

В. Эбелинг, Р. Файстель

ХАОС И КОСМОС

СИНЕРГЕТИКА ЭВОЛЮЦИИ



R&C
Dynamics

Werner Ebeling / Rainer Feistel

Chaos und Kosmos

Prinzipien der Evolution

Mit 52 Abbildungen

Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg · Berlin · Oxford

Вернер Эбелинг, Райнер Файстель

ХАОС И КОСМОС

СИНЕРГЕТИКА ЭВОЛЮЦИИ

Перевод с немецкого А. Логунова



Москва ♦ Ижевск

2005

Интернет-магазин
MATHESIS

<http://shop.rcd.ru>

- физика
- математика
- биология
- нефтегазовые технологии

Эбелинг В., Файстель Р.

Хаос и космос: синергетика эволюции. — Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований; НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2005. — 336 с.

Данная книга является своего рода синопсисом, посвященным эволюции *хаоса* в *космос*. Авторы, занимающиеся в течение многих лет изучением некоторых аспектов данной проблемы, излагают наиболее важные идеи, начиная с представлений древнегреческих мыслителей и заканчивая результатами последних исследований. Решающую роль в предлагаемом материале играют методы современной физики, теория самоорганизации и новейшие исследования в рамках теории хаоса.

Однако главными все же являются 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.

Для широкого круга читателей.

ISBN 3-86025-310-7 (нем.)

ISBN 5-93972-454-X (рус.)

Original title: Chaos und Kosmos: Prinzipien der Evolution

by Werner Ebeling und Rainer Feistel

Copyright © Spektrum Akademischer Verlag GmbH, Heidelberg.

© Институт компьютерных исследований, 2005

© НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», оригинал-макет, 2005

<http://rcd.ru>

<http://ics.org.ru>

Оглавление

Предисловие к немецкому изданию	7
ГЛАВА 1. О физической картине мира	10
1.1. Система и состояние	10
1.2. Принципы моделирования	15
1.3. Физика и эволюция	23
ГЛАВА 2. Время, сложность и структурирование	30
2.1. Простое и сложное	30
2.2. Обратимость и необратимость	33
2.3. Созидательный хаос	37
2.4. Процессы структурирования	40
ГЛАВА 3. Самоорганизация и эволюция	46
3.1. Необратимость и самоорганизация	46
3.2. Диссипативные структуры	49
3.3. Принципы самоорганизации	52
3.4. Базовые модели процессов самоорганизации	57
3.5. Эволюция — цепь процессов самоорганизации	65
ГЛАВА 4. Информация и ценность	70
4.1. Информация, состояние и обмен	70
4.2. Информация и хаос	79
4.3. Ценность — параметр порядка нового качества	81
ГЛАВА 5. Эволюция космоса и Земли	88
5.1. Большой Взрыв: модель «горячей» Вселенной	88
5.2. Восемь эпох эволюции протоплазмы	93
5.3. Самоструктурирование вещественной материи	103
5.4. Земля и Солнечная система	110
ГЛАВА 6. Эволюция климата	118
6.1. Земля в роли паровой машины	118
6.2. Океан — климатическая машина Земли	128
6.3. Устойчивость климата	137

ГЛАВА 7. Эволюция жизни	145
7.1. Самоорганизация и жизнь	145
7.2. Ад на Земле	155
7.3. Коацерваты — капельки жира в бульоне земного протоокеана	164
7.4. Протоклетки и создание молекулярного языка	179
7.5. Ритуализация генетического кода	189
7.6. Клеточная организация	203
ГЛАВА 8. Эволюция многоклеточных организмов	210
8.1. Морфогенез	210
8.2. Возникновение нервных клеток	224
8.3. Эволюция нейронных сетей	228
8.4. Индивидуальное научение	233
ГЛАВА 9. Эволюция общества	238
9.1. О необходимости перемен	238
9.2. Поведение и ритуализация	243
9.3. Информация и язык	247
9.4. Обмен и стоимость	251
ГЛАВА 10. Энтропия, порядок и сложность	258
10.1. Энтропия как мера случайности	258
10.2. Энтропия и информация	265
10.3. Энтропия и макроскопический хаос	268
10.4. Энтропия и сложные последовательности	270
ГЛАВА 11. Синергетика эволюции	281
11.1. О задачах синергетики	281
11.2. Элементы синергетической теории эволюции	287
11.3. Эволюционная динамика	291
11.4. Синергетика эволюционных процессов	295
ГЛАВА 12. Синописис эволюции	299
12.1. Quo Vadis Evolutio?	299
12.2. Можно ли еще спасти будущее?	305
Литература	312
Предметный указатель	328

Предисловие к немецкому изданию

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, лишенное формы и порядка состояние мира. У Гесиода *хаос* был пустым безразмерным пространством, предшествовавшим всему сущему; позднейшие мыслители — такие, как Анаксимен, Фалес и Гераклит — называли *хаосом* бесформенное первовещество (подобное воздуху, воде или огню), ставшее затем основой мироздания. В противоположность *хаосу* понятие *космос* (греч. «украшение, порядок») обозначало в греческой мифологии и 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 этой 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 работали еще 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, теория самоорганизации и новейшие исследования в рамках 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 составление своего рода синопсиса, то есть общего, суммарного обзора, посвященного эволюции *хаоса* в *космос*.

Будучи физиками, в дальнейшем мы будем пользоваться, в основном, языком физики и свойственным физикам образом 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 есте-

ственна научных 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, Г. Хаген, К. Ланиус и Б. Ронахер, которые прочли различные части этой книги и сделали ряд критических замечаний.

А также хотелось бы выразить благодарность Е. Н. Князевой за представленный перевод на русский язык последней, двенадцатой главы книги.

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, причинности 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 [6].

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 о курице и яйце: чтобы разобраться в законах, лежащих

в основе физического мира, нам необходимо постичь сам образ постижения, способ познания. Чтобы понять, каким образом действует наш мозг, нам необходимо познать суть пространства, времени и материи. Однако это обстоятельство ни в коем случае не означает, что проблемы, связанные с познанием 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. 1.1).



Рис. 1.1. Мария Эта Кастельянос (Веракрус). «Эволюция».

Теория самоорганизации и эволюции — это продукт нашего мышления, а наше мышление, в свою очередь, представляет собой 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 книга является носителем

лем 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 необходимым договориться о том, каким именно языком мы будем пользоваться в дальнейшем. Вот этот момент и станет для нас началом: мы поговорим о вещах, которые представляются, на первый взгляд, само собой разумеющимися.

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, которые являются составляющими описываемой нами системы, а во втором окажутся все остальные (они будут представлять собой «окружение»). В соответствии с правилами, такое разделение задается посредством выделения некоторой пространственно-временной области (например, объема, ограниченного стенами) (рис. 1.2).

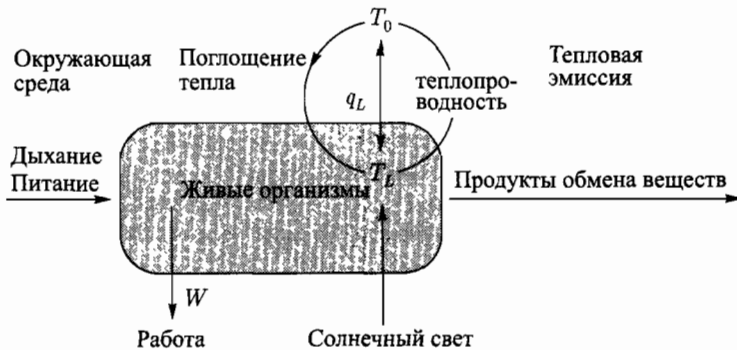


Рис. 1.2. Система и ее окружение, представленное на примере живых организмов и окружающей среды.

Мы нередко говорим, что те или иные объекты принадлежат определенной системе — так, к примеру, множество всех живых существ является биологической системой. В этом случае вовсе не обязательно простран-

ственное «соседство» всех элементов системы; они могут быть связаны всего лишь рядом общих характеристик. Строго говоря, все подобные системы являются системами открытыми: они взаимодействуют с окружением в процессе взаимного обмена энергией и материей. Однако часто в качестве модели открытой в действительности системы мы используем умозрительную систему, называемую 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, в виде тепла), 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, падающие на Землю метеориты) играет в процессе образования упомянутых структур всего лишь второстепенную роль, и при многих исследованиях этими факторами можно попросту пренебречь.

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.

«Естественной» системой является 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 исходит из предположения, что рассматриваемая система и соответствующее ей окружение находятся в определенных состояниях и эти состояния обуславливают обмен между системой и окружением. Точнее говоря, состояния — это нечто, не поддающееся непосредственному определению; в наших силах лишь регистрировать процессы 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 параметры, 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 особой тщательностью 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 должно 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 (методом дедукции) выведены из других величин или законов.
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 подсистемах 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, сколько 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 точки в фазовом пространстве; движение такой точки во времени $x(t)$ изображено в виде траектории на рис. 1.3.

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, необходимо знать еще и так называемые «параметры обмена», или «текущие величины», характеризующие взаимодействие между элементами системы или процессы

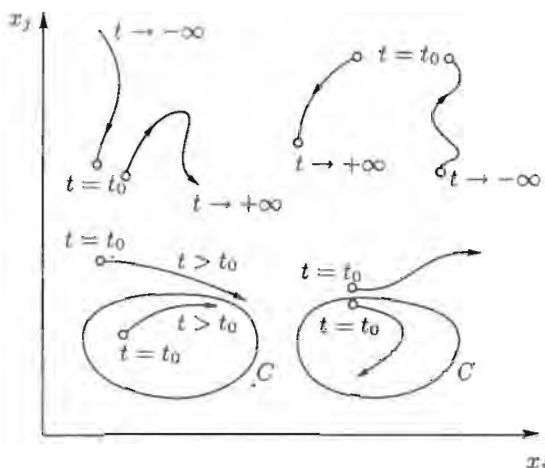


Рис. 1.3. Траектория движения точки, представляющей состояние системы, в фазовом пространстве. На больших отрезках времени при определенных обстоятельствах могут наблюдаться как устойчивые стационарные точки, так и устойчивые предельные циклы.

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, суммарное 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 или 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 причинности. Причинность 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 причинность — 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 однонаправленной 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 теплому.

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

Энтропию нельзя уничтожить. Невозможны процессы, уничтожающие энтропию. Строжайше запрещена спонтанная передача теплоты от более холодного тела к более теплому, 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) привели бы к увеличению ценности 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 между частицей и волной 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 останавливаться на этих примерах подробнее; мы займемся другим аспектом проблемы. Термины, в которых мы мыслим и говорим, являются абстракциями, понятиями отвлеченными, ритуализованными, 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 непреходящую преходящего, они возникают ниоткуда и вновь исчезают, они не стареют, их невозможно отличить друг от друга, они мгновенны и безличны.

Такое разделение мира — на относительно стабильные, осязаемые объекты и на объекты мимолетные, едва уловимые — удобно и доступно пони-

манию любого человека. Никому не придет в голову всерьез провозгласить своей собственностью дуновение ветра или дать имя морской волне. 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 некто иной, как они сами, люди, пытаются навязать природе эту своего рода «сегрегацию». Человек не только собственные представления 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 для решения множества технических задач, — громкоговоритель, посылающий звук во всех направлениях, представляется как своего рода «дробовик». «Звуковые частицы», подобно бильярдным шарам, «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 сомне-

ния 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 причинность; преломление луча теперь оказывается следствием, а существование линзы — причиной. В действительности же не существует причинной связи между линзой и световым лучом. При участии линзы свет распределяется в пространстве иначе, чем в отсутствие оной; причинность 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). Причинная 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 двойную сущность. Текущая жидкость может быть описана двумя эквивалентными способами: по Эйлеру и по Лагранжу. (Хотя оба способа, собственно, открыты Леонардом Эйлером, общепринято один из них все же приписывать Лагранжу, сделавшему решающий вклад в разработку этого способа.) Формулировка Эйлера напоминает электродинамический подход: 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 безличная 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 «старе-

ния» капле. Во втором случае у нас есть пространственное поле 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 причинности, 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 «причинной 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) инструментом 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»¹. 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 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 инженеров-специалистов по статике сооружений: без физиков здание развалилось бы, однако и в одиночку возвести его они, естественно, не в состоянии.

Положение физиков в «ансамбле» исследователей эволюционных процессов очень образно описано Николисом и Пригожиным [132]:

Мы в определенном смысле находимся в роли пришельца с другой планеты, наткнувшегося на дом в пригороде и желающего разобраться в том,

¹Kant I. *Allgemeine Naturgeschichte und Theorie des Himmels*.

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. Свойства 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 «историей», 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 [105], 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 редакцией П. Ландсберга [117], и превосходному анализу, сделанному С. Хокингом в книге «Краткая история времени» [82].

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 инженеров-статиков, без которых разрушилось бы всё 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 пространство 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 почувство-

вать 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 с 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 история 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 неизмеримо сложными процессами, становится абсолютно ясно, что без всестороннего 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 че-

ловечества, 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 и 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 эволюция каждого вида 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 по-

могли 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 из 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 подходов к решению этой проблемы; 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 несводимы друг к другу.*

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.*

3. Законы динамики комплексных систем образуют так называемый конус ограничений, или «конус законов» (рис. 2.1); 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.

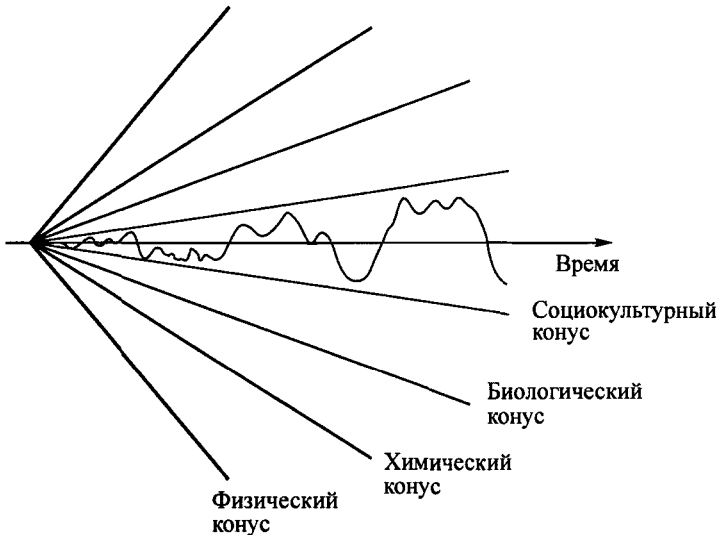


Рис. 2.1. «Конус законов». Все возможные процессы (не нарушающие фундаментальных законов) находятся в «физическом конусе»; «конусы», символизирующие химические, биологические и социокультурные процессы, значительно уже — они соответствуют процессам (также разрешенным), на которые наложены дополнительные ограничения.

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»¹ древних евреев. Ди-

¹Хаос (др.-евр.). — Прим. перев.

намика эволюции определялась исключительно фундаментальными законами, ведь комплексных систем тогда еще не существовало. Но наш мир был «креативен» 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 глубоких научных проблем.

2.2. Обратимость и необратимость

Классическая механика, основы которой были заложены в семнадцатом веке Ньютоном, стала затем надежным фундаментом для понимания различных 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 отсутствует принципиальное различие 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 быть произведена, 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 различны, 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. Гипотетические 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 целые 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 кинолентку 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) сформулировал второй закон термодинамики, а заодно и обнаружил 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 данной 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 внутренней свойственной им тенденцией к уменьшению ценности энергии и, вместе с тем, к уменьшению 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, Лосмидт, 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 обратимый характер.

Создание и развитие классической механики и электродинамики означают, казалось бы, и высочайший взлет, и, в то же время, конец физики. Пригожин и Стенгерс [147] писали об этом так:

Классическая динамика сегодня может быть изложена весьма компактно и при том замечательно элегантно. 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 всего лишь 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 . . .»¹, 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

¹Boltzmann L. *Analytischer Beweis des Zweiten Hauptsatzes . . .*

в обратном направлении; поскольку движение обратимо, система должна будет тем же путем двинуться «назад», а это значит, что ее гамильтониан (энтропия системы) начнет монотонно убывать, что, однако, противоречит теореме Больцмана. Парадокс Лошмидта вызвал в кругу физиков оживленную дискуссию, которая и по сей день не затихла окончательно. 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»¹ публикует работу «Об одной теореме динамики и механической тепловой теории»². Спорная теорема была сформулирована Пуанкаре, издавшем в 1890 году свое знаменитое исследование «О задаче трех тел и уравнениях динамики»³. Сегодня нам совершенно ясно, что работа Пуанкаре оказалась для развития физики не менее значимой, 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 возвращается через некоторое конечное время («время возврата» Пуанкаре) в состояние, сколь угодно близкое исходному. Цермело вывел из теоремы Пуанкаре заключение, 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 уменьшается.

2.3. Созидательный хаос

Как уже было сказано, «нормальная» ньютонова или гамильтонова механика оказывается не в состоянии разрешить глубинный конфликт между

¹ *Annalen der Physik.*

² Zermelo E. *Über einen Satz der Dynamik und die mechanische Wärmetheorie.*

³ Poincaré H. *Sur le probleme des trois corps et les equations de dynamique.*

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 хаотические.

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 сегодняшней 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 найденных с помощью 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 своего рода постоянное стохастическое возмущение, ведущее к «забыванию» начальных условий.

Другие авторы, используя численное моделирование динамики ньютоновых частиц, 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 не может быть достигнуто, так как именно в результате ошибок округления утрачивается часть информации, существовавшей в момент начала процесса.

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, обуславливающей 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 [5, 148].

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 (квантово-механического) 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 полугруппе 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 систематической 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 [29]. 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 полное совпадение возможно только при таких поворотах, когда величина угла кратна 60° . 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 уже упомянули, но и с целым рядом других видов симметрии, значительно менее наглядных [150, 122]. 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.

Попытаемся 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 физики многое узнали 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 процессов такого рода; к их числу относятся и погодные явления, и все биологические процессы.

Еще одна возможная классификация реальных процессов основана на величине характерного 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 метagalктики, 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 аналогичными при сравнении качественных

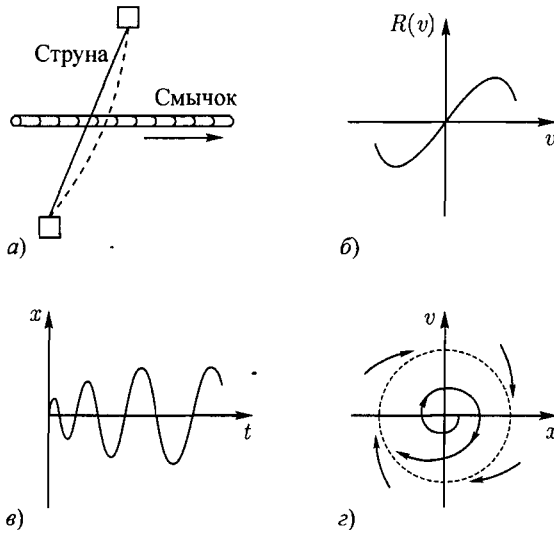


Рис. 2.2. Структурообразование на примере окрашенной скрипичной струны: а) струна и смычок; б) схематическое представление отрицательного трения, благодаря которому достигается полная энергия накачки струны; в) нарастание амплитуды (x) колебаний как функция от времени; г) траектории в пространстве скоростей.

характеристик. Все рассматриваемые здесь системы состоят из некоторого большого числа однородных элементов (атомы, клетки, индивидуумы), которые в неструктурированном состоянии ведут себя достаточно беспорядочно. 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. 2.2). Молекулы воды в подогреваемом снизу сосуде собираются в конвективные ячейки (рис. 2.3, 2.4). Молекулы в ходе химической реакции образуют временные структуры (рис. 2.5). 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

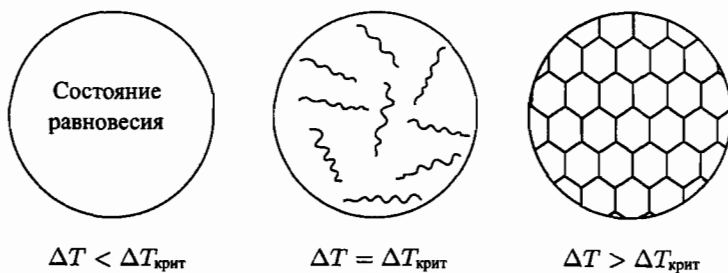


Рис. 2.3. Структурообразование на примере подогреваемой снизу жидкости. *Слева*: До тех пор, пока разница температур между верхним и нижним слоями жидкости мала, не наблюдается никаких макроскопических эффектов, кроме теплопередачи. *В центре*: Как только разница температур принимает критическое значение, 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.

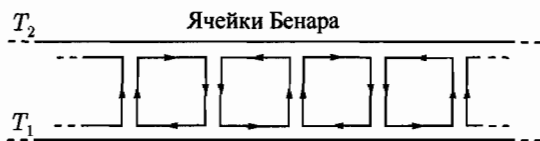


Рис. 2.4. Цилиндрическое движение подогреваемой снизу жидкости (поперечный разрез).

элементов системы — первоначально единое — распадается на различные эквивалентные друг другу классы, вследствие чего *симметрия системы оказывается нарушена и возникает структура*.

Совершенно аналогичные описанным нарушениям 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.

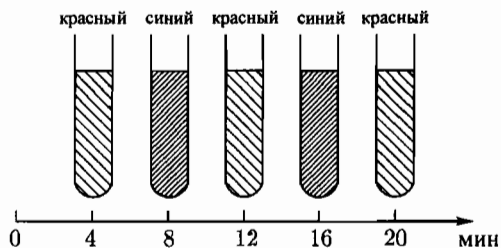
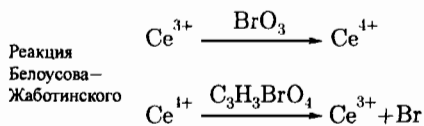


Рис. 2.5. Реакция Белоусова – Жаботинского: раствор периодически изменяет цвет с красного на синий.

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 деструктуризации, 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 протекания 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, 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 при возникновении определенных условий*, к которым можно отнести следующие:

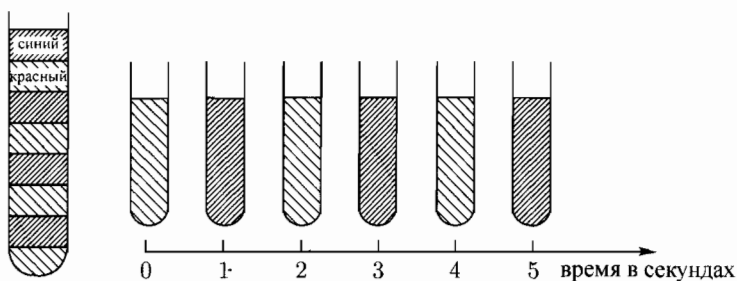


Рис. 3.1. Реакция Белоусова – Жаботинского. Слева: Спонтанное возникновение пространственной периодичности.

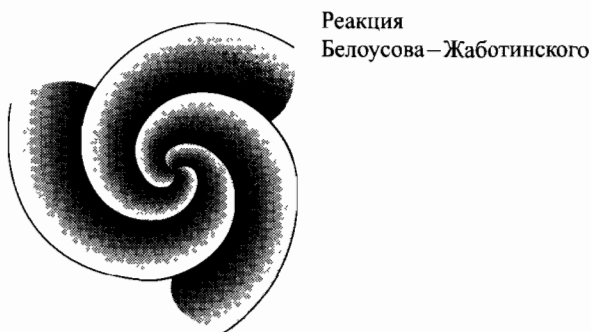


Рис. 3.2. В ходе реакции Белоусова – Жаботинского при определенных условиях могут возникать спиральные волны.

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 выходит из состояния 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. 2.5). Перечисленные вещества вступают в реакцию в результате введения в раствор высококачественных химикатов, образуя при этом не только пространственные, но еще и временные структуры (рис. 3.1; 3.2).

Подводя итог всему вышесказанному, мы можем сформулировать следующее положение:

Процессами самоорганизации являются такие процессы, которые посредством неотъемлемо присущих 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 *a 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 социокультурные 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 социокультурных 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 инженера-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, в 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 существующей 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, а 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 [145]. Различают открытые системы, обменивающиеся со своим окружением энергией и/или материей, и закрытые, то есть не вза-

имодельствующие 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 природе, поскольку следует учитывать также «экспорт» и «импорт» системы. Так называемые замкнутые (полузакрытые) 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 минимального 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 устойчивым, 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»¹ Поля Гленсдорфа и Ильи Пригожина (1971), «Синергетика»² Герма-

¹Glandsdorff P., Prigogine I. *Thermodynamic Theory of Structure, Stability and Fluctuations*.

²Haken H. *Synergetics*.

на Хакена (1973) и «Самоорганизация материи и эволюция биологических макромолекул»¹ 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 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 [33, 37].

¹Eigen M. *The Selforganization of Matter and the Evolution of Biological Macromolecules.*

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. 3.3). 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.

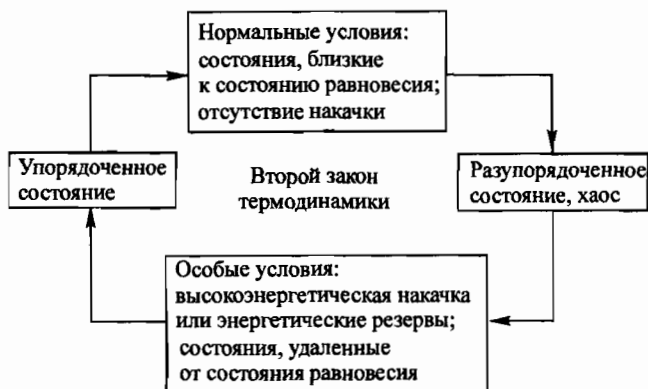


Рис. 3.3. При нормальных условиях следствием второго закона термодинамики является общая тенденция к разупорядочиванию и хаосу. В некоторых особых случаях — а к ним относятся, к примеру, удаление от состояния равновесия, высокоэнергетическая накачка или существование соответствующих энергетических резервов — процессы структурообразования протекают в полном согласии со вторым законом.

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 возможна лишь при условии, что система способна к «экспорту» энтропии (рис. 3.4). Поскольку энтропия является мерой ценности энергии, система

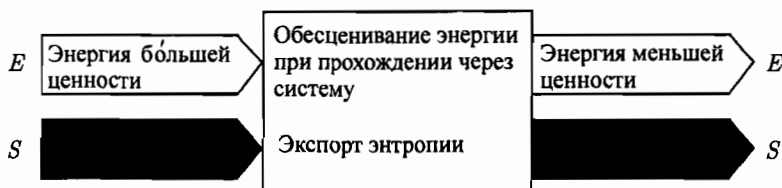


Рис. 3.4. Процесс самоорганизации возможен только в случае «экспорта» энтропии: энтропия на выходе из системы превышает энтропию на входе. Энергетический баланс системы может быть, разумеется, выровнен, если ценность энергии, поступающей в систему, превышает ценность энергии, выводимой за пределы системы.

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. 3.5).

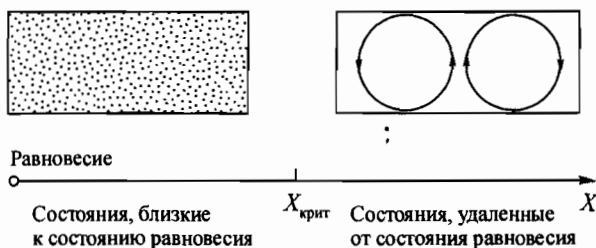


Рис. 3.5. Самоорганизация возможна лишь в системах, состояние которых значительно отличается от состояния равновесия. В этом случае возникают движения когерентного типа (такие, например, как когерентный лазерный луч или конвективные потоки в ячейках Бенара).

3. Принцип сверхкритического удаления. Самоорганизация возможна лишь тогда, когда удаление системы от состояния равновесия превышает определенное критическое значение. Возникновение процесса са-



Рис. 3.6. Переход к самоорганизации дискретен и связан с качественными изменениями в системе. Так, например, при образовании ячеек Бенара значительно возрастает расход тепла.

моорганизации связано с дискретными переходами и качественными изменениями в системе (рис. 3.6).



Рис. 3.7. Самоорганизация требует нелинейности, основанной, как правило, на обратной причинно-следственной связи.

4. Принцип нелинейности и обратной связи. Процессы самоорганизации требуют нелинейной динамики, которая обусловлена, как правило, эффектами обратной связи (рис. 3.7). 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; превы-

шение 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 микроскопических элементов системы (молекулы, световые волны и т. п.) синхронизированы параметрами порядка (рис. 3.8).

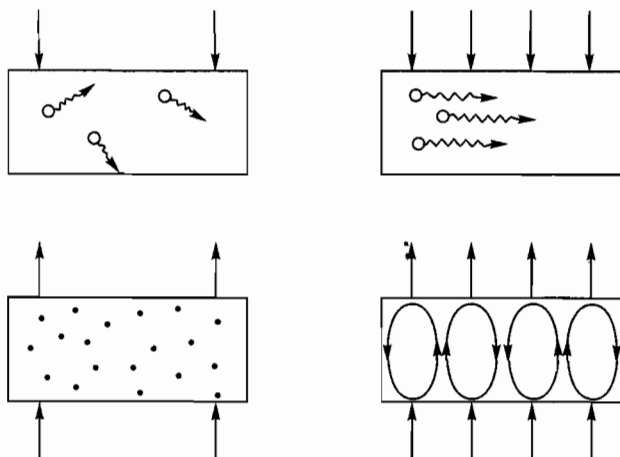


Рис. 3.8. Движение элементов системы (молекул, лазерных волн) синхронизировано параметрами порядка.

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. 3.9).

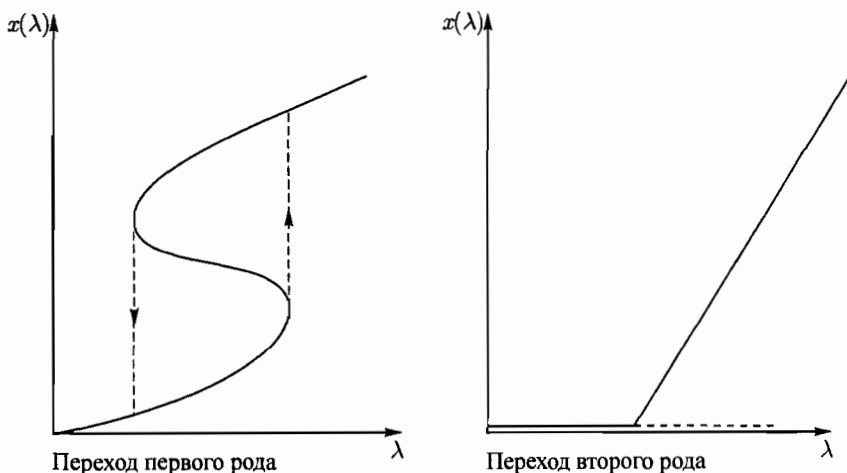


Рис. 3.9. Можно провести четкую аналогию между дискретными переходами в процессе самоорганизации и фазовыми переходами в термодинамике.

11. Принцип ограниченной предсказуемости. В результате самоорганизации возникают структуры, которые можно принципиально разделить на два класса: регулярные и нерегулярные, или хаотические (рис. 3.10).

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

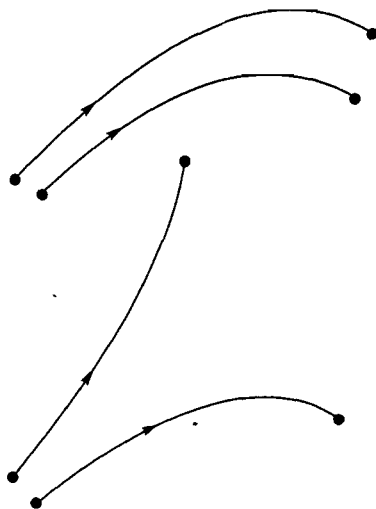


Рис. 3.10. Существуют регулярные и хаотические диссипативные структуры. Хаотическая динамика подразумевает экспоненциальную расходимость траекторий и, следовательно, низкую точность прогнозирования отдаленного будущего системы.

теория развития жизни; ядро общественных наук представлено историей развития общественных формаций.

Следующий раздел будет посвящен краткому обзору важнейших методов теории самоорганизации.

3.4. Базовые модели процессов самоорганизации

Существует целый ряд чрезвычайно плодотворных подходов к математическому моделированию самоорганизации в ходе эволюционных процессов. Наиболее интересными нам представляются следующие: 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

неотделимы 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. В дальнейшем обсуждении такой тип описания мы будем называть — по аналогии с механикой — кинематикой. 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 также является 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, опираясь на внутренние движущие силы, а не подчиняясь внесоциальным факторам. 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 причинных 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 называются 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 причинной 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 техно-

логии 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 Праем; 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 процессов 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 — обычно 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 [77, 160, 38]. 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 рода».

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

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

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.

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

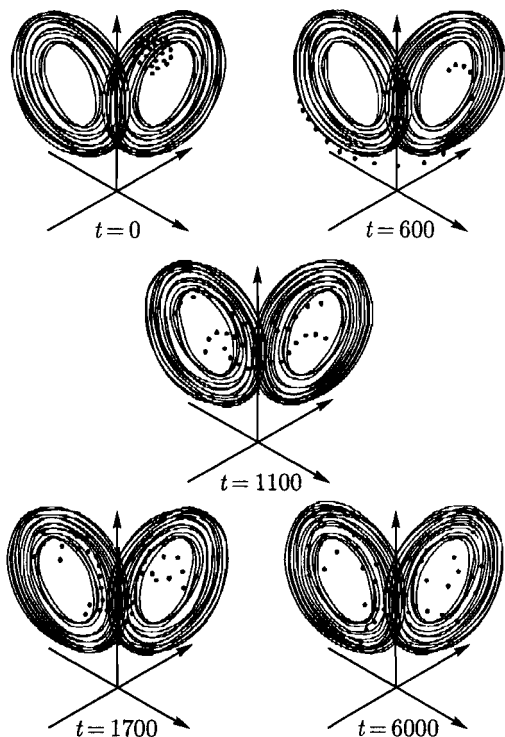
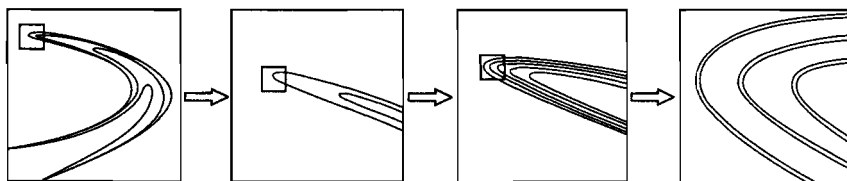


Рис. 3.11. Схемы траекторий хаотических аттракторов Лоренца. Вследствие экспоненциального расхождения траекторий облако ближайших окрестных состояний очень быстро рассеивается по полным аттракторам. Таким образом, точное прогнозирование состояния системы по прошествии определенного времени становится практически невозможным.



