историю» Земли.

Все три перечисленных нами «истории» несут в себе такое понятие, как «прошлое», то есть оказываются помечены уже упоминавшейся стрелой времени и определяют исключительность эволюционных процессов. Подобно тому, как слово «история» обозначает различные, но в то же время и схожие понятия, мы в нашей книге попытаемся отыскать некие нити, связующие совершенно, казалось бы, различные предметы и явления. Как показывают психологические исследования [?], образование новых понятий всегда несет в себе отпечаток нашего собственного бытия и нашего образа мышления. Поскольку речь идет о понятии времени, рекомендуем читателю обратиться к тематическому сборнику, вышедшему под редакци-

ей П. Ландсберга [?], и превосходному анализу, сделанному С. Хокингом в книге «Краткая история времени» [?].

В чем же, собственно, заключаются физические аспекты эволюции? Что является основой любого развития? В сущности, эволюционные процессы могут быть изучены только путем междисциплинарных исследований, и физики, естественно, вносят в них свой вклад — им досталась роль ???статиков, без которых разрушилось бы все здание, возводимое учеными-эволюционистами; однако роль эта при решении многих принципиальных вопросов все же не может считаться ведущей. Задача физиков заключается, в первую очередь, в том, чтобы выяснить, какие предварительные условия необходимы для развития высокоорганизованных систем, к которым, помимо прочих, относятся и все живые существа. Физики изучают движущие силы эволюции, в том числе и уже вкратце описанный нами в качестве примера баланс между обменными процессами, протекающими на Земле.

Наша планета получает лучистую энергию от Солнца, обладающего температурой около 6000 К, и возвращает в мировое пространство в среднем то же количество энергии в виде теплового излучения с температурой приблизительно 260 К. Там фотоны попадают в зону наполняющего космическое пространство фонового излучения, температура которого составляет всего 3 К. Таким образом, при поглощении и выделении энергии каждый квадратный метр поверхности Земли «экспортирует» в окружающее планету мировое пространство в среднем 1 Вт/К энтропии. Представленный механизм можно сравнить с водопадом, приводящим в движение мельницу: причиной процесса является разность уровней. С физической точки зрения, именно это и оказывается важнейшей движущей силой структурообразования на Земле.

Сегодня могут быть объяснены ключевые моменты эволюции галактик, звезд, планет и жизни на Земле. На фоне истории космической эволюции история человечества выглядит всего лишь эпизодом. Чтобы почувствовать это, предлагаем читателю провести следующий *мысленный эксперимент*.

Сократим в миллиард раз время протекания всех процессов и ограничим пространство, в котором они протекают, колбой Эрленмейера. Двадцать миллиардов лет, прошедших со момента Большого Взрыва, окажутся, таким образом, спрессованы в отрезок времени продолжительностью всего двадцать лет! Теперь представим, что если этот эксперимент начался в 1975 году, когда наблюдатель не мог обнаружить в колбе ничего, кроме горячего расширяющегося газа, который начнет конденсироваться лишь спустя несколько лет, то к 1983 году в колбе уже возникла бы наша Галактика, к 1990 году — Земля, а спустя примерно три года на ней появились бы первые живые существа. На таком двадцатилетнем отрезке времени вся ис-

тория человечества заняла бы всего один день, Троянская война длилась бы каких-то пару минут, создание Галилеем основ современной физики — одну минуту, первая мировая война уместилась бы в две секунды, а вторая — и вовсе в одну.

Этот мысленный эксперимент очень нравится нам тем, что наглядно демонстрирует значение нашей эпохи. Именно в наше время война в качестве средства для разрешения конфликтов должна быть отвергнута, и человечество должно выработать иное, чем прежде, отношение к природе. Если достичь этого не удастся, то свой «завтрашний день» человечество в нашем мысленном эксперименте уже не увидит. В связи с таким положением дел мы в нашей книге вновь и вновь обращаемся к вопросам синопсисов и прогнозов. Оба слова произошли из греческого языка и означают следующее: *синопсис* — сводное, суммарное изложение различных взглядов по какому-либо вопросу, сравнительный обзор; *прогноз* — предвидение, предсказание.

На примере метеорологии, имеющей дело с невероятно сложными процессами, становится абсолютно ясно, что без емкого сравнительного анализа (в случае метеорологии это анализ погоды) невозможным оказывается и успешное прогнозирование. В этом отношении оба понятия почти сливаются воедино.

Мы с вами живем в такое время, когда решается вопрос о дальнейшей судьбе человечества: выжить или погибнуть? В этой ситуации проблемы анализа и прогнозирования становятся жизненно важны. И хотя к решению столь сложных и трудных задач торного пути, очевидно, не существует, нам представляется чрезвычайно важным по мере наших скромных сил способствовать поискам решения стоящих перед человечеством задач. Прежде чем перейти к некоторым результатам нашего синоптического анализа, хотелось бы отметить одно: мы можем представить себе только такое будущее человечества, в котором все люди примерно в равной степени обеспечены некоторым необходимым минимумом материальных благ и энергии; это обязательное условие для дальнейшего развития всего многообразия человеческих культур, которое, в свою очередь, приведет к разрешению противоречий не только между современными способами производства и Природой, но и между высокоразвитыми индустриальными странами и странами «третьего мира».

Нам хотелось бы показать, что для эволюции чрезвычайно важна *инновационная способность*, ведь роль *нового* в эволюционных процессах переоценить невозможно. Мы понимаем образование *нового* как определенный исторический процесс, начавшийся в момент Большого Взрыва продолжавшийся в ходе формирования атомных ядер и химических элементов, звезд

и планет, различных биологических видов и самого человека. Сегодняшняя наука в состоянии датировать каждый из этих этапов: известно, когда возник гелий, кислород и тяжелые элементы; самые первые клетки появились из неживой материи от трех до четырех миллиардов лет назад; в принципе, известно даже время образования первых многоклеточных и зарождения более сложных биологических видов. Подобное постоянство в создании *нового*, как мы видим, весьма характерно для эволюции.

Под *новым* мы подразумеваем появление не существовавших прежде в природе элемента, биологического вида, технологии или формы поведения. В живой природе *новое* — это всегда результат мутаций генетического материала. Роль, отведенную в биологии мутациям, в технике играют инновации. *Одним из важнейших условий, определяющих способность системы к эволюции является непрерывное обновление.* Система, не способная к обновлению, обречена на умирание. Примеров тому — великое множество; мы ограничимся всего лишь одним. В биологии каждый вид сопровождается целым рядом мутаций, многие из которых оказываются не нужны данному виду, а потому представляют собой своего рода балласт. Вместе с тем, существует еще и так называемый «генетический багаж». Однако при определенных условиях (прежде всего, при быстром изменении внешних условий) такой генетический багаж оказывается единственным, что может спасти жизнь виду. В качестве примера можно привести сравнение динозавров и млекопитающих: широко распространено суждение о значительном превосходстве млекопитающих над динозаврами. Млекопитающие уже существовали в те времена, когда Земля была населена динозаврами, но занимали лишь пустовавшие ниши и явно уступали динозаврам. Катастрофы, разразившиеся на Земле в тот период, колебания климата и извержения вулканов привели к очень быстрому и резкому изменению условий жизни, так что оказалось, что в «багаже» динозавров отсутствуют резервы, которые помогли бы им выжить, тогда как у млекопитающих такие резервы нашлись. Поскольку млекопитающие обладали огромным жизненным потенциалом, заключавшемся в их способности к видовому обновлению, они сумели не только выжить, им удалось еще и захватить ведущие позиции, вытеснив со сцены динозавров. Способность к постоянному обновлению, таким образом, является непременным условием, определяющим способность к эволюции, каковая способность, в конечном счете, дана лишь для того, чтобы развить обнаруженное и усвоенное *новое*.

Итак, мы очертили достаточно широкий круг вопросов и в последующих главах попытаемся подробнее ознакомить читателя с некоторыми из указанных тем, чтобы по мере возможности убедить его в обоснованности результатов наших синоптических анализов и прогнозов.



## ГЛАВА 2

# Время, сложность и структурообразование

Проблема настолько сложна, что действительно строгое рассмотрение ее невозможно. Это обстоятельство вынуждает нас делать некие упрощенные предположения; можно ли счесть эти предположения законными и непротиворечивыми? Думаю, нет.

*Анри Пуанкаре.*

Механистическое мировосприятие и опыт

### 2.1. Простое и сложное

Приведенная в предыдущей главе картина мира, описываемая физикой, связана с закономерностями, которые физики называют «фундаментальными». Определение «фундаментальные» используется здесь для того, чтобы подчеркнуть, что не существует более глубоких, чем они, закономерностей, что именно они лежат в основе — представляют собой «фундамент» — любого физического объяснения. Прежде всего, это законы, управляющие свойствами и динамикой элементарных частиц и полей; сюда же относятся и законы, содержащие всеобщие запретительные принципы, действительные для всех без исключения процессов. В рамках фундаментальных физических законов существуют различные возможности временного развития систем, причем в зависимости от начальных и граничных условий возможности эти либо реализуются, либо нет. Скажем, законы механики отнюдь не исключают возможности вращения Земли вокруг своей оси под другим углом или движения Земли вокруг Солнца в противоположную нынешней сторону. В одном из «обратных» в этом смысле миров солнце восходило бы на западе и скрывалось на ночь за восточным горизонтом.

Этот и многие другие примеры позволяют нам сделать следующее умозаключение:

*Знания одних только фундаментальных физических законов недостаточно; мир, окружающий нас, обладает высочайшей степенью сложности.*

Хотя многое из того, с чем мы сталкиваемся в жизни, и состоит их элементарных частиц и полей, этот аспект часто не имеет для нас никакого значения. Свой автомобиль или холодильник мы воспринимаем, скорее, не как систему элементарных частиц и полей, а как некую целостность, как предметы обихода, имеющие для нас определенную ценность. Если какой-то из этих предметов выходит из строя, мы обращаемся за помощью вовсе не к физикам, занимающимся теорией элементарных частиц и полей, — мы вызываем механика соответствующей квалификации. Желая постичь мир как некое единство, мы оказываемся лицом к лицу с проблемой отношений между законами, царящими в мире элементарных частиц, и законами, управляющими высокоорганизованными системами. Существует множество возможных ответов на этот вопрос. Приведем крайности:

- 1. Все законы, действительные для комплексных систем, могут быть от начала и до конца выведены из фундаментальных законов физики.*
- 2. Каждый уровень сложности обладает собственными законами. Законы комплексных систем неприводимы.*

Первый ответ принадлежит механикам восемнадцатого и девятнадцатого веков; во главе сторонников этой точки зрения стоял французский астроном и математик Пьер Симон Лаплас (1749-1827). Течение, которое характеризуется вторым из приведенных ответов, называется витализмом; в отличие от сторонников так называемого механистического детерминизма виталисты предполагали существование в каждой системе некоей особой жизненной энергии, которая, так сказать, овладевает неживой материей. Позиция, которую занимаем мы, находится где-то между описанными крайностями. Кратко это положение может быть определено следующими формулировками:

- 1. Фундаментальные физические законы не могут быть нарушены ни при каких условиях и без ограничений действительны для систем любой степени сложности.*
- 2. Комплексные системы обладают эмергентными свойствами; целое больше суммы составляющих его частей.*

Рис. 4. «Конус законов»: Все возможные процессы (не нарушающие фундаментальных законов) находятся в «физическом конусе»; «конусы», символизирующие химические, биологические и социокультурные процессы, значительно уже — они соответствуют процессам (также разрешенным), на которые наложены дополнительные ограничения. [Zeit = время; sozio-kultureller Kegel = социокультурный конус; biologischer Kegel = биологический конус; chemischer Kegel = химический конус; physikalischer Kegel = физический конус]

3. *Законы динамики комплексных систем образуют так называемый конус ограничений, или «конус законов» (рис. 4); по мере возрастания сложности растет и количество соответствующих ограничений.*
4. *Комплексные системы и законы, которым эти системы подчинены, возникли в процессе эволюции; историчность является их главной отличительной чертой.*

Вышеперечисленные положения позволяют установить прямую и тесную взаимосвязь между временем, степенью сложности и космосом. Мы вновь выделили историчность в качестве центрального аспекта. Мир, в котором мы живем, возник приблизительно 17-20 миллиардов лет назад из раскаленной, плотной и при этом совершенно не организованной первичной материи. Эта материя пребывала в состоянии, чрезвычайно близком абсолютному хаосу древних греков или «тохувабоху»<sup>1</sup> древних евреев. Динамика эволюции определялась исключительно фундаментальными законами, ведь комплексных систем тогда еще не существовало. Но наш мир был «креативен» уже с самого начала времен и уже тогда обладал способностью к созданию объектов высочайшей степени сложности в рамках имеющихся начальных и граничных условий — способностью к самоструктурированию и самоорганизации. Для того, чтобы глубже вникнуть в научные основы образования комплексных систем, рассмотрим некоторые основные физические принципы; ограничимся несколькими основными понятиями классической механики и термодинамики. Первая же проблема, с которой нам предстоит столкнуться, может быть отнесена к числу самых глубинных научных проблем.

## 2.2. Обратимость и необратимость

Классическая механика, основы которой были заложены в семнадцатом веке Ньютоном, стала затем надежным фундаментом для понимания раз-

---

<sup>1</sup>Хаос (др.-евр.). — Прим. перев.

личных типов механического движения, включая движение небесных тел. Продуктивная способность механических принципов оказалась настолько велика, что ее границы стали ясны лишь много позже. «Золотая эпоха» классической механики достигла своего пика в 1847 году — с появлением работы Германа Гельмгольца «О сохранении силы», а уже через три года после этого пережила серьезный кризис в результате выхода в свет фундаментального труда Рудольфа Клаузиуса «О движущей силе тепла и выводимых отсюда законах». В своей работе Клаузиус сформулировал новый закон природы — второй закон термодинамики, — и ввел тем самым в естественнонаучное исследование в явной форме вектор времени.

В классической механике время играло роль параметра. Второстепенность роли времени в механике наиболее ярко проявляется на примере демона Лапласа. По мнению Лапласа, существо, обладающее точным знанием всех начальных и граничных условий могло бы путем решения основных уравнений механики вычислить все прошлые и будущие состояния вселенной. В рамках классической механики не существует эволюции и отсутствия принципиального различия между прошлым и будущим. Опираясь на работы Карно и Гельмгольца, Клаузиус в 1850 году впервые сформулировал принцип невозможности спонтанного перехода теплоты от более холодного тела к более тепловому. В позднейших естественнонаучных работах этому новому принципу были даны и другие, все более общие формулировки. Сегодня это положение определяется следующим образом: энтропия может расти, но ни при каких обстоятельствах не может быть уничтожена. Процессы не могут протекать в направлении, связанном с уничтожением энтропии, — возможно лишь то направление, которое связано с производством энтропии. Примером здесь может служить рассыпающаяся куча песка; спонтанное возникновение прежней кучи из рассыпавшейся, согласно принципу Клаузиуса, невозможно.