Увеличенные фрагменты

Рис. 3.12. Самоподобие структур хаотического аттрактора.

загадочными временными характеристиками и высокая чувствительность к возмущениям в системе (рис. 3.10, 3.11). Другим важным свойством является самоподобие многих структур (рис. 3.12). Известен целый ряд сценариев перехода от стационарного или колебательного режима к хаосу (сюда относятся не только фазовые переходы различного рода), самым, пожалуй, знаменитым из которых является 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»¹ Фейгенбаума математически очень точно взаимосвязаны со свойствами, присущими так называемым «яблочным человечкам», 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 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. 3.13). Воспользовавшись гегелевской метафорой, можно вместо цепи представлять себе и спираль, состоящую из циклов самоорганизации (рис. 3.14). Каждый цикл включает в себя несколько стадий:

1. Из-за изменения внутренних или внешних условий относительно устойчивое эволюционное состояние становится неустойчивым.

¹ Фиговое дерево по-немецки называется *Feigenbaum*. — Прим. перев.

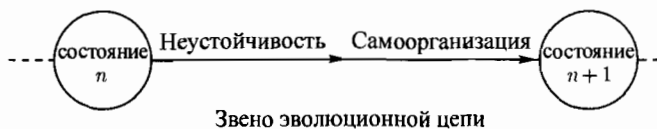


Рис. 3.13. Эволюционные процессы суть цепь процессов самоорганизации.

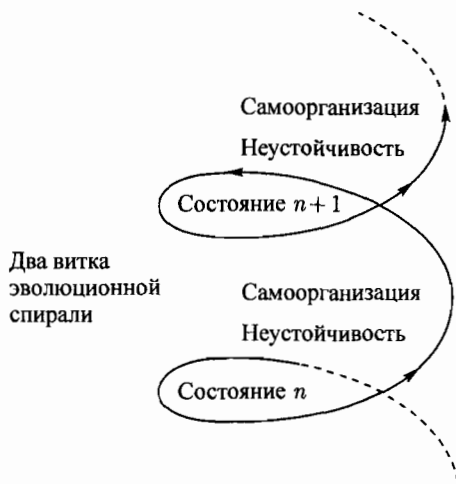


Рис. 3.14. Спираль эволюции: эволюционные процессы, представленные как последовательность циклов самоорганизации.

2. *Неустойчивость инициирует 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 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» [11], 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 существует, 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 невероятно 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 мате-

матики 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 с участками всех использованных цветов. 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 -й 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 укрыто завесой тайны, однако в наше время ситуация изменилась: современные компьютеры позволяют испытать в качестве исходных просто огромное количество точек [138, 126, 55]. 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 связана 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 отграничение индивидуумов может привести к возникновению у них достаточно стабильной «внутренней среды», способствующей нормальному протеканию необходимых организму комплексных обменных процессов. В противоречии между требованиями открытости и закрытости системы и зарождается возмож-

ность 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* [136]. 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 причинном 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, нам пока не ясен, однако известны некоторые из важнейших характеристик этого процесса. Наша метagalactика, 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. 3.14) [77, 147, 132, 30, 37]. Вопрос о том, насколько взаимосвязаны самоорганизация и эволюция с оценкой, анализом и оптимизацией, является одним из тех чрезвычайно интересных вопросов, которые 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, ту, 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 том смысле, который вкладывает в это понятие классическая теория 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 расположение пластов 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 определенным целям и имеют смысл, только если используются для обмена между партнерами, то есть деньги, полученные, например, за какой-то товар или работу 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 способное 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* [62]. 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 в данных физических условиях по

возможности более устойчив (будь то метастабильное состояние консервативной структуры или локальный аттрактор диссипативной структуры). Таким образом, свободная информация оказывается свободной и от действия законов, которым подчиняются порождающие ее структуры.

Рассмотрим два примера. Предположим, мы слушаем какой-то концерт или чью-то речь. Звук, распространяясь по залу, затихает и навсегда исчезает. Однако же если записать его на кассету, то на пленке окажется запечатлена определенная плотность магнитного потока 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 сохранялась, предположительно, в виде цепочек РНК [12]. 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. В то же время (именно благодаря упомянутой активности) РНК оказывается чрезвычайно склонна еще и к случайному вступлению в другие химические «связи», способные разрушить наследственную информацию (тоже, кстати, связанную).

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 обезьянкой («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).

Частным случаем существования свободной информации является информация в аналоговом и цифровом виде. 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, который из них идет до (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. 4.1). 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.

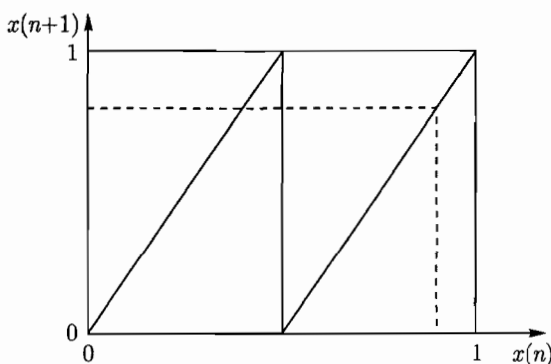


Рис. 4.1. Отображение Бернулли.

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 постоянно 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 искомую 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, эту единицу 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 расстояния между рациональными и иррациональными числами на числовом луче произвольно малы, области притяжения аттракторов фрактально взаимопроникают друг в друга.

Какое отношение всё это имеет к связанной и свободной информации? К примеру, физик обнаруживает объект, который ему хотелось бы детально изучить. Объект этот подчинен уже известным науке законам природы, на которые физик 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 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, 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

$$X(1) = 0.101xxxxx,$$

$$X(2) = 0.01xxxxxxxx,$$

$$X(3) = 0.1xxxxxxxxx,$$

$$X(4) = 0.xxxxxxxxxx,$$

а прошлое объекта как

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

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

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

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

Таким образом, во множестве 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. Естественнонаучные 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, а при использовании определенных правил

и закономерностей (например, логических или математических) она может быть соотнесена со свободной информацией, полученной из других источников; таким образом свободная информация 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, школ 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 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 непрерывных 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 [174, 33, 180].

В качестве примеров таких мультистабильных систем можно привести следующие:

- а) диссипативные мультистабильные системы (компьютер, мозг);
- б) «основные» состояния фрустрирующих систем (обучающиеся сети);
- в) нейтрально-устойчивые или метастабильные консервативные структуры (книги, компакт-диски, ДНК, спектры излучения, звуковые волны и пр.);
- г) устойчивые 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 такую 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 [142]. Обратимое описание, тем самым, делается уже невозможным: чтобы нарушить обратимость, достаточно любого малого смешанного 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»¹). Хаотическая динамика эргодична, и это ее свойство дает ученым возможность использовать в ходе исследований простую статистическую теорию нового типа, позволяющую 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 микро-

¹И. В. Гёте. Фауст (пер. Б. Пастернака) — *Прим. перев.*

пических степеней свободы всего лишь несколько параметров порядка иного 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 полностью. Напротив, описанное в предыдущем пункте использование статистической теории приводит к качественно новым возможностям прогнозирования вероятностей определенных будущих событий.

Мы убеждены в том, что 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 Сцилардом и сформулировано в виде теории Шенноном. Взаимосвязи информации и энтропии посвящена отдельная (десятая) 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». Величины 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 приближается 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 безуспешно) 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 почти прекратился. 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 [33].

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 аттрактор Лоренца 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 уже 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 подчине-

ны 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 (отбора). 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»¹ 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»² 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 и 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.

¹ Выживание наиболее приспособленных (англ.) — Прим. перев.

² Пригодность, приспособленность (англ.) — Прим. перев.

В рамках теории моделей ценность вводится как элемент аксиоматики. Понятие ценности занимает важное место и в современной теории информации [78, 180]. 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 подтверждается 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 [78]. В следующей главе мы неоднократно будем возвращаться к взаимосвязи информации и ценности.

;

ГЛАВА 5

Эволюция космоса и Земли

Чтобы в огромном массиве всевозможных научных фактов обнаружить некие общие черты, исследователь должен внимательно прислушиваться и присматриваться к Природе, пытаясь постичь ее универсальные принципы. Если однажды ему это удалось, начинается работа, результаты которой часто содержат открытие таких взаимосвязей, о которых никто и не подозревал.

Альберт Эйнштейн.

Речь на церемонии принятия в Академию наук, 1914 год

5.1. Большой Взрыв: модель «горячей» Вселенной

История возникновения нашей метagalактики — то есть системы галактик, из которых состоит Млечный Путь, — до сих пор полностью еще не выяснена. Тем не менее, существует ряд обоснованных гипотез и модель, принятая большинством современных физиков и астрономов. Речь идет о модели Большого Взрыва, в основу которой положены идеи Альфера, Германа и Гамова, разработанные в сороковых годах двадцатого века [133, 122]. Эта модель, в ее основной форме называемая стандартной моделью, основана, по большому счету, на пяти важных экспериментальных наблюдениях [14].

1. Изучение спектральных линий звезд показывает, что метagalактика, за исключением некоторых незначительных отклонений, имеет единый химический состав. Доминирующими веществами являются водород и гелий, массовые доли которых составляют приблизительно 77 % и, соответственно, 22 %; следующими по распространенности элементами оказываются кислород и железо.

2. Спектры элементов удаленных галактик демонстрируют систематическое смещение в красную часть спектра. Величина этого смещения линейно возрастает по мере увеличения расстояния между наблюдателем и объектом наблюдения.
3. Исследование поступающих из космоса радиоволн свидетельствует о существовании поля излучения, однородно и изотропно наполняющего космическое пространство. Спектральные характеристики этого так называемого фонового излучения приблизительно соответствуют излучению черного тела, имеющего температуру около 2.7 К; плотность фонового излучения составляет примерно 450 фотонов на кубический сантиметр.
4. Совокупные результаты астрономических наблюдений показывают, что крупномасштабное распределение галактик соответствует некоторой постоянной плотности массы, которая, по современным оценкам, достигает, по меньшей мере, 0.3 барионов на каждый кубический метр метagalактики.
5. Согласно выводам, полученным косвенным путем из анализа процессов радиоактивного распада в метеоритах, следует, что некоторые компоненты, входящие в состав определенных метеоритов, возможно, возникли 14–24 миллиардов лет назад.

Перечисленные нами факты нуждаются в некоторых комментариях. Первые попытки изучения спектральных линий звезд были предприняты еще Густавом Кирхгофом и Робертом Бунзенем, которые в 1859 году в Гейдельберге занимались разработкой метода спектрального анализа. Их новый метод, предназначавшийся для определения химических элементов, скоро показал себя как чрезвычайно мощный инструмент, пригодный для исследования Солнца и других удаленных небесных тел. Ученые получили возможность доказать, что в химический состав Солнца и звезд входят те же элементы, что и в состав Земли. После того, как спектральному анализу были подвергнуты все более удаленные галактики, исследователи обнаружили, что химический состав нашей метagalактики, в среднем, един, и в процентном соотношении выглядит следующим образом:

- 77 % водорода,
- 22 % гелия,
- 0.8 % кислорода,

- 0.1 % железа,
- 0.1 % остальные элементы.

Дальнейшие наблюдения подтвердили удивительную однородность и изотропность галактики и в отношении других важных физических параметров. Поскольку тяжелые ядра образовались лишь значительно позже, для эволюционной модели релевантны, в первую очередь, массовые доли (относительно совокупной массы) легких ядер.

Открытие факта систематического смещения спектров удаленных объектов принадлежит американскому астроному Эдвину Пауэллу Хаббл, обнаружившему в 1929 году красное смещение спектров галактик, пропорциональное расстоянию R , на которое они удалены:

$$V = H \cdot R. \quad (5.1)$$

Постоянная H называется постоянной Хаббла. Размерность этого коэффициента обратна времени; точное значение неизвестно. Проводимые наблюдения позволяют дать приблизительную оценку для обратного значения постоянной Хаббла:

$$H^{-1} = 10\text{--}23 \text{ миллиарда лет.} \quad (5.2)$$

В дальнейшем мы будем исходить из значения 20 миллиардов лет. Относительно большая погрешность основана на том, что измерения расстояний даже в случае ближайших больших скоплений галактик, удаленных от нас на 50 миллионов световых лет, крайне сложны.

Третий пункт был посвящен открытию фонового, или реликтового, излучения. Двое американских исследователей, Арно Пензиас и Роберт Уилсон, планомерно изучали радиоволны внеземного происхождения при помощи рупорно-зеркальной антенны. Добившись высокой чувствительности аппаратуры, они в 1964 году в результате тщательного анализа всех проведенных измерений пришли к заключению: существует ненаправленное слабое радиоизлучение, равномерно распределенное по небесной сфере. Измерение спектрального распределения этого излучения дало в результате температуру около 2.7 К. Напрашивался вывод о том, что все мировое пространство заполнено находящимся в состоянии теплового равновесия фотонным газом, температура которого составляет приблизительно 2.7 К. Последующие измерения позволили уточнить это значение, дав результат 2.726 К с колебаниями около 20 μ К [171, 165].

Предположение о том, что плотность массы в метagalактике может в хорошем приближении считаться постоянной, представляет собой экстраполяцию всего астрономического опыта (принцип Коперника), и с увеличением объема наблюдений оно получает все новые и новые подтверждения. В 1958 году Ян Хендрик Оорт на основе наблюдений яркости галактик с учетом соотношений между их массами и светимостью дал следующую оценку средней плотности барионной материи:

$$\rho \geq 1.7 \cdot 10^{-29} \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}.$$

Это значение все еще страдает существенной погрешностью, однако именно оно подтверждено независимыми наблюдениями и исследованиями гелия и дейтерия, дающими результат [14]

$$\rho \geq 5 \cdot 10^{-29} \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}.$$

Следовательно, нуклонная плотность, по сегодняшним данным, равна

$$n_n \geq 3 \cdot 10^{-7} \text{ см}^{-3},$$

что дает приблизительно 0.3 нуклона на кубический метр.

Последнее, пятое из вышперечисленных экспериментальных наблюдений основано на определении возраста метеоритов. В качестве «космических часов» служат радиоактивные атомные ядра с большими периодами полураспада: торий-232, уран-238, плутоний-244, йод-129, лютеций-176, гафний-176, рений-187 и осмий-187. Оценочное значение для среднего возраста установлено в пределах 17.6 миллиардов лет с погрешностью ± 4 миллиарда.

Поскольку галактики образовались, предположительно, уже в первый миллиард лет существования нашей метagalактики, ее возраст с достаточной степенью уверенности должен находиться где-то между 14 и 24 миллиардами лет [14].

Любая гипотеза об истории возникновения метagalактики должна удовлетворительно объяснять хотя бы те пять перечисленных нами выше экспериментально подтвержденных фактов. По сей день эта проблема вызывает весьма оживленные дискуссии в космологии, причем все шире распространяется мнение, согласно которому теоретическая интерпретация данных фактов должна основываться на выдвинутой Эйнштейном в конце 1915 года общей теории относительности. Фундаментальная работа, опубликованная Эйнштейном в 1916 году в «Анналах физики», называлась «*Основы общей*

теории относительности»¹. Некоторое время спустя Эйнштейн представил вниманию Прусской Академии наук следующую свою работу «Космологические дополнения к общей теории относительности»², в 1917 году увидевшую свет в сборнике докладов Академии.

Можно показать, что гипотеза о фотонном, или излучающем, космосе дает для малого временного интервала от начала расширения вселенной очень хорошее приближение, что позволяет получить следующую временную зависимость для увеличения расстояния между телами в начале расширения:

$$R(t) \sim \sqrt{t}. \quad (5.3)$$

Из данного закона расширения видно, что первоначальные расстояния между всеми телами должны быть крайне малы, то есть плотность космоса вскоре после начала расширения должна быть чрезвычайно высока. В соответствии с законами термодинамики, предполагается — согласно Альферу, Герману и Гамову (1948), — что сразу после начала расширения материя пребывала под воздействием сверхвысоких температур; отсюда возникла модель Большого Взрыва. Попробуем эти температуры оценить.

Кинетическая энергия релятивистской частицы (фотона) в расширяющемся космосе прямо пропорциональна ее импульсу и обратно пропорциональна расстоянию, то есть

$$E = p \sim R^{-1} \sim t^{1/2},$$

на основании чего температура может быть выражена, согласно (5.3), как средняя кинетическая энергия:

$$T(t) = c \cdot t^{-1/2}. \quad (5.4)$$

Поскольку к настоящему времени, то есть приблизительно в момент времени $t = 10^{20}$ с, температура фотонов фонового излучения составляет примерно 2.7 К,

$$c \approx 10^{10} \text{ К} \cdot \text{с}^{1/2}.$$

Температура нерелятивистских частиц должна определяться иным законом, но в связи с тем, что количество фотонов в метagalактике превышает количество более тяжелых частиц примерно в 10^9 раз, в начальных фазах температура подчиняется единому закону:

$$T(t) = \frac{10^{10} \text{ К} \cdot \text{с}^{1/2}}{\sqrt{t}}.$$

¹Einstein A. *Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie.*

²Einstein A. *Kosmologische Betrachtungen zur allgemeinen Relativitätstheorie.*

В рамках классической космологии, построенной на принципах общей теории относительности, вопрос о геометрии космоса остается открытым. Выбор между тремя моделями (эллиптическая, евклидова и гиперболическая геометрии), имеющимися на данный момент в распоряжении ученых, может быть осуществлен только экспериментальным путем. Решение вопроса о том, является ли космос замкнутым, плоским или открытым, во многом зависит от средних значений плотности массы в космосе. Известное современной науке значение $\rho \approx 10^{-29} \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$ очень близко к критическому значению

$$\rho_{\text{крит}} = (0.5 - 2.0) \cdot 10^{-29} \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}. \quad (5.6)$$

Таким образом, на основании экспериментальных данных выбрать между тремя существующими моделями космоса пока не представляется возможным.

Многие исследователи допускают существование скрытых масс (которое ведет к возникновению сверхкритических плотностей), тем самым отдавая предпочтение замкнутой модели. При определенных обстоятельствах «отвечать» за скрытые массы могли бы и гипотетические массы покоя нейтрино. Космологические модели, соответствующие квантовой теории поля, относятся к типу замкнутых, в то время как анализ и оценка последних измерений, проведенных в ходе исследований фонового излучения, указывают, скорее, на то, что для нашей Вселенной действительна модель открытого типа [165].

Следующий раздел будет посвящен обсуждению сценария «Большого Взрыва», основанного на уравнении (5.5).

5.2. Восемь эпох эволюции протоплазмы

Расширение метагалактики устанавливает общие рамки эволюции, в пределах которых мы условно выделяем (рис. 5.1) двенадцать периодов, или эпох, подобных геологическим [63]. Возникновение химических элементов и образование протоплазмы охватывает при этом первые восемь из них, и каждую эпоху мы постараемся кратко описать. Более подробные их характеристики читатель может найти в специальной литературе [176, 164, 108, 122, 96].

1. Первая эпоха: физический вакуум.

$$t \leq t_{\text{Планк}} \approx 10^{-43} \text{ с.}$$

О самой ранней из двенадцати эпох, называемой также эрой Планка, собственно, ничего не известно; существуют лишь носящие спекулятивный

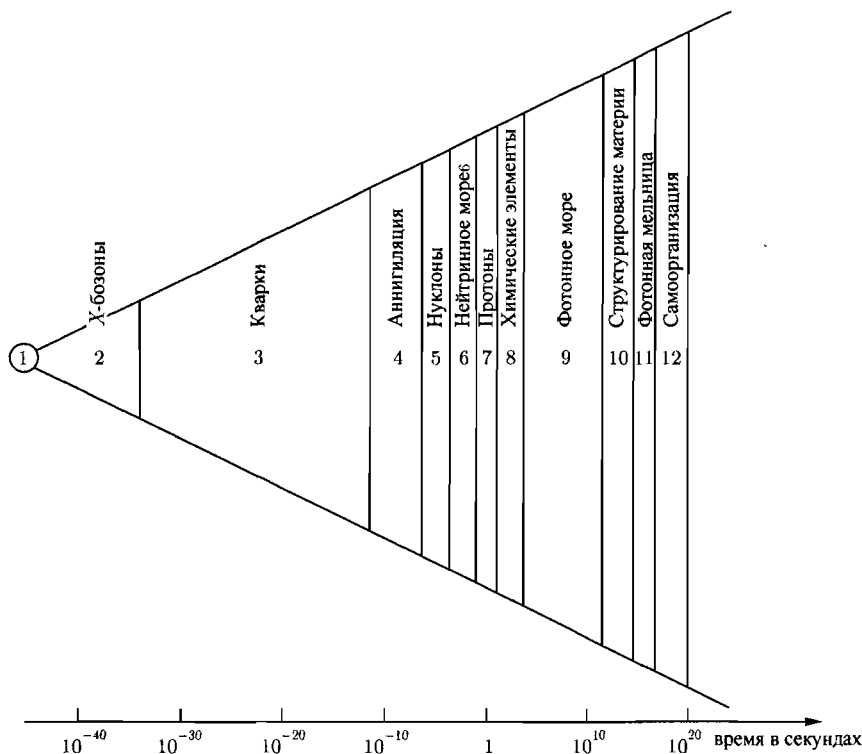


Рис. 5.1. Схематическое представление двенадцати периодов процесса расширения метagalактики.

характер предположения разной степени смелости. Вероятно, ни пространство, ни время не обладали тогда определяемым значением и размерностью. Состояние вселенной обладало высокой симметрией и представляло собой своего рода «пространственно-временную пену» [122].

2. Вторая эпоха: «уход вакуума».

$$10^{-43} \text{ с} \leq t \leq 10^{-33} \text{ с}.$$

В начале этой эпохи вселенная распалась на различные области [122], одна из которых имела пространственно-временную размерность $d = 4$. Наша метagalактика появилась в результате первого нарушения симметрии; метagalактика была наполнена однородной газообразной смесью, так назы-

ваемой первичной материей, состоявшей из кварков, электронов, нейтрино, фотонов, глюонов, X-частиц. Этот первичный газ, согласно уравнению (5.5), имел к началу описываемой эпохи крайне высокую температуру. Исходя из некоторых труднообъяснимых с точки зрения космологии моментов, многие авторы допускают, что начало этой эпохи связано с инфляционной фазой, коэффициент скорости расширения газового «шара» в которой был равен примерно 10^{50} [122]. Не углубляясь в детали этого спекулятивного предположения, мы ограничимся только рассмотрением в самых общих чертах простой модели расширения, принадлежащей А. А. Фридману. В рамках этой модели расширение сопровождается остыванием, которое, в среднем, описывается корневой зависимостью (5.5). Каким образом мог протекать процесс временной эволюции в эту эпоху, также остается неясным; мы будем исходить из того, что, согласно уравнению (5.5), к концу описываемого периода температура опустилась примерно до

$$T \sim 10^{27} \text{ К.}$$

Эта величина соответствует энергиям порядка 10^{24} эВ и процессу распада X-частиц, вследствие чего происходит нарушение симметрии, приводящее к разделению сильных и электрослабых взаимодействий. Таким образом, метagalactica вступает в гораздо более «традиционные» и значительно более доступные для теоретического рассмотрения фазы, о которых современная наука имеет уже определенное представление (вышеупомянутая нами «стандартная модель»).

3. Третья эпоха: кварк-фотонный газ. Вступивший в третью эпоху первичный газ состоял из кварков, антикварков, лептонов, фотонов и X-частиц. После распада X-частиц плотность кварков была на очень незначительную величину (порядка 10^{-8} %) выше, чем плотность антикварков. С этих пор метagalactica вела себя (с точки зрения термодинамики) как нормальный адиабатически расширяющийся газ, к которому применима стандартная модель адиабатического расширения. Разработка этой термодинамической модели была начата еще в 1948 году Альфером, Бете и Гамовым; остановимся подробнее на ее основных чертах.

Из-за крайне высоких температур, достигающих в начале третьего периода примерно 10^{28} К, первичный газ можно рассматривать как идеальный; эффекты, отличающие его от идеального, нерелевантны. Для адиабатических процессов в идеальных газах действительно следующее известное соотношение между температурой и плотностью:

$$T = \text{const } \rho^{\gamma-1}. \quad (5.7)$$

Показатель адиабаты $\gamma = c_p/c_v$ для атомарных (тяжелых) газов имеет значение $\gamma = 5/3$, а для релятивистских (не имеющих массы покоя) — значение $\gamma = 4/3$.

Поскольку в космосе той эпохи релятивистские частицы доминировали количественно и по вкладу в плотность энергетических потоков, в среднем действительно следующее релятивистское соотношение:

$$T = \text{const } \rho^{1/3}. \quad (5.8)$$

Адиабатическое расширение создает определенные временные рамки для эволюции метagalктики. Временная симметрия нарушается, и эволюция становится необратимым процессом.

Нарушение симметрии

обратимость → необратимость

делает второй закон термодинамики физическим фундаментом эволюции.

Метагалктика той эпохи, хотя и была уже «отмечена» стрелкой, указывающей направленность времени, еще не имела никакой пространственной структуры. До момента возникновения малейших флуктуаций все существующее пространство было однородно заполнено материей. Вопросы, касающиеся масштаба флуктуаций в космосе той эпохи и их влияния на формирование сегодняшних структур, являются, пожалуй, ключевыми для современной космологии [171, 165]. Температуры, во всяком случае, были настолько высоки, что тогдашний космос можно сравнить с батареей, «под завязку» заряженной высокоценной энергией. Вследствие адиабатического остывания к концу третьей эпохи температура упала до уровня

$$T \sim 10^{16} \text{ К} \sim 1000 \text{ ГэВ}.$$

Снижение средних энергий частиц усугубило нарушение симметрии — нарушилась электрослабая симметрия: когда упали средние энергии большей части W- и Z-бозонов, произошел разрыв энергетических связей. Это привело к разделению слабых и электромагнитных сил. Нарушение симметрии вызвало переход к новой эпохе эволюции, важнейшим событием которой был процесс уничтожения кварков.

4. Четвертая эпоха: аннигиляция кварков.

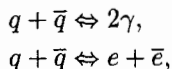
$$10^{-11} \text{ с} \leq t \leq 10^{-6} \text{ с}.$$

К началу четвертой эпохи в первичном газе еще преобладали кварки q и антикварки \bar{q} . Существует шесть типов кварков, среди которых различают

ур-кварки и down-кварки. С ростом адиабатического расширения первичного газа температура (по сравнению с концом третьей эпохи) упала до

$$T \sim 10^{13} \text{ К} \sim 1 \text{ ГэВ.}$$

Таким образом, первичный газ теперь находится в таком состоянии, при котором вероятность попарной аннигиляции кварков и антикварков значительно возрастает. Тепловое равновесие реакций аннигиляции оказывается заметно смещено вправо:



что следует из соответствующих данным реакциям законов действующих масс.

Величины свободных энтальпий реакций аннигиляции имеют порядок

$$\Delta g \sim 10 \text{ ГэВ.}$$

При реакциях аннигиляции кварков, таким образом, высвобождается энергия связи, порядок величины которой достигает 10^{12} эВ.

Термодинамическая ситуация благоприятствует аннигиляции, вследствие чего почти все кварки оказываются в связанном состоянии, соответствующем нижним значениям потенциалов Гиббса (квантово-хромодинамическое удержание или, по-английски, QCD-confinement). Мы уже указывали на тот факт, что количество кварков в первичном газе несколько (примерно на одну миллионную процента) превышало количество антикварков. В результате реакций аннигиляции «выжили» немногие кварки, а антикварков не осталось совсем, и симметрия, существовавшая между материей и антиматерией, оказалась нарушена:

симметрия материи и антиматерии \rightarrow *преобладание материи,*

что, бесспорно, серьезнейшим образом сказалось на структурах современного нам с вами мира, в котором античастицы встречаются крайне редко. Нарушение симметрии, так сказать, подготовило почву для перехода к следующей стадии развития космоса — к эпохе образования протонов и нейтронов.

В последнее время интенсивно разрабатываются гипотезы, отражающие различные точки зрения на ход эволюции в тот период, который обозначен нами как четыре первые эпохи; обсуждаются все новые и новые идеи [171, 165], и иногда признаваемая сегодня все шире модель первых

четырёх эпох называется *новой стандартной моделью* (в отличие от прежней стандартной модели) [96]. В то время, как о первых четырёх эпохах эволюции мы имеем довольно-таки скудные сведения и многие положения теории носят спекулятивный характер, переходя к следующим этапам развития космоса, мы, можно сказать, обретаем гораздо более прочный фундамент для рассуждений, и объясняется это тем, что энергии ниже 1 ГэВ могут быть экспериментально исследованы современной наукой. В теоретическую картину, описывающую этот период, внесено не так уж много радикальных изменений, потому о ней и говорят как о *старой стандартной модели*.

5. Пятая эпоха: образование нуклонов.

$$10^{-6} \text{ с} \leq t \leq 10^{-3} \text{ с}.$$

Благодаря притягивающим хромодинамическим взаимодействиям каждая тройка кварков, соединяясь, может образовать особое связанное состояние (так называемое «удержание кварков», Quark-confinement), которое и даёт хорошо известный нам нуклон. Один *up*-кварк и два *down*-кварка образуют нейтрон

$$u + 2d \Leftrightarrow n,$$

а два *up*-кварка и один *down*-кварк — протон

$$2u + d \Leftrightarrow p.$$

Поскольку энтальпия реакции для этих процессов составляет приблизительно 100 МэВ, на всем протяжении пятой эпохи происходит дальнейшее смещение равновесия вправо. Свободные кварки исчезают из метагалактики, и к концу описываемого периода она уже состоит из нуклонов с плотностью, примерно равной

$$n_n \sim 10^{27} \text{ см}^{-3}.$$

Кроме того, существуют электроны, позитроны, фотоны и нейтрино, плотность которых значительно выше. Общая плотность составляет около 10^{36} частиц на кубический сантиметр, а концентрация энергии определяется фотонами и отчасти лептонами.

Пятая эпоха привела к нарушению симметрии, связанному с появлением барионов и антибарионов. Барионы достигли абсолютного господства в метагалактике, и сегодня антибарионы едва ли ещё встречаются в естественных условиях.

6. Шестая эпоха: отделение нейтрино.

$$10^{-3} \text{ с} \leq t \leq 1 \text{ с}.$$

Физико-химический состав метagalактики в эту эпоху не претерпевал существенных изменений, однако температура и плотность продолжали снижаться. К концу эпохи температура опустилась до

$$T \sim 10^{10} \text{ К} \sim 1 \text{ МэВ}.$$

Плотность массы раскаленной плазмы в те времена составляла

$$\rho \sim 10^8 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}.$$

Средние значения плотности материи в метagalактике продолжали уменьшаться в кубической зависимости от удаления от ее центра. Современная нам метagalактика состоит из относительно однородного фотонного газа, имеющего плотность около 500 фотонов на кубический сантиметр, что, в принципе, соответствует реликтовому излучению, и нейтринного газа, плотность которого составляет примерно 300 нейтрино и 300 антинейтрино на кубический сантиметр.

Правда, само существование такого газа до сих пор не подтверждено экспериментально. О средних значениях плотности материи, обладающей массой покоя, мы располагаем, к сожалению, весьма неполной информацией; будь существующая вещественная материя распределена равномерно, в нулевом приближении она соответствовала бы газу, средняя плотность которого равна примерно 1 атомному ядру на кубический метр и который состоит примерно на 70% из протонов, на 30% из ядер гелия, а также из незначительной доли других элементов. Соотношение плотностей протонов и атомных ядер, равное приблизительно $5 \cdot 10^9$, почти не изменилось с эпохи раскаленной протоплазмы [133].

Теперь рассмотрим газовую модель эволюции и соответствующие законы для средней плотности протонов, нуклонов и нейтрино:

$$\begin{aligned} n_\gamma(t) &\sim 500 \text{ см}^{-3} [R(t_1)/R(t)]^3, \\ n_p(t) &\sim 1 \text{ м}^{-3} [R(t_1)/R(t)]^3, \\ n_\nu(t) &\sim 300 \text{ см}^{-3} [R(t_1)/R(t)]^3, \end{aligned} \quad (5.9)$$

где t_1 — начальный момент времени, а R_1 — соответствующее расстояние; за начало отсчета времени мы принимаем настоящий момент $t_1 \sim 10^{20}$ с.

Закон расширения Хаббла

$$R(t)/R(t_1) = H(t - t_1) \quad (5.10)$$

действителен только для ближайшего прошлого, то есть только для $(t - t_1) \ll H^{-1}$, в то время как на малых временах от начала расширения $t \ll H^{-1}$ закон расширения мы находим путем решения уравнения Эйнштейна

$$R(t) = \text{const } t^{1/2}. \quad (5.11)$$

Впоследствии мы рассмотрим функцию расширения $R(t)$ как заданную монотонно возрастающую функцию, которую мы можем получить в явном виде путем интерполяции выражений (5.10) и (5.11).

На основании этого допущения мы можем теперь приступить к изучению термодинамики эволюции нашей газовой модели метагалактики. Используя приближенные средние значения плотности, при решении в первом приближении (как показано выше) можно применять законы идеального квантового газа. Для адиабатического расширения атомарных газов действителен инвариант $n_A \cdot T_A^{3/2} = \text{const}$. Отсюда следует закон эволюции температуры:

$$T_A(t) = \text{const } R(t)^{-2}. \quad (5.12)$$

Для фотонного газа адиабатический инвариант выглядит иначе: $n_p \cdot T_p^{-3} = \text{const}$, откуда следует другой закон эволюции температуры:

$$T_\gamma(t) = \text{const } R(t)^{-1}. \quad (5.13)$$

Вычисления показывают, что в расширяющемся космосе плотность и температура в пространственном среднем постоянно понижаются, и этот важный факт лежит в основе эволюции комплексных структур в метагалактике.

Наши оценки для момента времени $t = 1$ с дают следующие средние значения плотности частиц:

$$n_\gamma \sim 10^{30} \text{ см}^{-3}, \quad n_n \sim 10^{21} \text{ см}^{-3}, \quad n_\nu \sim 10^{30} \text{ см}^{-3}.$$

Таким образом, по крайней мере плотность нуклонов достигла уже «земного» порядка величины: плотность 10^{21} нуклонов на кубический сантиметр примерно соответствует плотности нуклонов в твердых телах и жидкостях. Здесь следует сказать несколько слов об особых свойствах нейтрино: они не участвуют ни в сильных, ни в электромагнитных взаимодействиях, лишь

в слабых и гравитационных, вследствие чего эти частицы обладают способностью проходить сквозь нормальную земную материю, не подвергаясь на пути (причем путь может иметь протяженность, исчисляемую многими километрами) никаким хоть сколько-нибудь существенным воздействием. При таких условиях нейтрино образуют практически независимый газ. Вследствие отделения нейтринного газа полное термодинамическое равновесие нарушается. Возникает двухтемпературная система.

С тех пор метагалактика состоит из двух фактически независимых подсистем: нейтринного газа и остаточного газа, состоящего из фотонов, лептонов и барионов. Существование нейтринного газа из-за незначительной величины эффективных сечений взаимодействия нейтрино до сих пор не нашло убедительного экспериментального подтверждения. Многие исследовательские группы предпринимали попытки (подчас весьма трудоемкие и связанные с большими затратами) найти надежное доказательство существования космических нейтрино и изучить их свойства.

Отделение нейтринного газа можно рассматривать и как нарушение симметрии:

тепловое равновесие → распад на две независимые термические системы.

В отличие от описанных ранее нарушений симметрии на этот раз нарушение касалось чисто термодинамической переменной — температуры. В дальнейшем нам больше не придется сталкиваться с нейтринным газом: в последующие эпохи он не оказал влияния на ход эволюционных процессов.

7. Седьмая эпоха: нарушение нейтронно-протонной и электронно-позитронной симметрии.

;

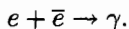
$$1 \text{ с} \leq t \leq 100 \text{ с.}$$

Плотность протонов в протоплазме была равна плотности нейтронов. Разность же масс протонов и нейтронов, а вместе с ней и разность их энергий покоя стала заметной, когда температуры опустились ниже

$$T \sim 1.4 \cdot 10^{10} \text{ К} \sim 1.3 \text{ МэВ.}$$

Как известно, масса покоя нейтрона составляет 939.550 МэВ, а масса покоя протона — 938.256 МэВ, поэтому большая часть нейтронов распадалась на протоны и электроны до тех пор, пока не установилось равновесие, представленное 75 % протонов и 25 % нейтронов.

Вторым значительным событием седьмой эпохи была аннигиляция электронов и позитронов:

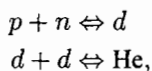


Почти все электроны и позитроны, соединившись, образовали высокоэнергетические световые кванты; пережить этот процесс, оставшись самими собой, удалось лишь очень немногим электронам. Поскольку метagalactica электронейтральна, средняя плотность оставшихся электронов в точности равна средней плотности протонов. В результате описанных процессов космос к концу седьмой эпохи представляет собой нейтральную плазму, состоящую из протонов, нейтронов и фотонов. Фоном для такой плазмы, как и прежде, служит море отделенных нейтрино. Температура плазмы снизилась примерно на миллиард кельвинов, а плотность приблизилась к той, что преобладает сегодня внутри звезд.

8. Восьмая эпоха: ядерный синтез.

$$10^2 \text{ с} \leq t \leq 10^4 \text{ с}.$$

Состояние протоплазмы восьмой эпохи по температуре и плотности соответствовало состоянию плазмы гигантской звезды. Как известно, звезды получают свою лучистую энергию из реакций ядерного синтеза. Протекавшие в протоплазме процессы синтеза нуклонов, а особенно реакции



все больше смещали равновесие вправо. Высокая стабильность ядер гелия стала причиной того, что почти все нейтроны оказались именно в ядрах гелия. В конце концов установилось следующее соотношение между водородом и гелием:

$$\text{H: } 77 \%, \quad \text{He: } 23 \%.$$

Результат вычислений подтверждает приведенные в начале раздела 5.1 экспериментальные данные. Следует отметить, что гипотезу Большого Взрыва может подтвердить и обнаруженная экспериментально распространенность легких ядер в природе. Это обстоятельство мы оцениваем как одно из важнейших достижений стандартной модели. Ядра элементов более тяжелых, чем железо, образовались лишь позднее, в результате таких, например, процессов, как вспышки сверхновых звезд.

Вот мы и добрались до конца «истории о Большом Взрыве». Многие еще остаются невыясненным, есть некоторые противоречия и сомнения,

идет интенсивная разработка новых концепций. Верится, однако, что по меньшей мере в основном стандартная модель верна; в конце концов, мы можем-таки констатировать тот факт, что гипотеза Большого Взрыва способна вполне удовлетворительно объяснить все перечисленные нами в начале главы экспериментальные данные. Этот результат стал причиной того, что в основу наших представлений о процессе становления метagalaktики была положена именно эта модель, пусть даже она и оставляет пока без ответов очень многие вопросы.

5.3. Самоструктурирование вещественной материи

В результате процессов, протекавших в ходе восьми описанных нами эпох эволюции протоплазмы и охватывавших временной промежуток продолжительностью примерно в три часа (рис. 5.1), образовалась раскаленная плазма, которая состояла из ядер различных химических элементов, а также из электронов и фотонов.

9. Девятая эпоха: фотонное море. Плотность электронов в протоплазме к началу девятой эпохи составляла примерно

$$n_e \sim 10^{17} \text{ см}^{-3},$$

а температуры достигали

$$T \sim 10^8 \text{ К.}$$

Такие значения соответствуют параметрам плазмы в установке ядерного синтеза (правда, существующей пока только в инженерных проектах).

Таким образом, из релятивистской, исполненной тайн и чудес фазы космос переходит в фазу, гораздо более близкую к «земным условиям», а значит, в значительно большей степени поддающуюся экспериментальному исследованию и изучению.

Рассмотрим теперь новую фазу плазмы, образовавшуюся через три часа после Большого Взрыва и ознаменовавшую собой наступление девятой эпохи. О начале этой фазы гипотез существует больше, чем достоверной информации [176, 26]. Однако надежный источник достоверной информации о состоянии Вселенной у нас все же есть — это космическое фоновое излучение, называемое также «реликтовым». Речь идет об уже упоминавшемся нами тепловом излучении, имеющем температуру 2.7 К и максимум, лежащий в сантиметровом радиодиапазоне [171]. Это тепловое излучение заполняет собой всю Вселенную; плотность его равна примерно $5 \cdot 10^8$ фотонов на кубический метр пространства, вследствие чего оно равномерно

окружает Землю со всех сторон. Согласно гипотезе Гамова, Дорошкевича, Новикова, Дика, Пиблса и др., реликтовое излучение происходит от протоплазмы, заполнившей нашу Вселенную через несколько часов после начала процесса расширения.

Поскольку плотность фотонов в протоплазме значительно превосходила плотность остальных частиц, отношение количества фотонов к количеству нуклонов оценивается примерно как 10^9 ; таким образом, протоплазму можно назвать еще и «фотонной плазмой». В процессе адиабатического расширения численное значение указанного отношения (связанного также с энтропией системы) практически не изменилось. В сегодняшнем космосе в каждом кубическом метре пространства мы обнаруживаем в среднем один атом водорода, а все остальные атомы встречаются гораздо реже; в противоположность этому средняя плотность фотонов составляет почти 10^9 на кубический метр. В отличие от современного отношения фотоны плазмы начала девятой эпохи обладали чрезвычайно высокой тепловой энергией, равной примерно 10 кэВ. Модель адиабатически расширяющейся вселенной в ходе дальнейшей эволюции непрерывно остывает, причем температура падает в приблизительном соответствии с кривой зависимости:

$$T \approx 2 \cdot 10^6 t^{-1/2}, \quad (5.14)$$

где температура T измеряется в кельвинах, а время t — в годах.

В процессе расширения спустя 10^5 – 10^6 лет температура снизилась примерно на две-четыре тысячи кельвинов, отчего, собственно, и началось образование атомов водорода и гелия. Непрозрачная фотонная плазма преобразовалась в прозрачный инертный газ. Процесс этот подтверждается и практическим опытом: при отключении газоразрядной трубки, наполненной горячей непрозрачной плазмой, газ в ней сразу становится прозрачным. Атомарные и молекулярные газы способны только к слабому взаимодействию с излучением, они прозрачны для света. Примерно через 300 000 лет адиабатические кривые в координатах плотности свободных электронов и температуры попадают в область образования атомов водорода [44]. Наблюдаемое сегодня реликтовое излучение представляет собой в некотором роде фотографию космоса времен образования атомов. Фотоны, пребывавшие в состоянии термодинамического равновесия с протоплазмой, исключительно слабо взаимодействовали с только что образовавшимся разреженным газом и могли преодолевать огромные расстояния. Некоторые из образовавшихся тогда фотонов в форме реликтового излучения можно наблюдать при помощи современных земных радиотелескопов, получая от них информацию о событиях, происходивших в первые несколько часов после Большого Взрыва.

10. Десятая эпоха: самоstructuring пространства и времени. К началу десятой эпохи космос был заполнен относительно однородным разреженным инертным газом. В этом состоянии космос оставался, предположительно, от 10^8 до 10^9 лет, продолжая при этом расширяться. Возникает вопрос: каким образом в космосе, пребывающем в подобном состоянии, вообще возможны процессы, положившие начало образованию упорядоченных структур? Назовем лишь три важнейшие физические причины:

1. Дальнейшее понижение температуры и плотности энтропии вследствие расширения, возникновение гравитационных неустойчивостей.
2. Неоднородность в первоначальном распределении.
3. Передача энтропии от вещественной материи к реликтовому излучению.

Основным механизмом структурообразования в десятой эпохе служили гравитационные неустойчивости (рис. 5.2). Еще в 1662 году Ньютон выдвинул гипотезу о том, что галактики и звезды могли сформироваться под воздействием гравитации из первоначально однородно распределенного газа; гипотеза эта сегодня общепризнанна и подкреплена многочисленными теоретическими работами и модельными расчетами [137, 118]. Не совсем ясно, правда, какую роль играла существовавшая в протоплазме незначительная неоднородность, послужившая своего рода затравкой для структурообразования [171, 165]. Предположим, что образовались сгустки газа, обладающие некоторым кинетическим импульсом.

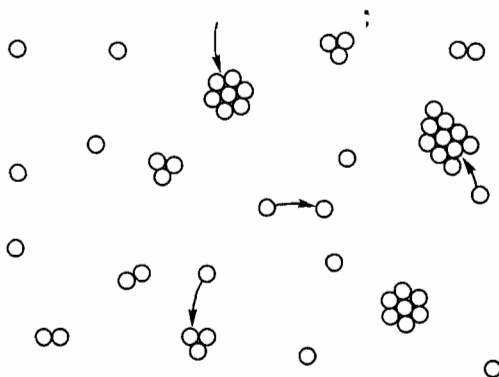


Рис. 5.2. Самоstructuring через гравитационную неустойчивость.

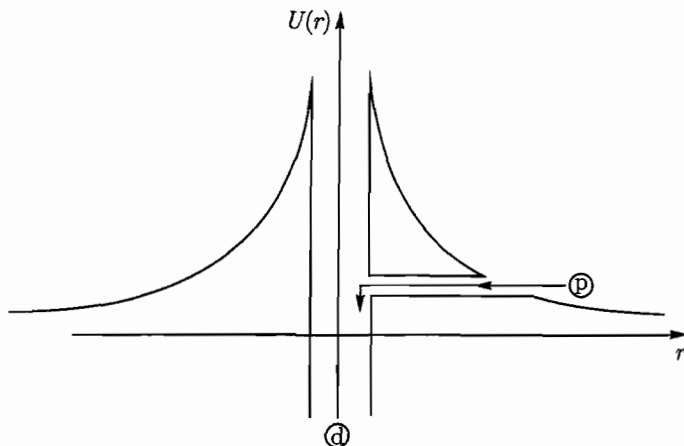


Рис. 5.3. Слияние протона и дейтрона через туннель, пронизывающий отталкивающий потенциальный барьер.

Рассмотрим эволюцию медленно вращающегося газового шара, образовавшегося под влиянием гравитационной неустойчивости. Под воздействием гравитации газовый шар сжимается все сильнее, а частота его вращения при этом все увеличивается в соответствии с законом сохранения кинетического момента. Вследствие адиабатического сжатия температура растет вместе с плотностью ($\gamma = 5/3$) согласно уравнению (5.7). С повышением температуры растет и степень ионизации газа в соответствии с уравнением Саха [29, 44]. Сильное кулоновское отталкивание ядер водорода и гелия сначала удерживает их на удалении друг от друга, но с повышением температуры ядра постепенно сближаются до тех пор, пока расстояние между ними не составит приблизительно 10^{-15} м. В преодолении кулоновских барьеров важную роль играет квантово-механический туннельный эффект (рис. 5.3). При сближении водородных ядер на расстояния, меньшие радиуса ядра, начинают действовать силы ядерного притяжения. В центрах газовых шаров были «запущены» реакции ядерного синтеза, в результате которых и произошло рождение первого поколения звезд. В процессе эволюции звезд водород медленно сгорал, образуя гелий. Дальнейшая история развития звезд зависит прежде всего от их массы [118]. Как правило, масса звезд составляет от 10^{29} до 10^{33} кг. В ходе эволюции звезды происходит синтез не только ядер гелия, но также ядер других легких элементов (Li, Be, B, C, N, O и т. д. вплоть до Fe). Для реакции ядерного синтеза необходимы, разумеется, чрезвычайно высокие температуры: так, например, сжи-

гание гелия $2\text{He}^4 \rightarrow \text{C}^{12}$ происходит только при температуре около 10^8 К. В тех случаях, когда масса звезды не превышает 10^{31} кг, то есть в не очень больших звездах, постоянное сжатие могло быть остановлено давлением вырожденных электронов. Таким образом возникли так называемые «белые карлики» — маленькие, «плотно упакованные» звезды, радиус которых приблизительно равен земному, однако масса, заключенная в этом объеме, равна массе Солнца.

Значительно более сложное поведение отличает звезды, обладающие большой массой. Примером таких звезд могут послужить так называемые «красные гиганты»: их плотное «ядро», состоящее из гелия, окружено разреженной плазмой, испускающей в окружающее звезду пространство ядра и атомы. Для многочисленного класса звезд, обладающих большой массой, характерна неустойчивость: в результате коллапса они превращаются в нейтронные звезды или черные дыры или же взрываются, выбрасывая материю в окружающее их космическое пространство. Под воздействием возникающего при этом интенсивного излучения нейтронов образуются ядра химических элементов тяжелее железа. Некоторые из возникших таким образом газовых облаков, содержащие большую часть элементов периодической системы, сгущаются, образуя газовые шары «второго поколения», плотность которых продолжает увеличиваться.

Предполагается, что именно из такого газового шара, обладавшего массой, приблизительно вдвое превышающей массу Солнца, и могла зародиться планетная система с солнцем в центре. Разработками гипотез, касающихся процесса образования планетной системы вокруг Солнца, со времен Канта (1755) и Лапласа (1796) занимались лучшие теоретики: число такого рода гипотез растет и по сей день, однако ни одна из них не может быть признана доказанной [172, 118].

Рассмотрим здесь лишь один из существующих сценариев: в результате коллапса межзвездного газового облака образовался вращающийся газовый шар, диаметр которого примерно равнялся диаметру Солнечной системы, а масса приблизительно вдвое превышала массу Солнца. При увеличении сжатия это протосолнце вращалось все быстрее, трансформируясь в эллипсоид и теряя массу в экваториальной области. Эта ионизированная газовая масса сначала оставалась связанной магнитным полем протосолнца и все более принимала кинетический момент всей системы. Благодаря такому магнитному соединению (теоретически еще не совсем выясненному) скорость вращения протосолнца, находящегося в центре системы, замедлялась, а стекавший с него газ, напротив, получал ускорение, так что в результате образовался некий плоский вращающийся диск. Возможно, причиной существующего распределения кинетического импульса были ради-

альные конвективные потоки. Непрерывная агломерация твердых частиц системы привела, вероятно, к образованию так называемых планетезималей — небольших сгустков, размеры которых исчислялись сначала метрами или даже сантиметрами.

С увеличением массы гравитационное поле таких «зародышей» будущих планет захватывало все больше и больше газовой массы из окружающего пространства, в результате чего и возникли планеты. Остатки газового облака разнес в окружающем пространстве солнечный ветер. Примерно таким образом можно описать историю образования планетной системы, однако многие детали все же еще только предстоит пока выяснить.

11. Одиннадцатая эпоха: образование «фотонной мельницы». Закончив с кратким описанием важнейших пространственных структур, перейдем к представлению не менее важного термодинамического механизма, явившегося, так сказать, мотором дальнейшей эволюции. Речь идет о так называемой «фотонной мельнице» (рис. 5.4). Обобщая все вышесказанное, можно заключить, что судьба фотонов на протяжении первых восьми эпох складывалась, по сути, без особых осложнений: постепенно остывая в процессе продолжавшегося расширения метагалактики (в соответствии с уравнением (5.14)), они достигли сегодняшнего уровня реликтового, или фонового, излучения. В настоящее время реликтовое излучение образует фотонное море, относительно однородно наполняющее космос и обладающее плотностью 450 см^{-3} и температурой 2.726 К . Судьба же вещественной материи оказалась значительно сложнее, и причина, на наш взгляд, заключается в том, что частицы вещества обладают, в отличие от фотонов, массой покоя, а потому подвержены воздействию гравитационных сил. Пока температуры в расширяющейся метагалактике еще были чрезвычайно высокими (то есть в начальной фазе расширения), неупорядоченное тепловое движение оставалось настолько интенсивным, что препятствовало образованию достаточно больших неоднородностей, которые могли бы послужить «затравкой» для дальнейшего структурообразования. В условиях постоянного понижения температур влияние гравитации становилось все сильнее: случайные флуктуации плотности усиливались гравитацией, происходило образование газовых шаров. Разумеется, возникновение такого рода сгустков материи стало возможным только тогда, когда температуры опустились значительно ниже тысячи градусов. Совершенно аналогичный эффект наблюдается в так называемых газах Ван-дер-Ваальса — газах с притягивающими взаимодействиями. При высоких температурах такие газы демонстрируют однородное состояние; при охлаждении же (например, путем адиабатического расширения) наблюдается эффект конденсации, то есть

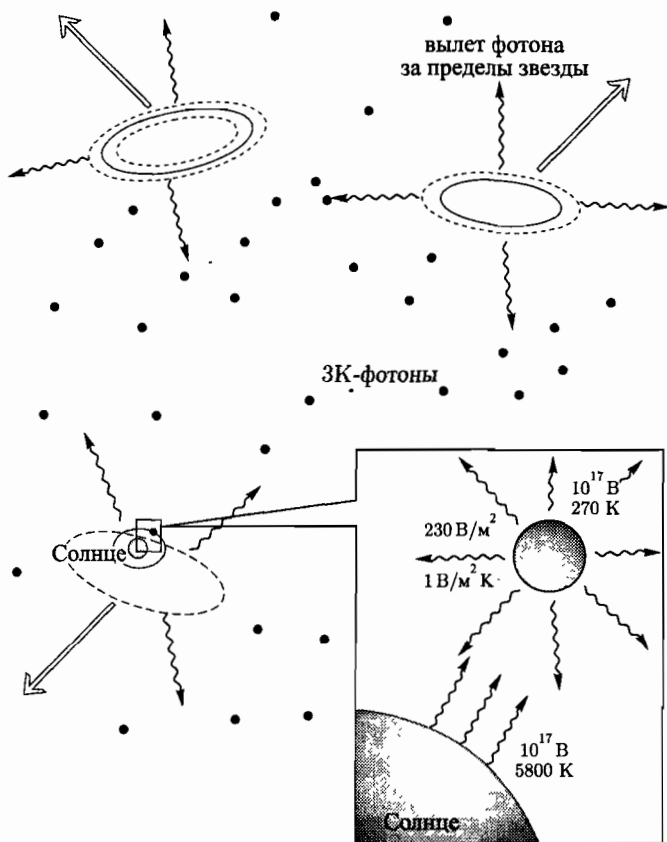


Рис. 5.4. Образование «фотонных мельниц» в расширяющейся метагалактике.

молекулы газа собираются в капельки. Представим себе, как из гигантских скоплений материи прежней метагалактики возникли сегодняшние галактические структуры. Из огромных сгустков газа образовались галактики, затем в галактиках начался процесс структурирования: под воздействием гравитационных сил неоднородности сжимались все сильнее. Вследствие адиабатического сжатия температура и плотность газа снова повысились:

$$T \sim n^{2/3} \sim \rho^{2/3}. \quad (5.15)$$

Достаточно большие газовые шары в результате гравитационного коллапса снова в конце концов достигали температур, исчислявшихся многими

миллионами градусов, в них начинались реакции ядерного синтеза и происходило рождение новых звезд. Процессы эти чрезвычайно сложны, так что здесь мы подробно рассматривать их не будем. Для наших дальнейших рассуждений важен лишь сам факт, что в течение миллиардов лет из неупорядоченного однородного распределения материи возникли столь сложные структуры и сверхструктуры, как красные гиганты, белые карлики, солнца, планеты, галактики и галактические субструктуры. Все эти структуры — одни горячие, другие холодные, — окруженные фоновым излучением, образовали своеобразный насосный механизм, называемый фотонной мельницей. Именно этот механизм, который мы рассмотрим и поясним на примере пары «Солнце–Земля», и является главной движущей силой дальнейшей эволюции космоса.

5.4. Земля и Солнечная система

Типичный пример структуры, возникшей в космосе в результате процессов структурообразования, представляет собой наша с вами планетная система. К ней-то и относятся интересующие нас объекты: Солнце, имеющее температуру поверхности, примерно равную 6000 К, и Земля, температура поверхности которой составляет около 300 К. Эта пара соответствует основной структуре нашего мира: относительно плотные и более нагретые сгустки вещественной материи (звезды и планеты) окружены морем однородного излучения (ЗК-фотоны). В данных условиях и начинает свою работу описываемый механизм, представляющий собой движущую силу процессов самоорганизации материи, — речь идет о так называемой «фотонной мельнице» (рис. 5.4). Поверхности относительно горячих звезд испускают фотоны, температура которых составляет тысячи градусов; минув различные промежуточные стадии (например, поверхности планет), они в конце концов попадают в фотонное море, имеющее температуру около 3 К. Этот механизм приводит в движение мельницу самоорганизации и эволюции на планетах.

Фотонная мельница, в принципе, работает подобно любой традиционной водяной мельнице или тепловому двигателю. Действие водяной мельницы основано на том, что вода, падая с высоты, переходит с более высокого уровня потенциальной энергии на более низкий. Падающая вода вращает мельничное колесо, которое часть полученной потенциальной энергии преобразует в полезную энергию вращательного движения. Тепловые машины, тщательная разработка которых была начата еще Карно и Клаузиусом, работают по схожему принципу. Для их работы необходимы два резервуара:

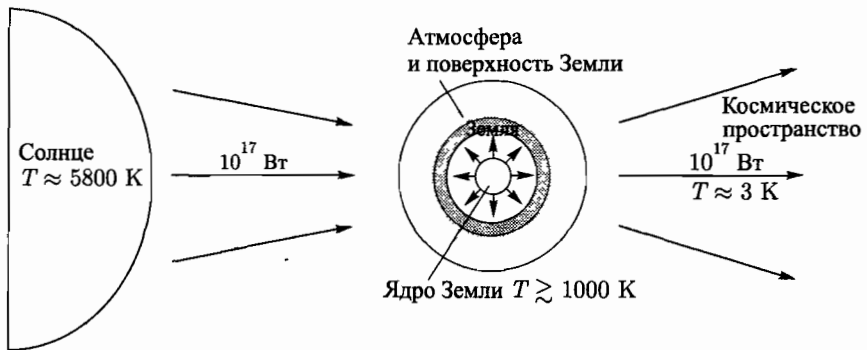


Рис. 5.5. «Фотонная мельница» — основная движущая сила самоорганизации и эволюции на Земле.

в первом (им может быть, к примеру, паровой котел) содержимое имеет более высокую температуру, чем во втором (речная, морская или любая другая вода или же наружный воздух). Возникающий при этом температурный градиент и обеспечивает работу тепловой машины, выделяющей часть энергии в форме полезной механической работы. Современная термодинамика располагает хорошо проработанной теорией действия таких тепловых машин. Благодаря работам Клаузиуса нам хорошо известно, что важную роль здесь играет не только поток энергии, но и соответствующий поток энтропии. Если тело поглощает теплоту, равную ΔQ при температуре T , то оно получает приток энтропии, равный, по Клаузиусу, следующей величине:

$$\Delta S = \frac{\Delta Q}{T}. \quad ; \quad (5.16)$$

Тепловая машина получает тепло более высокой температуры и отдает тепло с меньшей температурой; таким образом, согласно уравнению (5.16), величина отданной машиной энтропии больше, чем величина принятой. В данном случае можно говорить об «экспорте» энтропии. Бельгийский ученый И. Пригожин (в 1977 году ставший лауреатом Нобелевской премии по химии) доказал, что «экспорт» энтропии имеет важнейшее значение не только в случае тепловых машин, но и для всех без исключения систем, обладающих способностью к самоорганизации. Рассмотрим с этой точки зрения Землю в роли «фотонной мельницы» (рис.5.5). Земля принимает от Солнца тепловой поток, мощность которого приблизительно равна 10^{17} Вт, а температура составляет примерно 5800 К, что соответствует эффективной

температуре солнечной поверхности. В виде теплового излучения прежней мощности 10^{17} Вт Земля возвращает в космическое пространство примерно то же количество тепла, но температура его составляет уже всего лишь 260 К — именно такова температура теплового излучения нашей планеты. Простой расчет позволяет получить величину «экспорта» энтропии за единицу времени:

$$10^{17} \text{ Вт} \cdot \left(\frac{1}{5800 \text{ К}} - \frac{1}{260 \text{ К}} \right) \approx -4 \cdot 10^{14} \text{ Вт/К},$$

что дает в итоге следующее значение для каждого метра земной поверхности:

$$1 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}.$$

Это легко запоминающееся число отражает фундаментальную характеристику земного «экспорта» энтропии. Проще говоря, Земля представляет собой уже упоминавшуюся «фотонную мельницу», которая работает за счет разницы между получаемыми от Солнца «горячими» и возвращаемыми в космическое пространство «холодными» фотонами. Значение $1 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$ характеризует мощность движущих сил этой «мельницы», инициирующей процессы самоорганизации и эволюции на Земле. Следует отметить, что наша родная Солнечная система занимает совершенно особое место среди бесчисленных планетных систем. Она обладает семью большими планетами; одна из этих планет, Земля, имеющая твердую поверхность и среднюю плотность $5.51 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$, удалена от центральной звезды системы, Солнца, масса которого составляет приблизительно $2 \cdot 10^{30}$ кг, на расстояние, равное примерно $1.5 \cdot 10^{11}$ м. Рассмотрим подробнее историю эволюции Земли. Наша планета образовалась около 4, 5 миллиардов лет назад. Эволюция космоса продолжалась: возникали и исчезали звездные и планетные системы, звезды становились красными гигантами, белыми карликами, нейтронными звездами или черными дырами. Однако «звездную» историю мы оставим в стороне, поскольку нас интересует, в первую очередь, насчитывающая четыре с половиной миллиарда лет история процессов самоорганизации и эволюции материи на Земле — планете, выбранной нами в качестве модели. Предшествовавшая космическая эволюция становится для нас подобной прологу к пьесе в театре. Мы изложили этот «пролог», хорошо осознавая, что описанные нами события могли происходить и так, как мы представили их читателю, и как-то иначе. Неясные и слабые места нашего изложения по большей части связаны с нерешенными проблемами гравитационных неустойчивостей турбулентных газовых облаков. Унзольд [172] замечает:

Крупные нерешенные проблемы в современной астрофизике имеют, по существу, гидродинамическую природу. Это объясняется тем, что космические течения, как правило, турбулентны.

Интересно отметить, что достижения астрофизики совершенно очевидно связаны с решением проблем классической теоретической физики. Однако мы не будем здесь углубляться в анализ этой безусловно любопытной взаимосвязи; обратимся вновь к событиям, происходившим на Земле. История возникновения Земли привела к тому, что планета оказалась окружена газовой оболочкой: горные породы отдавали содержащийся в них газ, водород и гелий улетучивались в окружающее пространство, так что химический состав атмосферы постоянно изменялся [118]. На протяжении почти двух миллиардов лет преобладала атмосфера, состоявшая в основном из водяных паров, водорода, аммиака и сероводорода — такая атмосфера, на первый взгляд, не особенно гостеприимна. Однако исследования показывают, что для эволюционных процессов именно эта смесь газов несет в себе огромный потенциал. Бушующую атмосферу пронизывали разряды молний, бурные извержения вулканов создавали высокотемпературные области, вследствие чего возникали большие перепады температур. Водяной пар и некоторые газы, конденсируясь, образовывали в протодолинах зачатки будущего океана — соперника раскаленных потоков вулканической лавы. В этих условиях, согласно гипотезе А. И. Опарина, первым выдвинувшего подобное предположение [134], возникли примитивные органические молекулы — в частности, молекулы нуклеиновых и аминокислот. Сегодня описанные процессы могут быть воспроизведены в лабораторных условиях. В 1953 году С. Миллер (бывший в то время еще студентом) целыми днями напролет работал в лаборатории Гарольда Юри, пропуская электрические разряды через реконструированную первичную атмосферу, — и обнаружил в результате аминокислоты. Работы Миллера и Юри вызвали целый шквал подобных исследований; было доказано, что смесь газов, содержащая углерод, водород, кислород и азот, при подаче к ней энергии (например, в форме электрических разрядов ультрафиолетового света, или радиоактивного излучения, или тепла) при соответствующих (восстановительных) условиях производит все основные структурные элементы, необходимые для создания биоматерии: аминокислоты, оксикислоты, сахара, пиримидиновые и пуриновые основания [98, 144, 66, 151, 109].

С появлением химических процессов 4–4,5 миллиарда лет назад на планете началась фаза химической эволюции; она длилась около миллиарда лет. Главным результатом первой стадии химической эволюции стало соединение простых атомов H, C, N, P и т. д. в сложные органические молекулы. Процесс дальнейшей эволюции состоял в том, что возникшие сложные молекулы, в свою очередь, сливались, образуя макромолекулы. Некоторые из образовавшихся таким образом в первичной атмосфере молекул складывались в цепи: полипептиды и полинуклеотиды совершенствовались в ходе

непрерывной борьбы с разрушающим цепи гидролизом. Полимерные цепи по большей части состояли из мономеров не одного, а нескольких разных типов — это были так называемые гетерополимеры. Таким образом возникли линейные молекулярные структуры особого рода, что имело основополагающее значение [18]: по существу, химическая эволюция была завершена. Уже было упомянуто о главном ее результате, состоявшем в соединении атомов химических элементов в гораздо более сложные органические молекулы, образовавшие затем еще более сложные цепные молекулы. Важную роль в этом сыграли такие элементарные химические процессы, как гомогенный и гетерогенный катализ, автокатализ, бистабильность и колебания.

Перейдем к рассмотрению следующей стадии эволюции. Спустя некоторое время на Земле возникло несколько особых органических цепных молекул, обладавших способностью к самовоспроизводству. В случае полинуклеотидов это свойство основано на разнице в прочности водородных мостиковых связей между нуклеотидами. Представим себе молекулу рибонуклеиновой кислоты: это линейная цепная молекула, состоящая из элементов четырех типов — аденина, цитозина, гуанина и урацила. Нуклеотид аденин способен к созданию относительно прочной водородной связи с урацилом, а цитозин — с гуанином. Следовательно, данная цепь нуклеотидов предрасположена к тому, чтобы свободно присоединять к своим элементарным элементам, являющимся комплементарными им в вышеозначенном смысле этого слова. Так в результате образования химических связей между ассоциированными нуклеотидами может возникнуть комплементарная цепь [98]. Сравнительно короткие цепи рибонуклеиновой кислоты способны произвести такого рода «дополнение», и оно в точности будет повторять исходный образец. Иными словами, за два этапа исходный образец удваивается. Такое спонтанное воспроизведение в водах протоокеана случалось, правда, исключительно редко из-за отсутствия каталитической поддержки и очень низкой концентрации необходимых молекул. Полипептидам эти трудности удается преодолеть: сегодня экспериментально доказано, что еще примитивные абиогенно возникшие полипептиды — так называемые протеиноиды — уже обладали благодаря своей пространственной «складчатой» структуре поливалентными каталитическими свойствами, и достаточное количество спонтанно возникших протеиноидов было способно значительно ускорить течение процессов синтеза и репликации. Материя приобрела фундаментальное свойство — способность к саморепликации, вступив таким образом в новую фазу эволюции — фазу самоорганизации путем самовоспроизводства. Важную роль при этом играли процесс образования модификаций (иначе говоря, мутантов) исходных молекул в результате ошибок при копировании и процесс дальнейшего отбора наиболее удачных вариантов. Воз-

можно, возникли целые сетчатые структуры из полинуклеотидов и полипептидов, способные к репликации. Эти гипотетические структуры известны как гиперциклы [51] и РНК-репликазные циклы [33, 12].

Чрезвычайно важным процессом, приведшим к локальным повышениям концентрации макромолекул, был, предположительно, процесс коацервации: сольватные оболочки ионизированных макромолекул в растворах высокомолекулярных веществ расщеплялись под воздействием других заряженных молекул, и макромолекулы соединялись, образуя каплевидные коацерваты. Коацервация представляет собой одну из форм разделения раствора на фазы, причем фаза коацервата содержит макромолекулы в значительно более высокой концентрации, чем остальные фазы жидкости. А. И. Опарин [134] высоко оценивал значение коацервации, указывая, в частности, на возможность того, что именно коацерваты явились первым, предварительным этапом в процессе возникновения жизни. Во многом схожи с коацерватами микросферы, тщательно изученные С. Фоксом. Микросферы представляют собой крошечные протеиноидные шарики, диаметр которых не превышает 3 мкм. Как в коацерватах, так и в микросферах могут протекать реакции, а следовательно, они являются своего рода микрореакторами, способными к росту и делению, а также к обмену веществом с окружением, то есть еще и к изменению своего состава. Таким образом, микрореакторы выступают в качестве неких новых репликативных единиц наряду с репликативными сетчатыми структурами [33]. Образование микрореакторов явилось важным шагом к пространственному разграничению и, тем самым, к возникновению первых микробов (более подробно этот процесс будет рассмотрен нами в седьмой главе).