Позиции классической механики и термодинамики по отношению к временному течению процессов настолько противоположны, что мы должны особо остановиться для рассмотрения этого вопроса. Движение в физике определяется как *обратимое*, если изменение направления движения на противоположное не противоречит физическим законам; *необратимым* называется такое движение, изменение направления которого на противоположное запрещено физическими законами. Изменение направления движения на противоположное также называется в физике *T-преобразованием*. Примерами обратимого движения могут служить вращение планет вокруг Солнца и движение электронов в поле ядра. В этих случаях не существует жестко предписанного направления движения и процесс движения в противоположном направлении не противоречил бы законам физики.

Совершенно иначе выглядит случай необратимого движения. Рассмотрим в качестве примеров падение камня на мягкую почву или процесс зажигания спички. Гипотетически обратные названным процессы выглядят следующим образом: камень возвращается на прежнее место за счет теплоты, полученной от почвы, а спичка из обгоревшей снова становится целой; ни того, ни другого в реальной жизни не происходит. Спонтанное возвращение на прежнее место упавших камней и превращение уже использованных спичек в новые противоречит не только нашему житейскому опыту, но и фундаментальному физическому закону — второму началу термодинамики.

Обратимые процессы являются предельным случаем необратимых; обратное недействительно. С математической точки зрения, различные типы обратимого движения образуют группу, а необратимого — полугруппу. Впрочем, нас в данный момент интересует не столько математически точное изложение этого отличия обратимых процессов от необратимых, сколько ответ на вопрос о практическом определении обратимости или необратимости процессов. С этой целью попробуем развить следующее положение: допустим, исследуемый процесс заснят нами на киноплёнку или мы зафиксировали ряд состояний исследуемой системы на некотором промежутке времени, получив таким образом временную серию. Теперь запустим фильм «задом наперед» или рассмотрим временную серию от конца к началу: если при этом мы не отметим противоречий какому-либо из известных физических законов, то исследуемый процесс может быть определен как обратимый; в противном случае, мы имеем дело с необратимым процессом. Описанные примеры убеждают в том, что необратимость есть основополагающее свойство нашего мира. Представление о необратимости процессов соответствует всему нашему жизненному опыту: уголь в печи соединяется с кислородом, содержащимся в воздухе, образуя углекислый газ и пепел, куча песка рассыпается на глазах, инструменты и механизмы изнашиваются, люди рождаются и умирают — обращение вспять этих процессов не под силу, пожалуй, и самой смелой фантазии.

Как уже упоминалось, в 1850 году Рудольф Клаузиус (в то время он был профессором Артиллерийской школы в Берлине) открыл второй закон термодинамики, а заодно и причину необратимости макроскопических процессов, заключающуюся в возрастании энтропии. Как известно, энтропия — наряду с энергией — является одной из основных величин в физике. Энтропия текуча и может быть передана от одного тела к другому.

*Количество энтропии, содержащееся в некотором теле, есть мера обесценивания энергии данного тела. Чем выше энтропия некоторой системы, тем быстрее обесценивается энергия дан-*

*ной системы. Одновременно энтропия является и мерой разупорядочивания молекулярной структуры системы. Согласно второму закону термодинамики, каждый макроскопический процесс сопровождается ростом энтропии, уничтожение же энтропии в принципе невозможно. По Клаузиусу, производство энтропии определяет направление течения процесса.*

Процессы, протекающие в природе, из-за неотрицательности производства энтропии обладают внутренне свойственной им тенденцией к уменьшению значения энергии и, вместе с тем, к увеличению упорядоченности на молекулярном уровне; течение таких процессов необратимо. Что же за принцип лежит в основе необратимости? Этот вопрос волновал умы многих великих естествоиспытателей со времен Клаузиуса: среди них Больцман, Лошмидт, Планк, Цермело, Пуанкаре, Гиббс, Эренфест, Эйнштейн и другие. Задача, занимающая физиков, заключается в том, что микропроцессы (то есть процессы движения элементарных частиц, атомов и молекул) обладают свойством обратимости. Например, атомное рассеяние может протекать и в обратном направлении — достаточно поменять местами источник и объект. Просмотр запущенного с конца фильма, в котором зафиксированы результаты наблюдения за процессом рассеяния, доказывает полное соответствие полученного таким образом обратного процесса всем фундаментальным физическим законам. Причина такого рода обратимости состоит в том, что гамильтоновы системы классической и квантовой механики допускают изменение направления движения. Уравнения Максвелла также носят реверсивный характер.

Создание и развитие классической механики и электродинамики означают, казалось бы, и высочайший взлет, и, в то же время, конец физики. Пригожин и Стенгерс [?] писали об этом так:

Классическая динамика сегодня может быть изложена весьма компактно и при том замечательно элегантно образом. Все свойства динамической системы могут быть выражены единственной функцией — функцией Гамильтона. Теория выглядит вполне законченной и способна дать полное и однозначное решение любой задачи. Динамика обладает, следовательно, подлинной выразительностью, которая с тех самых пор . . . вызывает восхищение — но и ужас. [. . .] Для многих классов динамических систем время, похоже, стало не более чем артефактом.

Пригожин и Стенгерс, таким образом, считают, что в рамках физики обратимых процессов понятие времени не может быть определено однозначно; оба направления течения времени в какой-то мере равноправны.

Необратимые процессы в рамках классической механики и (общепринятой) квантовой механики не могут быть описаны в полном объеме. Любая конечная система, состоящая из атомов, молекул и электромагнитных волн, которые соответствуют обратимым динамическим уравнениям, вместе с тем обязательно обладает еще и обратимой во времени динамикой. Следовательно, упавший камень и сгоревшая спичка, представляющие собой конечные системы, должны бы — на микроскопическом уровне — вести себя обратимо, вступая при этом в конфликт с нашим опытом и вторым законом термодинамики.

Указанное противоречие между описанием происходящего на микроскопическом уровне и описанием того же процесса с точки зрения термодинамики и статистики известно уже более ста лет. Еще в 1876 году, то есть через пять лет после появления первой работы Больцмана «Аналитическое доказательство второго закона. . .»<sup>2</sup>, венский физик Лошмидт опубликовал свои возражения, получившие известность как «парадокс Лошмидта». Лошмидт рассматривал некий газ, окруженный гладкими упругими стенками. По теореме Больцмана, в полном согласии со вторым законом термодинамики, гамильтониан, соответствующий энтропии, должен увеличиваться. Лошмидт предложил следующий мысленный эксперимент: в определенный момент времени векторы скорости всех молекул следует развернуть в обратном направлении; поскольку движение обратимо, система должна будет тем же путем двинуться «назад», а это значит, что гамильтониан (энтропия системы) начнет монотонно убывать, что, однако, противоречит теореме Больцмана. Парадокс Лошмидта вызвал в кругу физиков оживленную дискуссию, и окончательно не затихла до сего дня. Спустя двадцать лет после выхода в свет работы Лошмидта появляется еще одно, не менее значительное, возражение против истинности теоремы Больцмана. В 1896 году Цермело в «Анналах физики» публикует работу «Об одной теореме динамики и механической тепловой теории»<sup>3</sup>. Спорная теорема была сформулирована Пуанкаре, издавшем в 1890 году свое знаменитое исследование «О задаче трех тел и уравнениях динамики»<sup>4</sup>. Сегодня нам совершенно ясно, что работа Пуанкаре оказалась для развития физики не менее плодотворной, чем труды Майера, Гельмгольца, Клаузиуса и Больцмана. В 1890 году Пуанкаре доказал теорему о квазипериодичности механических систем. Согласно этой теореме, при определенных условиях механическая система через некоторое конечное время («время возврата» Пуанкаре) в состояние, сколь угодно близкое исходному. Цермело вывел из теоремы Пуанкаре заключе-

<sup>2</sup>Boltzmann L. *Analytischer Beweis des Zweiten Hauptsatzes. . .*

<sup>3</sup>Zermelo E. *Über einen Satz der Dynamik und die mechanische Wärmetheorie.*

<sup>4</sup>Poincaré H. *Sur le probleme des trois corps et les equations de dynamique.*

ние, касающееся поведения газа, помещенного в камеру: по прошествии некоторого времени газ должен вернуться в свое исходное состояние.

Отметим, что разрешить парадокс Цермело не может и позднее доказанный астрономами порядок величины, характеризующей время возврата больших систем. Парадокс возврата совершенно однозначно утверждает невозможность необратимого поведения чисто механической системы. С другой стороны, в реальном мире безусловно существуют — несмотря на парадоксы теории — истинно необратимые процессы. Примером одного из подобных необратимых процессов может служить линейно затухающий осциллятор. Что же касается энтропии, то энтропия никогда не уменьшается, и этот факт действителен для всех динамических процессов в изолированных системах. Отклонение величины энтропии от максимального значения поэтому всегда увеличивается.

### 2.3. Созидательный хаос

Как уже было сказано, «нормальная» ньютонова или гамильтонова механика оказывается не в состоянии разрешить глубинный конфликт между обратимостью и необратимостью. Очевидно, требовалось введение новой концепции; корни этой концепции, занимающей центральное место в сегодняшних исследованиях в области теории хаоса, все же принадлежат еще девятнадцатому веку, восходя к работам Пуанкаре. Речь идет о понятии неустойчивости движения, зависящей от изменения начальных условий. Под этим понимается (если не углубляться в детали) свойственное определенным системам расхождение в течение весьма малого промежутка времени двух поначалу бесконечно близких траекторий. Иными словами, малейшее изменение начальных условий по прошествии некоторого небольшого отрезка времени перерастает в огромные отклонения.

*В неустойчивых (стохастических) областях фазового пространства расхождение двух изначально бесконечно близких траекторий увеличивается с течением времени экспоненциально. Такие системы сегодняшняя наука определяет как стохастические.*

Уже Пуанкаре было известно (в 1892 году), что ряд механических задач с участием нескольких тел — например, задача трех тел в небесной механике — имеет дело с неустойчивостью. Правда, со времен гениальных работ Пуанкаре должно было пройти еще более полувека, прежде чем было установлено существование взаимосвязи между неустойчивостью механического движения и необратимостью.



Пионерами этого важного направления физики считаются Хопф, Крылов, Борн, Колмогоров, Арнольд, Мозер, Синай и Чириков. Неустойчивость механического движения является, в понимании современной науки, причиной «беспорядочного, хаотичного» характера молекулярного движения в газах и макроскопических телах, — иными словами, причиной молекулярного хаоса.

Можно определить меру расхождения траекторий, называемую показателем Ляпунова, — по фамилии русского математика, в конце девятнадцатого века разработавшего основы концепции, носящей теперь его имя. С показателями Ляпунова теснейшим образом связана и так называемая энтропия Колмогорова. Строгое определение этой величины находится за рамками нашей задачи, однако в самом общем случае величина эта равна сумме положительных показателей Ляпунова, характеризующих некоторое движение. Колмогоров — это еще один русский математик, внесший значительный вклад в развитие новых направлений в науке.

Не менее важные результаты были получены также и при анализе проведенных при помощи современных компьютеров численных решений уравнений Ньютона для многочастичных систем. Обычные модели подобного рода содержат, правда, всего несколько сотен частиц; при использовании же метода периодических граничных условий полученные результаты могут быть распространены и на бесконечные системы. В своей новаторской работе ???Орбан и Беллеманс (1967) исследовали динамику ста дисков, движение которых подчинялось уравнениям Ньютона и законам упругого соударения. Правда, при этом не наблюдалось соответствующего циклу Пуанкаре возврата, и тому есть свои причины:

1. Для системы из ста частиц цикл Пуанкаре оказывается слишком велик;
2. Неизбежно случающиеся при округлении ошибки в расчетах действуют как некоторое постоянное стохастическое возмущение, ведущее к «забыванию» начальных условий.

Другие авторы, используя численное моделирование динамики ньютоновой частицы, доказали, что погрешности округления разрушают циклы Пуанкаре в больших системах и ведут к монотонному росту энтропии системы. Впрочем, ошибки округления отвечают и за то, что при обращении скорости начальное значение больцмановского гамильтониана (энтропии) больше уже не может быть достигнуто, так как именно в результате ошибок округления часть информации, существовавшей в момент начала процесса, уже утрачивается.

В связи с этим обстоятельством московскими учеными во главе с Норманом было введено понятие стохастического фона, за которым стоит представление о том, что ньютонова механика в действительности существует, собственно, только для тех интервалов времени, когда неизбежные стохастические влияния не вызывают вынужденного «забывания» начальных условий. С нашей точки зрения, это принципиально верное представление непременно должно быть связано с существованием известного науке универсального фонового излучения.

Так называемый стохастический фон, с точки зрения физики, есть не что иное, как «море» тепловых фотонов с температурой 2,7 К, в котором и протекают все процессы нашей метagalактики. Это тепловое фотонное море и есть та действительно значимая физическая причина разрушения цикла Пуанкаре в подсистемах метagalактики. В любом случае, переход от обратимой детерминированной эволюции к эволюции стохастической, порождающей рост энтропии, не есть результат аппроксимации или дополнительных допущений, — этот переход является следствием такого неотъемлемого внутреннего свойства движения, как неустойчивость. Этот вывод можно назвать также и квинтэссенцией работ Пригожина и его коллег [?, ?].

В заключение настоящего раздела, посвященного взаимосвязям неустойчивости механического движения и необратимости, подытожим основные положения, характеризующие современное понимание уравнений необратимости:

1. Гипотеза, предполагающая комплексный характер механического (квантовомеханического) движения в системе, равно как и связанная с первой гипотеза о неустойчивости как о неотъемлемом внутреннем свойстве самого движения. Иными словами, предположение, касающееся хаотического характера микроскопического движения.
2. Нарушение временной симметрии в результате ограничения макроскопического движения в подгруппе с возрастающей энтропией, направление течения времени в которой соответствует второму закону. Обоснованием подобного дополнительного допущения может служить осуществление перехода к бесконечно большим системам либо присоединение (конечной) системы к «остальному космосу».

Следует еще раз подчеркнуть: несмотря на значимость описанных научных достижений, очень многие важные вопросы остаются пока открытыми, так что окончательное решение проблемы необратимости еще впереди, и особенно важным нам представляется обязательное включение в процесс

решения космологического аспекта. Одно абсолютно ясно уже сегодня: корни проблемы макроскопической необратимости скрываются в неустойчивости микроскопического движения, то есть в хаосе микромира.