Другим чрезвычайно значительным шагом по пути эволюции можно назвать развитие и совершенствование «молекулярного языка» биополимеров. Элементарным языком биологических систем считается язык химический; алфавит такого языка состоит из нуклеотидов и аминокислот различных типов, язык обладает собственной грамматикой, в соответствии с которой и происходит «словообразование». Правила этого «языка» касаются химического состава, мутаций, кодирования и рекомбинации, а также цистронов и еще более обширных структур. Такие подпоследовательности имеют строго определенное значение в биологической смысле, поскольку именно в них закодированы различные признаки или, к примеру, ферменты. Элементы описанного молекулярного языка развивались и совершенствовались в протоокеане; процесс этот был обусловлен существованием способных к репликации носителей информации. В протоокеане роль таких носителей информации сыграли полинуклеотиды — сначала рибонуклеиновой, а затем дезоксирибонуклеиновой кислоты. Эффективная репликация

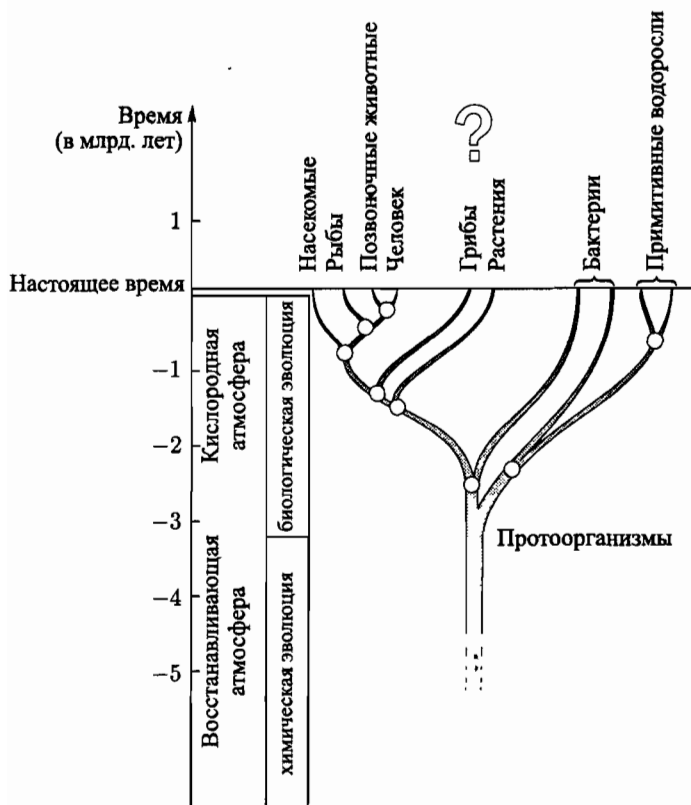


Рис. 5.6. Схема эволюции биологических видов.

полинуклеотидов стала возможной благодаря их союзу (его обеспечивали особые ферменты) с сетчатыми структурами.

Так возникали все новые — и все более и более сложные — репликативные системы, вступающие между собой в соперничество. Те из них, что справлялись с копированием быстро и с меньшими погрешностями и дефектами, продолжали развитие; системы, не выдержавшие конкурентной борьбы, отставали в развитии. В качестве сырья репликативным системам служили распространенные повсюду примитивные органические молекулы — такие, как аминокислоты и первичные нуклеотиды, — которые вновь и вновь образовывались под воздействием солнечного света, разрядов молний и извержений вулканов. Шло время, и океан постепенно заполнялся быстро воспроизводящимися репликативными системами; «сырья» становилось все меньше и меньше, и это обстоятельство ограничивало необходимый для репликации обмен веществ. Возник жесткий естественный отбор, в процессе которого совершенства достигли определенные репликативные единицы, функционирующие на основе полинуклеотидов и полипептидов. Такие системы оказались пространственно изолированы (возможно, путем стабилизации микрореакторов) от окружения и сформировали оболочки-мембраны, через которые осуществлялся обмен веществ: так произошло зарождение первых живых существ — возможно, схожих с бактериями или примитивными водорослями. Можно предположить, что это случилось три-четыре миллиарда лет назад. Именно отсюда и берет старт эволюция биологических видов (рис. 5.6). Здесь мы на некоторое время прервем рассмотрение эволюции жизни на Земле, поскольку этой теме будет посвящена отдельная (седьмая) глава; прежде следует обратиться к вопросам, связанным с эволюцией климата.

ГЛАВА 6

Эволюция климата

Я до сих пор прекрасно помню
То состояние, похожее на шок:
Я вышел из самолета в душный,
Насыщенный множеством запахов
Зной Западной Африки.
Казалось, будто я попал в кухню,
Где тысяча поваров
На тысяче плит
Варят, жарят и парят
Тысячу разных блюд.

Дэвид Аттенборо.
Жизнь на Земле

6.1. Земля в роли паровой машины

Это не просто граничит с чудом — это и есть самое настоящее чудо: вода, вещество с поистине уникальными физическими свойствами, сделала возможной жизнь и превратила Землю в обитаемую планету. В пустынных безжизненных просторах Вселенной возник исполненный жизни оазис — наша Земля, а ведь ее ближайшие соседи, Венера и Марс, что называется, остались ни с чем, «потому что без воды — ни туды и ни сюды!» Водонос (или, как в песенке, водовоз) — фигура, символизирующая то место, ту роль, что играет в нашем повседневном биологическом существовании вода; однако вода «играет» не только «для нас», но и «с нами».

Из всего множества протекающих на нашей планете процессов остановимся для более внимательного рассмотрения на тех, что связаны с климатом. Следует заметить, кстати, что понятие «климат» имеет отношение только к очень обширным областям и продолжительным периодам времени, а дождливое лето в Баварии — это еще далеко не изменение климата.

Представим, что мы находимся на космическом корабле, который движется по геостационарной орбите (т. е. совершает за сутки один виток вокруг планеты), а потому кажется с Земли неподвижным. Таким образом, Солнце, Земля и наш корабль образуют жесткий треугольник в плоскости эклиптики (при условии, что мы не будем принимать в расчет тот факт, что орбита Земли имеет форму эллипса, — иначе наш треугольник будет слегка «пульсировать», подчиняясь годовому циклу). Дневная и ночная стороны Земли, с занятой нами позиции, образуют неизменяющийся «земной серп», на котором в течение суток будут сменять друг друга материки и океаны. Нам будут отчетливо видны завихрения гигантских облачных спиралей, соответствующих областям низкого давления и выглядящих так, будто они просто нарисованы на поверхности земного шара; однако стоит только приглядеться повнимательнее, и мы заметим, что они, скорее, похожи на исплинских амёб, медленно ползущих и изменяющих свою форму. Мы увидим и кое-что еще: узор белого цвета на экваторе; он, правда, мерцает и подрагивает, но — подобно значку-логотипу телеканала — кажется подсвеченным на подвижном фоне.

Занятая нами позиция позволяет рассматривать Землю в очень больших пространственных масштабах, как того и требует стоящая перед нами задача. Теперь займемся выбором временных рамок, соответствующих тем же масштабам. Представим себе, что наш корабль находился на орбите в течение, скажем, пятисот лет, занимая все это время одно и то же положение; с корабля велась цейтраферная съемка фильма (многие километры киноплёнки) как в видимом, так и в инфракрасном диапазонах спектра. Запустим готовый фильм в режиме ускоренного просмотра. Контуры материков и океанов расплываются в горизонтальные полосы: на севере больше коричневых, а на юге — голубых. В пелене молочно-белых облаков, еще не достигших в те времена сегодняшней плотности, отчетливо различимы зоны пассатов и западных ветров. На экваторе опять-таки видны не просто горизонтальные линии, а четкий рисунок, возникший на рубеже между востоком и западом. А теперь, воспользовавшись эффектом стробоскопа, просмотрим те из заснятых кадров, на которых материки расположены на одних и тех же местах. Картина, полученная нами в результате этих манипуляций, весьма интересна и даже поучительна: в районе Исландии обнаруживается огромная облачная «гора», тогда как Азорские острова хорошо просматриваются сквозь тонкую облачную дымку, а вообще весь земной шар кажется окутанным четкими горизонталями волнообразных облаков.

Наша следующая цель заключается в том, чтобы разобраться в полученной картине и научиться прогнозировать кажущиеся медленными изменения климата, используя математическую модель.

К сожалению, современная наука пока еще очень далека от достижения этой цели, несмотря на возможности, предоставляемые ей метеорологическими и исследовательскими спутниками, а также мощными и быстрыми компьютерами. Атом водорода представляет собой удобную модель, которая может помочь разобраться в свойствах не только самого водорода, но и любых других атомов; попытаемся найти столь же простую и наглядную климатическую модель, которая могла бы послужить ключом к пониманию основных климатообразующих механизмов, и отдельные элементы такой модели рассмотреть здесь в свете процессов самоорганизации.

Без учета глубинного тепла земной коры, солнечного ветра и метеоритов (а также каких бы то ни было высших существей) Земля оказывается замкнутой (полузакрытой) системой, обменивающейся с остальным космосом только лучистой энергией. Энергетическое питание Земли, то есть солнечное излучение, достигающее верхних слоев земной атмосферы, можно сравнить с излучением черного тела, температура которого равна температуре поверхности Солнца (около 6000 К), с максимумом в диапазоне зеленого света с длиной волны, составляющей приблизительно 0.5 мкм. Средняя мощность солнечного излучения равна примерно 350 Вт/м^2 ; естественно, конкретное значение мощности для каждой точки земной поверхности зависит от времени суток и положения этой точки относительно экватора и полюсов. Излучаемая Землей энергия состоит, прежде всего, из непосредственно отраженных солнечных лучей, которые в дальнейшем нас интересовать не будут, поскольку не оказывают существенного влияния на определяющие климат термодинамические процессы (хотя нас может, пожалуй, заинтересовать доля отраженного излучения, описываемая через так называемое альbedo Земли). Остальная получаемая планетой энергия представляет собой наложение различных тепловых излучений, перемежаемых полосами поглощения химических элементов атмосферы. Очень приблизительно это распределение энергии можно сравнить с тепловым излучением тела, температура которого составляет около 300 К, причем максимальная длина волн равна примерно 10 мкм. Обе кривые излучения относительно хорошо отделяются друг от друга при длине волны около 4 мкм.

Земля не становится ни горячее, ни холоднее, а значит, в среднем поддерживается энергетическое равновесие обоих типов излучения. Как уже было сказано в предыдущей главе, из анализа температур следует, что в космическое пространство с температурой примерно 3 К Земля непрерывно экспортирует около $1 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$ энтропии. Такая «фотонная мельница» забирает поток высокоценной энергии (подобно тому, как колесо водяной мельницы забирает воду из реки или ручья или тепловая машина — из резервуара; см. схему на рис. 6.1), рассеивает ее на множестве уровней, а затем



Рис. 6.1. Паровая машина или водяная мельница из одного резервуара (реки или ручья в случае мельницы) забирают высокоценную энергию (тепловую или потенциальную), производят работу и отдают во второй резервуар уже обесцененную энергию.

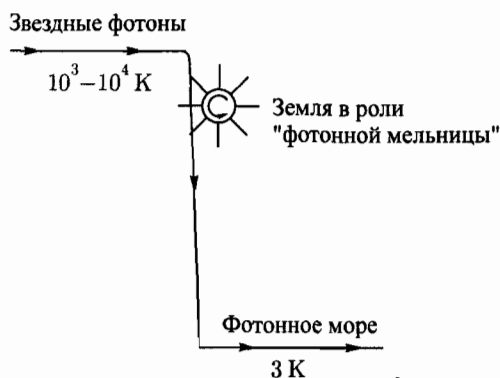


Рис. 6.2. «Фотонная мельница» забирает излучаемые Солнцем высокотемпературные фотоны, производит работу и возвращает в космическое пространство (3К-фотонное море) фотоны с гораздо более низкой температурой излучения.

экспортирует энергию уже менее ценную (рис. 6.2). Численно это рассеяние выражается величиной так называемого «экспорта» энтропии, представляющего собой своего рода «ограничительные рамки» для возможных процессов самоорганизации на Земле. Для климата и самой жизни на нашей планете безусловно важны и необходимы и горячее Солнце — как источник энергии, и холодный космос — как свалка для энтропийных отходов.

С принципом действия паровой машины знакомится каждый школьник или студент, изучающий термодинамику. Он узнает, что необходимы два котла (для горячего и охлажденного пара) и что машина отводит из

потока между котлами (от горячего к холодному) энергию для производства полезной работы (рис. 6.1). Землю тоже можно рассматривать как некую огромную паровую машину: разумеется, Земля не оборудована поршнями — она справляется с делом при помощи воды и ветра, но без вентиляей, регулирующих поток энергии, ей все же не обойтись — их-то мы и рассмотрим повнимательнее, проследив процесс превращений энергии.

Солнечный свет сначала попадает в атмосферу. При встрече с облаками (в зависимости от высоты они состоят из капель воды или из кристаллов льда) часть света рассеивается, то есть отклоняется от первоначального своего направления в результате отражения или преломления. Часть света (примерно четверть) сразу же отражается обратно в космическое пространство; другая часть (около половины) добирается до поверхности в виде более или менее рассеянного (в зависимости от толщины облачного слоя) дневного света. Облака практически не поглощают света и хоть и «регулируют» световой поток, но энергию из него едва ли извлекают, а потому и почти не реагируют непосредственно на сам свет, являясь, таким образом, чуть ли не идеальным «выпускным» клапаном. (Вода, естественно, заметно поглощает свет — но это должен быть многометровый слой воды.)

В областях, не занятых облаками, свет проникает сквозь атмосферу, так сказать, беспрепятственно (хотя и в этом случае происходит рассеяние, окрашивающее земное небо в голубой цвет, а также некоторое поглощение). Известно, что воздух в оптическом окне совершенно прозрачен. Для достигшего поверхности Земли света существует две возможности: он падает либо на сушу, либо на воду. В обоих случаях часть света отражается, а часть — поглощается. Характер отражения может меняться в зависимости от того, на какой участок поверхности попадает свет: на суше это могут быть камни, или покрытая растениями почва, или снег и т. д. Вода как таковая обладает неизменными поглощающими свойствами, однако в каждом конкретном случае, разумеется, возможны различные изменения поглощающей способности; это может произойти из-за присутствия в воде каких-то живых организмов (скажем, планктона) или, например, если значительная часть поверхности воды покрыта льдом или пенными гребнями волн. Однако большая часть света попадает в низкие широты, и там лишь изредка случаются сильные, продолжительные штормы и бури, захватывающие обширные пространства, а снег и лед встречаются еще реже (в горах).

Две трети земной поверхности заняты водой, и значительная часть этой воды находится в экваториальной зоне (рис. 6.3). Таким образом, мы можем предположить, что примерно три четверти всей солнечной энергии поглощает вода, и лишь четверть приходится на долю суши. Суша обладает очень небольшой теплоемкостью, и свет практически не проникает вглубь,

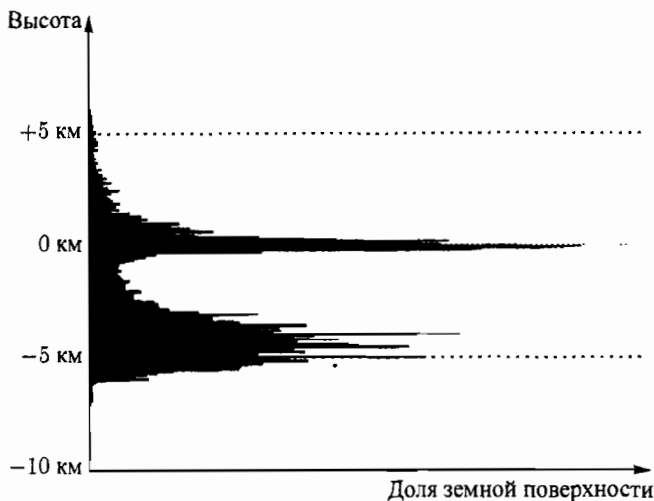


Рис. 6.3. Распределение высот по поверхности Земли: так называемое гипсографическое распределение высот, составленное по мировой карте высот ($5' \times 5'$).

так что не будет большой ошибкой предположить, что приходящаяся на долю суши энергия сразу же поглощается нижними слоями воздуха; таким образом, мы можем исключить из нашей картины поглощения энергии и земные материки. Доля светового излучения, поглощаемого хлорофиллом растений, а затем проделывающего длинный путь по всей биологической питательной цепочке, в общем-то, незначительна: она составляет примерно тысячную от общего количества получаемой Землей энергии.

Поглощая свет, вода нагревается — впрочем, температура ее при этом почти не изменяется вследствие большой теплоемкости воды и большой глубины проникновения света (около 50 см). Под воздействием, в основном, воздушных потоков и обусловленных ими течений происходит постоянное горизонтальное перераспределение полученного тепла и постепенная передача его в атмосферу. Малая часть этой энергии отражается обратно в космическое пространство, гораздо большая часть сначала попадает в атмосферу, где и соединяется с тепловой энергией, принесенной воздушными потоками с материков. Поскольку океаны в среднем не становятся ни теплее, ни холоднее, можно говорить об устойчивом энергетическом равновесии (учитывая при этом и небольшую, но весьма важную «разницу»), то есть в атмосферу попадает столько же энергии, сколько было получено при инсоляции.

Энергия покидает Землю только в виде излучения; теперь следует разобраться, каким образом возникает в атмосфере это излучение. Воздух имеет четко выраженную полосу поглощения в инфракрасном диапазоне, волны длиной от 5 до 8 мкм поглощаются водяным паром, в диапазоне от 8 до 13 мкм (интервал максимального излучения) воздух прозрачен, волны длиной от 13 до 17 мкм поглощает углекислый газ, а более длинные (свыше 17 мкм) — вновь водяной пар; естественно, мы представили все это в весьма упрощенной форме. Однако самую важную роль играет здесь вовсе не газ, а вода, постоянно присутствующая в виде капель и кристаллов льда (испарения, туман, облака). Значение воды велико потому, что она в любом виде оказывает влияние не на узкую полосу спектра, а на весь длинноволновый диапазон, самым решительным образом вмешиваясь в происходящее. Собственно, в инфракрасном диапазоне вода в виде жидкости, снега и льда так же черна, как черна сажа, и свет способен проникать в нее на глубину всего лишь нескольких микро- или даже нанометров. Углекислому же газу в описываемых процессах отведена всего-навсего третьеразрядная роль: его эффективная спектральная область значительно уже, чем соответствующие области двух других сред, концентрация его в атмосфере ничтожна и, ко всему прочему, пространственно-временное его распределение почти постоянно; подробнее рассматривать углекислый газ мы здесь не будем. Водяной пар, напротив, имеет непрерывную полосу поглощения (обусловленную вращением дипольных молекул), которая начинается уже вскоре после превышения максимума излучения и «контролирует», таким образом, практически половину всей проходящей энергии, тогда как водяные капли и кристаллы оказывают влияние на весь спектр.

Однако вернемся к судьбе энергии в атмосфере. С увеличением высоты температура воздуха падает, приблизительно так же воздух адиабатически охлаждается при подъеме в результате падения давления (рис. 6.4). Рассмотрим сначала простейший случай: над океаном находится сухой воздух, над которым на большой высоте располагается тонкий, но относительно плотный облачный слой. Океан излучает тепло, соответствующее температуре воды в его верхнем слое (метеорологи называют эту температуру SST, Sea Surface Temperature¹), поскольку в инфракрасном диапазоне он является совершенно черным и непрозрачным. Сухой же воздух над ним, напротив, прозрачен; он не поглощает и не испускает излучение (если не принимать во внимание CO₂, O₃ и т. д.). Однако капельки воды, находящиеся в облаках, тоже оказываются черными, и их излучение соответствует температуре

¹ Температура поверхности моря (англ.) — *Прим. перев.*

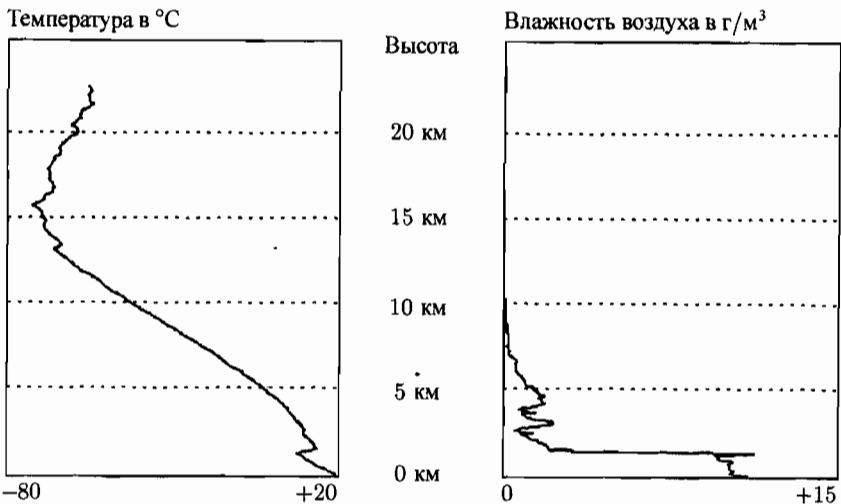


Рис. 6.4. «Вертикальный профиль» атмосферы: зависимость температуры и влажности воздуха от высоты (измерения проведены радиозондом, который стартовал с находившегося у побережья Марокко (34.40° с. ш., 9.82° з. д.) исследовательского судна «Александр фон Гумбольдт» 5 октября 1992 года в 10:14 по всемирному координированному времени),

воздуха в облаке, так как каждая капля парит в пузырьке из теплого воздуха. Облако излучает в мировое пространство тепловую энергию, соответствующую температуре его верхней стороны, а к поверхности Земли отправляется тепловая энергия, соответствующая температуре нижней стороны. Поскольку более холодный излучатель отдает меньше энергии, чем более теплый, постоянно существующая между облаком и поверхностью воды разница лучистых энергий становится причиной возникновения первичного транспорта энергии от поверхности океана к облаку, а затем от облака в верхние слои атмосферы, откуда она и излучается в мировое пространство.

В том случае, когда в схеме отсутствуют облака, а воздух по-прежнему сухой, поверхности суши и воды могут излучать непосредственно в космос; этот эффект каждому наверняка доводилось наблюдать в ясные ночи, особенно зимой. Если же воздух влажен (каким, собственно, и бывает обычно морской воздух) или облачные слои значительно толще, чем мы пытались представить их в первом, упрощенном случае, то излучение вынуждено пройти через целую цепь процессов поглощения и вторичного излучения. Такого рода препятствие при передаче тепловой энергии в кос-

мическое пространство часто называют «парниковым эффектом»; действие его можно представить в виде картинки: Земля, «с головой» укутанная в одеяло из водяного пара и облаков.

Тем, кому доводилось бывать на Красном море или в Мексиканском заливе, знаком тот особый душный влажный зной, плывущий над морем и в низине у побережья. Несмотря на чистое, безоблачное небо все та же влажная жара царит и по ночам. Этот эффект вызван воздействием водяного пара и испарений, которые являются результатом высокой скорости испарения в тропиках и вопреки высоким температурам воздуха у поверхности земли едва ли допускают охлаждение за счет излучения тепловой энергии. Однако стоит только подняться выше на Мексиканское или Эфиопское нагорье (от 500 до 2000 м), как влажность очень быстро уменьшается, и ясные ночи приносят с собой вполне ощутимую прохладу. (В штате Чьяпас на юге Мексики на высоте 1600 м над уровнем моря располагалась старая столица штата — город Сан-Кристобаль-де-Лас-Касас; новая столица, Тустла-Гутьеррес, находится всего в 500 м над уровнем моря и как раз отличается влажностью и жарой. Решение о переносе столицы, принятое в девятнадцатом веке, уже тогда удивило путешественников-исследователей, о чем свидетельствуют их сообщения.)

Совокупная энергия, курсирующая между поверхностью и атмосферой в виде инфракрасного излучения, почти в точности равна общей энергии получаемого Землей солнечного излучения!

Наряду с описанной вертикальной передачей излучения есть и другие пути, по которым энергия может достичь верхних слоев атмосферы, чтобы оттуда «уйти» в мировое пространство. Во-первых, существует тепло, которое накапливает сам воздух, движущийся снизу вверх в процессе конвекции, но вследствие малой теплоемкости воздуха доля этой энергии отнюдь не самая значимая. Огромное количество теплоты необходимо для испарения воды с поверхности океанов, морей, озер и т. д., и огромное количество энергии высвобождается при адиабатическом остывании поднимающегося на большие высоты воздуха, который, достигнув точки росы, снова конденсирует воду в облака. Этот «эффект холодильника» — благодаря которому происходит непрерывное перемещение воды (в виде пара) с поверхности на большие высоты, откуда она вновь устремляется вниз в жидком или твердом состоянии, — высушивает земную поверхность в тех областях, где воздушные массы опускаются вниз (зона пассатов, области вдоль параллелей 30° с. ш. и 30° ю. ш.), и вызывает большое количество осадков в тех областях, где воздушные массы поднимаются вверх (экваториальная зона и области вдоль параллелей 60° с. ш. и 60° ю. ш.); схема этих процессов представлена на рис. 6.5.

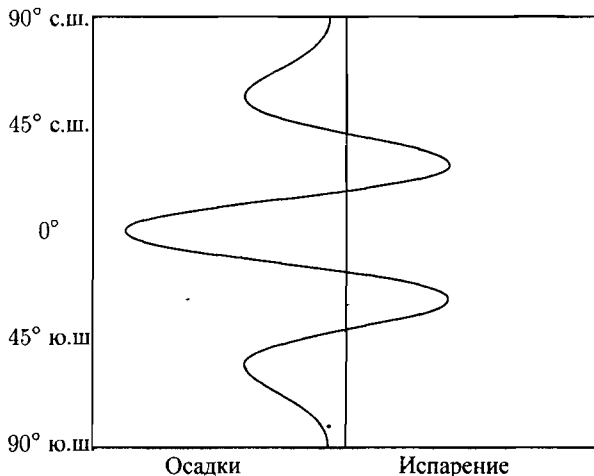


Рис. 6.5. Глобальное широтное распределение осадков и испарений. Сухие нисходящие воздушные массы на широтах, где господствуют пассаты, обуславливают образование пустынных поясов; восходящие воздушные массы способствуют выпадению осадков в экваториальной зоне и средних широтах.

Обобщая все вышесказанное, можно утверждать, что «впускные и выпускные клапаны» описанной нами паровой машины (в роли которой и представлена наша планета) существуют прежде всего благодаря воде, содержащейся в атмосфере. «На входе» такими клапанами являются облака, почти исключительно обеспечивающие охлаждение, и поглощающий излучение водяной пар. «На выходе» оказываются облака, испарения, водяной пар, которые действуют, с одной стороны, как нагреватели, а с другой — образуя энергетические конвейеры для скрытой теплоты — как охладители. Управление этими клапанами осуществляется комплексным образом — посредством множества взаимосвязанных процессов в мировом океане и атмосфере. Толстый и низкий облачный слой действует, в основном, охлаждающе, тогда как тонкие высокие облака над поверхностью воды и материков производят иной эффект, ограничивая нагревание днем и охлаждение ночью. Анализ данных, полученных с применением метеоспутников, свидетельствует — мы здесь, разумеется, сильно упрощаем — о существовании охлаждающего эффекта между 30° с. ш. и 60° с. ш. и между 30° ю. ш. и 60° ю. ш., а также теплового эффекта в полярных и экваториальных широтах. Все это вместе взятое незначительно превышает охлаждение. Облака на дневной стороне регулируют приток и выделение тепла, а на ночной

стороне — только выделение, и Земля с их помощью охлаждается в общем почти так же сильно, как и нагревается; отсюда следует, что на дневной стороне явно преобладает охлаждающий эффект облачности, а на ночной — уже упоминавшийся парниковый эффект. По этой причине для климата среднее суточное обращение Земли может оказаться намного важнее, чем прочие средние суточные или месячные параметры.

К вышеназванным процессам, наряду с уже описанной вертикальной передачей, относится и чрезвычайно существенное горизонтальное перераспределение энергии. Поскольку поглощение солнечной энергии осуществляется только дневной стороной планеты, а возвращается в мировое пространство энергия, излучаемая всей Землей (то есть и дневной, и ночной сторонами) в соответствии с локальными температурами, то днем поглощение превышает излучение, а ночью, естественно, наоборот. Это нарушение баланса выравнивается чистым потоком энергии, существующим почти исключительно благодаря механическому вращению Земли и устремляющимся с дневной стороны на ночную. Кроме того, плотность энергии солнечного излучения на единицу площади в низких широтах, разумеется, намного больше, чем в высоких (изменения средней облачности в зависимости от широты), а отсюда следуют и более высокие значения средней температуры вблизи поверхности. Однако, как мы уже увидели, излучение определяется прозрачностью атмосферы в инфракрасном диапазоне, температурой верхних сторон облаков и скоростью вертикального потока, несущего скрытую теплоту, вследствие чего широтное распределение количества выделенной теплоты существенно отличается от широтного распределения лучепоглощения. Разница компенсируется за счет переноса тепла с севера на юг в атмосфере и верхних слоях океана (и тот, и другой способ предполагают перенос примерно равного количества энергии за единицу времени), регулируется всеобщим ветровым режимом и в значительной мере зависит от формы и положения континентов.

6.2. Океан — климатическая машина Земли

В предыдущем разделе речь шла о ветрах и облаках, и может показаться, что атмосфера не так уж решительно влияет на климат (во всяком случае, непосредственно, напрямую не связана с ним). Мы с вами живем в атмосфере и день за днем наблюдаем за каприолями (или даже кульбитами) погоды; на первый взгляд, мы имеем дело с климатическими процессами. Однако такое представление ошибочно. Атмосфера слишком «шустра», а атмосферные явления слишком скоротечны для тех временных рамок,

в которых можно говорить о климате. Считается, что энергия в атмосфере «обновляется» в течение двух недель, и, соответственно, можно предположить, что спустя 14 дней атмосфера уже и сама не будет знать, какова была погода сегодня. Именно поэтому опыт породил ставшую теперь обычной практику метеорологов вычислять среднемесячные значения с тем, чтобы избежать слишком быстрых колебаний данных. Можно оценить по памяти погоду за две недели или даже месяц, но нелегко предполагать, что память может сохранить сведения о погоде за сто лет, не говоря уже о тысячелетии.

Поступающее на Землю солнечное излучение поглощается, как известно, очень тонким приповерхностным слоем и преобразуется там в тепловую энергию. Приповерхностный слой, лежащий между абиссальной зоной и верхними слоями атмосферы, — то есть тот, в котором мы все живем, — является самым теплым. Таким образом, атмосфера нагревается снизу и, следовательно, находится в принципиально неустойчивом слое, где происходит непрерывная вертикальная конвекция. Конвективные процессы протекают с относительно высокой скоростью и в значительной степени обуславливают адиабатически определенные профили давления и температуры, эффективно создавая теплоту на высоте, где Земля может избавиться от нее, отправив в виде излучения в мировое пространство и защищая таким образом поверхность планеты от перегрева.

Однако океан нагревается снизу и, следовательно, находится в принципиально устойчивом слое, только в исключительных случаях изменяющемся под воздействием интенсивных горизонтальных течений. По этой причине вертикальные профили определяются преимущественно соответствующей климатической историей поверхности, и разные моря в этом смысле очень отличаются друг от друга; изменение профилей происходит чрезвычайно медленно. Представим себе, что поверхность подвергается систематическому охлаждению; в этом случае в процессе конвекции холодная вода с поверхности постоянно будет опускаться на глубину, и охлаждение поверхности повлечет за собой охлаждение воды во всем море. Поскольку теплоемкость воды достаточно велика — изменение температуры всего океана на один лишь градус соответствует целому годовому бюджету потребления Землей солнечной энергии, — процессы охлаждения также оказываются чрезвычайно медленными. Теперь представим себе обратную ситуацию — систематическое медленное нагревание поверхности. В этом случае рассматриваемый слой становится только устойчивее и эффективно блокирует вертикальный теплообмен. Описанный «диодный эффект» океана придаст возникающим климатическим изменениям температур пилообразную форму, и медленные охлаждения будут регулярно сменяться

более быстрыми потеплениями; на такие тенденции действительно указывают имеющиеся в распоряжении ученых образцы льда, полученные при бурении.

Собственно, все факты свидетельствуют в пользу того, что изменения погоды суть не что иное, как хаотический процесс, весьма чувствительный к любым, даже небольшим, возмущениям. Имея дело с подобной чувствительностью погоды к начальным и граничным условиям, можно, кажется, счесть, что любая попытка составить долгосрочные прогнозы изначально обречена на неудачу [118]. В отношении климата, впрочем, это препятствие может, в конечном счете, стать ступенькой к успеху.

Рассмотрим в качестве модели газ. Его микроскопическое состояние описывается координатами и скоростями всех составляющих его частиц, проследить которые представляется практически безнадежным делом. К счастью, хаотическая динамика такой многочастичной системы приводит ее к эргодичному поведению, позволяющему успешно применить к системе статистическое описание. Путем введения новых эмпирических величин (таких, как температура и энтропия) удастся достичь поразительного упрощения при моделировании почти всех важных макроскопических характеристик в рамках термодинамики, переставшей с некоторых пор быть просто механической теорией.

Возможность систематического исключения быстрых микропеременных является предпосылкой для формулировки самых разнообразных практических законов, и примерами тому могут послужить химические законы реакций, закон диффузии (называемый еще законом Фика), закон Ома и т. д. Соотнеся все вышесказанное с климатом, можно с некоторой долей уверенности (или хотя бы с крепнущей надеждой) предположить, что и атмосфера ведет себя подобным образом (то есть эргодично), и на больших временных интервалах все флуктуации погоды можно не учитывать; достаточными в качестве релевантных средств описания оказываются определенные средние значения и корреляционные функции.

Одной из самых важных величин такого рода является средняя температура поверхности Земли (в частности, уже упоминавшаяся SST¹). Усреднение осуществляется через некий подходящий большой промежуток времени, который хотя и мал во временном масштабе климатических изменений, все же достаточно значителен для временной шкалы погодных явлений. При этом предпочтительнее усреднять (по возможности) в координатной системе, которая не вращается вместе с Землей, а жестко связана с осью Солнце–Земля (усреднение в описанном выше стробоскопическом

¹ См. прим. к с. 124.

представлении позволяет учесть обе точки зрения). Выбор координатной системы основан на том факте, что облака на дневной и ночной сторонах контролируют земной энергетический баланс совершенно разными способами. Это весьма существенно влияет на величину парникового эффекта, поскольку облачный покров на дневной и ночной стороне различается статистически лишь незначительно, а облака, как известно, имеют некий «типичный» (особенно в тропиках) суточный пробег.

В качестве заключения достаточно подробного описания движения энергетических потоков в атмосфере можно привести следующую гипотезу: на основании эмпирических данных (полученных с помощью спутников) может быть установлена жесткая взаимосвязь, представляющая временное изменение средних значений SST в виде функционала пространственного распределения температуры. С учетом такой корреляции атмосферу следует рассматривать уже не эксплицитно, а лишь как «параметрическую» обратную связь SST с самой собой, в виде совокупности всех сложных, но быстрых процессов. Здесь же имеются и указания на реализуемость такого рода представления; так, к примеру, ряд исследований показывает, что среднемесячное количество воды в атмосфере в некоторой выбранной точке можно приблизительно вычислить как простую функцию от температуры поверхности воды в этой точке. Однако это количество воды, как уже подчеркивалось в предыдущем разделе, образует важнейшие клапаны, обеспечивающие приток и отток энергии.

Не могут и не должны быть исключены из составляемой нами «формулы климата» и определенные океанические процессы, рассмотреть которые нам еще предстоит. Но прежде чем мы этим займемся, обратимся все же еще раз к «малым и быстрым» величинам: к тем, которые характеризуют взаимодействие океана и атмосферы, и к тем, которые относятся к пространственному распределению энергии (в частности, к распределению энергии в вертикальных слоях в самом океане).

Океан состоит из трех качественно очень различных слоев. Самый верхний — пограничный между океаном и атмосферой — слой можно назвать «кожей» океана, и толщина его составляет всего несколько миллиметров; такая «кожа» способна настроиться на окружение в течение считанных секунд. Под «кожей» находится следующий слой — смешанный поверхностный слой, толщина которого, как правило, варьируется в пределах от нескольких десятков до нескольких сотен метров. Этот слой не подвергается прямому воздействию света, ветра и волн; должны пройти часы и даже дни, прежде чем исчезнут, скажем, последствия шторма или «следы» прошедшего судна; водовороты, течения или тепло могут сохраняться здесь месяцами. Временная шкала последнего, глубинного слоя, или абиссаль-

ной зоны (средняя толщина его равна примерно 4000 м), вмещает в себя тысячелетия, и поэтому образует собственно климатическую машину.

Приняв за условные ориентиры массу и теплоемкость океана и атмосферы, ученые вычислили, что то количество тепла, которое повысило бы температуру океана примерно на 0.001°C , вызвало бы повышение средней температуры в атмосфере на 1°C . Таким образом, становится ясно, что едва поддающиеся измерению изменения в мировом океане могут оказывать весьма существенное влияние на атмосферный климат. Уже один только поверхностный слой (с одной стороны, реагирующий на атмосферные процессы значительно быстрее, нежели глубинный, а с другой стороны — куда более инертный, чем атмосфера) имеет теплоемкость, превышающую теплоемкость атмосферы в 10–100 раз. Предположительно, именно этот слой и «отвечает» за изменения во временных интервалах, исчисляемых годами и десятилетиями. Тепловое расширение этого слоя, ставшее результатом глобального потепления, могло быть причиной повышения уровня моря.

Атмосфера, поверхностный слой и абиссаль сообщаются между собой только посредством своего рода «бутылочных горлышек», свойства и характеристики которых стоит рассмотреть подробнее. Все три названные нами системы «живут» в отличных друг от друга характерных масштабах времени и обладают очень разными способностями к сохранению тепла. Континентальный климат (допустим, в пустыне) определяется скоростью изменения температуры в атмосфере; морской климат — напротив, несет на себе печать поверхностного слоя. Воздействие абиссальных зон значительно растянуто во времени и обнаруживается лишь в средних величинах, вычисляемых на больших интервалах времени. Представим климатический аттрактор в виде пучка траекторий в некотором фазовом пространстве: он определяется в величинах, относящихся к шкалам абиссальной зоны. Добравшись до тонкой структуры отдельной траектории такого пучка, мы обнаружим, что воздействие океанического поверхностного слоя есть не что иное, как «аттрактор в аттракторе». Углубившись же в тонкую структуру, мы наткнемся на неустойчивость и изменчивость рядовых погодных явлений. При грубом рассмотрении все перечисленные тонкие структуры представляют собой спирали, периодические петли годовых и суточных циклов.

Взаимоотношения между атмосферой и поверхностным слоем сводятся, главным образом, к двум чрезвычайно отличным друг от друга процессам. Во-первых, это передача механических сил из атмосферы в поверхностный слой (иными словами, волнение на море), турбулентное перемешивание воды и мировая система океанических течений, которую можно рассматривать как «ответ» на воздействие мировой системы воздушных потоков; эти

течения переносят колоссальное количество тепла из низких широт в высокие. Во-вторых, это существующий между атмосферой и поверхностным слоем мирового океана процесс обмена теплом и водой, который осуществляется благодаря энергетической поддержке со стороны системы воздушных течений (проще говоря, ветров), и наряду с осадками (снег, дождь, роса и прочие) охватывает все явления, описываемые понятием «скин-эффект», то есть «поверхностный эффект».

Поток энергии — не всегда, но преимущественно — направлен из воды в атмосферу. Потери тепла на поверхности воды можно условно разложить на три компонента: тепловое излучение (в мировое пространство, в облака или в пар непосредственно над водой), теплопередачу из воды в воздух или наоборот (этот эффект растянут во времени и сравнительно невелик) и, наконец, испарение, которое связывает значительное количество энергии и в виде скрытой теплоты переносит эту энергию из воды в воздух.

Отводимое таким образом с поверхности воды тепло попадает туда с больших глубин, преимущественно в результате вертикального турбулентного обмена, происходящего в тонком граничном слое — уже описанной выше «коже» толщиной всего 1–2 мм, за счет молекулярной теплопроводности. Поскольку процесс молекулярного теплообмена протекает значительно медленнее, чем турбулентная передача тепла в более глубоких слоях, создается достаточно большой вертикальный перепад температур: согласно данным, полученным со спутников в результате съемок в инфракрасном диапазоне, обычно разность температур между поверхностным и более глубокими слоями составляет примерно 1° С. Мощность проявления поверхностного эффекта зависит от скорости, с которой в воде производится тепло, и скорости, с которой воздух отводит получаемые от воды теплоту и влагу, а также от соотношения теплового излучения самой воды и отраженного ею излучения атмосферы и облаков, — то есть в итоге мощность скин-эффекта определяется температурой воды и воздуха, относительной влажностью и скоростью ветра, а также распределением воды и водяного пара в воздухе не только непосредственно над поверхностью воды, но и на больших высотах.

Чем же объясняется столь важное значение этого, казалось бы, незаметного поверхностного эффекта для климата всего земного шара? С одной стороны, у нас сегодня имеются специальные спутники, предназначенные для регистрации температуры инфракрасного излучения мирового океана. Такие спутники используются уже несколько лет (с 1991 года к ним присоединился и европейский ERS-1), однако из-за поверхностного эффекта они в действительности замеряют температуру не самой воды, а температуру, примерно на 1° С (в зависимости от места и времени) отличную от нее в результате атмосферного влияния. Естественно, эту разницу меж-

ду действительными и получаемыми значениями хотелось бы знать точно, чтобы учесть ее при измерениях, ведь несколько десятых градуса означают существенную ошибку при определении, допустим, количества тепла, сохраненного поверхностным слоем. С другой стороны, вся энергия, попадающая из мирового океана в атмосферу, должна пройти сквозь игольное ушко скин-эффекта. Располагая сведениями о перепаде температур в тончайшем поверхностном слое (добытых, к примеру, с помощью спутников), ученые смогут подробно и полно фиксировать на протяжении долгого времени процессы обмена энергией и водой между океаном и атмосферой и таким образом экспериментально получить наиболее значительные ключевые величины, характеризующие климатические процессы.

Обратимся теперь к следующему уровню — к тепловому обмену между поверхностным слоем и абиссальной зоной. Прежде всего следует пояснить, в чем, собственно, заключается суть проблемы и почему «наружные», поверхностные слои океана столь разительно отличаются от «внутренних», глубинных. Начнем с того, что подъемные силы в воде образуют значительный импульс для движения воды и во многом определяют квазистационарное состояние, в котором пребывает мировой океан. Импульс вызывает движение в тех случаях, когда под одним и тем же давлением находится вода различной плотности. В этих условиях вода меньшей плотности (более «легкая») поднимается вверх, в области меньшего давления, а вода большей плотности (более «тяжелая») под воздействием гравитационных сил опускается вниз, на большую глубину, достигая тем самым состояния с минимальной потенциальной энергией, в котором вода на определенной глубине повсюду обладает одинаковой плотностью. Плотность воды в мировом океане зависит от ее температуры, от содержания в ней солей и от давления, под которым она находится. Океан создает, таким образом, устойчивое вертикальное расслоение: плотность воды в нем монотонно растет с увеличением глубины.

Как известно, Солнце нагревает только самые верхние слои воды. Теплая вода легче холодной, а потому нагретые слои стабильно остаются наверху, а холодные — внизу. Процессы теплообмена выравнивают возникающую при этом разность температур, но бесконечно медленно, а устойчивость расслоения препятствует конвекции. Ветер и волны, хотя и перемешивают верхние слои, не достигают все же достаточной глубины, ведь для поднятия наверх холодной (и потому «тяжелой») воды требуется большое количество энергии.

Нагревание за счет солнечного излучения происходит в тропиках значительно интенсивнее, нежели на полюсах. По этой причине, в принципе, холодные воды с полюсов и направляются в экваториальные области, что

компенсируется водами, несущими тепло из низких широт в высокие. Поскольку глубины мирового океана заполняет холодная вода, процесс этот — начавшийся, по предположениям ученых, уже очень давно — практически закончен. Итак, на поверхности океана находится относительно теплая вода, а в глубине — относительно холодная. Теплую воду от холодной отделяет так называемый «слой скачка», внутри которого (толщина этого слоя составляет несколько десятков метров) происходит резкое понижение температуры.

Итак, обмен между поверхностным слоем и абиссальной областью вследствие сложившегося устойчивого расслоения практически невозможен, существует всего лишь несколько «медленных» процессов, поддерживающих этот обмен несмотря на все препятствия. Прежде чем мы перейдем к более подробному рассмотрению таких процессов, остановимся еще на одном моменте. Если после того, как было достигнуто устойчивое состояние, должно было произойти глобальное похолодание, то этот механизм оказался бы вновь запущен для обмена холодной воды абиссальных областей на еще более холодную. Как только климат снова потеплеет, эти «врата» опять окажутся закрыты, так что абиссаль всегда запечатлевает холодные периоды и в сменяющем холод потеплении чрезвычайно медленно забывает эту информацию. Разумеется, в действительности это соответствует истине лишь условно, так как ниже определенной температуры (которая зависит от давления и содержания в воде солей) вода снова расширяется, и как только абиссаль заполняется водой наибольшей плотности, этот клапан прекращает действовать.

Действительная температура на глубине около 4000 м в больших океанах колеблется от $+2^{\circ}\text{C}$ до $+4^{\circ}\text{C}$, а содержание солей составляет примерно 3,6 % (36 г в килограмме воды). При таких условиях максимум плотности воды находится, в зависимости от давления, между -4°C и -5°C , а при давлении, царящем на глубинах более 800 м понятие максимума плотности воды вообще теряет смысл. Правда, при погружении вода нагревается за счет сжатия, однако менее чем на 1°C (всего лишь $0,3^{\circ}\text{C}$, если воду нулевой температуры погрузить на глубину 4000 м). Соленая вода с максимальной плотностью имеет на поверхности температуру -4°C , а при погружении -3°C . Глубокие подземные воды, таким образом, очевидно теплее, чем вода с максимальной плотностью. Мы, к сожалению, пока не знаем точно, что именно могла бы рассказать об истории земного климата такая температура, однако, согласно предположениям ученых, этот феномен в значительной степени обусловлен бассейновой структурой абиссали, где вода из одного бассейна в смежный может попасть лишь «перелившись через край» (обладая при этом меньшей плотностью).

В наше время абиссальные конвекционные процессы считаются спорадическими и наблюдаются в очень немногих районах мирового океана. (Вполне может быть, что глубинные воды, до сих пор памятуя — как раз в том смысле, о котором мы упоминали — о последнем ледниковом периоде, продолжают блокировать обмен.) К таким районам можно отнести Гренландское море и море Узделла. При замерзании морской воды образуется пресный лед, а морская соль в очень высокой концентрации остается в той части воды, которая еще не успела замерзнуть. Если эта вода достаточно холодна и содержит достаточно соли, то она становится настолько тяжелой, что может опускаться даже на очень большую глубину. Насколько нам известно, такая конвекция происходит, по большей части, не в той «упорядоченной» форме, что знакома нам по эффекту Бенара («ячеистые структуры»), а напоминает, скорее, об облаке, пролившемся стремительным дождем, капли и струи которого на пути к земле смешиваются со своим окружением. Поскольку при этом общее количество глубинных вод увеличивается, слой скачка по всему мировому океану тоже чуть-чуть поднимается. Глубоководные шторма, к примеру, так или иначе выравнивают этот уровень, смешивая под поверхностным слоем воду, поднятую в прилегающих к слою скачка областях.

Другой важнейший процесс является результатом разделения единого мирового океана на множество относительно замкнутых морей. Красное и Средиземное моря, к примеру, сообщаются с мировым океаном только узкими и мелкими проливами — Баб-эль-Мандебским и Гибралтарским. Холодные глубинные воды, идущие с полюсов, едва ли достигают таких морей, и потому каждое из них обзавелось собственной абиссалью, обладающей некими только ей присущими свойствами. В Красном и Средиземном морях, скажем, абиссаль отличается довольно высокой температурой и высоким содержанием солей благодаря быстрому испарению и сильному нагреванию поверхности. Существующая здесь (несмотря на тепло) высокая плотность позволяет глубинным водам, оставаясь много ниже уровня моря, медленно стекать в Атлантический или Индийский океаны и таким образом вносить свою — и, заметим, весьма существенную — долю энергии в мировую абиссаль.

Все эти массы воды, собранной из самых разных мест и обладающей самыми разными свойствами, движутся на большой глубине, не подвергаясь воздействию быстрых колебаний температуры воздуха, возникающих из-за изменений погоды, суточных и годовых циклов (например, сезонных штормов или пассатов). При этом они подчинены внутренним процессам старения и перемешивания, в особенности в тех областях, где соприкасаются воды различных типов. Незначительная скорость производства «новой» во-

ды (контакт будущей глубинной воды с воздухом) эффективно способствует усреднению по всем быстрым флуктуациям; таким образом, в абиссали существует квазистационарное состояние поразительной пространственной и временной устойчивости. Это состояние является одновременно и своего рода записью климатической истории последних тысячелетий, и активным участником климатических процессов следующего тысячелетия.

К сожалению, мы только-только начали понимать, какие именно истории могла бы рассказать нам великая книга под названием «Океан». Для того, чтобы расшифровать эти письма, необходимо провести не только огромное количество измерений, но и значительно продвинуться в теории таких сложнейших необратимых термо- и гидродинамических явлений, как потоки, старение и перемешивание.

6.3. Устойчивость климата

Наша модель климата, представляемого в виде паровой машины, состоит из трех подсистем, каждая из которых действует в собственных временных рамках (то есть имеет собственную временную шкалу) и обладает способностью тем или иным образом сохранять энергию. Речь идет об атмосфере (ее временную шкалу составляют дни и недели), океаническом поверхностном слое (месяцы и годы) и абиссали (века и тысячелетия). Приток и отток энергии регулируется, в основном, водой, содержащейся в атмосфере; эта вода в форме водяного пара и облаков действует при поглощении и передаче энергии либо как охладитель, либо как нагреватель — в зависимости от транспортных потоков и распределения плотности каждого из двух названных агрегатных состояний.

Океан является мощным буфером, накапливающим тепло и атмосферные газы (в частности, углекислый газ). Однако действует он отнюдь не как простой транспортер, на который что положишь, то, спустя некоторое время и в другом месте, и возьмешь: свойства, запечатленные сейчас, к примеру, в океанической циркуляции, в будущем вернуться в атмосферу, распределенные в пространстве и времени; иными словами, информация, которой в данный момент располагает океан, является интегральной функцией отклика на изменения климата в давно прошедшие эпохи в самых разных уголках Земли.

Многие ученые (и авторы в том числе) склоняются к мнению, что, занимаясь климатом и погодой, нельзя обойти молчанием такую фигуру, как хаотический аттрактор — в том понимании, которое вкладывается в этот термин теорией нелинейных динамических систем. Поток лучистой

энергии, изливающийся на Землю, по ряду астрономических причин подвергается периодическим колебаниям, на которые планета реагирует нелинейной динамикой своих океанов и атмосферы. Сюда относятся различные стохастические наложения, возникающие, к примеру, из-за извержений вулканов, и медленные сдвиги, вызываемые дрейфом материков и эрозией горных пород, а также биологическая эволюция и развитие техники. Если же существует некий «климатический аттрактор», то он представляет собой довольно-таки сложный математический объект. И хотя все попытки извлечь такой аттрактор из массы имеющихся в распоряжении ученых геологических, океанологических и метеорологических данных до сих пор не увенчались большим успехом, мы все же предлагаем читателям — просто несколько опережая время — исходить в дальнейшем из того, что такой аттрактор уже найден.

Насколько же устойчив наш гипотетический аттрактор? Такой вопрос обычно подразумевает локальную устойчивость траекторий аттрактора в фазовом пространстве, то есть является, по сути, вопросом о том, насколько скачкообразны и иррегулярны эти траектории и в каких пределах могут находиться происходящие из года в год изменения погоды. Мы этот вопрос пока оставим в стороне; прежде займемся областью притяжения аттрактора. Если принять во внимание ближайших соседей Земли — Венеру и Марс, — то становится очевидно, что в весьма схожих условиях наряду с земным аттрактором существуют еще и другие. Пока никто не может со всей определенностью сказать, избежала ли Земля незавидной участи своих соседей просто благодаря счастливой случайности или же наш аттрактор описывает единственно возможное поведение планеты. Однако с полной уверенностью мы можем утверждать, что земной климат должен находиться в действительно устойчивом состоянии. Почему?

На сегодняшний день мы располагаем достаточно точной картиной развития Земли в течение последнего миллиарда лет. На протяжении этого колоссального отрезка времени Земля устойчиво сохраняла температуру около 300 К с диапазоном колебаний примерно 10%. Такую устойчивость следует счесть очень хорошей, принимая во внимание 6000 К солнечного пекла и 3 К межзвездной стужи. С тех пор, как на земном шаре возникла жизнь, ее существование, очевидно, ни разу не подвергалось опасности, грозящей ей полным исчезновением. Что же изменилось? Атмосфера первоначально содержала, вероятно, 10–30% углекислого газа — сегодня мы можем наблюдать только следы его присутствия в атмосфере. Солнечное излучение за этот промежуток времени, должно быть, также изменилось вполне измеримо. Скорость вращения Земли, замедляемого приливами и отливами, когда-то была, предположительно, в 3–5 раз больше сегодняшней

(а большие планеты до сих пор вращаются с прежней скоростью). Материки поразительным образом покинули свои исходные позиции, и, соответственно, полностью сменила «режим работы» океаническая система тепловых потоков. Не следует забывать, что раскол материков и образование складок, ставших впоследствии горными массивами, должны были быть связаны с активной вулканической деятельностью, в результате которой в атмосферу выбрасывалось огромное количество пыли и газов. А уж последствия столкновения Земли с чудовищно крупным телом (оставленные им на Луне и Меркурии шрамы до сих пор бросаются в глаза) — пожалуй, никому не под силу представить себе эту картину полностью. Жизнь «отравила» океан и атмосферу кислородом, покрыв обширные области торфяными болотами и известняковыми и меловыми породами. При этом Земля, с космической точки зрения, все это время вела себя скорее как прецизионный термостат, нежели как свеча на ветру. Уровень воды в течение длительного периода едва ли мог значительно измениться (под словом «значительно» мы имеем в виду изменения, превышающие несколько десятков метров; для людей такие перемены равнозначны катастрофе, однако если смотреть на них с позиций истории Земли, они суть не более, чем флуктуации). Если бы в процессе горообразования не возникали все новые и новые горы, то все существующие горы атмосферная эрозия разрушила бы примерно за сто миллионов лет. Под водой все это происходило на несколько порядков медленнее; таким образом, как только земля оказывается под водой, эрозия практически прекращается. Все материки становятся плоскими морями, и гипсографическая кривая Земли (рис. 6.3) приобретает очень широкий максимум при нулевой высоте. На реальной гипсографической кривой имеются и большие высоты, но вместе с тем только одно выраженное плато — при нуле высоты (другое плато на кривой располагается на высоте океанической коры, однако его возникновение объясняется несколько иными причинами). Судя по большинству равнин, существующих на современных материках (на одной из них, кстати, живут и авторы этой книги), современный нам уровень воды в мировом океане несколько ниже того среднего значения, что сохранялось неизменным на протяжении длительного периода времени; поэтому представляется весьма вероятным, что маятник вновь качнулся в другую сторону (или, может, это случится очень скоро, или через тысячи лет). Никто сегодня не может сказать с полной уверенностью, какую роль играет человечество в этом процессе, и насколько эта роль важна.

Существует ряд исключительно серьезных соображений по поводу того, что стабильность земного климата на протяжении столь длительного периода времени обусловлена следующим обстоятельством: хотя различные условия из числа вышеперечисленных существенно изменились, их

влияние, однако, могло быть в значительной степени компенсировано. Исключать такую возможность, разумеется, нельзя; однако с научной точки зрения представляется более плодотворным ответить сначала на вопрос, касающийся стабилизирующих обратных связей: могли ли такие связи оказаться порождением внутренних сил системы и возможно ли найти им объяснение, не прибегая к услугам неведомых добрых духов.

Обратимся сначала к графику распределения влажности в атмосфере; такой график можно получить, произведя измерения при помощи шара-зонда (рис. 6.4). На высоте примерно 15 км имеется выраженный температурный минимум, который играет роль, схожую с ролью крышки на кастрюле: над ним воздух остается почти совсем сухим. Такая «холодная ловушка» с температурой около -80°C существует во всех климатических зонах в любое время года. Почему же эта крышка настолько значима? Дело в том, что ее существование обусловлено соотношением силы тяжести и теплового движения частиц газа. Газ в состоянии теплового равновесия при определенной температуре состоит из частиц, движущихся с самыми разными скоростями. Плотность распределения $f(v)$ частиц, обладающих некоторой скоростью v , определяется распределением Максвелла – Больцмана:

$$f(v) \sim v^2 \exp(-mv^2/2kT).$$

При некоторой определенной температуре T всегда существуют и частицы с более высокой скоростью v , причем их количество тем больше, чем меньше масса m частиц. Каждая планета или звезда характеризуется легко вычисляемой второй космической скоростью: тело, оторвавшееся от поверхности планеты (или звезды) со скоростью, превышающей это значение, может никогда не вернуться на поверхность. Именно это и происходит: частицы газа непрерывно «улетучиваются» из внешних слоев атмосферы в мировое пространство, и скорость протекания этого процесса можно вычислить, исходя из температуры атмосферы, размера и массы планеты. Небольшие небесные тела — скажем, Луна и Меркурий — уже лишились таким образом своих газов.

Легкие атомы, как уже было отмечено, отличаются от тяжелых значительно большей подвижностью. Когда вода достигает верхних слоев атмосферы, молекула под воздействием мощного солнечного излучения легко расщепляется на водород и кислород. Водород, легчайший из всех известных химических элементов, навсегда покидает планету, отправляясь в мировое пространство, а химически активный кислород тем временем занимается поисками нового «партнера». Если бы вода непрерывно попадала с Земли в верхние слои атмосферы, наша планета к настоящему времени, возможно, оказалась бы уже иссушена. (Поскольку Венера практически лишена воды,

было решено выяснить, может ли этим путем исчезнуть с планеты вся вода. Максимальные потери, согласно оценке, примерно равны всего лишь четверти земных запасов воды на протяжении всего существования Венеры. С другой стороны, наиболее приемлемым и достоверным объяснением высохшей Венеры представляется «набравший силу» парниковый эффект, и выполненные с учетом такого допущения вычисления, в принципе, полностью этого не исключают.)

Скорость, с которой водород сегодня покидает Землю, оценивается в $300\,000\,000$ атомов/см²·с, что соответствует всего 80 000 т водорода в год. При массе мирового океана в 1.5 триллиона тонн (доля водорода составляет примерно 10 %) пройдет не меньше 2 000 миллиардов лет, прежде чем Земля лишится всей своей воды. Таким образом, мы видим, что описанная «холодная ловушка» обеспечивает нашу планету своего рода «водонепроницаемым» покровом.

Раз уж сложилось так, что земной климат пребывает в устойчивом хаотическом аттракторе, и это состояние поддерживается преимущественно за счет гибкой и быстродействующей «вентильной» системы (водяной пар-облака), то можно надеяться, что такой системе под силу также окажется и эффективное выравнивание и компенсация (в определенных пределах) всех небольших изменений параметров Солнца, состава атмосферы и т.п. посредством перераспределения все тех же облаков и водяного пара. Однако те факты, которыми располагает современная наука, не дают надежного основания ни для пессимизма, ни для оптимизма: и то, и другое преждевременно, но все же может послужить поводом к более интенсивному изучению данной проблемы.

В мире сейчас много говорится о парниковом эффекте (сам термин был предложен в 1896 году Аррениусом), и в качестве его первопричины общепринято представлять углекислый газ CO₂. Однако положение совсем не так просто и очевидно, как может показаться на первый взгляд. Прежде всего прочего следует отметить, что без парникового эффекта температура повсюду на Земле была бы примерно на тридцать градусов ниже, а жидкий океан отсутствовал бы вовсе. Таким образом, становится ясно, что говорить следует прежде всего об изменении эффекта. Разумеется, верно, что повышение концентрации углекислого газа в атмосфере ведет к тому, что поглощается больше инфракрасного излучения и тем самым затрудняется доступ теплового излучения к поверхности Земли; однако при этом речь идет лишь об относительно небольшой доле по сравнению с водой и водяным паром. Парниковый эффект, создаваемый водяным паром, оценивается значением 100 Вт/м², углекислым газом — 50 Вт/м², а облаками — всего 30 Вт/м². Заметим, что о существующем в настоящий момент рас-

пределении в атмосфере водяного пара и капель можно только высказать предположение, то есть приведенные цифры суть результирующие значения неких больших вкладов, которые в случае облаков в значительной мере взаимно компенсируются. При возникновении климатических изменений эти значения для H_2O могут благодаря обратной связи стать совершенно иными, менее чувствительными к концентрации углекислого газа. Действительно, в атмосфере в течение последних десятилетий наблюдается систематическое повышение концентрации CO_2 , которое довольно-таки уверенно можно связать с использованием человечеством ископаемых горючих веществ. Если же рассматривать только прямое воздействие газов, появление которых в атмосфере имеет антропогенные причины, то они удерживают в атмосфере примерно на 1% (то есть около 3 Вт/м^2) от общего количества энергии больше, чем это было в доиндустриальную эпоху.

Итак, вывод о том, что такое повышение концентрации углекислого газа в атмосфере должно стать причиной глобального потепления на Земле, представляется поспешным, — ввиду того, что климатическая система нашей планеты снабжена комплексной обратной связью. Основанный на недопустимой линейной экстраполяции контуров управления, этот вывод гласит, что непосредственное воздействие CO_2 (то есть уменьшившийся в результате усиления инфракрасного поглощения отток тепловой энергии) является также косвенным указанием на то, что все остальные управляющие факторы — океанические течения, ветер, облака и прочие — грядущего потепления, в принципе, не принимают происходящие изменения к сведению и остаются к ним совершенно равнодушны. Это абсолютно противоречит всему, что мы знаем об этих чувствительных величинах: они отреагируют, причем весьма недвусмысленно, уменьшив, по всей видимости, воздействие климатических возмущений; при неблагоприятных обстоятельствах эта реакция может оказаться и еще более сильной.

Все вышесказанное не означает, что связь, обнаруживаемая между CO_2 и потеплением, непременно является ошибкой; это значит лишь, что подобный вывод в настоящее время в лучшем случае может представлять собой рабочую гипотезу, но никак не полностью достоверные научные данные. Даже если через какое-то — причем немалое — время путем измерений удастся подтвердить существование причинно-следственной связи между повышением концентрации CO_2 в атмосфере и глобальным потеплением (имеются данные о последних 100 000 лет, свидетельствующие о возможности такого рода корреляции), один только этот факт дает науке не больше, чем сравнение данных о выделении в атмосферу углекислого газа и данных об изменениях за последние 10 лет роста некоего ребенка, родившегося в 1980 году. Нам удастся установить хорошее согласие трендов обеих кри-

вых, но было бы преждевременно выводить отсюда причинные связи. Если две величины — скажем, A и B — коррелируют друг с другом, то и A может казаться следствием B , и B может оказаться следствием A , или же, к примеру, и A , и B могут иметь некую общую причину. Решить этот вопрос можно только путем изучения действующих механизмов A и B , но никак не сравнением двух кривых. Можно ли совершенно исключить вероятность того, что глобальное потепление, например, способствует высвобождению некоторого количества углекислого газа из необъятных кладезей мирового океана, и, следовательно, причинная связь как раз обратна установленной нами? Холодная вода на полюсах ежегодно поглощает около 100 миллиардов тонн углерода (мту) в CO_2 , теплые экваториальные воды примерно равное количество его высвобождают; 100 мту ежегодно «путешествуют» по живым организмам; люди производят дополнительно всего 10 мту, и половина этого количества остается в воздухе; в атмосфере находится в общей сложности около 750 мту, тогда как в мировом океане в растворенном виде содержится 40 мту — таков баланс, колоссально зависящий от самих климатических процессов, и человечеству отведена в нем лишь второстепенная роль.

Например, около 1550 года в течение примерно столетия во всем мире воцарился так называемый «малый ледниковый период»; средние температуры этой эпохи были приблизительно на 1°C ниже, чем в наше время. Причины такого похолодания нам неизвестны, однако подобные факты убедительно доказывают, что климат и безо всякого вмешательства человека ни в коей мере не является чем-то абсолютно постоянным. Лишь когда мы действительно разберемся в основных действующих механизмах и обратных связях и проведем их количественное исследование, мы сможем осторожно приблизиться к такого рода суждениям. До тех пор мы живем с риском пожать когда-нибудь в будущем неизвестные пока плоды человеческой деятельности. Избежать ошибок можно лишь одним способом — ничего не делая. Это правило — в нашем контексте оно сводится к профилактическому сокращению до неизбежного минимума всех антропогенных изменений — остается пока, пожалуй, единственным, с чем можно согласиться не раздумывая. Впрочем, и такой подход не дает гарантии того, что никаких глобальных изменений климата на Земле никогда не произойдет.

Данные, собранные по всему миру с 1850 года до наших дней, свидетельствуют о том, что температура за это время поднялась на 0.5°C . Повышение температуры происходило «в несколько приемов», и при этом процессы на суше отличались от процессов на море, а изменения, случившиеся в северном полушарии, отличались от таковых в южном. С 1980 года каждый последующий год оказывается теплее предыдущего, и несмотря на

все подъемы и спады существует, кажется, линейная тенденция к повышению температуры в пределах 0.5°C за каждые сто лет. Тщательное наблюдение за содержанием углекислого газа в атмосфере было начато только в 1957 году, и уровень его с тех пор поднялся с 0.0315% до 0.0354% (по данным 1990 года). Широко известно о таянии альпийских ледников, начавшемся еще в средние века, однако замерзания Балтийского моря, регистрируемые в Финляндии с 1720 года, продолжают и в нашем столетии, и нет никаких признаков, что они прекратятся; равным образом, ни с одной из полярных шапок на протяжении последних двадцати лет не происходит никаких систематических изменений. Даже на фоне интенсивных международных исследований положение сейчас таково, что причинная связь между увеличением содержания в атмосфере углекислого газа и потеплением климата хотя и предполагается, но в настоящий момент все же не может быть окончательно подтверждена.

ГЛАВА 7

Эволюция жизни

В наши дни становится все более и более очевидным, что познание сущности жизни возможно только через познание ее происхождения.

А. И. Опарин.

Жизнь, ее природа, происхождение и развитие¹

7.1. Самоорганизация и жизнь

Старейшая научно обоснованная теория возникновения жизни принадлежит А. И. Опарину [134]. Одна из самых молодых и основанных уже на новейших научных данных и современных экспериментах теория биогенеза разработана Манфредом Эйгеном и учеными его школы [47, 50, 49, 51, 53]. Мы попытаемся перебросить мостик от одной теории к другой; при этом хотелось бы подчеркнуть, что нас в данном случае интересуют не столько химические и биологические подробности, сколько путь, сделавший возможным переход от случайного, с физической точки зрения, синтеза к простейшим каталитическим структурам, на которых дарвиновский принцип отбора впервые мог быть эффективно осуществлен на молекулярном уровне, — путь, направивший и значительно ускоривший дальнейшее развитие жизни на нашей планете.

Предварим рассмотрение конкретных моделей несколькими принципиальными замечаниями касательно той роли, которую играют в описываемых процессах самоорганизация и второй закон термодинамики. Еще в девятнадцатом веке сложилось убеждение, что зарождение жизни противоречит физическим законам. Так, к примеру, в 30х–40х годах девятнадцатого века ведущий физиолог того времени Иоганнес Мюллер в своих

¹Цит. по изд. А. И. Опарин. Жизнь, ее природа, происхождение и развитие. М.: Наука, 1968. С. 29. — *Прим. перев.*

лекциях в Берлинском университете постулировал существование некоей особой «жизненной силы», так называемой *vis vitalis*. Ученик Мюллера студент-медик Герман Гельмгольц, опираясь на эксперименты и теоретические обобщения, сумел доказать существование единых законов, которым подчиняются и живая, и неживая материя. Научные данные, полученные Гельмгольцем, легли в основу первого закона термодинамики. К совершенно аналогичным выводам в результате своих исследований пришел и врач Юлиус Майер, утверждавший, что солнечное излучение является непосредственным источником потока ценной энергии, которая поддерживает жизнь на Земле. Эти идеи получили развитие в работах Людвига Больцмана, который по праву может быть назван предтечей теории эволюции жизни.

Однако подлинный прорыв в понимании взаимосвязи между существованием жизни и вторым законом термодинамики был совершен уже другими учеными: Оствальдом, Шрёдингером, фон Берталанффи и Пригожиным. Именно этим исследователям мы обязаны представлением о том, что живые существа принципиально следует рассматривать как открытые системы [158, 145]. Термодинамика же открытых систем совершенно очевидно допускает структурообразование и самоорганизацию, что и было с особой четкостью показано в работах ученых, принадлежавших к брюссельской школе Пригожина. Эйген [47] приложил полученные научные результаты к проблеме биогенеза. Одним из важнейших итогов этих общих исследований стал следующий вывод: Земля, представляющая собой открытую систему, около 4000 миллионов лет назад оказалась в состоянии неустойчивости вследствие флуктуаций, носивших характер самоорганизации на молекулярном уровне. Таким образом, возникновение различных форм жизни стало наконец закономерным и неизбежным процессом. У его истоков, однако, стояли случайные события, приведшие к образованию структур, способных к эволюционному (в дарвиновском смысле) развитию.