## 2.4. Процессы структурообразования

В современной науке, пожалуй, не отыщется такой области, где понятие «структура» не занимало бы видного места. Так, например, математика стала учением о структурах благодаря систематичной работе исследовательской группы Бурбаки. Само понятие «структура» (не имеющее, к сожалению, единого определения) находится в теснейшей связи с такими понятиями, как *множество, элемент, соотношение, операция, симметрия*. Структура системы понимается как тип упорядочивания и соотношений элементов системы. Под структурообразованием подразумевается возникновение — в самом широком смысле этого слова — новых элементов или соотношений в системе [?]. В более узком смысле о структурообразовании мы говорим, имея дело с понижением симметрии системы. Так, например, шестиугольник является системой с менее совершенной симметрией, нежели круг: отображения последнего, полученные в результате любых вращений этого круга вокруг своего центра, полностью совпадают с исходной фигурой, тогда как для шестиугольника такое полное совпадение возможно только при таких поворотах, когда величина угла кратна  $60^\circ$ . Симметрия кристалла льда менее совершенна, чем симметрия, существующая в паре или воде, поскольку кристаллическая решетка позволяет совершать только дискретные сдвиги.

Современная физика знакома не только с трансляционной симметрией, о которой мы только что упомянули, но и с целым рядом других видов симметрии, значительно менее наглядных [?, ?]. С точки зрения физики, наш мир пребывал в состоянии совершеннейшей симметрии в самом начале своей эволюции, в момент так называемого Большого Взрыва. В процессе эволюции первозданная симметрия космоса нарушалась все сильнее и сильнее, и результатом этих нарушений было рождение все новых и новых структур.

Попробуем разобраться в предпосылках, лежащих в основе способности материи к созиданию. Вопросы, представляющие для нас особый интерес, касаются соотношения времени и сложности. Каким образом могло произойти преобразование первоначального *хаоса* в наблюдаемый нами сегодня мир сложных, *комплексных структур*? Существует единственное разумное тому объяснение: хаосу уже внутренне свойственна способность

к созиданию. Весьма существенный вклад в изучение этих созидательных способностей сделан учеными, занятыми исследованием хаоса и теорией самоорганизации и тем самым движущими науку к постижению сложной природы окружающего нас мира. Стало ясно, что существующая сложная структура мира должна рассматриваться нами как результат процесса самоорганизации. Чтобы мысленно проследить весь путь, приведший ученых к этому выводу, нам придется начать издалека и заняться сначала таким предметом, как феноменология временных процессов, а также затронуть отдельные физические понятия и законы. Представление о многообразии простых и сложных процессов, протекающих в окружающем нас мире, можно получить, вкратце рассмотрев некоторые из них.

К простым процессам мы относим падение камня, полет мяча, движение Земли по орбите вокруг Солнца и движение электрона по орбите вокруг ядра. Со времен Галилея, Кеплера и Ньютона физике многое известно о сущности этих процессов и законах, которым они подчинены. Значительно меньше мы знаем о комплексных временных процессах — о течении ручья, к примеру, или о морских волнах, или о погоде и течении процессов в биологической и социальной сферах. Язык, движение и поведение детей и взрослых или процессы, протекающие в природе, очевидно значительно многограннее, нежели движение падающих тел; тем не менее, и эти высокосложные процессы могут быть проанализированы при использовании современных научных методов.

Изучение комплексных процессов можно начать с попытки определенным образом классифицировать рассматриваемые явления. На первом этапе помочь может уже сам язык, используемый нами при описании процессов. Мы проводим разделение процессов на обратимые и необратимые, периодические и непериодические, а также детерминированные и стохастические. Кроме того, мы используем для обозначения процессов слова «рост», «распад», «прогресс», «регресс» и многие другие термины, имеющие четкое значение в разговорном языке, но при этом довольно расплывчато определенные в языке науки. Особый интерес для нас представляет понятие *самоорганизация*. Под самоорганизацией понимается *процесс, структурирующий систему спонтанно*, то есть «сам по себе», без какого-либо внешнего управления. Опыт показывает, что в природе существует множество такого рода процессов; к их числу относятся и погодные явления, и все биологические процессы.

Еще одна возможная классификация реальных процессов основана на величине характеристического времени. Для измерения времени используются такие единицы, как секунда, минута, час, сутки, год, век, тысячелетие и т. д. Даже секундные интервалы можно разделить на еще более короткие

отрезки времени вплоть до пикосекунды. Таким образом, временная шкала сегодня включает в себя величины примерно тридцати порядков. Наибольший временной диапазон охвачен процессом расширения нашей метагалактики, начавшимся приблизительно 17–20 миллиардов лет назад. Всего несколько миллиардов лет длится эволюционный процесс в Солнечной системе. В то время как эволюция живых существ описывается на временной шкале интервалом от нескольких миллионов до нескольких миллиардов лет, смена поколений происходит на куда более коротких отрезках времени — от одного дня до одного столетия. Многие интересные физические и химические процессы протекают в течение временных промежутков, исчисляемых секундами. Временные рамки многих типичных для биосферы ритмов ограничивают сроки от суток до года, что следует рассматривать как результат согласования этих ритмов с ритмами планетарными. Почти во всех диапазонах нашей временной шкалы мы обнаруживаем простые и сложные типы движения.

Обратимся теперь к особым характеристикам процессов структурообразования. Первое наблюдение касается того, что эти процессы в совершенно различных системах протекают, кажется, по одной и той же схеме и оказываются абсолютно аналогичны друг другу при сравнении качественных характеристик. Все рассматриваемые здесь системы состоят из некоторого большого числа однородных элементов (атомы, клетки, индивидуумы), которые в неструктурированном состоянии ведут себя достаточно беспорядочно, статистически сообразно типу их взаимодействия между собой. Однако если внешние условия изменяются таким образом, что определенный параметр (так называемый параметр порядка) превышает критическое значение, в системе происходит нечто удивительное. Хотя все элементы системы по-прежнему ведут себя совершенно индивидуально, в соответствии с оказывающими на них влияние условиями, они выстраиваются при этом в большие единые группы, играющие в системе различные роли. ???Окрашенная скрипичная струна вдруг демонстрирует макроскопические колебания (рис. 5). Молекулы воды в подогреваемом снизу сосуде собираются в конвективные ячейки (рис. 6, 7). Молекулы в ходе химической реакции образуют временные структуры (рис. 8). Клетки с общим генотипом дифференцируются в процессе онтогенеза в различные по своему фенотипу ткани. Люди с примерно равными (с точки зрения биологии) способностями социально делятся на группы в соответствии с избранными ими профессиями. В ходе всех перечисленных процессов множество элементов системы — первоначально единое — распадается на различные эквивалентные друг другу классы, вследствие чего *симметрия системы оказывается нарушена и возникает структура.*

Рис. 5. Структурообразование на примере окрашенной скрипичной струны: а) струна и смычок; б) схематическое представление отрицательного трения, благодаря которому достигается полная энергия накачки струны; в) нарастание амплитуды ( $x$ ) колебаний как функция от времени; г) траектории в пространстве скоростей. [ $a = a$ );  $b = b$ );  $c = v$ );  $d = r$ ); Saite = струна; Bogen = смычок]

Рис. 6. Структурообразование на примере подогреваемой снизу жидкости. *Слева*: До тех пор, пока разница температур между верхним и нижним слоями жидкости мала, не наблюдается никаких макроскопических эффектов, кроме теплопередачи. *В центре*: Как только разница температур принимает критическое значение, жидкость выходит из состояния равновесия, о чем свидетельствуют наблюдаемые флуктуации. *Справа*: При значениях разницы температур, превышающих критическое, мы получаем возможность наблюдать чудесные «соты» — в процессе движения жидкости образуется так называемая гексагональная ячеистая структура. [Gleichgewicht = состояние равновесия;  $T_{\text{krit}} = T_{\text{крит}}$ ]

Рис. 7. Цилиндрическое движение подогреваемой снизу жидкости (поперечный разрез). [Benardzellen = ячейки Бенара]

Рис. 8. Реакция Белоусова–Жаботинского: раствор периодически изменяет цвет с красного на синий. [BZR = реакция Белоусова–Жаботинского; rot = красный; blau = синий; min = мин]

Совершенно аналогичные описанным нарушения симметрии в физике известны уже давно, и обозначаются они термином *фазовые переходы*. Между ними и так называемыми кинетическими фазовыми переходами в нефизических системах обнаруживается весьма впечатляющее сходство, что и позволяет говорить о существовании неких общих закономерностей, действительных для всех процессов структурообразования.

*Таким образом, самоорганизация — это процесс, приводящий систему в состояние, отличающееся от состояния, заданного граничными условиями и действующими законами, более низкой степенью симметрии.*

## ГЛАВА 3

# Самоорганизация и эволюция

Я испытываю чувство удовлетворения, убеждаясь, как без помощи произвольных вымыслов создается под действием всем известных законов движения благоустроенное целое, . . .

*Иммануил Кант.*

Всеобщая естественная история и теория неба

### 3.1. Необратимость и самоорганизация

*Самоорганизация* — это процесс спонтанного структурообразования, являющий собой противоположность общей тенденции к деструкции, то есть к разрушению структур. Процессы самоорганизации относятся к числу необратимых, правда, обладая при этом совершенно особыми, характерными только для них, отличительными чертами.

*Необратимость есть предпосылка для начала процесса самоорганизации.*

Поскольку необратимость является следствием «креативного характера» механического движения, выражением тенденции к расхождению, или дивергенции, то есть к разнообразию, то в процессе самоорганизации возникают новые формы созидательной способности материи. Чему учит нас наш повседневный опыт? Наблюдения показывают нам, что при определенных условиях из молекулярного хаоса может возникнуть порядок. Доказательство тому — всё многообразие, порожденное эволюцией с момента образования галактик, звезд и планет и вплоть до возникновения жизни с ее едиными экологическими и социальными структурами. Физический анализ свидетельствует, что *система способна к самоорганизации только*



Рис. 9. Реакция Белоусова–Жаботинского. Слева: Спонтанное возникновение пространственной периодичности. [got=красный; blau=синий; t in s=время в секундах]

Рис. 10. В ходе реакции Белоусова–Жаботинского при определенных условиях могут возникать спиральные волны. [BZR=реакция Белоусова–Жаботинского]

*при возникновении определенных условий*, к которым можно отнести следующие: *существование некоторого надкритического интервала, отделяющего систему от состояния равновесия, и приток в систему полноценной энергии (вывод энтропии из системы)*. Иначе говоря, мы определяем некий процесс как процесс самоорганизации, если в ходе его система покидает состояние термодинамического равновесия при условии «экспорта энтропии» и приходит в сравнительно более упорядоченное, нежели начальное, молекулярное состояние. В качестве примера может послужить уже упоминавшаяся реакция Белоусова–Жаботинского, которая представляет собой сложную реакцию с участием ионов церия, ионов брома и малоновой кислоты (рис. 8). Перечисленные вещества вступают в реакцию в результате введения в раствор высококачественных химикатов, образуя при этом не только пространственные, но еще и временные структуры (рис. 9; 10). Подводя итог всему вышесказанному, мы можем сформулировать следующее положение:

*Процессами самоорганизации являются такие процессы, которые посредством неотъемлемо присутствующих системе движущих сил ведут систему от состояния равновесия к образованию более сложных упорядоченных структур.*

Задачей, которую ставит перед собой теория самоорганизации, называемая также синергетикой, является исследование условий протекания процессов самоорганизации. Два последних десятилетия развития синергетики, в основе которой лежат фундаментальные работы Шрёдингера, Тьюринга, Пригожина, Эйгена и Хакена, были очень плодотворны. Особое место среди собранных и изученных за это время научных данных занимает, к примеру, такой факт: сложную динамику не следует а priori воспринимать как неупорядоченность. Если энтропию рассматривать как меру упорядоченности, то достаточно высокой степенью организации могут обладать даже турбулентные течения.

Какую же роль понятие «самоорганизация» играет в процессе постижения сложности окружающего нас мира? В последние годы в мире науки укрепилось мнение, что сложные эколого-экономические и социокультур-

ные явления могут быть изучены только при условии, что они будут представлены в виде единой комплексной динамической системы, в которой главную роль играют феномены самоорганизации. Такие установки ведут к постоянному расширению сферы применения современных — и поначалу ориентированных только на естественные науки — теорий, подобных теории самоорганизации (или синергетики) в духе школ Пригожина и Хакена. Синергетика предоставляет в распоряжение ученых ряд методов, чрезвычайно удобных и эффективных для исследования высокоорганизованных систем. В свете этой дисциплины всё многообразие эколого-экономических и социо-культурных процессов мы можем увидеть с двух разных сторон. Если считать человека имманентным элементом системы, представляющей наш мир, то речь, несомненно, идет о процессах самоорганизации; альтернативой явилось бы предположение о существовании некоей внешней системы управления нашим миром согласно извне же заданной программе. Если же мы выведем людей за пределы системы, сочтя человека сознательно действующим субъектом, то можем рассматривать самих себя (по крайней мере, в определенной степени) как «организаторов» процессов, протекающих в системе. Оба видения взаимно дополняют друг друга: здесь мы встаем на позиции синергетики и рассматриваем систему как комплексное динамическое единство. При этом следует с самого начала твердо уяснить, что подобный подход может быть плодотворным только при условии междисциплинарного сотрудничества ученых, занимающихся естественными, техническими и общественными науками. Как уже было упомянуто в первой главе, естествоиспытатель выступает в этом «ансамбле» в роли, схожей с ролью статика при сооружении здания: будучи признан вполне компетентным для проведения расчетов и математического моделирования, он все же не должен чересчур вмешиваться в вопросы, касающиеся деятельности, назначения, цели и смысла.

### 3.2. Диссипативные структуры

В ходе процессов спонтанного структурообразования — в частности, при процессах жизнедеятельности — нарушений физических законов никогда не наблюдалось и, более того, подобные нарушения никогда не предполагались наблюдателями. Это положение должно быть выдвинуто в качестве аксиомы, чтобы сразу становилось ясно: говоря о процессах самоорганизации, мы не имеем в виду некую альтернативу существующие физике, речь идет, скорее, о применении физических законов к тем предметам и явлениям, к которым такие законы прежде не применялись. В этом смысле физика

образует своего рода рамки для комплексных процессов самоорганизации, и физические законы — в особенности законы термодинамики — устанавливают, какие из процессов принципиально возможны, а какие — принципиально запрещены. Следует отметить, что универсальными физическими законами ни в коей мере не определяется ни то, какие именно из разрешенных процессов действительно протекают, ни то, в какой конкретной форме они протекают. Для определения такого рода частных особенностей существуют специальные законы движения (кинетические уравнения), имеющие, как правило, нефизическую природу. Опишем, к примеру, химические реакции, протекающие с полным соответствием с законами термодинамики. Однако то, какие вещества и с какой скоростью будут преобразованы при этом, определяют отнюдь не законы термодинамики, а уравнения химических реакций. При описании биологических систем в роли таких «частных» законов могут выступить, скажем, законы динамики популяций, выраженные уравнениями Лотки–Вольтерра.