Последствия событий, вызванных упомянутыми флуктуациями, сегодня уже нельзя восстановить во всех подробностях, поскольку следы этих событий, так сказать, теряются среди геологических, метеорологических и биологических процессов, имевших место на Земле на протяжении последних нескольких миллиардов лет. И все же данные, которыми располагают молекулярная биология и науки, изучающие прошлое нашей планеты, позволяют создать некую многоступенчатую схему, где отражено возможное протекание земного биогенеза. Случайный характер биогенеза предполагает и еще одно условие: непременно должен существовать не один, а по крайней мере целый ряд более или менее вероятных сценариев развития событий. От каждого из этих гипотетических сценариев требовалось, что-

бы их отдельные фазы могли быть верифицированы в ходе экспериментов и/или на основании теоретических моделей и чтобы вероятность случайных событий, оказывающих влияние на переход от одной фазы к другой, была достаточно велика. Это эвристические принципы достоверности и непрерывности, сформулированные еще Ленингером (в 1971 году), а затем развитые Романовским, Чернавским и Степановой (1975).

Все известные к настоящему моменту гипотезы протекания биогенеза содержат пока отдельные элементы, не совсем соответствующие приведенным нами принципам. И все-таки, несмотря на это обстоятельство, от дальнейшей разработки таких конкретных моделей отказываться ни в коем случае не следует. Манфред Эйген сформулировал свою основную позицию (к которой мы присоединяемся) следующим образом:

Для понимания сути биологической самоорганизации нам следует исходить из конкретных моделей, о релевантности которых можно судить только по наблюдениям или экспериментам.

Хотя науке известно огромное количество примеров самоорганизующихся систем, поистине сложна лишь одна из них — сама *жизнь*. Всем известно, что процесс возникновения жизни на Земле должен нести на себе отпечаток неимоверного многообразия отдельных элементов молекулярных структур, каталитических механизмов, явлений обратной связи и внешних условий. Многие теории занимаются целенаправленным рассмотрением определенных классов таких элементов; наша же основная цель сводится, скорее, к попытке обнаружить некий термодинамический и информационный «скелет» этой единственной в своем роде иерархии самоорганизации. Такой «скелет» в значительной степени независим от случайностей внешних условий и представляет собой только общий организационный аппарат всего организма. Основные элементы «скелета» (в их исторической последовательности) представлены в виде схемы на рис. 7.1.

Эта схема охватывает три иерархические ступени эволюционной сложности: химические, биологические и социальные явления. Несколько опережая события, здесь нам хотелось бы указать на тот факт, что переход между классами явлений каждый раз отмечен возникновением нового качества развивающейся способности к обработке информации.

Земля тех далеких времен, бесспорно, представляла собой огромную термодинамическую лабораторию *неравновесных состояний*. Приток энергии, значительные градиенты и разнообразные физические процессы создавали *нелинейный химический шум*, то есть множество случайным образом возникающих и распадающихся химических соединений. Простые молекулы образовывались в стационарных или равновесных концентрациях, более

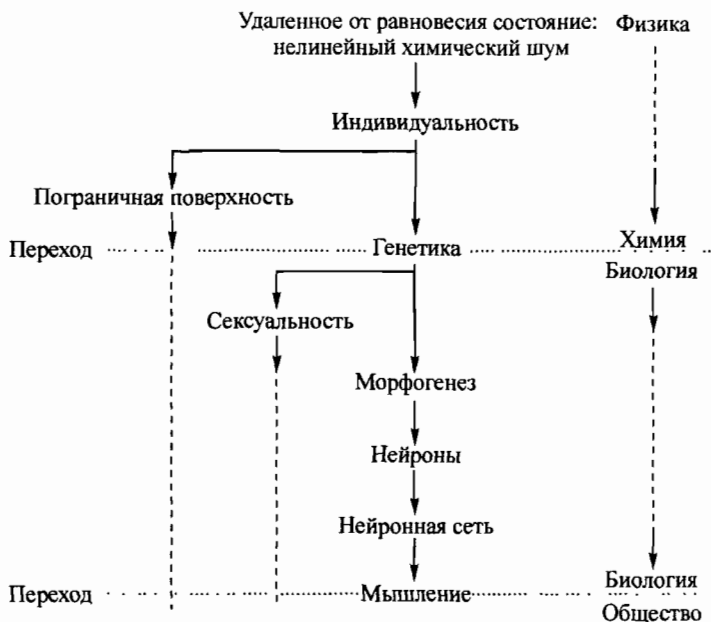


Рис. 7.1. Эволюционное древо: увеличение сложности с позиций обработки информации (подробнее см. в тексте)

сложные — только в виде стохастических распределений, поскольку число теоретически возможных молекул многократно превышает любые имеющиеся на Земле запасы атомов. Случайное присутствие в одном месте и в одно время особых катализаторов вызывало цепные реакции, некоторое время производившие определенные молекулы в гораздо более высоких концентрациях, нежели те, что могли постоянно присутствовать в океане или следовать из распределения Больцмана по энергии.

Есть веские основания для предположения о том, что эти редкие случаи концентрации могли запустить процессы дальнейшего развития только внутри небольших, ограниченных пространств; например, скорость производства особых ценных веществ должна была превышать скорость разложения и потери на диффузию. Для возникновения таких пространств существовало множество естественных возможностей: песчаные полости, поверхностные слои, коацерваты, микросферы, равновесные и неравновесные ядра и т. д.

Становление *индивидуумов* в этом смысле сопряжено с образованием и совершенствованием *пограничной поверхности*, отделяющей индивидуум

от окружающей его среды; начало было положено скачкообразными изменениями концентрации в направлении изнутри наружу, границами раздела фаз или примитивными липидными мембранами. Такая пограничная поверхность предохраняет индивидуум от внешних негативных воздействий и защищает его внутреннюю химическую и физическую среду, но в то же время должна сохранять систему термодинамически открытой. Понятие индивидуума и его сопряжения с окружающим миром по-прежнему является фундаментальным принципом существования биологических систем, и два противоположных требования — к открытости и отграниченности — приводят к сложным компромиссам (таким, например, как формирование пищеварительных, дыхательных и половых органов, или же появление кожи, органов чувств, мышц и костей, предназначенных для активного движения и т. д.). Конкретная форма пограничной поверхности в каждом случае отражает конкретную форму окружающей среды и потому зачастую оказывается достаточно специфичной; однако принципиально ее функция имеет абсолютно универсальную природу и значение со времен первых биохимических образований и до наших дней. Обмен энергией и материей всегда был, с позиций термодинамики, неизбежным, и распознавание сигналов возникло сначала как случайный побочный продукт такого обмена и развилось затем в особые, оцениваемые селективным путем формы. Благодаря этим двум способностям — к обмену энергией и материей и распознаванию сигналов, — и стал возможным постепенный переход к коммуникационной и информационной системам. Именно этот последний переход мы и будем называть *переходом ритуализации*.

Термин *ритуализация* был введен в этологию Джулианом Хаксли и означает возникновение из различных практических действий определенных «сигнальных действий» [169]. Мы предлагаем расширить область употребления этого термина за пределы биологии поведения, распространив понятие «ритуализация» на все процессы самоорганизации, ведущие к возникновению языка символов (и, соответственно, на участвующие в коммуникации стороны). Описываемый переход по сути своей схож с кинетическими переходами второго рода и демонстрирует такие типичные особенности, как нарушение симметрии, отсутствие разделения фаз, нейтральная устойчивость и макроскопические флуктуации. Процесс или структура, постепенно редуцированные до рудиментарной формы — символа, — получают свободу, которую может дать инвариантность кодирования, и при этом по-прежнему принимаются и понимаются соответствующим аппаратом именно так, как если бы они все еще оставались исходными процессом или структурой, а не были бы заместившими эти процесс или структуру символами.

Описанный переход ритуализации представляется нам ключевым механизмом, обеспечившим возникновение систем обработки информации; и это обстоятельство будет нами неоднократно отмечено и подчеркнуто в дальнейшем, при рассмотрении различных стадий естественной эволюции.

Впервые такой переход произошел при возникновении генетического кода. Из химического шума выделялись каталитические неравновесные структуры; те из них, основные элементы конфигураций которых случайно оказывались самоусиливающимися, становились прочнее и возникали чаще; это стало началом примитивной химической дарвиновской эволюции. Селективная ценность определялась здесь скоростью совокупного чистого воспроизводства; учеными уже предложены и рассмотрены некоторые сценарии такой эволюции с различными физическими условиями, молекулярными типами и механизмами реакций.

Высочайшая каталитическая активность требовала и более сложных катализаторов, и процесс их создания и совершенствования можно описать как путь от случайных связей случайно оказавшихся рядом фрагментов до организованной модульной технологии. Комбинирование и соединение в цепи всего нескольких стандартных элементов позволяло достигать гораздо более высокой степени гибкости и сложности; теперь требовался некий «проект», своеобразная матрица. Такая матрица (а ею может быть, к примеру, цепь нуклеиновой кислоты) осуществляет переход ритуализации — к первому природному генетическому языку, где полное индивидуальное описание всех элементов заменено знаками, предписывающими последовательность элементов при «монтаже», — кодонами. Эти первые химические автоматы, способные преобразовать генетическую информацию в фенотипические свойства, называются протоклетками. Именно переход ритуализации представляется нам началом жизни как таковой, переходом от химии к биологии, отмеченным образованием самых первых систем обработки информации.

Из-за нейтральной устойчивости (произвольности) распределения элементов в коде синтаксис дрейфовал и быстро разветвлялся до тех пор, пока наконец не достиг стадии достаточной сложности. Следы этих процессов до сих пор отчетливо различимы в сложности и избыточности генетического кода.

Сексуальность, возможно, возникла в результате «каннибализма» времен дифференциации видов как первая форма внутривидовых коммуникаций, как обмен генетически сформулированным опытом в борьбе за выживание. Этот метод передачи информации показал себя затем настолько важным и мощным, что сохранялся на всем протяжении биологической эволюции [167]. Первоначальная бинарная симметрия двустороннего обмена

информацией между индивидуумами позднее стала неустойчивой и разбилась на два фенотипически отличных друг от друга пола. Кинетический переход второго рода в «женское» и «мужское» ввел в борьбу за выживание качественно новую селективную оценку, основанную на так называемой «красоте», — половой отбор.

Морфогенез, по Эрнсту Геккелю, явился результатом нарушений симметрии в скоплениях или колониях клеток. Уже на ранних стадиях жизни клетки нуждаются в «органе вкуса» — химических рецепторах для поиска пищи, обнаружения врагов или других опасностей, а также для управления активными видами деятельности (скажем, сменой режима обмена веществ). Последнее может пониматься еще и как дифференцированная интерпретация генетической информации в зависимости от преобладающих внешних условий. В результате обмена веществ клеток колонии возникают пространственные распределения продуктов питания и отходов жизнедеятельности; сведения об их местоположении в скоплении передаются через «вкус» отдельных клеток и активируют соответствующие генетические программы. Если эта конфигурация оказывается удачной для естественного отбора, то жесткие внешние условия оборачиваются во благо, а различные рабочие режимы клеток становятся своего рода генетическими «предписаниями» для тканей и органов. В рамках теории языка совершенно аналогичен описанному процесс введения в язык новых абстрактных понятий.

Отделение от внешней среды дифференцированных многоклеточных систем ознаменовало существенные перемены: так, например, возникла вторая (уже более высокого порядка) пограничная поверхность, защищавшая индивидуум от физических и химических воздействий окружающей среды и выполнявшая все те функции, о которых уже было сказано выше. Произошел совершенно типичный переход ритуализации: вещества, бывшие до сих пор прежде всего элементами или продуктами обменных процессов и лишь во вторую очередь служившие в качестве источников информации, в результате преобразования оказались веществами, предназначенными исключительно для передачи информации — такими, как гормоны или морфогены. Секреторы и рецепторы этих веществ работают только внутри тела, так что значение сигналов сводится к вопросу «согласованности» между рецептором и источником. Соответственно, возможны и дрейф веществ, несущих сигнал, и их диверсификация, дополнявшие первую коммуникационную систему внутри организма.

Хотя такая система использует в своей работе символы, основана она не на тексте (то есть не на некоторой последовательности символов), а на числах. Каждый символ (вещество) схож до определенной степени с переменной в компьютерной программе, а локальная концентрация этого веще-

ства является тем самым «значением» переменной, которое сохраняется по данному «адресу». Таким образом, в роли центрального процессора, «обсчитывающего» эти числа, выступает генетическая машина, находящаяся в самой клетке. Развивая эту аналогию, можно сказать, что многоклеточный организм представляет собой не что иное, как гигантский автомат, осуществляющий параллельную обработку данных.

При критических значениях параметра порядка (например, концентрации морфогена) клетки «переключают» свою генетическую программу и развиваются, образуя уже иные, отличающиеся от предусмотренных первоначальной программой, ткани. Границы органов (и фазовые границы при кинетических переходах в клетках) возникают вдоль линий бифуркации и в физическом трехмерном, и в морфогенетическом векторном пространстве, как это описывает теория катастроф Рене Тома, но не ограничиваются, естественно, так называемыми «градиентными системами». Клетки сами занимаются производством транспортных веществ в зависимости от своего количества и активности и таким образом сами управляют геометрией и топологией индивидуального развития.

Поверхность организма снабжена сенсорными клетками, предназначенными для приема внешних сигналов. От сенсорных клеток отходят *нейроны*, регистрирующие «вкус» как внешнего мира, так и внутренней среды самого организма, а в особенности — химические выделения (секреты) рецепторов и других нейронов. Нейроны с их длинными аксонами и дискретным способом передачи сигналов образуют внутри организма вторую, быструю и надежную, коммуникационную систему, которая обеспечивает дистанционную передачу данных, необходимую для восприятия раздражений и когерентных психосоматических реакций. Импульсы, испускаемые нейронами, — это только «техническая» уловка организма, позволяющая без потерь осуществить быструю передачу информации, но никак не ключ к пониманию истинных принципов действия механизма такой передачи.

В результате ритуализации посредством индивидуального синаптического взаимодействия на уровне «нейрон–нейрон» первоначально универсальные транспортные вещества преобразовались в особые нейромедиаторы (тем же образом, как уже было сказано, до них возникли морфогены). Благодаря свободной нейронной «согласованности» при интерпретации сигналов вновь стали возможны дрейф и диверсификация.

Сегодняшние нейроны — экстраординарный, привилегированный класс клеток любого организма, своего рода «художники» и «ученые». Их существование протекает в изолированной среде, которую отличает высокая стабильность; питание и защита нейронов относится к приоритетным задачам

организма; они не способны к размножению, и их единственная обязанность — отвечать «да» или «нет», оперативно реагируя на химическую ситуацию на синапсах. На наш взгляд, все это отнюдь не случайно, ведь нейронам для принятия решений приходится использовать весь их генетический и метаболический «потенциал».

Нейроны объединили системы ввода и вывода сигналов, приняв на себя основную ответственность за поведение животных. От поведения в огромной степени зависят и выживание, и размножение, а потому нейронные функции эволюционировали под давлением жесточайшего отбора. Отображение сигналов, поступающих в организм от всех органов чувств, с целью получить комплексную ответную активность всех отдельных мышечных волокон и желез — задача крайне сложная, и решение ее началось с уровня простых рефлексов (отношений типа «один стимул — одна реакция»), требовавших все больше и больше параллельно и последовательно соединенных нервных клеток с их функциональными нарушениями симметрии.

Мы убеждены в том, что нейронная сеть функционирует совершенно аналогично морфогенетической системе управления; внимания заслуживают лишь несколько отличий. Эволюция вновь воспользовалась весьма эффективной уловкой, заключающейся во взаимодействии определенных химических составов и переключении клеточной экспрессии генов.

Нейронные сети можно описать и как ориентированные графы, вершины которых соответствуют нервным клеткам, а дуги — аксонным синаптическим связям. Нейронная сеть может содержать циклы для выполнения итеративных операций и реализации обратной связи, однако здесь простоты ради мы это обстоятельство опустим. Граф имеет истоки (в нашем случае в роли истоков выступают рецепторы) и стоки (эффекторы). Внутренние нейроны, с одной стороны, находятся на концах ветвей сходящегося (конвергентного) дерева «предвключенных» нейронов, а с другой стороны — являются корнем расходящегося (дивергентного) дерева последующих нейронов.

При приеме внешнего сигнала нейрон мгновенно оценивает информацию, переданную медиаторами на его синапсы в виде вектора концентрации (иными словами, в виде набора входных данных). Чем протяженнее путь от рецепторов, тем более общей и абстрактной может быть данная нейроном оценка. Независимые нейроны — то есть находящиеся «за пределами» распространения импульсов друг друга — оценивают одну и ту же информацию с разных «точек зрения», исходя из различных приоритетов.

При выводе сигналов нейрон управляет активностью всех эффекторных клеток (мышечными волокнами, к примеру), которыми заканчиваются ветви дивергентного дерева, то есть представляет собой соответствующую

щим образом работающую подпрограмму. Последующие нейроны, в свою очередь, реализуют подпрограммы, которые может вызвать управляющий процессом нейрон. Чем протяженнее путь от нейтрона к эффекторам, тем более сложным и емким оказывается запущенное воздействие. Независимые нейроны вызывают альтернативные подпрограммы, которые отвечают за разные типы поведения, конкурируют и смешиваются друг с другом, так что в зависимости от степени нелинейности связи между нейронами могут проявляться смешанные действия (сегрегация), взаимное ингибирование (селекция) или блокировка (гиперселекция).

Оценка входных данных и запуск программ вывода сигналов представляют собой, что называется, две стороны одной медали — активности отдельных нейронов. Каждый нейрон (точно так же, как и обычные компьютерные подпрограммы) предназначен для решения определенной задачи; именно этим он и занимается, причем действуя так, как это принято среди клеток, то есть используя для достижения своих целей внутренние биохимические реакционные цепи и генетические «переключатели». Каждый нейрон приводит в действие особую программу для обработки поступающих к нему данных, является индивидуально дифференцированным и сам при этом представляет собой, в смысле экспрессии генов, собственную маленькую «ткань».

Мы целиком разделяем идеи М. Конрада, согласно которым нейроны представляются нелинейными химическими процессорами с адаптивной аппаратной частью и возможностью переключаться между тремя состояниями: стационарным, осциллирующим и хаотическим. Благодаря биохимической природе протекающих в нейронах реакций они способны действовать во многих временных диапазонах: от высокоскоростных реакций (к которым, возможно, относятся реакции возбуждения и торможения) и управления среднескоростными реакциями до изменения состояний в связи с процессами научения или с кратковременной и долговременной памятью и, наконец, роста аксонов вдоль морфогенетических градиентов.

Представляется, что эволюция нейронов была повторена и при формировании высших форм интеллекта, но на этот раз уже в полной сети. Главную роль при этом сыграли нарушение симметрии после удвоения и ритуализация коммуникаций, в результате которой реальная выходная деятельность замещается виртуальными внутренними «выходными данными», то есть символами. Многого остается пока неизученным: индивидуальные способности к научению, внутренняя оценка прогнозирующих сетей и т. д. Жизнь в своем бесконечном разнообразии и поразительной целесообразности хранит столько тайн, что их хватит еще многим будущим поколениям исследователей.

7.2. Ад на Земле

Последние десятилетия были отмечены появлением целого ряда гипотез, касающихся возникновения жизни на нашей планете. Несомненно, дискуссии на эту тему — такую старую, но все же нестареющую — из числа вызывающих самый живой научный интерес, хотя о «младенчестве и детстве» Земли мы сегодня, по большому счету, лишь догадываемся, не имея пока возможности подкрепить все свои догадки научно обоснованными доказательствами. И все же картина, представляющая, так сказать, исходную ситуацию, породившую жизнь на нашей планете, относительно ясна даже при условии, что царившие в те времена температуры и преобладавшие в океанах и атмосфере химические смеси количественно оценены могут быть только очень приблизительно и что в течение первых сотен миллионов лет они могли непрерывно изменяться.

Согласно общепринятым сегодня представлениям, примерно 4.6 миллиарда лет назад в облаке, появившемся в результате взрыва сверхновой, возник сгусток, которому на протяжении следующих 4 миллиардов лет предстояло постепенно становиться Землей. На остывающую поверхность из атмосферы оседал водяной пар; древнейшие из обнаруженных на сегодня горных пород находятся в Гренландии и возраст их исчисляется 3.8 миллиардами лет. Древнейшими следами жизни считаются найденные в Австралии известняковые отложения, строматолиты, остатки синезеленых водорослей (их возраст составляет примерно 3.5 миллиардов лет), которые когда-то подобно громадным дрейфующим коврам устлали поверхность океанов, добывая энергию путем фотосинтеза и высвобождая при этом кислород. О наличии в тогдашней атмосфере Земли кислорода свидетельствуют, к примеру, протоматерики (палеозоли), карбонатные осадки и руды со следами выветривания. Они указывают на то, что приблизительно 3 миллиарда лет назад земная атмосфера уже содержала свободный кислород. Около 2 миллиардов лет назад концентрация кислорода составляла примерно 2% от сегодняшней, в дальнейшем его количество постоянно росло, и завершился заметный рост всего 600 миллионов лет назад. Прежде кислород появлялся в процессе диссоциации воды в верхних слоях атмосферы (водород улетучивался в мировое пространство), однако количество его едва ли превышало 2% от сегодняшних значений. Следовательно, очень рано должны были возникнуть организмы, способные к фотосинтезу, так что несмотря на растущую погрешность можно предположить, что примерно 2 миллиарда лет назад на Земле уже жили автотрофные существа, и число этих существ, очевидно, должно было быть достаточно велико. Слоистые железные руды представляют собой отложения, возраст которых колеблется

от 2.5 до 1.8 миллиарда лет; они могли бы свидетельствовать о периодах существования окислительной атмосферы. Благодаря присутствию в воздухе (а значит, и в океане) свободного кислорода растворенное железо выпадало в осадок и связывалось большими количествами O_2 . Когда все железо было полностью связано таким образом, содержание O_2 в атмосфере весьма заметно возросло. Возможно, этот процесс — его можно назвать первой природной катастрофой — и привел мир к первому ледниковому периоду, начавшемуся около 2.3 миллиардов лет назад: атмосферный покров, содержащий большое количество углекислого газа и потому способствовавший нагреванию планеты, постепенно разрушался вследствие фотосинтеза.

Если все это происходило именно так, как мы предполагаем, то для зарождения жизни и покорения ею земных океанов понадобилось «всего» 500 миллионов лет, — то есть время, сопоставимое с тем, что прошло с кембрия до наших дней. Как показала биологическая эволюция, такой промежуток времени вмещает в себя огромное количество комплексных процессов, и такие процессы, очевидно, уже тогда могли протекать на биохимическом уровне, о чем свидетельствуют самые различные структуры и функции; однако расшифровке до сих пор поддались лишь немногие из таких свидетельств.

В следующих разделах мы рассмотрим эти вопросы подробнее. Какими свойствами должны были обладать случайно возникшие вещества, чтобы стать отправной точкой для гораздо более сложных процессов? Когда на химическом уровне мог начаться дарвинистский отбор, обусловивший систематическое «выведение» новых улучшенных молекул? Когда и каким образом произошло формирование генетического кода, и какой путь привел к нему прежние, значительно более простые образования? С чем следует связывать само понятие «жизнь»? Но прежде вернемся к тем временам, когда все только начиналось.

Ранее всего произошло выделение самых легких магматических шлаков (гранитные породы), образовавших твердые участки на поверхности расплавленных текучих горных пород; текучие нижние слои сдвигали такие участки вместе (похожим образом ведет себя расплавленный свинец), при этом возникали крупные скопления, которым впоследствии предстояло стать материками (или, возможно, сначала всего одним). Через расколы и трещины на поверхность будущего материка происходили выбросы раскаленной магмы, которая сразу же затвердевала, образуя при этом тонкую корку, — точно так же, как это и по сей день случается в океанических глубинах, только, вероятно, со значительно большей интенсивностью. Возникающие при этом котловины заполнялись водой — так было положено начало процессу появления на Земле океана. Над всей планетой господствовала

зловонная восстановительная протоатмосфера, содержавшая гораздо меньше кислорода, чем сейчас, но зато перенасыщенная водородом, метаном, аммиаком, сероводородом и углекислым газом. Едва ли найдется причина для сомнений в том, что Солнце так же, как сегодня (ну может, немного слабее) сияло над Землей, облака плыли по небу (которое, скорее всего, еще не было голубым), и неистовствовали бури, и шторма уносили к полюсам теплую поверхностную воду из экваториальной зоны. На планете существовали реки и озера, горы и вулканы; следует упомянуть еще и о метеоритном граде: величина этих метеоритов не ограничивалась размером человеческого кулака (а теперешний град, по большей части, именно таков) — нет, это были полновесные глыбы, настоящие исполины, диаметр которых мог достигать многих километров, и при падении в магму на поверхности планеты эти «градины» устраивали грандиозные «всплески». Скалистые участки поверхности были покрыты не землей и песком, а пеплом и лавой, которым только предстояло в результате выветривания стать песком и пылью. Ни известняковых гор, ни атоллов в природе еще не существовало.

Составные компоненты различных горных пород в растворенном виде непрерывно вымывались в море, образуя морскую соль, наверняка содержащую в те времена еще и целый ряд нитратов и фосфатов (например, аммиак, NH_3 или фосфин PH_3), которые сегодня вследствие постоянного биологического истощения (то есть использования их в качестве питательных веществ) стали в океане очень редки. В больших концентрациях должны были встречаться и такие вещества, как цианистоводородная (или синильная) кислота HCN и цианид калия KCN .

Собственно говоря, Землю тех времен мы можем — не погрешив против истины — охарактеризовать одним словом: «ад».

После первых опытов Миллера (1953) было проведено огромное количество экспериментов, показавших, что Земля располагала свободной энергией в неспецифической форме (молнии, ультрафиолетовое излучение, отдаваемая горными породами теплота и т. д.), и количество такой энергии было достаточным для возникновения органических соединений низкой и средней степени сложности. Обнаруживаемые количества таких соединений появляются «в пробирке» всего за несколько дней; «бульон», заполнявший мировой океан на заре эволюции, имел не только значительно большие объемы (примерно 1 000 000 000 000 000 000 000 полных лабораторных пробирок), но еще и гораздо более продолжительную историю, исчисляемую отнюдь не днями, а десятками миллионов лет. Среди всевозможных алканов, спиртов, фенолов, аминокислот, жиров, сахаров и прочих веществ, которые могли образоваться в заметных количествах, лишь немногие обладали свойством растворяться в воде, так что все нерастворимые компоненты

скапливались на поверхности суши или океана. Если все было именно так, то это обстоятельство имело, возможно, и определенные климатические последствия, поскольку испарение воды, скажем, — а вместе с тем и перенос скрытой теплоты — могли в значительной мере затруднены масляной или жировой пленкой, скапливавшейся на поверхности океана. Сегодня, однако, мы можем наблюдать дрейфующие по поверхности океана нефтяные пятна или ковры из водорослей: они не могут существовать в таком виде очень уж долгое время — в большинстве случаев волны, ветер и течения довольно скоро относят их к побережьям или на мелководье, где они скапливаются, постепенно разлагаясь.

В те далекие времена существовало великое множество таких мест, где раскаленная магма и холодная вода вступали в контакт, подобный тому, что наблюдается сегодня на примере так называемых «черных курильщиков»: на дне океана на срединно-океанических хребтах из подземных источников бьет ключом вода, температура которой составляет многие сотни градусов. Порождаемая этим температурным контрастом свободная энергия вкуче с выделяемыми из раствора химикалиями и каталитическими свойствами поверхности горных пород могли привести к тому, что такие области стали важнейшими местами выработки органических веществ. Одни молекулы вымывались турбулентными потоками, другие «цеплялись» (или, если хотите, «приклеивались») к камням, проникая в их мельчайшие поры, а те соединения, что не разрушались сразу, могли «прикапливать» свободную энергию химически, чтобы затем использовать ее в качестве дополнительных калорий в том «бульоне», который служил общим источником питания.

Эти поколения представителей интенсивных «химических шумов» оказываются, в принципе, достаточно перспективными кандидатами на роль «искры зажигания» жизни на Земле. Путем непрерывного производства высокоэнергетических химических веществ они в течение длительного времени обеспечивали нужное удаление от состояния химического равновесия на фоне стабильно устойчивых физических условий. (Насколько продолжительна сегодня «жизнь» отдельных горячих источников и вулканов? Она исчисляется по меньшей мере веками; возможно — тысячелетиями или даже больше. Налицо условия, весьма благоприятные для проведения любых долгосрочных экспериментов, затеваемых Природой.)

Переход от химии к биологии можно условно разделить на четыре этапа. Рассмотрим каждый из них подробнее.

1. Физико-химическая самоорганизация. Из случайных каталитических сеток и каскадов возникают молекулярные системы, что ведет к существенному повышению концентрации высокомолекулярных веществ

(в частности, полипептидов и полинуклеотидов); важную роль на этом этапе играет образование относительно изолированных коацерватов. Происходит создание первого «опытного образца» посредством катализируемой простыми протеинами (репликазами) репликации полинуклеотидов. Репликативные молекулярные системы становятся все эффективнее благодаря мутациям и отбору.

2. Образование протоклеток в условиях полного кодирования. Появление первых самовоспроизводящихся единиц из РНК и белка. «Рабочее» распределение функций между РНК (репликация образцов и накопление информации) и белком (каталитические функции) становится все отчетливее и приводит к возникновению элементов особого молекулярного языка. Позднее роль накопителя информации берет на себя ДНК, и РНК становится первым шагом на пути к существующему сегодня механизму транскрипции (то есть биосинтеза молекул РНК на соответствующих участках ДНК). Развивается модульный принцип синтеза белков.

3. Ритуализация языка кодирования, триплетный код и минимальный организм. Суущественно избыточное полное кодирование проходит через последовательную ритуализацию и замещается «генетической стенографией» — первоначальным триплетным кодом. Таким образом, собственно, и появляется первая способная к обработке информации система, называемая живым существом. Возникают протоформы сегодняшних типов РНК; совершенствование триплетного кода придает большую амплитуду вариациям белкового синтеза. Минимальный организм готов.

4. Клеточная организация. Триплетный код достаточно изменчив, чтобы обеспечивать возможность синтеза таких сложных структур, как, к примеру, мембраны; быстро достижимые в процессе отбора преимущества позволяют посредством пространственного структурирования коацерватов замораживать незавершенный код. Организовано деление клеток; дефицит сырья требует создания поливалентной цепочки обмена веществ; активное движение плазмы приводит к увеличению подвижности коацерватов и возникновению между ними взаимодействия типа «хищник–жертва».

Представленное описание дает читателю возможность получить о ходе эволюционного развития впечатление, схожее с тем, какое создается при просмотре полученного методом цейтраферной кино съемки фильма о превращении ужасной гусеницы в чудесную бабочку, — впечатления обманчивого и в то же время совершенно верного.

При возникновении существенной флуктуации началось самовоспроизведение и связанное с ним «взрывное» увеличение количества опреде-

ленных молекул (предполагается, что это — вопреки нашим сегодняшним взглядам — было вовсе не таким уж из ряда вон редким событием в ран-ских просторах тех времен), и копии (благодаря течениям, турбулентной диффузии) разошлись очень широко, попав при этом в области с различными физическими и химическими условиями. Всё, что сумело выжить, продолжало размножаться, и естественное предпочтение при этом отдавалось самым «приспособленным». Эти экземпляры попадали не только в новые, прежде «незаселенные» места, но и возвращались назад, к своим «предкам», и вступали с ними в конкурентную борьбу. Миграция и «возвращение к истокам» были и остаются теми путями, которые ускоряют эволюционные процессы и не требуют при этом каких-либо локальных изменений климата. В этом отношении развитие было намного сложнее простой временной серии в каком-то одном месте. При упоминании в четвертом пункте дефицита питательных веществ ни в коем случае не имелось в виду, что по всему миру оказались вдруг израсходованы все энергоемкие химикалии добиологической эпохи; однако в определенном месте, в определенной нише все ресурсы были исчерпаны, и спонтанное новообразование с возникшим дефицитом не справилось.

С другой стороны, в те времена еще не существовало полового размножения, то есть при налаженной передаче информации последующим поколениям не существовало никакого обмена между системами с различным «жизненным опытом». Эволюционное древо продолжало непрерывно разветвляться, но если его ветвь заканчивалась всего одним выжившим типом, то у него имелась всего одна определенная цепочка «предков» (а не полноценное «генеалогическое древо» — в отличие, к примеру, от каждого из нас). С этой точки зрения тогдашнее развитие представляется опять-таки всего лишь простой «линейной последовательностью», потому что все рецентные организмы имеют тот же генетический код и восходят, по сути, к одному-единственному протовиду, подавившему все другие, определенно имевшиеся на Земле в больших количествах.

Если первыми населявшими нашу планету живыми существами были обитатели горячих источников, расположенных на дне океана, то какие-то отдельные экземпляры время от времени выносило наверх — на поверхность воды, к солнечному свету. Это могло продолжаться до тех пор, пока не наступил день, когда нашлись такие экземпляры, что оказались способны самостоятельно выживать в условиях, столь отличных от первоначальных. Именно они положили начало самой успешной жизненной форме за всю историю существования жизни на Земле — цианобактериям, или синезеленым водорослям. Цианобактерии являются одноклеточными прокариотами, способными к фотосинтезу; предполагается, что огромное количество прока-

риотов населяло Землю на протяжении более 3 миллиардов лет, полностью изменив состав мирового океана и атмосферы, и только с появлением эукариотов (в отличие от прокариотов, не имеющих оформленного клеточного ядра, эукариоты — это живые существа, обладающие клеточным ядром; все многоклеточные организмы состоят из ядросодержащих клеток) синезеленые водоросли были вытеснены с прежних ведущих позиций и оказались лишены заглавной роли на мировой сцене. Однако и сегодня они, по всей вероятности, играют ключевую роль в обеспечении уровня кислорода и снижении содержания углекислого газа в воздухе, а также в образовании ископаемых энергоносителей.

Цианобактерии состоят в очень тесной родственной связи с прохлорофитами (различаются типом хлорофилла) и пурпурными бактериями, которые являются анаэробными фотоавтотрофами и нуждаются в сероводороде. Цианобактерии и эукариоты относятся к разным ветвям эволюционного древа (архебактерии и эубактерии); об эукариотах, в свою очередь, следует сказать, что они близкородственны эоцитам — анаэробным хемоавтотрофам, населяющим горячие источники.

Эукариотов на Земле великое множество: к ним относятся, помимо прочих, и все растения и животные, обитающие на суше и тоже состоящие между собой в близком родстве. К животным относятся и воротничковые жгутиконосцы — одиночные или образующие колонии гетеротрофы; к наземным растениям — некоторые виды зеленых водорослей (одиночные или колониальные гетеротрофные организмы). Существуют и рецентные жгутиковые, являющиеся только автотрофами, или только гетеротрофами, или тем и другим одновременно; они обладают значительным генетическим и морфологическим сходством друг с другом. Со времен Геккеля одноклеточные автотрофные растения принято считать исходной формой всех высших растений и животных.

По всей видимости, в течение невообразимо длительного периода времени (примерно 2/3 всей земной истории) существовало разделение жизни на «старый мир», таящийся в горячих сернистых источниках в глубинах океана, и «новый мир», плещущийся в растворенном в воде ядовитом кислороде на пронизанной солнечным светом поверхности. Если жизнь возникла на погруженном на глубину 2000 метров океаническом хребте, то синезеленые водоросли довольно скоро «эмигрировали» на поверхность, уйдя, таким образом, в «новый мир». Наши же предки, напротив, еще долго оставались в привычном «старом мире» и поднялись наверх лишь значительно позднее, уже в виде эукариотов, которым нужен был содержащийся в воздухе кислород, — и «покорили» синезеленые водоросли, «низведя» их до положения внутриклеточных органоидов — хлоропластов, и завоевали в

конечном итоге весь «новый мир», остающийся с тех пор во власти многоклеточных. Науке не известны какие-либо ископаемые, которые могли бы свидетельствовать о существовании в тот (весьма продолжительный, заметим) период времени новых сколько-нибудь «впечатляющих» организмов или о заметных изменениях экологических структур: может, такие ископаемые просто не сохранились, но также возможно, что наиболее значительные свидетельства эволюционных достижений оказываются скрыты Природой под покровами тайны. Может быть, отсутствовало необходимое для изменений давление отбора? Или господствующие популяции препятствовали быстрому продвижению вперед других видов? А может, работы по развитию новой серии «Эукариот» были настолько объемны, что растянулись на необычайно долгий срок, и потому так много времени прошло, прежде чем нужный продукт был доведен наконец до конкурентоспособного состояния?

Эукариоты отличает огромное структурное разнообразие и высокоразвитый генетический механизм. Что же представляет собой клетка эукариота: захиревшее и пришедшее в полный упадок многоклеточное образование или универсальный структурный элемент, способный выполнять множество функций? Вероятно, оба эти предположения соответствуют действительности.

Эукариоты обладают клеточными ядрами, которые содержат хромосомы; в эукариотах есть удивительные компартменты и органоиды — митохондрии и пластиды; деление эукариотов — это четко управляемый процесс (митоз/мейоз, выраженная половая рекомбинация); эукариоты имеют ДНК-интроны и осуществляют после транскрипции трудоемкую «постобработку» мРНК, трансляционный аппарат снабжен развитой положительной и отрицательной обратной связью для осуществления белкового синтеза; у эукариотов имеются сложные жгутики (то есть высокоразвитый активный двигательный аппарат).

Вероятно, эукариоты стали результатом кооперации: специализированные безъядерные одноклеточные объединились в основанное на разделении функций клеточное скопление, причём отдельные члены симбиоза строго ограничивались выполнением своей отдельной задачи. Так, к примеру, хлоропласты в клетке имеют много общего с цианобактериями. Клетки-эукариоты «не производят» хлоропласты, подобно тому, как это делают многоклеточные, «производя» свои органы, — они делятся самостоятельно. Из-за крошечных размеров и относительной простоты строения репликация этого элементарного многоклеточного могла полно и синхронно происходить и без достижения в организованном индивидуальном развитии стадии имаго. Его «клетки», специализированные и ограниченные выполнением той или

иной функции, представлены сегодня в виде компартиментов и органоидов. Таким образом, тезис о «задержке в развитии» многоклеточных поддерживается и такими классами, как ресничные, обладающие двумя клеточными ядрами, каждое из которых специализируется на выполнении собственных задач.

Естественная эволюция, как правило, доводит нечто до совершенства посредством внешнего давления. Сегодня, собственно, неизвестны причины, вызвавшие гибкое использование различных химических веществ в качестве источников энергии и сырья, или более высокую эффективность клеточного энергетического обмена и обмена веществ, или компактную и экономную в смысле сырья и материалов «конструкцию» эукариотов, или усовершенствованный способ обмена опытом посредством половой рекомбинации, или высокоразвитую моторную систему, предназначенную для поиска питания (но возможно также, что для охоты и бегства), или выверенную химическую и оптическую сенсорную систему — все это говорит о более длинных пищевых цепочках и ожесточенной борьбе за существование на протяжении всех предполагаемых 2 или даже 3 миллиардов лет.

Наконец возник «биологический компьютер», универсальность, робастность и эффективность которого вызревала в условиях суровой необходимости; так жесткость процесса естественного отбора обернулась благом. Важнейшим свойством «биокомпьютера» является, с нашей точки зрения, его способность обрабатывать информацию, то есть его свободная генетическая программируемость в соединении с высокоразвитой биохимической периферией. Эта современная «клеточная машина» была снабжена всем, что необходимо для того, чтобы открыть совершенно новую главу в эволюции.

Эукариоты начинали свой путь, будучи мощно развитой одноклеточной формой, а затем, по мере обогащения атмосферы кислородом, совершили революционный скачок, став многоклеточными существами: их клетки должны были стать крупнее клеток синезеленых водорослей, а первые ископаемые формы с клетками большей величины имеют возраст 1.8 миллиарда лет. Только 680 миллионов лет назад произошло массовое исчезновение цианобактерий. Начало кембрия (550 миллионов лет назад) отмечено огромным количеством ископаемых форм различного происхождения. Однако и 570 миллионов лет назад уже существовали многоклеточные животные формы, обладавшие наружным скелетом, о чем свидетельствуют ископаемые остатки, датированные этим возрастом. Неужели начало сегодняшнему разнообразию видов было положено более 600 миллионов лет назад?

7.3. Коацерваты — капельки жира в бульоне земного протоокеана

Старейшая из научно обоснованных теорий биогенеза, как уже упоминалось, была выдвинута А. И. Опариным в 1924 году [134]. Базовые положения этой теории мы по-прежнему считаем фундаментом научных представлений о биогенезе, и в этом смысле они никоим образом не устарели. Чрезвычайно важное значение гипотеза академика Опарина придает коацерватам, называемым иногда «капельками жира в бульоне протоокеана». Гипотеза о возникновении коацерватов подтверждена экспериментально. Как было доказано уже самим Опариним и его коллегами, коацерваты без особых осложнений могут быть синтезированы из воды и органических веществ — именно так произошло их самопроизвольное образование в земном океане тех далеких времен. У коацерватов был обмен веществ, они обладали способностью к делению и росту; свойства их схожи, на первый взгляд, со свойствами примитивных живых существ. Однако коацерваты лишены механизма передачи наследственной информации, который гарантировал бы сохранение и изменчивость фенотипических признаков, то есть лишены способности сохранять, обрабатывать и постепенно накапливать информацию; и поскольку описанный механизм отсутствует, «развитие» коацерватов протекает хаотично. Особый — и весьма интересный в рамках биогенеза — класс коацерватов представлен так называемыми микросферами, изученными С. Фоксом [66, 162]. В ходе наблюдений Фокс обнаружил, что молекулы простейших полипептидов (так называемых протеиноидов) в воде соединяются друг с другом, образуя при этом крошечные шарики. Экспериментально было доказано, что такие микросферы возникают из абиогенно образованных протеиноидов и при этом оказываются способны к самовоспроизводству, а содержащиеся в них протеиноиды обладают определенными каталитическими свойствами. По мнению Фокса, на одной из последующих стадий возникали пронуклеиновые кислоты, которые, соединяясь с протеиноидами, образовывали прорибосомы, и на этих прорибосомах начался в конце концов синтез белков. Остается открытым вопрос о природе механизмов, с помощью которых происходило постепенное совершенствование микросфер. На сей счет в настоящее время существует ряд гипотез, выдвинутых такими учеными, как Эйген [47], Кун [114] и Каплан [98]. При этом речь идет о многоступенчатых теориях: переход от возникших неорганическим путем макромолекул к простейшим формам живых существ разделен здесь на множество качественно отличных друг от друга последовательных этапов. Той же линии будем придерживаться и мы при изложении своей гипотезы.

Путеводной нитью нам послужат фундаментальные идеи Эйгена, Куна и Каплана, хотя по отдельным вопросам мы придерживаемся иного мнения (в частности, это касается и роли коацерватов). В настоящее время не представляется возможным вынести окончательное суждение об истинности различных сценариев — прежде всего, наука не располагает пока необходимыми для такого заключения экспериментально доказанными фактами. Разработка альтернативных идей тоже не обязательно означает полный отказ от других теорий, поскольку, во-первых, *к возникновению жизни могут вести множество параллельных путей*, а во-вторых, *имея дело со стохастическим процессом, принципиально невозможно реконструировать единственный путь — можно только указать вероятности различных путей*.

В отличие от Эйгена и Куна мы пришли к мнению, что коацерваты или микросферы уже с самого начала играли чрезвычайно значимую роль. Кроме того, мы полагаем, что бесферментная репликация нитей нуклеиновых кислот, представленная в гипотезах Эйгена и Куна в качестве исходного пункта, менее вероятна по сравнению с другими возможными вариантами. По крайней мере эксперименты Фокса, Дозе и других исследователей свидетельствуют о том, что каталитически активные примитивные белки имелись с самого начала и в значительных количествах, а следовательно, существовала вероятность того, что они тогда же начнут активно участвовать в происходящем. Определяемое же принципом «всё или ничего» поведение постулированных Эйгеном и Шустером гиперциклов в однородном реакционном пространстве могло оказаться, скорее, препятствующим эволюции фактором. И наконец, мы считаем, что появление генетического кода явилось результатом развития более ранних, более примитивных в языковом плане форм представления генетической информации.

Фаза 1. Спонтанный органический синтез. Описываемая эпоха началась от 4 до 5 миллиардов лет назад — именно к этому времени относится начало спонтанного синтеза углеводородных соединений в протоокеане и протоатмосфере, происходившего под воздействием атмосферных электрических разрядов, вулканической активности и т. п., а также дальнейшая полимеризация таких соединений, то есть образование полипептидов, полинуклеотидов и т. д. В пятой главе мы уже упоминали о том, что в этот период на Земле сложились условия, благоприятные для процессов синтеза углеводородов и других органических соединений. Земная атмосфера тех времен состояла, главным образом, из H_2 , H_2O , NH_3 , CH_4 , а также некоторого количества H_2S , то есть носила восстановительный характер. Кроме того, на нашей планете после образования твердой коры уже существовали первые заметные скопления воды.

От Солнца в открытую систему, которую представляла собой в ту эпоху Земля, поступал непрерывный поток фотонов. Температура солнечного излучения превышала 5000 К, вследствие чего оказался запущен механизм «экспорта» энтропии (подробно это уже было описано в пятой и шестой главах). Помимо поступающей в систему энергии в виде мощного солнечного излучения (жесткий ультрафиолет), накачка происходила еще и за счет «местных метеоусловий», то есть бесчисленных гроз, сотрясавших земную атмосферу, а также энергетических ресурсов земного шара, высвобождавшихся в ходе вулканических и радиоактивных процессов. А. И. Опарин первым сумел комплексно обосновать картину благоприятных условий, которые возникли в результате совокупности названных процессов и привели к началу абиогенного синтеза органических веществ. Возможно, сначала под воздействием энергетических источников в атмосфере могли начаться процессы эндотермического синтеза различных производных углеводов, а также — в определенных объемах — производных циановодорода. Значительная часть продуктов начавшихся реакций синтеза в конечном счете попадала в водоемы, обогащая тем самым так называемый «первичный бульон». Концентрация органических веществ в «первичном бульоне» могла составлять несколько процентов. Эксперименты, в ходе которых моделируются природные условия древней Земли, в значительной мере подтверждают такого рода предположения. Так, к примеру, в 1953 году в ходе уже упоминавшихся экспериментов Миллер впервые обнаружил в смеси H_2 , H_2Cl , CH_4 , NH_3 , находившейся под длительным воздействием электрических разрядов, различные аминокислоты, алифатические карбоновые кислоты и карбамиды. Ультрафиолетовое излучение и раскаленный песок в качестве источников энергии дали позднее по существу те же результаты. Помимо всего прочего были обнаружены важнейшие аминокислоты (звенья протеиновой цепи) — Ala, Asn, Asp, Cys, Glu, Gly, Ile, Leu, Lys, Phe, Ser, Thr, Tyr, Val и их полимеризаты, а также примитивные белки (так называемые протеиноиды), уже обладавшие поливалентными каталитическими свойствами [98].

Х. Оро и С. Поннамперуме в 1972 году впервые удалось синтезировать пуриновые (аденин и гуанин), а позднее и пиримидиновые (урацил и цитозин) основания в жидкой фазе. Подтвердилась и возможность образования жирных кислот в результате воздействия электрических разрядов или ультрафиолетового излучения. Важными промежуточными продуктами при этом были формальдегид (HCOH) и дициан (NC-CN). При дальнейшем облучении или нагревании этих веществ могут быть получены сахара и их производные. Затем следуют реакции синтеза нуклеозидов и нуклеотидов в смоделированных природных условиях древней Земли. Важное значение в

качестве поставщика энергии для реакций мог иметь полифосфат (собственно, полифосфат считается в этом смысле предшественником аденозинтрифосфорной кислоты, АТФ). Экспериментально полученное доказательство спонтанного синтеза названных соединений [66, 144, 128] и астрофизические наблюдения сегодня уже едва ли позволят усомниться в том, что довольно сложные углеводороды и другие биологически важные молекулы могли возникнуть — и возникли — на древней Земле неорганическим путем под воздействием энергетической накачки (в форме электрических разрядов, нагревания, ультрафиолета, космического излучения и т. д.).

Согласно разработанной нами модели, все чрезвычайно большое количество возможных видов химических соединений следует разделить на два класса в соответствии с их средней распространенностью X в природе [33]. К первому классу относятся простые соединения ($X \gg 1$), а ко второму — сложные соединения ($X \ll 1$). Для класса $X \gg 1$ в протоокеане установились постоянные концентрации; соединения этого класса представляют собой естественные энергетические и сырьевые ресурсы для дальнейшей предбиологической эволюции. Соединения же класса $X \ll 1$ не могли поддерживать постоянную концентрацию, поскольку количество частиц в системе должно быть целым (0, 1, 2, ...), то есть соединения такого типа могут возникать в системе и снова распадаться лишь с определенной вероятностью. Вследствие этого все процессы, в которых они заняты, должны носить, по существу, стохастический характер. И именно среди представителей этого класса химических соединений нам следует, в принципе, искать «зародыши» молекулярной самоорганизации. Число возможных органических соединений невообразимо велико. Оценки показывают, что одни только белки (при условии, что каждый тип белка будет представлен всего одной-единственной молекулой) смогли бы заполнить собою объем, превышающий всю известную нам Вселенную. Таким образом, вероятность X возникновения подавляющего большинства химических соединений в протоокеане в результате спонтанного синтеза практически равна нулю. С точки зрения физики, сущность добиологических и биологических процессов сводится к тому, что имеющиеся частицы способны занять в системе лишь исчезающе малое число возможных состояний. Соответствующие эволюционные процессы вообще возможны лишь потому, что основаны не только на спонтанном синтезе, но еще и способны самостоятельно «организовать» синтез отобранных соединений.

С другой стороны, сегодня с определенной уверенностью можно утверждать, что возникновение целого ряда «интересных» для биогенеза соединений выглядит как неизбежность; сюда относится, в частности, появление протеиноидов, полифосфатов и коротких нуклеотидных цепочек. Для таких

веществ $X \gg 1$, и потому они должны были — по крайней мере в отдельных областях древнего мирового океана — иметь достаточно высокие концентрации. Спонтанно образовавшиеся протеиноиды обладают рядом чрезвычайно интересных свойств. В частности, они демонстрируют поливалентную неспецифическую ферментативную активность: они способны действовать подобно примитивным полимеразам, способствуя синтезу новых полипептидов и полинуклеотидов. Кроме того, протеиноиды схожи с полифосфатами: они способны к гидролизу последних и высвобождают при этом энергию (примерно 40 кДж/моль), которая может служить для связи в пептидных и нуклеотидных соединениях. Таким образом, полифосфаты берут на себя важную функцию поставщиков энергии.

Фаза 2. Образование коацерватов. Как показал А. И. Опарин [134], однородная взвесь органических молекул могла образовывать скопления — шаровидные капли, называемые коацерватами, — при любых хоть сколько-нибудь благоприятных условиях. Во многом схожи с коацерватами и микросферы, изученные Фоксом [66]. Существенное отличие коацерватов Опарина от микросфер Фокса заключено, собственно, в способе производства и химическом составе этих образований. Опарин использовал желатин, гуммиарабик и другие извлеченные из живых систем органические вещества, тогда как микросферы состоят из протеиноида, происхождение которого может быть абиогенным. Фокс обнаружил, что такие протеиноиды в воде собираются вместе, образуя при этом крошечные шарики — микросферы. В дальнейшем в качестве «сверхпонятия» мы воспользуемся более старым обозначением «коацерват». Образование этих примитивнейших предшественников современных клеток оказало решающее влияние (как в количественном, так и в качественном отношении) на ряд последующих эволюционных этапов. Перечислим важнейшие свойства коацерватов:

1. Коацерваты представляют собой микрореакторы, в которых протекают химические реакции.
2. Коацерваты могут обмениваться со своим окружением энергией и материей.
3. Коацерваты могут образовываться и распадаться, увеличиваться и уменьшаться в объеме, делиться.
4. Концентрация органических веществ в коацерватах выше, чем в свободной воде, а потому действенность эвентуальных каталитических веществ здесь возрастает на несколько порядков.

5. Продукты реакций, протекающих в коацерватах, закрепляются значительно дольше, чем продукты реакций, обусловленных свободной диффузией, а потому принципиально возможной становится уже работа цепей синтеза.
6. Коацерваты обладают внутренней физической и химической средой; они могут служить своего рода убежищем для сложных молекул и повышать их стабильность.
7. Своеобразие коацерватов придает селективным свойствам веществ качественно новый характер, существенно отличный от прежнего (в однородном распределении) и столь важный для последующих этапов эволюции.

Представим себе некоторый объем воды протоокеана, уже содержащий (в результате описанной нами фазы) определенное количество протеиноидов и полифосфатов, а также несколько нуклеотидных цепочек и других соединений. В этих условиях существует высокая вероятность спонтанного образования простых коацерватов, состоящих (помимо самой воды) главным образом из протеиноидов [162]. В физическом плане коацервация сводится, в сущности, к полиионным взаимодействиям; вспомним о том, что полипептиды образуются в растворе поликатионов. Концентрация протеиноидов в коацерватах может превышать таковую в свободных растворах в сотни раз и составлять от десяти до двадцати процентов; для остальных входящих в коацерват соединений — например, для полифосфатов и примитивных нуклеиновых кислот — также характерна высокая концентрация. Важно и то, что коацерваты образуют своего рода мембрану с заполненными водой порами, диаметр которых равен приблизительно 2 нм; сквозь такую мембрану способны проникнуть только малые молекулы [162]. В описанных условиях при поливалентном каталитическом воздействии протеиноидов могут протекать процессы синтеза, которые были бы невозможны в свободном растворе; коацерваты, таким образом, представляют собой своего рода микрореакторы. Другой важный аспект заключается в том, что из-за ограниченности объема таких микрореакторов большую роль здесь играют стохастические процессы. Это, в частности, означает, что случайно возникшие гиперциклы могут обернуться совершенно иными гиперциклами. Потребность протекающих селективных процессов в сырье и энергии покрывается за счет поступающих аминокислот, нуклеотидов и богатых энергией полифосфатов. Масса коацервата и его объем вследствие процессов синтеза увеличиваются, и возникающие при этом механические нестабильности могут в результате запустить, к примеру, процессы деления. Динами-

ка коацерватов порождает качественно совершенно новый тип селективных процессов, открывающий столь же новые пути дальнейшего эволюционного развития. Теория такого отбора коацерватов была разработана авторами в ранних работах [35, 33, 60]. Названные исследования, помимо прочего, показали, что при определенных допущениях кинетические уравнения, описывающие эволюцию коацерватов, могут быть сведены к очень простой системе уравнений, весьма схожей с уравнениями Эйгена для отбора в однородной фазе.

Существенное математическое отличие этой системы от уравнений Эйгена состоит в том, что в нашей теории масса коацерватов (а вместе с нею и их количество) растет по экспоненциальному закону, то есть точно так же, как в случае линейного автокатализа, вне зависимости от того, насколько в действительности нелинейны химические законы внутренних процессов. Принципиальное значение скорости такого роста, то есть селективную ценность данного типа коацервата, можно вычислить из скорости его внутреннего химического обмена.

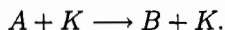
Важнейший вывод раздела, посвященного коацервации, может быть, пожалуй, представлен следующим образом: селективные процессы между коацерватами протекают так же, как и между автокаталитическими веществами, то есть процесс подчиняется условиям простого отбора, даже если непосредственные составляющие коацервата демонстрируют в однородной взвеси гиперселективное поведение. Более того, отбор характеризуется экстремальным принципом: выживает всегда только один-единственный тип коацервата — тот, селективная ценность которого оказывается самой высокой. Селективная же ценность определяется химической кинетикой компонентов коацервата и равна сумме скоростей всех реакций при постоянном молярном составе, поделенной на общую концентрацию в коацервате.

Можно предположить, что скорости деления первых возникших коацерватов (и, соответственно, их селективная ценность) были едва выше нуля. Отбора не происходило, хаотически складывались и вновь распались коацерваты то одного, то другого состава. Новая фаза была достигнута лишь тогда, когда химические реакции обмена приобрели заметно более высокую, чем прежняя, скорость; поиск же необходимого для подобного увеличения скорости состава коацервата был отдан на волю слепого случая.

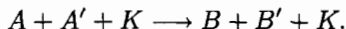
Фаза 3. Каталитические процессы. Вне всякого сомнения, важнейшей предпосылкой для зарождения жизни (да и вообще всех известных сегодня биологических процессов) является способность определенных химических соединений каталитически воздействовать на реакции обмена и

многokrратно увеличивать скорости протекания таких реакций. Разумеется, велика вероятность того, что первые, случайно образовавшиеся ферменты были еще отнюдь не специализированными и малоэффективными по сравнению с существующими сегодня более совершенными молекулами. Органический катализ протекает, как правило, посредством кратковременной комплексной связи фермент-субстрат и последующего распада такого комплекса на фермент и продукт. Образование и разложение комплекса могут осуществляться спонтанно (механизм Михаэлиса-Ментена) или же быть результатом периодически изменяющихся условий (суточные изменения температуры, изменения объема коацерватов). Для дальнейшего рассмотрения представляется целесообразным подробнее рассмотреть различные каталитические процессы и прояснить их значение для добиологической эволюции.

В общем случае катализатор K преобразует некое вещество A в некое вещество B :



Однако зачастую такого рода реакции оказываются несколько сложнее. Катализатор производит из вещества A и некоторого «сырья» A' продукт B и «отходы» B' :



В этом случае ситуация уже отнюдь не столь очевидна, поскольку на этот раз мы имеем дело с пятью элементами вместо трех. Ограничимся допущением, что вещества A' и B' относятся к сырьевым ресурсам (см. фазу 1), то есть всегда представлены в постоянной концентрации, так что расход и производство этих веществ не имеет для нас существенного значения. Таким образом, мы можем и частные случаи свести к простой первой схеме, представляющей общий случай протекания каталитических реакций. Если же вещество A является сырьем, а B относится к редким, дефицитным веществам, то можно говорить о том, что катализатор K производит продукт B , но, естественно, только в том случае, когда ожидаемое число частиц B , получаемых в результате каталитического воздействия, заметно превышает 1, так что продукт B может образовать некую постоянную концентрацию. Если же ожидаемое число B , пусть даже явно повышаясь, все же остается значительно ниже 1, говорят о мутагенном воздействии катализатора, так как появление молекул вещества B в этом случае, как и прежде, представляет собой всего лишь случайное событие (хотя вероятность его со временем увеличивается). Не менее интересен и случай, когда оба вещества — A , и B — относятся к разряду редких. На этот раз о преобразовании веществ

при помощи катализатора K можно говорить, если воздействие K значимо, а в противном случае мы снова имеем дело лишь с мутагенным эффектом.

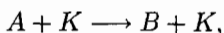
Преобразующие катализаторы наверняка в больших количествах возникли и в «первичном бульоне», и в коацерватах случайного состава, однако на первых порах не оказывали непосредственного влияния ни на эволюционные процессы в свободном растворе, ни на эволюцию коацерватов, поскольку оставляли биомассу практически инвариантной и, следовательно, не изменяли скорость размножения. Опосредованное же воздействие катализаторов проявлялось в изменении химического состава раствора и коацерватов в пользу более сложных молекул, что повышало вероятность возникновения обменных реакций между новыми функциональными типами молекул. Таким образом создавались условия для образования новых производящих катализаторов. Однажды возникнув, такой катализатор на протяжении всего своего существования производил биомассу и умножал количество коацерватов. Кроме того, продукты каталитических реакций могут подвергаться со стороны преобразующих катализаторов и дальнейшей обработке, так что в пространстве чисел заполнения возникают своего рода ударные волны, направленные вдоль каталитической оси в пространстве продуктов; такие волны могут не только усиливаться или ослабевать, но еще и взаимодействовать между собой, «разветвляться», образуя при этом каталитическим или мутагенным путем широкий спектр различных соединений. Среди произведенных таким образом соединений опять-таки могут оказаться катализаторы, способные инициировать целый ряд цепных реакций. Но до тех пор, пока производящие катализаторы не способны к самовоспроизводству, они действуют только на протяжении срока своего существования, не размножаясь, и после их распада весь процесс, постепенно затухая, в конце концов вовсе прекращается. Такой тип поведения очень напоминает течение другого процесса; речь идет о каскадных ливнях, вызываемых высокоэнергетическим космическим излучением; воспользуемся этим сходством и обозначим термином «каталитические каскады» те каталитические системы, которые образуют простые или разветвленные цепи. При возникновении описанных каскадов истинные процессы отбора невозможны ни в свободном растворе, ни между коацерватами.

В этой фазе существенно то, что повышение концентрации определенных веществ как в свободном растворе, так и в коацерватах происходит скачкообразно, что опять-таки повышает вероятность спонтанного появления новых, значимых молекул.

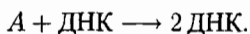
«Ударная волна» в этих простейших случаях движется от молекул некоторого типа 1 к типу 2, а затем экспоненциально затухает. Подобная картина наблюдается и в случае более длинных и разветвленных цепей при условии,

что они не содержат циклов. Появление циклов означает переход на более высокую ступень, когда соответствующая вероятность существенно ниже, чем таковая для простых или разветвленных цепей.

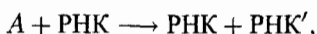
Следующей формой каталитического взаимодействия может считаться образование опытных образцов. Имевшие второстепенное значение на начальных этапах эволюции, процессы молекулярного копирования носителей информации сыграли в дальнейшем ключевую роль — они стали основой механизма передачи наследственных признаков в биологической эволюции. Речь идет об особой форме каталитического преобразования, которое можно записать следующим образом:



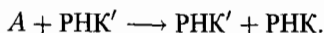
причем A здесь — сырье (например, мононуклеотид), K — молекулярная матрица (РНК или ДНК), а B — образованная в результате реакции копия K . Очевидно, что если K является двойной спиралью ДНК, то и B тоже окажется двойной спиралью, то есть ДНК представляет собой продукт автокатализа:



Правда, скорость этой реакции пока крайне мала. Для РНК, которая обычно представляет собой одиночную нить молекул, сначала образуется парная ей нить:



и только вторым этапом — цепная молекула, идентичная исходной:



Без каталитической поддержки (то есть без так называемой ДНК- или РНК-репликазы) эти процессы протекают исключительно медленно и обладают высокой чувствительностью к помехам.

Как только возникли циклы, каталитические сетки приобрели новое качество. Из циклов составлялись каталитические структуры, различные типы которых существовали лишь совместно или распались. Каталитический цикл воспроизводит все свои элементы, что может привести к заметному повышению концентрации соответствующих типов молекул. Именно поэтому мы оцениваем появление циклов как начало новой фазы эволюции. Гиперциклы же, по определению Эйгена и Шустера [51], представляют собой значительно более сложные агрегаты, нежели простые каталитические циклы.

Фаза 4. Каталитические соединения. На основе фактов, приведенных при рассмотрении третьей фазы, следует признать, что в дальнейшей эволюции коацерватов ключевую роль сыграли производящие катализаторы. Систематическое увеличение количества коацерватов началось только тогда, когда появилась такая система катализаторов, все элементы которой напрямую или опосредованно участвовали в производстве друг друга. Теория графов трактует такого рода систему как неразложимую единицу, или цепь. Примером простейших цепей могут служить циклы. Вероятность появления циклов может быть рассмотрена опять-таки в рамках теории графов [33]. Случайный состав раствора (или коацервата) соответствует некоторому подпространству в пространстве продуктов, заполненном различными типами структур. Поскольку мы не знаем, о каком именно типе идет речь, нам неизвестно и эвентуальное местонахождение каталитических осей (ребер графа). Однако биохимия, в принципе, может ответить на вопросы, касающиеся того, сколько в среднем каталитических осей производства k приходится на n случайно отобранных органических соединений. Соотношение $c = k/n$ — несомненно очень малое число — мы назовем координационным числом графа. Теперь произвольным образом разместим в пространстве продуктов между вершинами графа k ребер и выясним вероятность возникновения при этом цикла с одним элементом.

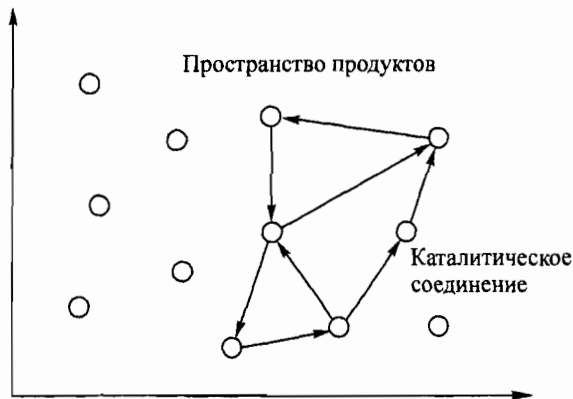


Рис. 7.2. Каталитическое соединение представляет собой самовоспроизводящуюся химическую сетевую структуру.

Полученный ответ может быть представлен в виде $P(l) \sim c^l$. Поскольку координационное число графа очень мало, вероятность возникновения достаточно высока только для самого короткого цикла из числа возможных.

Вероятность же образования более длинных циклов уменьшается, соответственно, в s раз. Достаточно эффективный автокатализ ($l = 1$) по причинам химического характера следует в общем случае исключить; цикл же ($l = 2$), напротив, сравнительно легко представить. Заметим, что речь идет о двух стереохимических комплементарных молекулах, так что конденсация сырья для молекул одного типа ведет к производству молекул второго типа.

Возможны и парные нити молекул ДНК. Однако последние не ведут, как уже было отмечено во введении, непосредственно к дальнейшему развитию и совершенствованию, поскольку скорость репликации ДНК очень мала; давление отбора приводит к укорачиванию цепочек и, тем самым, к их распаду, так что в конечном счете ДНК оказывает стереохимическое влияние практически лишь на собственное дополнение. То же относится и к комплементарной репликации молекул РНК. Таким образом, становится очевидным, что мы имеем дело с катализаторами, которые обладают свойствами, сходными со свойствами белков. Результатом их неспецифического воздействия стало образование внутри циклов паразитических боковых цепей, так что общий каскадный эффект, возникший в предыдущей фазе, теперь приобрел устойчивый характер и вызвал непрерывное увеличение количества вещества и размножение коацерватов. Таким образом, стал возможен отбор, и из теории следует, что «выжить» в ходе этого отбора удалось соединению с наибольшим собственным значением каталитической матрицы, а также всем структурам, находившимся в соответствующих графах за таким соединением.

До сих пор мы ограничивались рассмотрением селективного поведения однородных частей раствора; исследуя же характеристики коацерватов, можно показать, что и картина селективного поведения «микрореакторов», содержащих только линейные сетчатые структуры, практически идентична той, что наблюдается в случае однородных растворов; в обоих случаях наибольшее собственное значение определяет селективную ценность.

Итак, эволюция каталитических циклов может быть представлена следующим образом. Допустим, в процессе каталитической репликации комплементарных полипептидов появляется некая дефектная копия, не являющаяся точным дополнением исходной молекулы: к примеру, молекула 2 производит вместо своего точного дополнения 1 некий мутант $1'$. При последующей репликации возникает молекула $2'$, представляющая собой дополнение к существующей $1'$, и на последнем этапе снова появляется $1'$. Таким образом возникает новый каталитический цикл ($1' - 2'$), вступающий в конкурентную борьбу с начальным циклом ($1 - 2$). Победа остается за тем из циклов, чье максимальное собственное значение окажется наибольшим. Итак, каталитические циклы благодаря своей способности к репликации,

мутации и селекции оказались способны эволюционировать: возникают последовательные циклы со все увеличивающейся скоростью репликации.

И хотя описанный эволюционный процесс еще не оптимизировал способность молекул к созданию целых каскадов подобных «отростков», на этом этапе наверняка постоянно появляются и такие циклы с каталитическими «хвостами», что способствует непрерывному расширению «ассортимента» полипептидов как в свободных растворах, так и в коацерватах.