Условия, необходимые для возникновения спонтанного структурообразования для следующего класса систем — таких, для которых выполняются условия так называемого локального равновесия, и к их числу относятся практически все биологические и химические системы, — удалось сформулировать Пригожину [?]. Различают открытые системы, обменивающиеся со своим окружением энергией и/или материей, и закрытые, то есть не взаимодействующие с окружением. Второй закон термодинамики гласит, что энтропия принципиально может быть только произведена, но ни в коем случае не уничтожена. Для закрытой системы производство энтропии означает, однако, автоматическое увеличение энтропии и, тем самым, разупорядочение. Для открытых систем производство (в общем случае) не равно приросту, поскольку следует учитывать также «экспорт» и «импорт» системы. Так называемые замкнутые (полузамкнутые) системы, способные обмениваться с окружением только теплотой (излучением), тоже могут «экспортировать» и «импортировать» энтропию. В том случае, когда «экспортировано» больше, чем произведено, энтропия в пределах системы уменьшается и возникает порядок. Это обстоятельство разрешает кажущееся противоречие между вторым законом термодинамики и дарвиновским принципом, постулирующим непрерывное возрастание степени упорядоченности и организованности.

В классе открытых систем, представленных нами в качестве возможных кандидатов для осуществления процессов самоорганизации, следует все же выделить и множество подклассов. Пригожин сумел показать, что в области линейной необратимой термодинамики — то есть там, где потоки энергии через систему относительно малы, — действителен принцип мини-

мального производства энтропии, гласящий, что при названных условиях открытая система всегда стремится к состоянию, при котором она производит наименьшее количество энтропии. Это состояние в заданных граничных условиях однозначно и постоянно является стабильным, подобным равновесному состоянию, что полностью исключает возможность возникновения спонтанного структурообразования.

Только с появлением в пределах системы надкритического потока «полноценной» энергии — и, соответственно, с началом надкритического «экспорта» энтропии — становится возможной неустойчивость, обуславливающая возникновение совершенно новых структур. Критическая граница определяется внутренним трением и эффективностью внутренних обратных связей.

Физическая теория самоорганизации, бурное развитие которой пришлось на начало семидесятых годов, к настоящему моменту выглядит уже весьма и весьма значительно. Хотя идеи, лежащие в основе самой теории, уходят корнями в прошлое (история этих корней насчитывает не менее ста лет), в качестве отправной точки современного нам этапа можно назвать три работы: «Термодинамическая теория структур, устойчивости и флуктуаций»<sup>1</sup> Пауля Гландорфа и Ильи Пригожина (1971), «Синергетика»<sup>2</sup> Германа Хакена (1973) и «Самоорганизация материи и эволюция биологических макромолекул»<sup>3</sup> Манфреда Эйгена (1971).

На чем же основана привлекательность и очарование этой теории, быстро получившей известность за пределами узкого круга ученых-физиков? Если проследить историю развития научной мысли, становится ясно, что почти во всех дисциплинах — где-то раньше, где-то позднее — происходит динамический, эволюционный переход к отличному от прежнего образу мышления. В биологии такой «скачок» особенно заметен: от ниспосланной свыше системы видов, при изучении которой задача науки сводилась лишь к классификации, Дарвин отважился шагнуть в мир, развивающийся и изменяющийся во времени, в процессе эволюции постепенно перебирающийся со ступени на ступень. Человеческое общество с его классами и кастами, господствующими и подчиняющимися, тоже долгое время считалось данностью неизменной — до тех пор, пока Маркс и Энгельс не предприняли первой попытки применить эволюционистский подход к изучению и пониманию социальных структур. Физическая же наука, в отличие от многих других, сохранила собственную картину мира, включающую в себя вечно кружащиеся электроны, колебания математических маятников и никогда

---

<sup>1</sup>Glandsdorff P., Prigogine I. *Thermodynamic Theory of Structure, Stability, and Fluctuations.*

<sup>2</sup>Haken H. *Synergetics.*

<sup>3</sup>Eigen M. *The Selforganization of Matter and the Evolution of Biological Macromolecules.*

не стареющие электрические поля — словом, все те «линии и краски», что и по сей день еще доминируют в учебниках по теоретической физике. Единственным исключением оказался закон, касающийся увеличения энтропии, или второй закон термодинамики, который остается предметом никак не желающих прекращаться дебатов между специалистами и дилетантами. Несмотря на то, что еще Кант пытался представить Солнечную систему как результат необратимого развития, даже такой революционер в науке, как Эйнштейн, все же не был, в принципе, готов к такому шагу: он ввел в уравнения общей теории относительности некий «космологический член» без дедуктивного доказательства — единственно ради возможности сделать описываемый его уравнениями космос стационарным.

Теория самоорганизации и эволюции позволила физике покинуть «башню из слоновой кости» и выбраться наконец в живой, яркий, исполненный многообразия мир — позволила сделать тот самый шаг, который едва ли можно переоценить и который совершенно заслуженно привлек к себе всеобщее внимание представителей других научных дисциплин.

В следующем разделе в самых общих чертах будут представлены некоторые основные понятия и концепции теории самоорганизации; читатель может детально ознакомиться с теорией, воспользовавшись рекомендуемой литературой [?, ?].

### 3.3. Принципы самоорганизации

Порядок и хаос — это две грани мироздания, динамически взаимосвязанные между собой. Хаос может быть обращен в порядок, а порядок — в хаос. Второй закон термодинамики, управляющий всем универсумом, позволяет происходить как первому, так и второму (рис. 11). Соотношение между ними, как мы видим, асимметрично: упорядоченные структуры могут возникнуть, разумеется, только в частных случаях при четко определенных условиях. В следующем разделе мы попытаемся дать, насколько это возможно, более точное описание таких условий.

Основные характеристики детерминированности самоорганизующихся систем могут быть изложены в форме рабочих принципов, на данный момент — в связи с тем, что сама дисциплина пока еще не достигла зрелости, — содержащих в себе некоторые временные, предварительные элементы.

**1. Принцип «экспорта» энтропии («принцип накачки»).** Энтропия — это основной параметр всех макроскопических систем, масштаб для определения ценности содержащейся в системе энергии и одновременно мера разупорядочения составляющих систему элементов. Самоорганизация

Рис. 11. При нормальных условиях следствием второго закона термодинамики является общая тенденция к разупорядочиванию и хаосу. В некоторых особых случаях — а к ним относятся, к примеру, удаление от состояния равновесия, высокоэнергетическая накачка или существование соответствующих энергетических резервов — процессы структурообразования протекают в полном согласии со вторым законом. [Normalbedingungen = нормальные условия; Gleichgewichtsnähe = состояния, близкие к состоянию равновесия; keine Energierampen = отсутствие накачки; Chaos = разупорядоченное состояние, хаос; Spezialbedingungen = особые условия; Energierampen oder Vorräte = высокоэнергетическая накачка или энергетические резервы; Gleichgewichtsferne = состояния, удаленные от состояния равновесия; Ordnung = упорядоченное состояние; 2. Hauptsatz der Physik = второй закон термодинамики]

Рис. 12. Процесс самоорганизации возможен только в случае «экспорта» энтропии: энтропия на выходе из системы превышает энтропию на входе. Энергетический баланс системы может быть, разумеется, выровнен, если ценность энергии, поступающей в систему, превышает ценность энергии, выводимой за пределы системы. [hochwertige E. = энергия большей ценности; Energiedurchsatz = обесценивание энергии при прохождении через систему; geringwertige E. = энергия меньшей ценности; Entropieexport = экспорт энтропии]

возможна лишь при условии, что система способна к «экспорту» энтропии (рис. 12). Поскольку энтропия является мерой ценности энергии, система способна «экспортировать» энергию только в том случае, если поступающая в нее извне энергия обладает более высокой ценностью (теплота при более высокой температуре, электричество, механическая работа), нежели энергия, выводимая из системы.

**2. Принцип преобразования энергии.** Самоорганизующиеся системы характеризуются рядом преобразований энергии. Создание упорядоченных структур связано с «высокоценными» формами энергии. Часть подаваемой в систему энергии постоянно преобразуется в специфические формы энергии, обладающие высокой ценностью (энергия потока, разность концентраций, потенциалов и т. п.), и связана с когерентными формами движения (рис. 13).

**3. Принцип надкритического удаления.** Самоорганизация возможна лишь тогда, когда удаление системы от состояния равновесия превышает определенное критическое значение. Возникновение процесса самоорганизации связано с дискретными переходами и качественными изменениями в системе (рис. 14).

Рис. 13. Самоорганизация возможна лишь в системах, состояние которых значительно отличается от состояния равновесия. В этом случае возникают движения когерентного типа (такие, например, как когерентный лазерный луч или конвективные потоки в ячейках Бенара). [Gleichgewicht = равновесие; Gleichgewichtsnähe = состояния, близкие к состоянию равновесия; Gleichgewichtsferne = состояния, удаленные от состояния равновесия;  $D_i = X$ ;  $D_{i_{krit}} = X$ ]

Рис. 14. Переход к самоорганизации дискретен и связан с качественными изменениями в системе. Так, например, при образовании ячеек Бенара значительно возрастает расход тепла. [Konvektion = конвекция; ruhende Flüssigkeit = жидкость в состоянии покоя; Temperaturdifferenz Unten-Oben = разность температур верхнего и нижнего слоев жидкости]

**4. Принцип нелинейности и обратной связи.** Процессы самоорганизации требуют нелинейной динамики, которая обусловлена, как правило, эффектами обратной связи (рис. 15). Нелинейности особенно характерны для химических реакций и гидродинамических процессов.

**5. Принцип усиления.** В области перехода системы от структур одного типа к структурам другого возникают мощные флуктуации; превышение критического значения некоторого параметра усиливает определенные моды флуктуаций, представляющие собой зародыши новых структур (см. также рис. 2.4).

**6. Принцип внутренней обусловленности.** Структуры, возникшие в результате самоорганизации, обусловлены, в общем случае, как граничными значениями, так и внутренними факторами.

**7. Принцип нарушения симметрии.** Появившиеся в результате самоорганизации структуры возникают, как правило, вследствие нарушения симметрии. Реальные структуры обладают менее совершенной симметрией, чем фундаментальные законы, представляя собой лишь частный случай возможных структур. Почти все основные виды симметрии в реальности оказываются нарушены.

**8. Принцип параметра порядка (принцип Хакена).** Как правило, существуют специфические формы движения (называемые модами), которые координируют все движения элементов системы. Действия микроско-

Рис. 15. Самоорганизация требует нелинейности, основанной, как правило, на обратной причинно-следственной связи. [Ursache = причины; System = система; Folgen = следствия; Nichtlineare Rückkopplung = нелинейная обратная связь]

Рис. 16. Движение элементов системы (молекул, лазерных волн) синхронизировано параметрами порядка.

Рис. 17. Можно провести четкую аналогию между дискретными переходами в процессе самоорганизации и фазовыми переходами в термодинамике. [Übergang 1. Art = переход первого рода; Übergang 2. Art = переход второго рода]

пических элементов системы (молекулы, световые волны и т. п.) синхронизованы параметрами порядка (рис. 16).

**9. Принцип устойчивости.** Самоорганизующиеся системы относительно устойчивы при незначительных возмущениях; усиление возмущений представляет опасность для системы, поскольку возмущения, превышающие определенные критические значения, могут привести к разрушению всей структуры.

**10. Принцип фазовых переходов.** Процессы самоорганизации часто состоят из последствий кинетических переходов, возникающих в связи с растущим отклонением системы от состояния равновесия при критических значениях определенных параметров. Существуют аналогии с равновесными фазовыми переходами (рис. 17).

**11. Принцип ограниченной предсказуемости** В результате самоорганизации возникают структуры, которые можно принципиально разделить на два класса: регулярные и нерегулярные, или хаотические (рис. ??).

**12. Принцип историчности** Все структуры реального мира, возникшие в ходе эволюции, в конечном счете могут быть поняты только через синтез фундаментальных законов, на которых основаны процессы, породившие те или иные структуры, и конкретных «индивидуальных» историй возникновения этих структур. Для химии началом начал является возникновение химических элементов на ранних стадиях развития космоса; распространенность же элементов обусловлена историей развития космоса. Для биологии точкой отсчета может быть назван дарвинизм, понимаемый как теория развития жизни; ядро общественных наук представлено историей развития общественных формаций.

Следующий раздел будет посвящен краткому обзору важнейших методов теории самоорганизации.

Рис. 18. Существуют регулярные и хаотические диссипативные структуры. Хаотическая динамика подразумевает экспоненциальную расходимость траекторий и, следовательно, низкую точность прогнозирования отдаленного будущего системы.



### 3.4. Базовые модели процессов самоорганизации

Существует целый ряд чрезвычайно плодотворных подходов к моделированию самоорганизации в ходе эволюционных процессов. Особым интересом отмечены при этом следующие типы подходов к математическому моделированию: феноменологическая кинетика, термодинамическое моделирование, детерминированная динамика, стохастическая динамика и моделирование с использованием методов статистической физики. Коротко остановимся на описании основных особенностей перечисленных подходов к моделированию процессов самоорганизации.

**1. Феноменологические (кинематические) модели.** Модели процессов самоорганизации должны включать в себя время, поскольку временные рамки явлений и характер протекающих процессов в принципе неотъемлемы от самой сущности самоорганизации. Исходя из этого требования, в качестве наипростейшей модели, отражающей характер самоорганизации, можно рассматривать графическое представление событий или их перечисление, где в роли текущей переменной выступает время. Для дальнейшего обсуждения такой тип описания мы обозначим — по аналогии с механикой — как кинематику. Кинематическое представление относится к традиционному инструментарию многих наук: при умелом подборе зависящих от времени параметров такое графическое представление удачно сочетает в себе наглядность, достоверность и информативность.

**2. Термодинамические модели.** К термодинамическим относятся все модели, которые касаются термодинамических величин, определяющих количество вещества, энергию, энтропию и их потоки. Данный тип моделирования используется в термодинамике необратимых процессов. Термодинамические модели описывают глобальный и локальный баланс энергии, энтропии, импульса и количества вещества. Термодинамическое моделирование также освящено традицией, но применяется, в основном, в естественнонаучных и технических дисциплинах. Следует отметить, что термодинамическое моделирование часто используется в комбинации с другими типами моделирования. Экономисты и экологи совсем недавно начали применять в своих исследованиях этот весьма эффективный метод, однако термодинамические модели, скажем, экологических систем успешно разрабатывались Г. Моровитцем, а попытка представить обобщенную термодинамическую модель экономических процессов была предпринята еще в начале двадцатого века Н. Георгеску-Рогеном. Традиционные термодинамические исследования экологических, экономических и технических процессов ограничиваются изучением потоков и балансов энергии и материи.

Систематический анализ энтропии, энтропийных потоков и балансов относится в настоящее время к числу еще не полностью решенных вопросов моделирования. Эта область развивается чрезвычайно интенсивно: не подлежит ни малейшему сомнению значимость анализа энтропии не только для корректного моделирования при решении задач, связанных с окружающей средой и ресурсами, но и для построения полной термодинамической модели производственных процессов. Анализ энтропии является также необходимым условием для серьезного исследования эффективности процессов, в ходе которого могут быть использованы достижения современной термодинамики необратимых процессов. Наиважнейшей термодинамической мерой эффективности процессов является производство энтропии, а также необходимый для самоорганизации «экспорт» энтропии. Иначе говоря, система должна обладать некоторым энергетическим ресурсом, питающим ее полноценной энергией. Термодинамическая ситуация характеризует экономическое производство как структурообразующий и упорядочивающий процесс — таким образом, с точки зрения физики, это процесс самоорганизации. Подобно любому другому эволюционному процессу, производство развивается отнюдь не подчиняясь внесоциальным факторам, а опираясь на внутренние движущие силы. Естественно, термодинамика не в состоянии объяснить эти внутренние движущие силы — а к ним относятся и инновационные механизмы, и взаимосвязи науки и общественных потребностей, и т. п., — однако все же способна корректно отображать воздействие подобных факторов на процесс производства.

В том смысле, в котором понимается персистентность физических форм движения, ни в одной из высших форм движения термодинамические законы никогда не нарушаются, однако для каузальных объяснений одного этого факта еще не достаточно. Совершенно очевидно, что всеобъемлющая теория экологических и экономических процессов не может отказаться от того методического арсенала, которым располагает термодинамика. Поскольку энергетический и материальный баланс уже сегодня представляет собой своего рода костяк любого производственного планирования и управления, проведенный методами термодинамики анализ, вне всякого сомнения, приобретет все большее значение. Следует указать еще и на то обстоятельство, что в настоящее время далека от окончательного решения проблема количественной оценки энтропийных потоков для экономических процессов, а также для экологических и ресурсных потоков.

**3. Детерминированная динамика.** Детерминированными динамическими моделями являются модели, основанные на дифференциальных уравнениях (или дифференциальных уравнениях с дискретным временем),

где переменные суть определенные количественные характеристики одной из  $n$  подсистем; такие переменные, по Герману Хакену, обозначаются термином «параметр порядка». Нелинейная динамика параметров порядка занята составлением и решением для таких характеристических величин нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений и дифференциальных уравнений в частных производных. При выборе параметра порядка особенно важен факт существования неразрывной каузальной взаимосвязи между значением параметра порядка в момент времени  $t_0$  и его же значением в некоторый последующий момент времени  $t > t_0$ , то есть

$$x(t_0) \rightarrow x(t).$$

Эти переменные могут представлять, скажем, концентрации химических веществ в реакционной системе или же долю определенной технологии в производстве того или иного товара. В первом случае уравнения детерминированной динамики выражаются в виде уравнений скорости химических реакций. Простая динамическая модель для второго случая создана Фишером и Прая; в ней в процентном отношении представлено участие новой улучшенной технологии в производстве:

$$dx(t)/dt = ax(1 - x).$$

Здесь  $a$  — некоторая количественная мера превосходства новой технологии. Динамика поведения параметров порядка охватывает весьма обширный диапазон, включая в себя как самые «быстрые» процессы (продолжительность электронных переходов, к примеру, измеряется в пределах нано- и даже пикосекунд), так и самые «медленные», к которым относятся биологические или космические эволюционные процессы, продолжительность которых исчисляется миллионами и миллиардами лет. В биологии, скажем, можно выделить следующие основные временные шкалы:

- характеристическое время ферментативной реакции или экспрессии генов,
- характеристическое время удвоения клетки,
- характеристическое время индивидуального развития,
- характеристическое время, необходимое для того, чтобы установилось так называемое экологическое равновесие — стационарное состояние в популяционной динамике,
- характеристическое время, необходимое для возникновения нового вида.

**4. Стохастическая динамика.** Стохастическая теория также оперирует макроскопическими параметрами порядка  $x(t)$ , однако рассматривает их при этом как флуктуирующие величины. Кроме того, теория постулирует существование вероятностного распределения  $P(x, t)$  и некоторого динамического уравнения (управляющего уравнения), определяющего временное развитие этих величин. Методы детерминированной динамики весьма успешны и уже позволяют создавать подробные модели, описывающие продвижение новых технологий на фоне более ранних или проникновение новых видов в уже существующие экологические связи. Упомянутые выше методы детерминированной динамики хороши во всем, кроме, пожалуй, одного: они не отражают стохастического характера возникновения «нового»; а поскольку при исследовании эволюционных процессов особенно значим именно этот момент, ядро любой теории эволюции составлено на основании стохастических моделей.

**5. Статистическая физика.** Статистическая теория, основанная на гениальных методах, разработанных в конце девятнадцатого века Больцманом и Гиббсом, является, пожалуй, наиболее требовательной из всех перечисленных. В основу теории положены вероятностные распределения в микроскопическом состоянии системы; микроскопическое состояние при этом включает в себя координаты и молекулы частиц, из которых состоит система.

Какие из представленных методов окажутся наиболее подходящими для решения стоящей перед исследователем задачи, каждый раз зависит от конкретных особенностей проблемы. Методы статистической теории применяются при исследовании проблем самоорганизации лишь в особых случаях, поскольку являются наиболее сложными (но одновременно и позволяющими получить наиболее полную информацию) из пяти описанных методов. Чаще остальных используется третий метод: центральное место в детерминированной динамике занимают исследования устойчивости, а процесс самоорганизации, как правило, начинается с того, что небольшие флуктуации нарушают устойчивость существующих в системе «старых» структур. Именно поэтому повышенный интерес вызывает изучение возникающих в нелинейных системах неустойчивых состояний. Термодинамическим условием для возникновения процесса самоорганизации в системе является «экспорт» энтропии. Потенциально способны к самоорганизации только системы, которые оказываются в состоянии освободиться от произведенной ими в ходе необратимых процессов энтропии. В этом смысле «экспорт» энтропии может быть интерпретирован как движущая сила про-

цессов самоорганизации, абсолютно не противоречащих второму закону термодинамики.

Теперь рассмотрим подробнее центральное понятие теории самоорганизации, введенное Германом Хакеном, — понятие *параметр порядка*. Что представляет собой параметр порядка? Изучая процессы самоорганизации, которые, естественно, могут протекать на всех уровнях иерархии, исследователи обычно особое внимание уделяли временной шкале. Все быстротекущие процессы можно рассматривать только приближенно, как стационарные или квазистационарные, соответствующие же динамические переменные — по крайней мере, в принципе — заменяются при этом их стационарными или средними значениями. Такие переменные, по Хакену, обозначаются термином «подчиненные моды». Все значительно медленнее текущие процессы можно приближенно понимать как постоянные внешние условия и просто назначать соответствующие им переменные, или «управляющие параметры». Все остальные величины и будут собственно интересовавшими нас «параметрами порядка». К счастью, в подавляющем большинстве случаев таких величин всего несколько — часто от одной до пяти. Даже не зная законов динамики и располагая только результатами наблюдений, к выводам относительно этого важного числа зачастую можно прийти на основании упоминаемых далее свойств, особенно с помощью современных методов анализа временных рядов и бифуркаций [?, ?, ?]. Поясним это положение примером из термодинамики: для характеристики состояния часто оказывается достаточно всего трех величин, описывающих давление, температуру и объем, хотя, к примеру, количество степеней свободы (как минимум три координаты и три импульса для каждого атома) представлено гораздо большим числом.

Особенно интересны случаи, в которых задействованы один, два или три параметра порядка. Как следует из теории дифференциальных уравнений, от их количества в определенном смысле качественно зависят возможные формы динамики и нарушения симметрии. Рассмотрим по отдельности каждый из этих трех случаев.

Одномерная система — это система с единственным параметром порядка. Этот случай описывается нелинейным дифференциальным уравнением вида

$$dx/dt = f(x, c),$$

где через  $x$  обозначен параметр порядка, а через  $c$  — один или более управляющих параметров. Если функция  $U(x)$  обладает свойством

$$dU/dx = -f(x),$$

то верно следующее соотношение:

$$dU/dt = (dU/dx) \cdot (dx/dt) = -f(x)^2 \leq 0,$$

то есть  $x$  не изменяется до тех пор, пока  $U$  не достигнет минимума. Единственно возможные конечные состояния системы — это стационарные состояния, и они оказываются именно нулями функции  $f(x)$ . Теперь мы должны ответить еще на один вопрос: каким образом поведет себя рассматриваемая система, если вследствие флуктуаций она незначительно отклонится от стационарного состояния, в котором, согласно допущению, находится система при  $x = 0$  ( $f(0) = 0$ ). Из соотношения

$$dx^2/dt = 2x \cdot f(x) \approx 2x^2 \cdot f'(0)$$

следует, что отклонение  $x^2$  экспоненциально возрастает, если  $f'(x)$  положительна в стационарной точке  $x = 0$  (неустойчивая точка), или же вновь исчезает, если  $f(x)$  имеет в стационарной точке отрицательную производную (устойчивая точка).

Бифуркации соответствуют качественным изменениям системы, которые могут состоять лишь в том, что при изменениях управляющего параметра  $c$  появляются/исчезают нули функции  $f(x)$  или что  $f(x)$  в стационарной точке изменяет знак на противоположный, переходя из устойчивого состояния в неустойчивое. Самым важным оказывается случай, когда рядом с рассматриваемой устойчивой точкой появляется пара новых точек, одна из которых устойчивая, а вторая — неустойчивая: в системе наблюдается бистабильность, и процесс перехода системы от одного состояния к другому обозначается термином «фазовый переход первого типа».

Для описания двумерной системы с двумя параметрами порядка потребуются два дифференциальных уравнения:

$$dx/dt = f(x, y),$$

$$dy/dt = g(x, y).$$

Наряду с уже описанными свойствами наблюдаются и новые: возможные конечные состояния данной системы теперь не ограничиваются точками на оси  $x$  — ими могут стать точки или замкнутые кривые на плоскости  $(x, y)$ . Последние соответствуют незатухающим колебаниям, или нелинейным автоколебаниям. При изменении управляющего параметра устойчивая до сих пор точка может перейти в такой предельный цикл.

Рис. 19. Схемы траекторий хаотических лоренцевых аттракторов. Вследствие экспоненциального расхождения траекторий облако ближайших окрестных состояний очень быстро рассеивается по полным аттракторам. Таким образом, становится едва ли возможно точное прогнозирование состояния системы по прошествии определенного времени.

Трехмерную систему с тремя параметрами порядка описывают дифференциальные уравнения следующего вида:

$$\begin{aligned} dx/dt &= f(x, y, z), \\ dy/dt &= g(x, y, z), \\ dz/dt &= h(x, y, z). \end{aligned}$$

В этом случае в трехмерном фазовом пространстве (которое представляет собой тор) существуют устойчивые точки, предельные циклы и квазипериодические колебания на плоскости, а кроме того, качественно совершенно новое явление, именуемое хаосом. Хаос возникает в тех случаях, когда конечное состояние системы соответствует кривой, которая не замкнута и не лежит в одной плоскости, а образует в определенной области пространства бесконечно тонкое, но не плотное фрактальное кружево. Такого рода образования — хаотические, или странные, аттракторы — демонстрируют целый ряд интересных свойств, среди которых кажущиеся весьма загадочными временные характеристики и высокая чувствительность к возмущениям в системе (рис. ??, 19). Другим важным свойством является самоподобие многих структур (рис. 20). Известен целый ряд сценариев перехода от стационарного или колебательного режима к хаосу (сюда относятся не только фазовые переходы различного типа), самым знаменитым из которых является, пожалуй, открытое М. Фейгенбаумом удвоение периода, обладающее множеством не зависящих от системы универсальных закономерностей и — при наблюдении этого феномена в природе — являющееся почти самым надежным и достоверным указанием на существование хаоса. Интересно, что универсальные свойства «фигового дерева»<sup>4</sup> Фейгенбаума математически очень точно взаимосвязаны со свойствами, присущими так называемому ???«яблочному человечку», то есть множествам Жюлиа, порождаемым комплексными полиномами, о которых мы в дальнейшем расскажем подробнее.

Вопреки до сих пор преобладающему (особенно в физике) мнению, хаотические процессы в природе — это скорее правило, нежели исключение. Изучение математиками хаотических процессов — собственно, даже

<sup>4</sup>Фиговое дерево по-немецки называется *Feigenbaum*. — Прим. перев.

Рис. 20. Самоподобие структур хаотического аттрактора. [Ausschnittvergrößerungen = увеличенные фрагменты]

Рис. 21. Эволюционные процессы суть цепь процессов самоорганизации. [Zustand  $n$  = состояние  $n$ ; Zustand  $n + 1$  = состояние  $n + 1$ ; Instabilität = неустойчивость; Selbstorganisation = самоорганизация; ein Kettenglied der Evolution = звено эволюционной цепи]

сама классификация таких процессов — поднимает, несмотря на одержанные победы, огромную массу столь значительных проблем, что в будущем мы можем рассчитывать еще на многие и многие важные открытия.

Динамика эволюционных процессов часто может быть отображена только посредством довольно сложных систем уравнений. Так, к примеру, многие модели селективных процессов в экологических и экономических системах основаны на уравнениях типа Лотки–Вольтерра. Современные исследования показывают, что элементы хаоса (выше определенные нами через неустойчивость траекторий движений) в виде имманентных компонентов присутствуют, вероятно, во многих моделях реальных систем.

### 3.5. Эволюция: цепь процессов самоорганизации

Мы рассматриваем эволюцию в природе и обществе как бесконечную цепь процессов самоорганизации (рис. 21). Воспользовавшись гегелевской метафорой, можно вместо цепи представлять себе и спираль, состоящую из циклов самоорганизации (рис. 22). Каждый цикл включает в себя несколько стадий:

1. *Из-за изменения внутренних или внешних условий относительно устойчивое эволюционное состояние становится неустойчивым.*
2. *Неустойчивость запускает процесс самоорганизации, порождающий новые структуры.*
3. *Результатом самоорганизации становится возникновение нового относительно устойчивого эволюционного состояния, которое может оказаться началом следующего цикла.*

В действительности описанные цепи (или спирали) образуют объединенные в сложнейшую сеть системы. Динамика отдельных циклов самоорганизации нелинейна; переходы от цикла к циклу носят характер бифуркаций и в определенном смысле представляют собой аналогию фазовых



Рис. 22. Спираль эволюции: эволюционные процессы, представленные как последовательность циклов самоорганизации. [zwei Windungen der Evolutionsspirale = два витка эволюционной спирали; Instabilität = неустойчивость; Selbstorganisation = самоорганизация; Zustand  $n + 1$  = состояние  $n + 1$ ; Zustand  $n$  = состояние  $n$ ]

переходов в термодинамике. Хорошо известно, что термодинамические системы вблизи фазовых переходов демонстрируют некоторые особенности, к которым относятся мощные флуктуации, большие времена релаксации, обширные пространственные корреляции, структуры на многих масштабах, особые спектры шума. Подобная картина возникает и при переходах между циклами самоорганизации. По предположению группы датских ученых, возглавляемых Пёром Баком, критическое состояние эволюционных систем особенно «ценно»; в этой связи говорят о «самоорганизующейся критичности» [?], идея которой заключается в том, что такие системы регулируются только критическими условиями (имеются, кстати, достаточно убедительные аргументы в пользу этой идеи). Существует несколько фактов, свидетельствующих о том, что самоорганизующаяся критичность является существенно важным элементом эволюционных процессов.

В предыдущей главе мы уже выяснили роль, которую играют в процессах структурообразования нарушения симметрии. В ходе эволюции нарушение симметрии является, так сказать, центральным событием: согласно нашим представлениям, эволюционные процессы — это потенциально безграничные последовательности циклов самоорганизации и разнообразные нарушения различных видов симметрии, в результате чего отдельные элементы системы, постоянно дифференцируются и образуют все новые и новые структуры.

Каким же образом вообще возможно возникновение в ходе эволюции столь сложных структур под воздействием простых законов в простых же условиях? В поисках ответа на этот вопрос стоит обратиться к такому понятию, как «фрустрация». Под «фрустрацией» понимается состояние системы, возникающее при наличии нескольких до определенной степени противоречивых условий, которые не могут быть выполнены все одновременно (вероятно, каждому человеку по собственному житейскому опыту знакомо подобное состояние). Физические многочастичные системы, пребывающие в равновесии, постоянно стремятся к состояниям с наименьшей свободной энергией. Фрустрации возникают в тех случаях, когда взаимодействие между элементами системы таково, что уменьшение энергии в одном месте постоянно связано с увеличением энергии в другом. Экспериментально и с использованием математических методов такие случаи хорошо изучены, к примеру, для аморфных твердых тел. Ученые обнаружили, что существу-

ет, как правило, огромное количество компромиссных решений, которые могут считаться практически равноценными. Будучи весьма различными, такие компромиссные решения в фазовом пространстве находятся на больших расстояниях друг от друга и разделены высокими потенциальными барьерами. Состояние, в котором оказывается система, зависит от начальных условий и случая; совершенно невероятна возможность того, что система, попав в одно из таких состояний, сменит его на другое из числа компромиссных решений.

Фрустрация вынуждает систему «пойти на компромисс», что и приводит к нарушению симметрии. На незатейливом примере из области математики продемонстрируем процесс возникновения из простых постулатов чрезвычайно сложной и, с эстетической точки зрения, очень красивой структуры. Некоторая поверхность разделена на участки разных цветов так, что любая граничная точка соседствует со всеми использованными цветами. При использовании двух цветов решение очевидно — им может стать любая граничная линия; при использовании же трех и более цветов решение поначалу представляется невозможным, так как каждая точка, принадлежащая отрезку конечной длины, всегда имеет «соседей» только двух цветов. Однако с точно такой же проблемой можно столкнуться при поиске нулевых точек комплексного полинома методом Ньютона. Поиск начинается с произвольно выбранной исходной точки на комплексной плоскости и для полинома  $n$ -ой степени заканчивается в одной из его  $n$  нулевых точек. Границы, отделяющие друг от друга окрестности разных нулевых точек, называются множествами Жюлиа и как раз обладают упомянутым выше свойством. Множества Жюлиа могут быть связными или же несвязными — эти их свойства описывает множество Мандельброта. Решение проблемы множеств Жюлиа еще полвека-век назад было сокрыто завесой тайны, однако в наше время ситуация изменилась: современные компьютеры позволяют испытать в качестве исходных просто огромное количество точек [?, ?, ?]. Компромисс отыскивается следующим образом. Предположим, мы имеем дело с тремя цветами. Сначала следует разделить плоскость линиями на три разноцветные области, а затем каждую из граничных линий заменить цепочкой каплевидных областей, окрашенных, соответственно, в «третий цвет». Края пузырьков снова окажутся не отвечающими условиям задачи, поскольку опять-таки будут разделять только два цвета, а потому и их, в свою очередь, следует заменить новыми цепочками, также окрашенными в соответствующий цвет; повторяя эти действия до бесконечности, мы получим образование, которое больше не является одномерным, — перед нами фрактал, размерность которого находится где-то между 1 и 2.

Биологическая эволюция также непосредственно с фрустрациями, приводящими Природу к различного рода компромиссам. Поскольку речь в данном случае идет об открытых системах, то среди всех условий, к которым вынуждены приспосабливаться организмы, термодинамические условия, естественно, являются наиважнейшими. Однако если бы организмы были полностью открыты для любых воздействий окружающей их среды, им вряд ли удалось бы выжить; и только ограничение индивидуумов может привести к возникновению у них достаточно стабильной «внутренней среды», способствующей нормальному протеканию необходимых организму комплексных обменных процессов. Из противоречия между требованиями открытости и закрытости системы и зарождается возможность компромисса, и образование конечностей, естественных отверстий и органов чувств как раз являет собой пример выгодного компромисса такого рода.

Другим столь же существенным элементом эволюции можно назвать процесс возникновения *нового* [?]. Хотя возникновение нового в ходе эволюционных процессов и является закономерно обоснованной тенденцией, возможность точно установить конкретный момент времени, когда произойдет такого рода событие, а также конкретное место, где оно произойдет, столь же мала, что и возможность определить авторов творения. В каузальном определении этих и других обстоятельств процессов возникновения нового (в частности, новых технологий) решающую роль играют случайные влияния. Учет случайных аспектов требует использования теории случайных процессов, стохастики и результатов, полученных в ходе исследования хаоса. Появление стохастической теории эволюции исторически тесно связано с проблемой моделирования процессов биогенеза и поведения биологических популяций. Однако стохастические методы оказались весьма эффективны и продуктивны и при применении их для исследования комплексных процессов эволюции в экологической сфере и эволюции общественных структур.

Подведем некоторые итоги: путь от первозданного хаоса нашего с вами мира к сегодняшнему космосу, заключающему в себе красоту и гармонию, пока не выяснен, однако нам известны некоторые из важнейших характеристик этого процесса. Наша метагалактика, возникшая из очень горячего, плотного и совершенно неупорядоченного первовещества примерно 17–20 миллиардов лет назад, уже тогда должна была обладать некими созидательными силами. На основании хаотического характера движений и колоссальных запасов энергии мы можем сделать вывод о том, что в ней была изначально заложена по крайней мере тенденция к увеличению сложности. Формированию представлений о природе этих созидательных сил и тенденциях естественного развития весьма и весьма способствуют современные

исследования хаоса и теория самоорганизации, вырабатывающие новый подход к пониманию степени сложности нашего мира. Теперь нам известно, что для комплексного понимания сегодняшней мир следует представить как результат цепочки процессов самоорганизации (рис. 22) [?, ?, ?, ?, ?]. Вопрос о том, насколько взаимосвязаны самоорганизация и эволюция с оценкой, анализом и оптимизацией, является одним из тех чрезвычайно интересных вопросов, что до сих пор остаются открытыми.

## ГЛАВА 4

# Информация и ценность

Даже самые неупорядоченные процессы, если они протекают при одних и тех же условиях, дают каждый раз одни и те же средние значения, — единственно этому обстоятельству можно приписать то, что мы и в поведении теплых тел обнаруживаем совершенно определенные законы.

*Людвиг Больцман.*  
О тепловом равновесии

### 4.1. Информация, состояние и обмен

Среди невообразимого множества творческих успехов, достигнутых Природой в ходе эволюции, изобретение такого процесса, как обработка информации, несомненно, занимает совершенно особое место. В качестве введения сначала остановимся на определении двух терминов, которые представляются нам необходимыми для понимания читателем дальнейших взаимосвязей. Речь идет о понятиях «связанной» и «свободной» информации. Во избежание излишней категоричности в определениях, мы попробуем объяснить различие между свойствами этих двух типов информации на примерах. Связанная информация может весьма наглядно быть представлена на примере многоцветного напластования горных пород, подобного тому, что можно наблюдать в Большом Каньоне в Аризоне. Свободную информацию мы находим, читая любую книгу — скажем, такую, как та, что Вы читаете сейчас.

В принципе, связанная информация наличествует в любой физической системе. Универсальной количественной мерой такой информации является энтропия рассматриваемой системы. Информация в этой естественной форме до определенной степени скрыта и, собственно говоря, вовсе не является информацией в смысле, вкладываемом в это понятие классической

теорией информации. Если в системе содержится некая информация, то мы можем — по крайней мере, в принципе — разобраться в ней, распознав закодированное сообщение, подобно тому, как мы узнаем об истории Земли, изучая напластования горных пород, или выясняем по солнечному свету химический состав Солнца. Однако нам едва ли удастся ответить на вопросы о Большом Взрыве, наблюдая за кипением воды в кастрюле; так же и газ, находящийся в состоянии термодинамического равновесия, уже не позволяет нам делать выводы относительно исходного состояния, это равновесие породившего. В этом смысле физические системы могут содержать в себе связанную информацию, а могут и не содержать: связанная информация никоим образом не служит какой бы то ни было цели, не имеет назначения, она представляет только саму себя и является непосредственным материальным свойством рассматриваемой системы.

Свободная информация — совсем другое дело; различия между этими двумя типами информации носят качественный характер. Свободная информация — это всегда элемент взаимосвязи между двумя системами, называемыми передающей и получающей, то есть выступающими в роли передатчика и приемника информации. Можно сказать, свободная информация представляет собой бинарное отношение между двумя системами. Ну а поскольку свободная информация представляет отношение, она не является непосредственным свойством системы, существуя относительно самостоятельно и качественно отличается от «нормальных» физических объектов. Свободная информация имеет цель и назначение, она связана с существованием по крайней мере двух систем, которые извлекают ее из массивов связанной информации, сохраняют ее, обмениваются ею, обрабатывают ее, с тем чтобы она в конце концов вновь оказалась преобразована в связанную информацию в виде схемы построения или программы поведения. Свободная информация обладает определенной независимостью от носителя: скажем, сообщение может быть сделано в форме письма, телеграммы и т. п., передано в электронной форме на дискете или посредством движения электронов в проводнике; конкретный материальный способ коммуникации не имеет отношения к содержанию сообщения. При желании связанную информацию можно обозначить как материальную, или физическую, а свободную — как нематериальную, или абстрактную.

В некотором смысле роль информации схожа с ролью денег в обществе. Аналогии, проводимые между информацией и деньгами — информационным носителем ценности, — никоим образом нельзя считать просто формальными. Потребительская ценность представляет собой материальное свойство предметов или товаров. Меновая же стоимость — отвлеченное от материальной формы понятие, она не зависит от конкретного носителя

этой стоимости, и суть ее «инвариантна»: деньги остаются деньгами, будь то монеты, купюры, чеки и т. п. Деньги всегда имеют назначение, они служат неким целям, они имеют смысл, только если используются для обмена между партнерами, то есть если деньги получены, например, за какой-то товар или за какую-то работу и в конце концов вновь могут обратиться в некий товар или услугу.

«Цель» — это термин, имеющий значение только применительно к живым существам. В этом смысле свободная информация представляет собой нечто, не могущее существовать вне мира живых существ. Во избежание каких бы то ни было недоразумений следует уточнить, что человеческие инструменты и орудия — не будучи, естественно, живыми существами — все же однозначно должны быть определены как относящиеся к системе социальной эволюции просто в силу их происхождения и функций.

Позднее мы детально рассмотрим существование в природе *фазовых переходов от связанной информации к свободной* [?]. Такого рода фазовый переход называется *ритуализацией* или *символизацией*. Свободная информация всегда носит характер символической, она предполагает, что и отправитель, и получатель способны создавать и понимать данные символы. При этом до тех пор, пока отправитель и получатель под одними и теми же символами понимают одно и то же, для содержания опять-таки не имеет существенного значения ни природа, ни тип используемых символов (то есть ни используемый носитель информации, ни способ кодирования ее). Связанная же информация неразрывно связана с физической природой состояния, которое она представляет.

Инвариантность свободной информации относительно физической природы носителя данных является никак не второстепенным ее свойством; напротив, с физической точки зрения, это важнейшее из свойств свободной информации. Любой носитель информации имеет, естественно, физическую природу и подчинен физическим законам — в частности, второму закону термодинамики. Согласно этому универсальному закону природы, закрытые системы, не способные обмениваться со своим окружением ни материей, ни энергией, стремятся к состоянию термодинамического равновесия, характеризуемого максимальной энтропией. Из состояния максимальной энтропии, то есть максимальной разупорядоченности, извлечь какую-либо информацию невозможно. Однако всегда существует некоторая релевантная для связанной информации разница между максимальным значением энтропии и ее действительным значением. Информация, связанная с физическим состоянием системы, «стирается» при приближении системы к термодинамическому равновесию.

Для свободной информации может быть использован любой носитель,

особенно такой, естественно, который был бы в данных физических условиях по возможности более устойчивым (будь то метастабильное состояние консервативной структуры или локальный аттрактор диссипативной структуры). Таким образом, свободная информация оказывается свободной и от действия законов, которым подчиняются структуры такого рода.

Рассмотрим два примера. Предположим, мы слушаем какой-то концерт или чью-то речь. Звук, распространяясь по залу, затихает и навсегда исчезает. Однако же если мы запишем его на кассету, то определенная плотность магнитного потока будет запечатлена на пленке в виде символа для некоторой мгновенной амплитуды давления звуковых волн. Такие символы уже не подчинены законам распространения звуковых волн, а потому оказываются значительно долговечнее. Воспроизводящая головка магнитофона, которая способна «понимать» символы, находящиеся на магнитной ленте, при необходимости совершает обратное преобразование, и символы вновь становятся свободно распространяющимися звуковыми волнами.

Первая догенетическая наследственная информация протожизни сохранилась, предположительно, в виде цепочек РНК [?]. Содержание цепочки РНК воплощается в жизнь непосредственно, то есть безо всяких интерпретаций, только за счет ее собственной химической активности, причем тот факт, что РНК вообще имеет последовательность оснований, не является решающим. Именно благодаря упомянутой активности РНК одновременно и чрезвычайно склонна к тому, чтобы случайно попасть в другую химическую «кучу», которая способна разрушить наследственную информацию (тоже, кстати, являющуюся связанной).

При перенесении информации на инертную ДНК (теперь речь идет о свободной информации) проблема в значительной степени теряет прежнюю остроту, но происходит это ценой необходимого в подобных случаях «перевода» ДНК-символов в химически активные молекулы. Без такого «аппарата для чтения» ДНК становится столь же бессмысленна, что и текст, напечатанный на пишущей машинке обезьяной («Вавилонская библиотека» Х. Л. Борхеса), линия радиорелейной связи для бушменов («Соседи по космосу» К. Сагана) или «говорящие булавки» для нас с вами («Пикник на обочине» братьев Стругацких).

Информация в аналоговом и цифровом виде является частным случаем существования свободной информации. Компьютерные данные, наша письменность или генетические коды ДНК представляют собой информацию обоих видов; гормональная же система регуляции, напротив, не является ни цифровой, ни аналоговой. Имея дело с аналоговой, или последовательной, информацией, мы можем выстроить все символы в одномерную линию. Символы здесь упорядочены, и о каждом из двух символов мы можем сказать,



Рис. 23. Отображение Бернулли.

который из них идет перед (или после) другого. Отдельные кадры в фильме можно рассматривать как символы, которые, будучи упорядоченными последовательно, образуют при этом непрерывный набор знаков. Информационные системы не языкового, не последовательного типа могут быть обозначены как «сигнальные системы». Сигналы тоже передают информацию в форме символов, то есть значение сигнала точно так же определяется договором между передающей и принимающей сторонами.

Простой и наглядной системой, демонстрирующей соотношение различных форм информации, является отображение Бернулли (рис. 23). Отображение Бернулли — это простейший из возможных случаев так называемой символической динамики, метода, отображающего поведение динамической системы на свойства строк (последовательностей) символов и изучающего их средствами лингвистического анализа.

При изучении свойств хаотических процессов очень широко используются так называемые дискретные отображения, вычисляющие по заданному числу  $X(n)$  некоторой последовательности следующее за ним число  $X(n+1)$  (то есть здесь можно говорить и о законе следования, и о формулах итерации или рекурсии). Записать отображение Бернулли можно следующим образом:

$$X(n+1) = 2 \cdot X(n) \pmod{1}.$$

Начнем с исходного значения  $X(0)$ , лежащего между 0 и 1. Чтобы получить следующий элемент, число следует умножить на 2 и, если результат окажется равен единице или больше единицы, отнять от него 1. Точно таким же образом поступая с каждым из полученных чисел, можно прийти к последовательности, обладающей определенными свойствами. В соответствии с начальным значением последовательность может устремиться к аттракторам различных типов: к неподвижной точке, в которой вычисление дает каждый раз одно и то же число, к периоду конечной длины, где всегда повторяется конечная последовательность чисел, или к «хаотическому» аттрактору, то есть к бесконечному непериодическому числовому ряду.

Множество всех начальных значений, ведущих в конце концов к данному аттрактору, называется областью (или бассейном) притяжения этого аттрактора. Одним из таких аттракторов является, очевидно, число 0. При подстановке его в рекурсивную формулу всегда будет получаться все тот же нуль. Какие начальные значения ведут к нулю? Например,  $X(0) = 1/2$  дает нуль в следующем шаге. Какие значения приводят к 1/2? Легко видеть, что это значения 1/4 и 3/4. Таким образом, можно постепенно определить иско-

мую область притяжения нуля, содержащую бесконечное множество чисел. Существует особый прием, воспользовавшись которым можно быстро и точно определить все аттракторы, их свойства и их области притяжения. Представим число  $X(0)$  в двоичном виде. Например:

$$X(0) = 0,010011010111010111000101000101100000110000011\dots$$

Для того чтобы умножить это число на 2, как требует того формула, нам нужно всего лишь сдвинуть все цифры на один знак влево (или сдвинуть запятую на один знак вправо). Если слева от запятой появится 1, ее следует вычеркнуть. Каждое рациональное число (рациональными называются числа, которые могут быть представлены в виде дроби, где числитель и знаменатель — целые числа), как известно, в двоичной системе счисления может быть выражено в виде конечной или периодической дроби, а всякое иррациональное число — в виде бесконечной непериодической дроби. Таким образом, если последовательность начинается с рационального числа, то закончится она неподвижной точкой (конечная двоичная дробь) или циклом (периодическая двоичная дробь); в случае же, когда начальное значение представлено иррациональным числом, последовательность устремляется к хаотическому аттрактору. Поскольку рациональные и иррациональные числа находятся на числовом луче на произвольно малом расстоянии между собой, области притяжения аттракторов фрактально взаимопроникают друг друга.

Какое отношение все это имеет к связанной и свободной информации? Физик, к примеру, обнаруживает объект, который ему хотелось бы детально изучить. Объект этот подчинен уже известным науке законам природы, на которые физик не никоим образом не может повлиять. Применим к этим законам формулу отображения Бернулли. В момент исследования объект находится в определенном состоянии; физик хотел бы выяснить, каким образом он может, используя данные о об этом состоянии, узнать нечто о прошлом и будущем изучаемого им объекта, опираясь на известные науке законы. Сопоставим настоящему состоянию объекта определенное число  $X(n)$ . Физик с некоторой точностью измеряет объект в обнаруженном состоянии и тем самым переводит связанную информацию, задаваемую самим этим состоянием, в свободную информацию, выражая ее числом, которое может быть записано на бумаге, или сохранено в памяти компьютера, или представлено в двоичной или десятичной системе счисления и которое не исчезнет тогда же, когда описываемое им состояние объекта сменится следующим. В соответствии с точностью первого измерения (количество значащих двоичных цифр) ученый может теперь определить (с убывающей

точностью) состояния объекта в прошлом и будущем по значениям, предшествующим  $X(n)$  и последующим за ним. Допустим, результат измерения точен до четвертого знака («иксами» обозначены неизвестные цифры):

$$X(0) = 0, 1101xxxx,$$

тогда будущие (четыре момента времени) состояния объекта определяются как

$$X(1) = 0, 101xxxxxx,$$

$$X(2) = 0, 01xxxxxxx,$$

$$X(3) = 0, 1xxxxxxxx,$$

$$X(4) = 0, xxxxxxxxx,$$

а прошлое объекта как

$$X(-1) = 0, x1101xxx,$$

$$X(-2) = 0, xx1101xx,$$

$$X(-3) = 0, xxx1101x,$$

$$X(-4) = 0, xxxx1101.$$

Таким образом, для множества математических и логических операций, которые необходимо провести исследователю (для прогнозирования, к примеру), он, имея дело со свободной информацией, может использовать просто символический сдвиг цифр.

Обобщим все вышесказанное. Естественнаучные исследования часто имеют своей целью извлечение свободной информации из связанной (к примеру, посредством измерений). В этом смысле свободная информация не столь богата, как связанная: она описывает лишь отдельные аспекты объекта, являющегося предметом изучения. Однако в отличие от связанной информации, свободная информация может быть сохранена, скопирована, размножена и преобразована; при использовании определенных правил и закономерностей (например, логических или математических) она может быть соотнесена со свободной информацией, полученной из других источников, и таким образом может быть накоплена, а накопление информации, как известно, является принципом действия как биологической, так и социальной эволюции. Подобно тому, как организмы в ходе биологической эволюции накапливают необходимый опыт, а особи, победившие в борьбе за выживание и обладающие лучшими качествами, затем половым путем обмениваются наследственной информацией и передают ее следующим поколениям, люди в ходе социальной эволюции собирают информацию, полученную ими в процессе практической деятельности и целенаправленных

исследований, и, обладая языком, обмениваются этой информацией устно или письменно, оставляя ее потомкам через посредство книг, школы и т. п. С этой точки зрения, человеческий половой инстинкт и жажда нового, именуемая любопытством или любознательностью, утолить которую люди могут, обращаясь к книгам, фильмам и другим источникам информации, оказываются сродни друг другу и являются, по сути, не чем иным, как мощным позитивным фактором, определяющим ценность обмена информацией, только на двух разных уровнях — биологической и социальной эволюции.

С увеличением объемов свободной информации начинается использование таких формальных средств сжатия данных, как абстрагирование, образование понятийного аппарата и работа с ним; этот этап, по сути, представляет собой следующую, более высокую, ступень процесса ритуализации: изначально естественные структуры становятся символами, символы складываются в новые структуры, которые опять-таки расширяют набор используемых символов — своего рода алфавит, — однако все же сокращают объемы информации, которая (в рамках нашей метафоры) может быть представлена в виде текста.

В качестве простого примера рассмотрим некую компьютерную программу. Компьютерная программа — это последовательность команд процессора. Команды, в свою очередь, состоят из некоторого количества битов, то есть ячеек, находящихся в каждый момент времени либо в заряженном, либо в разряженном состоянии. В ходе выполнения программы наступает момент, когда эти ячейки оказываются связаны с шиной, и их заряд подается на определенные контакты процессора («считывание команды»). Возникающая при этом конфигурация зарядов инициализирует в процессоре перенос зарядов, вследствие чего на других контактах процессора возникает новая конфигурация («обработка команды»). «Значение» каждой из этих битовых конфигураций реализуется при непосредственном электрическом контакте с процессором.

Программиста редко занимают описанные нами конфигурации — их символизируют на самом нижнем уровне команды ассемблера. Естественно, здесь нужен «переводчик» (транслятор), в качестве которого выступают ассемблер или компилятор и операционная система. Программисту нет необходимости записывать одну за другой все команды своих программ. При возникновении повторяющейся последовательности элементов программист ее выделяет, присваивает ей некое имя — например, *XYZ* (заменяя имеющуюся структуру символов новым символом) — и вместо соответствующей последовательности команд пишет *CALL XYZ*. Регулярное использование этого метода позволяет выстраивать оптимальные иерархии

символов. Эффективность этого метода обнаруживается уже на примере так называемых высокоуровневых языков программирования, подлинная же его мощь проявляется в описании гораздо более разветвленных иерархий: от протеинов до математических теорем. Мы еще обсудим это подробнее.

Свободная информация в виде сообщений по определенным правилам может передаваться между элементами системы. Особой формой подобных регулирующих механизмов, применимых для последовательных цифровых информационных сообщений, являются языки.

Уровень сложности процессов космической и земной эволюции отражен в связанной информации протекающих состояний; главной же отличительной чертой биологической и социальной эволюции является появление свободной информации.

Исключительное значение для любого рода обработки информации имеет сохранение ее. Каким вообще образом физическая система может сохранять информацию? Это возможно только в том случае, если система обладает большим количеством состояний, в каждом из которых она пребывает лишь определенный промежуток времени [?, ?, ?].

В качестве примеров таких мультистабильных систем можно привести следующие:

- а) диссипативные мультистабильные системы (компьютер, мозг),
- б) «основные» состояния фрустрирующих систем (обучающиеся сети),
- в) ???нейтрально-стабильные или метастабильные консервативные структуры (книги, компакт-диски, ДНК, спектры излучения, звуковые волны и пр.),
- г) стабильные слои в гравитационном поле (литосфера, океан),
- д) хаотическая динамика (история Земли, погода, история человечества и пр.).

## 4.2. Информация и хаос

Как показывает тщательное изучение отображения Бернулли, *хаос* и *информация* имеют друг с другом нечто общее. Попытаемся проследить эту общность, и с этой целью еще раз пройдемся по некоторым пунктам, обсуждавшимся в предыдущих главах.

1. Комплексные механические движения обратимы и хаотичны. Хаос разрушает само понятие траектории, так как точное определение исходных величин становится невозможным, и уже по истечении конечного промежутка времени заданная траектория модели демонстрирует качественно иное течение процесса или состояние, чем описываемый этой моделью реальный хаотический процесс. Выходом из положения становится замена точной траектории статистическим пучком, охватывающим со временем все возможные состояния. Эквивалентом использования пучка является введение вероятностей, которое сразу же приводит к нарушению симметрии динамической группы: группа обратимых движений переходит в полугруппу необратимой динамики [?]. Обратимое описание тем самым делается уже невозможным: чтобы нарушить обратимость, достаточно любого малого ???неклассифицированного шума (например, космического фонового излучения). Хотя практически все основные физические уравнения обратимы, строго обратимые процессы в природе являются скорее исключением, нежели правилом, и их можно сравнить с крошечными островками в огромном море необратимости. Позднее мы обсудим подробнее тот факт, что симметричность уравнения никоим образом не может быть отождествлена с симметрией его решений.
2. Хотя хаос и затрудняет прогнозирование комплексной динамики, на более высокой ступени тот же хаос создает предпосылки для нового простого описания (хаос, по сути, «часть силы той, что без числа творит добро, всему желая зла»<sup>1</sup>). Хаотическая динамика эргодична, и это ее свойство дает ученым возможность использовать в ходе исследований простую статистическую теорию нового типа, позволяющую им обойтись без знания всех параметров движения, то есть исходя из крайне скудной информации о нем. Самым известным примером тому является, конечно, статистическая термодинамика, использующая при определении макроскопических свойств системы вместо множества микроскопических степеней свободы всего лишь несколько параметров порядка нового качества.
3. Хаос и ограниченная предсказуемость не исключают друг друга. Даже если траектории в системе с хаотической динамикой экспоненциально расходятся, это хотя и означает быстрое снижение вероятности точного прогнозирования поведения системы в отдаленном будущем, но все же никоим образом не исключает возможности прогнозирования

---

<sup>1</sup>И. В. Гёте. Фауст (пер. Б. Пастернака). — *Прим. перев.*

полностью. Напротив, описанное в предыдущем пункте использование статистической теории приводит к качественно новым возможностям прогнозирования вероятностей определенных будущих событий.

Мы убеждены в том, вышеперечисленные три пункта должны определять подход к принципам моделирования комплексных систем. Более того, мы уверены, что те же принципы содержат в себе еще и ключ для подхода к теории обработки информации. Информация и энтропия неразрывно взаимосвязаны — об этом знали еще Максвелл и Больцман, это было детально продемонстрировано Силардом и сформулировано в виде теории Шенноном. Взаимосвязи информации и энтропии посвящена отдельная (девятая) глава этой книги. Здесь же следует сказать лишь о том, что понятие энтропии предполагает и понятие вероятностей, которое опять-таки тесно связано с хаотической динамикой.

Комплексные системы при наличии соответствующих свойств микроскопической динамики позволяют, используя немногие параметры порядка нового качества, найти такие свойства, которые описывают поведение системы на более высоком уровне посредством чрезвычайно ограниченной информации. Здесь мы, естественно, сталкиваемся с понятием ???«ценность». Эти ценности являются, прежде всего, чисто формальными решениями микроскопической динамики при заданных граничных условиях, а потому не могут быть сведены к функциям микроскопических переменных.???

Принципиальное значение имеет взаимосвязь энтропии и предсказуемости. Мы уже установили, что хаос и устойчивость — равно как и ограниченная предсказуемость — не исключают друг друга. Каждый из нас знает об этом исходя из собственного жизненного опыта: стабильность общества не исключает проявлений «личного» хаоса. Наш с вами жизненный путь, с момента рождения и до самой смерти, можно охарактеризовать как динамическую неустойчивость. Взгляды, настроения и случайности накладывают отпечаток на личную судьбу любого человека и оставляют свои метки на всю жизнь. Жизнь близнецов несмотря на почти равные «граничные условия» может протекать совершенно по-разному. Именно эта исключительно сильная зависимость процесса дальнейшего развития от мельчайших деталей и составляет типологическое свойство хаотической динамики. Никто не может надеяться на существование «уравнения», которое давало бы человеку возможность узнать, какое будущее его ждет. Для того, чтобы существовать в окружающем его мире, человеку нужен постоянный поток информации.

Совершенно иначе ситуация представляется, если речь идет о большом количестве людей. Общество состоит из отдельных индивидуумов, каждый из которых ведет в определенном смысле хаотическую жизнь, однако функционирует оно на удивление стабильно. Люди умирают от старости, болезней или несчастных случаев, рождаются новые, каждый выбирает себе место, где он будет жить, профессию, спутников жизни; и хотя никто не занимается организацией всего этого, существуют вполне устойчивые профессиональные группы, поддерживается численность населения и торговый баланс. Страны и народы получают некие характеристики («трудолюбивые люди», или «красивый народ», или «отсталая страна»), хотя, в конечном счете, отдельные личности, являющиеся носителями этих качеств, приходят и уходят и ни в коем случае не могут быть распределены по нескольким инвариантным категориям.

### **4.3. ???Ценность — параметр порядка нового качества**

Процессы оценки и оптимизации, как известно, играют в нашей жизни решающую роль. Каждый человек пытается улучшить собственную жизнь, повысить, что называется, ее качество; государство несет ответственность за улучшение условий жизни своих граждан; промышленность постоянно стремится к созданию все более совершенных изделий для удовлетворения запросов потребителей. С этим всегда связаны процессы оценки и оптимизации. Как показывает история развития естественных наук, примитивный перенос человеческих представлений об оптимизации в сферу природы приводит к возникновению совершенно нелепых конструкций. С другой стороны, применение в тех же естественных науках идей оптимизации оказалось весьма эффективным и плодотворным. Многие физические законы сформулированы в форме экстремальных принципов. Примерами тому могут послужить и принцип наименьшего действия в механике, и принцип Ферма в оптике, и вариационные принципы в квантовой механике и теориях поля. Многие исследователи считали вариационные принципы особенно удовлетворительной формулировкой законов. Приведем высказывание Макса Планка, взятое нами из его доклада 1915 года «Принцип наименьшего действия»:

Среди более или менее универсальных законов, которыми отмечены достижения физической науки на протяжении последних столетий, принцип наименьшего действия является в настоящее время, пожалуй, тем принципом, который благодаря своим форме и содержанию может претендовать



на то, что он вплотную приближен к идеальной конечной цели теоретических исследований.

В вышеназванные экстремальные принципы введены скалярные величины (функции и функционалы), позволяющие оценивать и сравнивать состояния или траектории. Еще один, совершенно отличный от предыдущего, тип критериев оценки и оптимизации возник в середине девятнадцатого века в связи с развитием термодинамики. Идея о том, что в ходе термодинамических процессов что-то оценивается и оптимизируется, была введена Клаузиусом вместе с понятием энтропии, и произошло это почти параллельно с разработками теории биологической эволюции. Развитием идеи о том, что энтропия некоторого тела есть мера обесценивания содержащейся в данном теле энергии, занимался и сам Клаузиус, и — вслед за ним — другие ученые, среди которых прежде всего следует назвать Гельмгольца и Оствальда. Оствальд однажды высказался в том смысле, что ему удалось постичь сущность второго закона термодинамики только тогда, когда стала ясна взаимосвязь с ценностью энергии. Историков науки по-прежнему интересуют причины, по которым Кирхгоф и Герц затем пытались (и небезуспешно) исключить из физики понятие ценности.

Для физической энтропии в контексте понятия ценности второй закон термодинамики утверждает, что изолированные системы спонтанно стремятся к обесцениванию содержащейся в них энергии. Самоорганизация требует накачки системы высокоценной энергией (для обеспечения неоднократно упоминавшегося нами «экспорта» энтропии). В области линейных отношений (близких к равновесию) необратимые процессы демонстрируют тенденцию к минимизации производства энтропии (принцип Пригожина). В нелинейной области (состояния, далекие от равновесных) поиск универсально действующих принципов до сих пор не увенчался успехом и потому оказался почти прекращен. И все же существует еще ряд принципов оптимизации, действительных в пределах особых классов нелинейных процессов. Эта проблема была тщательно изучена нами в одной из прошлых совместных работ [?].

Помимо проблемы необратимости существует еще и проблема *несводимости ценности*.

*Энтропия не может быть вычислена как функция от координат и импульсов. Селективная ценность не может быть вычислена из фенотипических свойств организмов, а меновая стоимость не может быть вычислена из свойств материалов, из которых изготовлен товар.*

Каким образом могут существовать в системе величины, не вытекающие из основных переменных, если эти же переменные и дают полное описание системы? Речь идет о так называемых *эмергентных свойствах*. Целое больше суммы составляющих его частей; добавим к этому еще несколько замечаний. Начнем с почти тривиального, но притом необычайно важного факта: симметрия уравнений движения не может быть отождествлена с симметрией их решений. Простейшим примером тому является гармонический осциллятор; канонические уравнения инвариантны относительно сдвига по времени (поскольку автономны), решение же инвариантно только относительно сдвигов с периодом  $T$ .

Еще более глубокое впечатление производят лоренцев аттрактор и отображение Бернулли, уравнения движения которых отличает тривиальная простота. Нельзя не упомянуть и о замечательных множествах Жюлиа, представляющих собой результат простых ньютоновых итераций, о которых говорилось выше.

Решения локальных уравнений обладают общими свойствами нового типа, которые, хотя и являются однозначным следствием из уравнений, имеют при этом, как правило, некое новое качество. Этот факт представляется нам чрезвычайно значимым в отношении многих проблем. Позднее мы разовьем эту мысль при рассмотрении вопросов морфогенеза. Важный аспект морфогенеза заключается в том, что каждая клетка «работает только на себя», и несмотря на это существует большой организм, общий план которого нигде не записан.

В полной аналогии с морфогенезом действует социальная эволюция. Никто не только не планировал создания общества именно в такой форме, но даже не предвидел. Скорее, все было как раз наоборот: на протяжении всех этих тысячелетий люди — точно так же, как сегодня — преследовали только свои собственные эгоистические интересы. Так без какого бы то ни было генерального плана (и беспомощность некоторых политиков доказывает это) возникает величественное здание — целесообразное, удобное и полезное.

То же, в принципе, относится и к энтропии молекулярных систем, и в этом случае видится, быть может, даже ярче и четче, ведь число «актеров» здесь уже не так велико. Энтропия как эмпирическая величина введена в термодинамическое равновесие. Допустимость подобной величины предполагает, что все «быстрые» микроскопические переменные подчинены некоторой определенной статистике (например, демонстрируют эргодическое поведение в фазовом пространстве). В противном случае (скажем, при турбулентности) нахождение таких величин оказывается весьма затруднительным.

Теперь о самом главном. Свойства величин, характеризующих ценность (или стоимость), несут на себе определенный отпечаток, накладываемый на них типом действующей статистики элементов, и в вышеуказанном смысле эта статистика является *интегральным* свойством микроскопической системы. Статистика учитывает не симметрии уравнений движения, а симметрии их решений! Для проведения статистических вычислений необходимо знать, каковы траектории частиц в фазовом пространстве, насколько долго и где именно сохраняют они свои параметры, где проходят сепаратрисы, каковы граничные условия и т. д. В общем случае это возможно только тогда, когда уравнения *сначала* решаются, а *затем* усредняются. Эти операции никоим образом *не коммутативны*! В случае же энтропии, в силу особых свойств находящихся в равновесии газов, такой необходимости нет, и можно сделать так, что окажется достаточно усреднить только канонические уравнения.

*Таким образом, при переходе к описанию более высокого порядка (т. е. приведенному) возникают величины нового качества. Новое качество заключено в свойствах микроскопических уравнений, непосредственно усреднить которые мы практически не в состоянии.*

Теперь обратимся к вопросу об оценке и оптимизации в случае комплексных процессов. На Земле в ходе эволюции жизни и связанных с нею комплексных систем фундаментальное значение имели процессы селекции. Селекция в эволюционной системе всегда связана с оценкой и конкуренцией.

Селекция — это отбор положительно оцененных видов в ходе конкурентной борьбы между различными видами. Конкуренцию в самом общем смысле мы определяем как коллективный процесс, протекающий в динамических системах, включающих в себя множество видов. Конкуренция возникает в ситуации, когда все входящие в систему виды (подсистемы) оказываются принципиально способны к существованию в данных условиях и преследуют общую цель, которая не для всех достижима в равной степени. Когерентный процесс в таких условиях приводит к выходу из борьбы и исчезновению одного или нескольких видов (подсистем).

Примером из физики может служить конкуренция лазерных или гидродинамических мод в борьбе за существующие в системе энергетические ресурсы. В экологии о конкуренции говорят, если некий необходимый для выживания вида ограниченный фактор используется двумя или более видами. Конкуренция приводит к селекции, то есть к отбору, но процессу

отбора предшествует процесс оценки. По Чарлзу Дарвину, в конкурентной борьбе выживает наиболее приспособленный вид. Выражение «survival of the fittest»<sup>2</sup> отражает всю суть процесса естественного отбора. Эта удачная формулировка принадлежит, впрочем, не самому Дарвину; она вышла из-под пера Спенсера и была принята отнюдь не однозначно. Многие полагали, что данное выражение есть не что иное, как тавтология. Мы же убеждены, что это не так. Само существование «синергетики эволюции» тем и обусловлено, что формулировка Спенсера не только не является тавтологией, но и, более того, выражает основной закон эволюции. В этой связи следует упомянуть и о том, что понятие «fitness»<sup>3</sup> представляет собой пример объективированной оценки в эволюционном процессе. Важнейшим новым понятием в теории естественного отбора является, таким образом, понятие «ценности» или, по Дарвину, «приспособляемости».

Понятие «ценность» впервые было введено в восемнадцатом веке Адамом Смитом при разработке экономической теории. Фундаментальные идеи Адама Смита были впоследствии развиты Рикардо, Марксом, Шумпетером и многими другими экономистами. В ином социальном контексте идея «ценности» оказалась использована в конце восемнадцатого века Мальтусом. Параллельно с этими разработками в социально-экономической сфере концепция с середины девятнадцатого века нашла применение в биологии благодаря трудам Дарвина, Уоллеса, Геккеля, Спенсера и ряда других ученых. Райт в тридцатые годы двадцатого века разрабатывал идею адаптивных ландшафтов, развитую впоследствии такими авторами, как Конрад Шустер, Кауффман.

Адаптивный ландшафт формируется скалярными значениями фенотипов; примерами таких количественно выражаемых свойств могут служить вес, размер, высота, максимальная скорость и т. п. Отвлеченность этих понятий, естественно, приводит к усложнению процесса математического моделирования.

*По нашему определению, ценность есть нефизическое свойство вида (подсистемы) в динамическом смысле. Ценность выражает сущность биологических, экологических, экономических и социальных взаимодействий и взаимосвязей в контексте динамики системы в целом.*

В рамках теории моделей ценность вводится как элемент аксиоматики. Понятие ценности занимает важное место и в современной теории инфор-

---

<sup>2</sup>Выживание наиболее приспособленных (англ.) — Прим. перев.

<sup>3</sup>Пригодность, приспособленность (англ.) — Прим. перев.

мации [?, ?]. Этот момент представляется нам настолько существенным, что рассмотрению его мы решили посвятить отдельную главу.

Перечислим некоторые черты, общие для определения понятия ценности в разных научных дисциплинах:

1. Ценность, определяющая порядок элементов (подсистем, видов, мод), составляющих некоторую систему, является свойством всей системы. Ценность ни в коем случае не может считаться свойством отдельного, изолированного элемента. Целое в этом смысле есть нечто большее, нежели сумма составляющих его частей.

2. Ценность имеет решающее значение для структуры и динамики эволюционной системы. Ценность определяет взаимосвязи элементов и их динамику, характерными особенностями которой являются конкурентная борьба между элементами и осуществляемый в ходе такой борьбы отбор.

3. Динамика систем с оценкой необратимо и неразрывно связана с определенными экстремальными принципами. Экстремальные принципы могут быть связаны со скалярными функциями и полными дифференциалами только в особых случаях; как правило же, они носят ярко выраженный комплексный характер и определяются большим числом критериев.

С оценкой мы ассоциируем следующие три функции:

1. регулирующая функция,
2. дифференцирующая функция,
3. стимулирующая функция.

Процессы оценки и оптимизации имели важнейшее значение для возникновения жизни и сопряженной с этим обработки информации. Данный факт доказывается рядом наблюдений за поведением моделируемых систем; значительную роль при этом сыграли исследования, проводимые школой Манфреда Эйгена. Объем настоящей работы не позволяет нам привести здесь детальное представление моделей эволюции жизни, однако мы еще вернемся к ним в седьмой главе. Разработки Эйгена и развитие его идей другими исследователями в любом случае должны привести нас — не взирая на многочисленность нерешенных пока проблем — к новому подходу к пониманию природы мироздания. На основании естественнонаучных исследований становится совершенно ясно, что самоорганизация при соответствующих условиях может служить фундаментом для протекания процессов оценки, оптимизации и дальнейшего повышения уровня сложности

систем. В результате таких исследований на задний план вытесняется даже призванный Клаузиусом призрак тепловой смерти Вселенной.

Сегодня много усилий ученые прикладывают к тому, чтобы постичь глубинный смысл, содержащийся в понятии «ценность информации». Московский ученый Руслан Стратонович, занимающийся исследованиями в области теории информации, не сомневается в существовании информационной ценности и доказывает этот факт, основываясь на примерах и теоретических доводах. По мнению основателя синергетики Германа Хакена, более точная формулировка понятия «ценность информации» требует моделирования динамики поведения получателя информации [?]. В следующей главе мы неоднократно будем возвращаться к взаимосвязи информации и ценности.