Фаза 5. Циклы РНК-репликазы. Современная биологическая эволюция основана на взаимодействии двух специализированных типов молекул: молекулы ДНК исполняют роль носителей информации, а белки — функциональную и структурообразующую роли. Ученые (в частности, М. Эйген [47]) выяснили, что система, обладающая только одним из названных типов молекул, оказывается не способна к эволюционному развитию. Спонтанное возникновение набора, который состоял бы из согласованных между собой молекул обоих типов, представляется чрезвычайно маловероятным событием; гипотеза, построенная на основании подобного допущения едва ли может быть признана удовлетворительной. Существует ли выход из создавшейся дилеммы? Если таким выходом, в принципе, может стать описание эволюционных процессов, то ученым может помочь тщательное исследование других процессов развития. В современном человеческом обществе люди работают, по большей части, специализируясь в той или иной сфере деятельности, образуя при этом жизнеспособные развивающиеся системы. Каждая из этих систем возникла не сразу и не была, заметим, «собрана» как мозаика (по отдельности специалисты едва ли окажутся жизнеспособны в масштабе эволюции), — система складывается путем постепенного разделения функций. Здесь действует фундаментальный принцип — принцип разделения труда. Возвращаясь к поставленной в начале раздела дилемме, ответим на следующий вопрос: существовал ли некий простой, еще неспециализированный предшественник молекул ДНК и белков, способный пусть и к примитивному, но одновременному исполнению обеих функций? Действительно, такие молекулы нам хорошо известны — это молекулы РНК. РНК имеет схожую с ДНК базовую последовательность, однако в большинстве случаев не образует двойной спирали. Развиваясь в зависимости от окружающих условий и базовой последовательности более или менее сложных вторичных и третичных структур, РНК может стать стереохимически столь же активной, как и белки. По сию пору РНК выполняет функции посредника при двух «специалистах» — ДНК и белках, и это должно послужить нам достаточным основанием для более тщательного рассмотрения возможной роли РНК в эволюционных процессах.

Приступая к такому рассмотрению, следует исходить из того, что на древней Земле в результате спонтанного синтеза появились, помимо прочего, еще и полинуклеотиды [98, 109]. Разумеется, возникшие таким образом цепочки РНК и ДНК были еще совсем короткими, а их концентрация поначалу оставалась чрезвычайно низкой. В принципе, они уже обладали способностью к спонтанной репликации, однако без каталитической поддержки удвоение происходило все же крайне медленно, и это свойство едва ли повышало эволюционный потенциал полинуклеотидов. Каталитическую поддержку репликации обеспечили особые белки, называемые репликазами. Огромное значение для теории биогенеза имело доказательство того, что уже примитивные, спонтанно возникшие белки — протеиноиды — обладали такими репликативными свойствами [98, 109, 162].

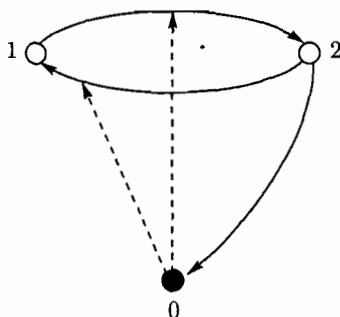


Рис. 7.3. Идеальный цикл РНК-репликазы: на РНК (2) конденсируется примитивный белок (0), обладающий каталитическими свойствами, которые способствуют ускорению образования дополнительной нити РНК (1).

Соединение белков (или протеиноидов), в результате которого образовались полинуклеотиды, должно было, таким образом, произойти очень рано. Конечно, эффективность спонтанно образовавшихся репликаз была еще очень низка. Новая фаза началась, когда в каталитических сетках были произведены и более эффективные репликазы. В зависимости от того, какое положение по отношению друг к другу занимают производящее соединение, репликаза и РНК (или ДНК), можно выделить огромное количество различных случаев, так и не исчерпав при этом всех возможных вариантов. Теоретически (и для нашего рассмотрения тоже) не представляется важным точное выяснение того, какие именно «промежуточные формы» могли быть реализованы при переходе от четвертой фазы к шестой, то есть от каталитического цикла к циклу РНК-репликазы. Однако кажется вполне очевидным,

что некие промежуточные формы при подобном переходе совершенно необходимы и что они могли быть представлены большим количеством самых разнообразных вариантов.

Можно легко представить себе, как среди полипептидов, которые образовались в виде каталитических отростков производящих циклов, нашлось и несколько таких, что содействовали репликации полинуклеотидов, то есть выступали в роли катализатора. Пока спонтанная репликация молекул ДНК или дополнительных нитей РНК представляла собой крайне редкое явление, производство полинуклеотидов ширилось, и их концентрация продолжала расти. В «кильватере» каталитических циклов, производящих репликазы, началось самовоспроизводство, мутации и отбор полинуклеотидов, что способствовало воспроизводству и отбору опытных экземпляров. Процесс репликации таких опытных экземпляров был, естественно, направлен на достижение более высокой скорости; таким образом, вероятно, и осуществялось объединение полипептидов в полинуклеотиды.

Чрезвычайно важна и проблема обратной связи между полинуклеотидами и полипептидами. По нашему мнению, существенное значение для обратной связи имеют слабые каталитические свойства молекул РНК; отсюда, собственно, следует предположение о возможной способности РНК-цикла «породить» в дальнейшем более эффективные в качестве катализаторов молекулы.

Поскольку репликаза едва ли способна произвести дополнение для свернутой в клубок молекулы РНК, мы вынуждены или ограничиться рассмотрением «наименее свернутых» молекул РНК, или же предположить, что свертывание макромолекул в клубок происходит под воздействием колебаний физико-химических условий, так что молекулы РНК попеременно проявляют то свои каталитические свойства, то свойства нуклеиновой кислоты. Репликаза в общем случае обрабатывает цепи нуклеиновых кислот независимо от их базовой последовательности, то есть репликаза производит опытное копирование молекулы. Такое копирование, являясь особой формой каталитического воздействия в растворах (а также в коацерватах), влечет за собой весьма значительные последствия. Во-первых, репликаза катализирует не только образование дополнения исходной нити РНК, но еще и «дополнение дополнения», то есть производит весь комплекс целиком — РНК и комплементарную ей цепь. В селективном отношении такой комплекс не может представлять опасности для собственного производящего соединения коацервата, если молекула РНК зависит от присутствия репликазы, которую не может производить самостоятельно; только при таком условии и возможно заметное повышение содержания РНК в коацервате. Однако молекулы РНК способны мутировать, и такие мутировавшие

молекулы тоже будут копироваться репликазой, то есть все без исключения образуют РНК-циклы (в дальнейшем, возможно, с каталитическими цепями).

Становится совершенно ясно качественное значение нуклеиновых кислот в эволюции: мутируя, они могут, тем не менее, продолжать использовать прежний механизм, поскольку опытные образцы производятся независимо от копируемых молекул.

Отдельные соединения способны к взаимному отбору. Многие из возникающих РНК-соединений образуют «потомство», обладающее каталитическими свойствами; таким образом, появление молекул РНК, самостоятельно производящих необходимую им репликазу, — это, собственно, только вопрос времени. Однако появление таких молекул означает начало нового периода эволюции, так как по сути предполагает возможность взаимного присоединения белковых молекул и полинуклеотидов.

7.4. Протоклетки и создание молекулярного языка

Фаза 6. Циклы РНК-репликасы и протоклетки. РНК-цикл, самостоятельно производящий для себя репликазу, называется циклом воспроизводства РНК-репликасы. Присоединяясь к Р. В. Каплану [98], мы предположим, что такие циклы воспроизводства РНК-репликасы имели фундаментальное значение для возникновения жизни на нашей планете.

Как показывает анализ химических уравнений скорости, цикл воспроизводства РНК-репликасы со специфическими репликасами соответствует двухэлементному гиперциклу Эйгена. В силу квадратичного закона роста гиперциклов системы со специфическими репликасами в ходе отбора одерживают победу над системами с неспецифическими репликасами. Отбор типа «всё или ничего» происходит в результате гиперболической нелинейности роста гиперциклов: однажды возникшая система больше не может быть вытеснена новыми, даже лучшими, из-за их поначалу низкой концентрации. Однако границу, отделяющую специфические репликасы от неспецифических, нельзя назвать очень уж четкой ввиду того, что высокая специфичность проявляется все же скорее редко, чем часто. Эйген и Шустер [51] даже ставили вопрос о том, не было ли появление гиперциклов своего рода «тупиковой ветвью» на пути эволюции. Согласно другим, предпринятым ранее, исследованиям, ответ на этот вопрос может быть только отрицательным, поскольку в силу стохастических эффектов гиперциклы вполне могут сменять друг друга. Вероятность того, что в системе, где уже существуют N представителей некоторого гиперцикла (скажем, типа 1), господство

вдруг перейдет к новому гиперциклу (типа 2), изначально представленному одним-единственным экземпляром, составляет, по оценкам [36],

$$P = (1 + q)^{1-N},$$

где q равно отношению коэффициентов роста рассматриваемых гиперциклов.

Для макроскопических объемов (при очень больших N) эта вероятность практически равна нулю. Иной случай представляют собой коацерваты с диаметром от 1 до 100 мкм, содержащие относительно малое число частиц; таким образом, существование коацерватов открывает новые перспективы для эволюции гиперциклов.

Совершенно иной путь для совершенствования циклов воспроизводства РНК-репликазы связан с процессами отбора коацерватов, поскольку при этом действуют простые законы автокаталитического роста. Рассмотрим коацерват, содержащий всего один цикл воспроизводства РНК-репликазы. Как показывает вычисляемая селективная ценность такой модели, отбор коацерватов с различными циклами воспроизводства РНК-репликазы оптимизирует и скорость репликации, и производство репликазы. Коацерваты, содержащие всего один цикл воспроизводства РНК-репликазы, могут рассматриваться не только как микрореакторы (об этом уже говорилось в предыдущих разделах), но еще и как особого рода протоклетки. Именно такими протоклетками и были сделаны первые шаги по пути долгого развития кооперации и разделения функций между белками и полинуклеотидами. На первом этапе развития кооперации вклад РНК составляли, во-первых, принадлежащие ей огромные емкости для накопления и хранения информационных образцов и, во-вторых, ее слабые каталитические свойства; со стороны репликазы были предоставлены мощная каталитическая способность и ограниченные емкости для накопления и хранения образцов.

Собственно говоря, возникновение коацерватов с циклом воспроизводства РНК-репликазы открыло путь к развитию высокоорганизованных форм жизни; с тех пор принцип естественного отбора мог поддерживать и систематически совершенствовать самовоспроизводящиеся единицы. Постепенно в борьбе за выживание накапливается опыт взаимодействия с окружающим миром.

Теперь рассмотрим, каким образом новым структурам удалось одержать верх в конкурентной борьбе с их возможными предшественниками — коацерватами с производящим соединением, репликазой и РНК. С появлением мутанта РНК', производящего лучшую репликазу, каталитическая ситуация в коацервате изменилась. Математическое моделирование новой

ситуации показывает, что при этом не возникает давления отбора, которое заместило бы прежнюю РНК в коацервате, поскольку обе — и РНК, и РНК' — извлекают пользу из обеих неспецифических репликаз. Иначе, однако, обстоит дело с отбором среди коацерватов, селективная ценность которых зависит от соотношения содержащихся в них РНК и РНК'. При каждом делении это соотношение стохастически изменяется, и при этом может начаться конструктивный отбор.

Таким образом, концепция коацервата оказывается необходимым элементом выдвинутой нами гипотезы, позволяя представить переход от пятой фазы к шестой как неизбежный целенаправленный процесс; как свидетельствуют результаты наших изысканий, существование коацерватов является неперенным условием продолжения любого эволюционного процесса, основанного на нуклеиновых кислотах. Объясняется это тем, что при однородном распределении селективная ценность мутанта всегда определяется скоростью репликации, с которой прежний механизм способен воспроизводить вновь возникшие молекулы нуклеиновых кислот, и лишь эволюция коацерватов помимо прочего оценивает еще и мутировавший фенотип, новый белковый механизм. Таким образом, в ходе дальнейшего развития доминирующую роль играют именно коацерваты с циклами воспроизводства РНК-репликазы; коацерваты способны постепенно повышать свою эффективность в соответствии с селективной ценностью и элиминировать неэффективные, снижающие скорость деления паразитные реакции.

Описанные коацерваты способны эволюционировать, у них существует обмен веществ, они могут размножаться и обладают наследуемыми генотипическими и фенотипическими свойствами. Следовательно, представляется вполне оправданным определить такие коацерваты как протоклетки — самые примитивные возможные предшественники клеток.

Фаза 7. Введение ДНК. Исходя из параметров селективной оценки протоклеток, можно выделить три цели, преследуемые в ходе естественного отбора: увеличение скорости воспроизводства РНК-репликазы, увеличение эффективности репликазы и увеличение плотности коацерватов. Однако в силу двоякой роли РНК увеличение скорости протекавших в ней реакций оказывается жестко ограничено: совершенствование каталитических свойств РНК требует наличия более эффективной пространственной структуры, более сильного скручивания, тогда как для повышения эффективности репликазы требуется, напротив, развернутая, ровная, «удобочитаемая» молекула РНК. Удовлетворять одновременно обоим условиям невозможно; в подобной ситуации существенным шагом вперед может стать только распределение функций между двумя молекулами одинаковой специализации.

По всей вероятности, среди производимых РНК «вариантов» репликазы находились и такие, которые можно обозначить как весьма неспецифические и которые случайным образом производили в качестве комплементарной к РНК нити то молекулу РНК, то молекулу ДНК (точно так же происходило и образование дочерней нити к молекуле ДНК). Поскольку никаких ферментов, способных наладить процесс, тогда еще не было, следует предположить, что либо по причинам, связанным с внутренней средой коацервата, ДНК существовала в форме одиночной нити, либо из-за меняющихся внешних условий иногда происходил разрыв двойной спирали.

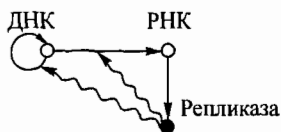
Для размножения коацервата необходим лишь простой каталитический цикл. Вследствие этого РНК, которая больше не была вынуждена заботиться о поддержании «удобочитаемой» развернутой формы, полностью переключилась на выполнение каталитической функции в процессе производства репликазы, а ДНК взяла на себя роль накопителя информации — роль, для которой этот тип молекул, как известно, и предназначен. РНК и по сей день выполняет функции посредника между ДНК и белком; разумеется, теперь эта функция осуществляется в гораздо более дифференцированной форме.

Комплементарные нити оказались РНК не нужны, но синтез их — как «предмета роскоши» — продолжался. Произошедшие в этой фазе изменения представляются достаточно основательными, и теоретический анализ этих изменений подтверждает предположение о том, что эволюция таким образом действительно ведет к повышению селективной ценности коацерватов. Следует отметить, что полученные нами соответствующие формулы все же слишком сложны для того, чтобы удачно вписаться сюда, а потому мы их опустим.

Мы приходим к выводу, что произошедшее в седьмой фазе введение ДНК в качестве накопителя информации оказалось связано с большими преимуществами: на последующих этапах развитие РНК сначала ограничивалось целенаправленной специализацией на выполнении ею каталитической функции (транспортная РНК), а затем возникла долгосрочная тенденция к систематическому усовершенствованию репликазы.

Фаза 8. Вспомогательные ферменты. Обмен веществ коацерватов, ставший значительно более эффективным благодаря разделению функций РНК–ДНК, естественно, давал отдельным молекулам из общего фонда ДНК возможность мутировать, чтобы таким образом открывать новые пути для дальнейшего совершенствования. При этом следует помнить, что описываемые протоциты в значительной мере состояли из ДНК и содержали, в отличие от современных нам клеток, всего одну или несколько молекул. При рассмотрении предыдущей фазы мы уже указывали на тот факт,

что селективная ценность очень во многом зависит от константы скорости реакции; а потому — с теоретической точки зрения — едва ли возможно решить, какие же именно участки каталитической сетки более всего нуждались во введении вспомогательных ферментов (или катализаторов), иначе говоря, где введение ферментов обеспечит наибольшее увеличение селективной ценности. Но к первоочередным задачам, разумеется, относятся две: во-первых, ускорение воспроизводства репликазы на РНК посредством ферментов, называемых синтетазами, или лигазами, а во-вторых, разделение функций репликазы — удвоение молекул ДНК (дубликаза) и перенос информации ДНК на РНК (транскриптаза) (рис. 7.4)



тождественно:

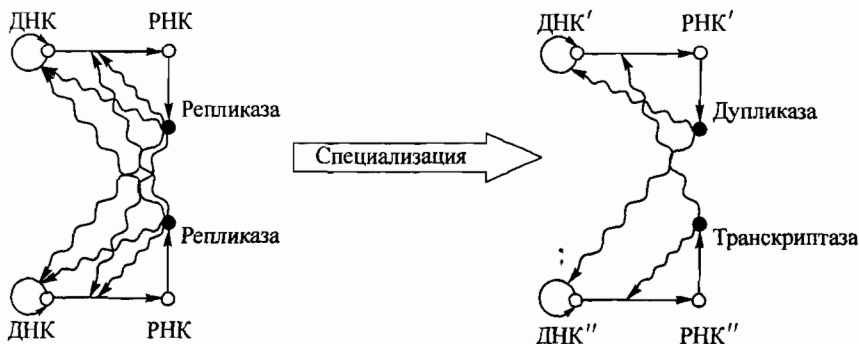


Рис. 7.4. Разделение функций репликазы путем специализации на различных задачах: интерпретация (транскриптаза) и копирование (дубликаза) генетического «текста».

Изменения структуры каталитической сетки принципиально могут быть разделены на следующие три класса:

1. Разделение функций

Примером разделения функций может служить репликаза, которая сначала несла на себе как функцию удвоения молекул ДНК, так и функцию

копирования информации с ДНК на РНК. Процесс разделения функций протекает непрерывно.

Сначала появляются молекулы репликазы, способные справиться с первой задачей несколько успешнее, нежели со второй. Это позволяет исходным молекулам образовать такие вариации, которые больше соответствуют выполнению второй функции, и т. д. Описанный процесс разделения функций обнаруживает сходство с кинетическими фазовыми переходами второго рода.

2. Объединение функций

Объединение функций представляет собой процесс, обратный первому: задача, для решения которой первоначально предназначались два различных катализатора, претерпевает такие изменения, что в результате ее способен решить уже всего один катализатор. Этот процесс, конечно, не так значим, как первый.

3. Смена функций

Примером здесь может послужить реорганизация синтеза белков на РНК, при которой происходит не постепенная дифференциация функций, а резкое, внезапное изменение. Контроль за функцией, которая до сих пор вообще не контролировалась катализаторами, может оказаться захвачен одним из мутантов. Поскольку при этом не совершается гладкого перехода, такая форма, естественно, встречается реже, но зато приносит с собой чрезвычайно существенное изменение свойств, вследствие которого происходит очень быстрый и мощный рост селективной ценности. Описанный процесс аналогичен кинетическому фазовому переходу первого рода.

Все три представленные класса изменений обладают значительным сходством еще и с онтогенетической дифференциацией клеток, а также с филогенетическим процессом образования видов и социальными процессами разделения труда.

Общая фаза носит характер стремительного самоускорения; каждый из возникших в результате отбора ферментов делает обмен веществ все более эффективным и позволяет продолжать стохастические поиски новых катализаторов, что приводит к появлению очень сложной каталитической сетки. Эту фазу можно определить как фазу экстенсивного развития ферментативного аппарата [181, 182].

Математическое моделирование здесь уже чрезвычайно сложно, а потому ограничимся обсуждением процесса дифференциации «репликаза → дупликаза + транскриптаза».

Модели коацервата, содержащего одновременно и старые, и новые формы катализаторов, дают представление о том, насколько эффективнее долж-

ны стать последние, чтобы «окупились» затраты на специализацию; выясняется, что условия такой «окупаемости» весьма непросты. Интересно, что селективная ценность чрезвычайно сильно зависит от соотношения обоих типов ДНК-молекул, и существует по меньшей мере один оптимальный вариант, в общем случае отличный от соотношения 1:1. Путем отбора такое оптимальное соотношение достигается, разумеется, очень быстро. Однако в силу того, что функция в данном случае сравнительно сложна, то и селективная ценность здесь уже не может быть выражена монотонной функцией от константы скорости реакции, как это было возможно, когда мы имели дело с упрощенными примерами. Это означает, что при оптимальном соотношении старых и новых катализаторов отбор направлен на достижение уже не максимально возможных скоростей, а оптимальной скорости, которая обеспечивает наиболее полную согласованность всех каталитических цепей. Результатом оказывается четко сбалансированное сочетание концентраций и скорости реакций, повышение же чувствительности к малейшим изменениям условий является в данном случае той характерной чертой, что отличает системы, уже достигшие высокой степени сложности организации.

Фаза 9. Модульный принцип. Экстенсивное развитие ферментативного аппарата в ходе восьмой фазы очень скоро наталкивается на принципиальный барьер. Собственно, экстенсивная фаза предваряет и инициирует следующую за ней фазу интенсивного совершенствования ферментативного аппарата, и восьмая фаза уже несет на себе отпечаток качественно новой формы.

Из биохимии нам известно, что эффективные современные ферменты по большей части относятся к группе глобулярных белков. Такие белковые нити, свертываясь в клубки, образуют пространственные складки и «гнезда», посредством которых они способны стереохимически распознавать и обрабатывать другие молекулы (принцип «ключ–замок»). Одноэтапное производство подобных белков из простого сырья практически невозможно. Введение эффективных катализаторов было, следовательно, связано с образованием более или менее длинных цепочек синтеза для этих белков, причем они как на конвейере последовательно нанизываются друг за другом. Совершенствование цепочек белкового синтеза началось, вероятно, уже с появлением первых репликаз, но простоты ради мы до сих пор оставляли эти процессы без внимания.

Такого рода цепочка представляет собой, в общем случае, последовательность каталитических и некаталитических реакций обмена и каталитической или некаталитической сборки готовых элементов. В фазе экстенсивного развития ферментативного аппарата возникла возможность при

помощи особых ферментов радикально увеличить скорость ряда стадий обработки, которые без каталитической поддержки протекали чрезвычайно медленно. Но поскольку все без исключения вспомогательные ферменты теперь должны были производиться каталитическим аппаратом самой клетки и зачастую оказывали только какое-то одно очень специфическое воздействие, при этом возникло весьма существенное противоречие: скажем, если для синтеза n белков необходимо в среднем m промежуточных стадий, то для полного прохождения всех ступеней потребуется $n \cdot m$ катализаторов; чтобы произвести такое количество катализаторов, следует задействовать в процессе $n \cdot m \cdot m$ катализаторов и т. д. Очевидно, что при экстенсивном развитии ферментативного аппарата потребность в катализаторах растет быстрее, чем «производственная мощность».

Существует единственная возможность сохранения небольшого числа некаталитических промежуточных ступеней: на нескольких первых ступенях синтезировать различные белки совместно, а позднее, только на последних стадиях, разделять их в соответствии с назначением. Использование участков совместного синтеза, в определенном смысле, уже было предопределено и предыдущей фазой, поскольку при мутациях, запускавших процессы разделения или смены функций, длинная цепь синтеза наверняка не каждый раз перестраивалась полностью — вероятно, часто происходили изменения только на отдельных стадиях.

Возможно, вышеописанный процесс и послужил совершенствованию производства ферментов, но принципиально проблему он все же не решал: среднее число катализаторов, необходимых для синтеза n белков, хотя и стало меньше, но все так же зависело от n . Решительный прорыв свершился только благодаря принципу стандартизации всех ступеней синтеза. Прежняя «технология производства» предполагала маркировку белка типом различных фрагментов, входящих в его состав, а последовательность соединения этих фрагментов определялась их химическими свойствами и спецификой катализаторов.

Но по мере того, как в целях объединения функций количество различных используемых фрагментов и соответствующих катализаторов должно было сократиться, производимые белки перестали различаться типами использованных фрагментов; теперь их отличала друг от друга последовательность их синтеза. Итак, вследствие объединения функций началось производство не только «желательных» белков, но еще и определенных подклассов перестановок их фрагментов (в той мере, в какой их последовательность оставалась химически неопределенной). В результате возникла необходимость каким-то химически читаемым способом «записывать» последовательность фрагментов, соответствующих определенному белку.

Простейший из возможных вариантов таков: участки ДНК, кодирующие тот или иной фрагмент посредством РНК, объединяются в последовательность, образуя более длинную ветвь молекулы, которая отвечает за синтез определенного белка. Естественно, для этого требуется своего рода химическое «управление»: начало и конец сегмента ДНК должны быть маркированы и распознаны, необходимая для синтеза последовательность должна быть присоединена к считывающей последовательности на ветви ДНК и т. д. Так возникла генетическая грамматика.

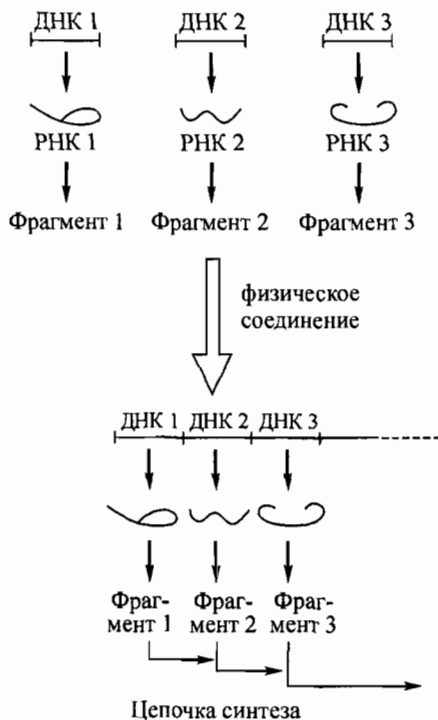


Рис. 7.5. Закрепление последовательности фрагментов в процессе синтеза означает введение примитивной грамматики (например, пунктуации).

Первоначальная технология производства белка предполагала поддержание по возможности малого количества фрагментов одного белка — чтобы без необходимости не удлинять цепочку синтеза; новый же способ оказался вовсе не чувствителен к увеличению числа фрагментов, коль скоро все

Белок =

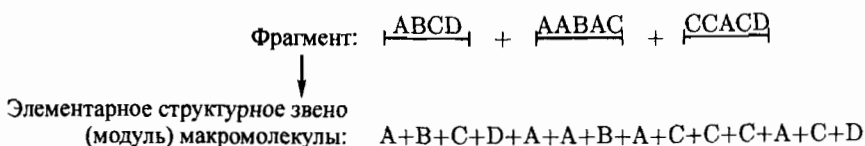


Рис. 7.6. Синтез белков: переход к стандартизованным модулям.

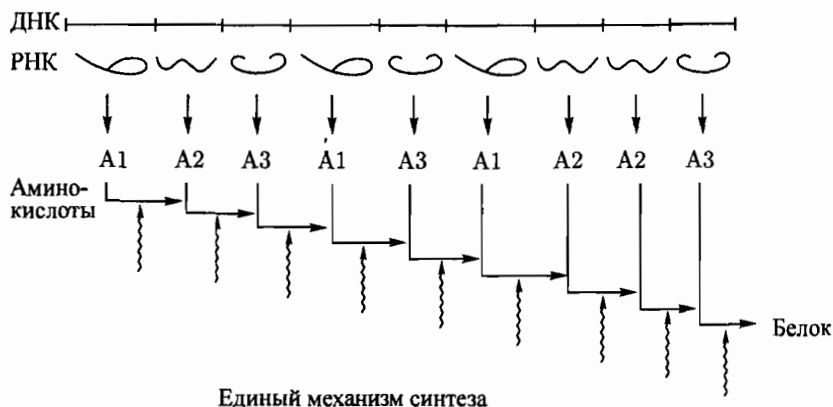


Рис. 7.7. Только единое управление стандартизованными элементами позволяет производить больше белковых продуктов, нежели имеющиеся в наличии ферментативные инструменты.

участвующие в процессе фрагменты относились к определенному классу соединений, и механизм синтеза был способен их обрабатывать. Таким образом, появилась возможность для развития следующей тенденции: число фрагментов белка увеличивалось, однако сами фрагменты сократились до небольшого класса элементов, сложность каждого из которых теперь стала значительно ниже, чем прежде. Такие элементы можно было синтезировать или использовать в качестве сырья; они относились к тому типу молекул, который мог быть обработан имеющимся механизмом в соответствии с новым единым стандартом, то есть они должны были иметь специфический, отличающий их конец и общий «гриф», что обеспечивало захват молекул механизмом вне зависимости от их специфики. Кроме того, описываемые элементарные звенья могли соединяться друг с другом, образуя некоторую произвольную последовательность, и, объединившись таким образом, со-

здавать большое разнообразие белков. Можно предположить, что для этой «цели» тогда были «избраны» L- α -аминокислоты — отчасти по необходимости, отчасти случайно.

Итак, к концу данной фазы ДНК коацерватов состояла из большого количества фрагментов, каждый из которых отвечал за синтез определенного белка. Каждая ветвь представляла собой сочетание сегментов, содержащих в себе информацию, необходимую отдельным аминокислотам для участия в процессе синтеза. Переход к модульному принципу был, таким образом, неизбежен и мог осуществляться путем медленных, «пошаговых», изменений.

7.5. Ритуализация генетического кода

Фаза 10. Генетическая «стенография». Совершенствование модульного принципа на протяжении девятой фазы выразилось, прежде всего, в количестве и эффективности существовавших на тот момент катализаторов. Можно допустить, что и синтез стандартизованных РНК-молекул, каждая из которых соответствовала определенной аминокислоте, должен был производиться уже не повсюду, где эти молекулы закодированы на ДНК. Так как в ДНК, предназначенной для синтеза белка, сегменты задают, собственно, только последовательность стадий синтеза, полная информация о структуре относящейся к определенной аминокислоте РНК становится, благодаря модульному принципу, ненужной. Соответственно, сегменты ДНК состояли из короткого, специфического для той или иной РНК, отрезка, называемого идентификатором, и обширного избыточного остатка (рис. 7.8).

Механизм синтеза мог теперь быть перестроен таким образом, чтобы при производстве белка из имеющегося набора элементов ДНК выбирать

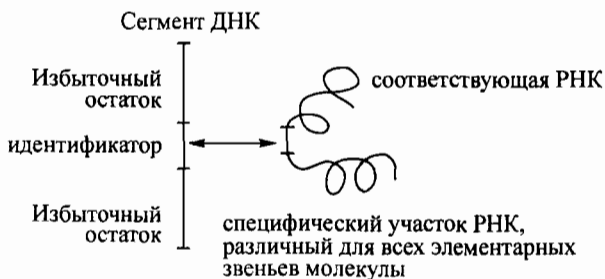


Рис. 7.8. Ритуализация. Редукция полного ДНК-текста к одиночным символам представляет собой акт ритуализации.

каждый раз только те, которые соответствуют ближайшему следующему идентификатору ДНК, а затем присоединять соответствующую аминокислоту. Избыточные участки ДНК постепенно могли быть удалены (коль скоро это не создавало помех работе механизма синтеза) посредством мутаций, так что информационная емкость ДНК-молекулы определенной длины возрастала — по сравнению с прежним способом кодирования — на 1–2 порядка. Оба способа кодирования на протяжении всего долгого переходного периода могли применяться в коацерватах параллельно, то есть имело место не мгновенное преобразование полного кода в сокращенный, а развитие нового кода на основе старого транскрипционного механизма.

Такая перестройка кодирования предполагала готовый модульный способ; кроме того, она весьма существенным образом содействовала усовершенствованию и сохранению этого способа. Собственно, в полном кодировании изначально имелся серьезный изъян. Каждая мутация на ветви ДНК означала изменение относящейся к ней РНК, а тем самым и нарушение модульного принципа, действие которого основано на постоянстве количества типов РНК. С другой стороны, мутации, которые изменяли бы последовательность синтеза самих модулей в рамках модульного принципа, были практически исключены, и изменчивость обеспечивали разве только разрыв молекул, кроссинговер или тому подобные сильные воздействия, поскольку спонтанное замещение одного сегмента другим в результате точковой мутации до крайности невероятно. Иначе обстоит дело с сокращенным кодированием. Предположим, что в качестве идентификаторов выступали совсем короткие отрезки и что количество элементов-модулей было не намного меньше, чем число различных возможных идентификаторов; тогда каждая точковая мутация вызывала замещение одного идентификатора другим (также разрешенным), то есть мутации почти всегда представляли собой обмен аминокислотами в белке. Таким образом модульный принцип только в этой фазе поддерживал требуемую генетическую изменчивость, что является необходимым условием для быстрого дальнейшего развития и совершенствования белкового фонда.

Как и многие другие, прежние, новшества, перестройку кодирования можно интерпретировать как процесс разделения труда: из обладавшей первоначально функциональным единством ДНК и соответствующей ей РНК возникают три различные категории (рис. 7.9)

Прежде всего следует назвать ДНК, на которой — как и раньше — происходит синтез соответствующей РНК. Здесь сохраняется принцип полного кодирования, только на этот раз, разумеется, в применении к отдельным основаниям, и такая РНК является предшественницей сегодняшней тРНК.

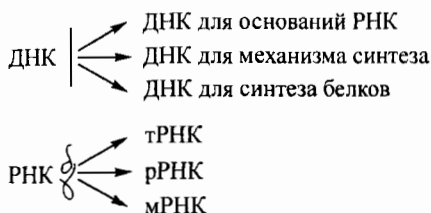


Рис. 7.9. Развитие универсального механизма синтеза белка привело к разделению функций ДНК и РНК.

Ко второму типу молекул ДНК относятся те, что отвечают за создание механизма синтеза белка. Соответствующие этому типу молекулы РНК являются предшественниками сегодняшней рРНК, которая представляет собой своего рода отпечаток прежних времен, свидетельствующий о том, что первоначально РНК напрямую использовалась еще и для выполнения каталитических функций. Все формы РНК относятся к очень древним (в смысле эволюционного развития) образованиям, поскольку в рецентной живой природе они обнаруживаются в почти неизменном виде.

Третий класс ДНК-молекул предназначен для белкового синтеза как такового. РНК, образованная на комплементарной нити первоначально использовавшейся ДНК, предшествовала появлению сегодняшней мРНК, ответственной за последовательность «укладки» оснований в процессе синтеза.

Переход от полной формы кодирования к сокращенной увеличил гибкость, мобильность и возможную емкость модульного механизма; следствием этого стало мощное экстенсивное и интенсивное развитие ферментативного аппарата, ограниченного только количеством оснований. Относительно же обработки генетической информации многоклеточными организмами необходимо высказать следующие соображения. С одной стороны, известно, что генетическая информация, будь она просто нанизанной на молекулярные нити (подобно бусинам), никогда не стала бы достаточной информацией для каждой отдельной клетки. Следовательно, информации предстояло «уплотниться», то есть разместиться в соответствии с определенной грамматикой. С другой стороны, мы знаем, что развитие многоклеточных произошло только после появления ядра в добиологической клетке. Об эукариотах уже неоднократно упоминалось: мРНК, считанная с ДНК, «расчленилась» и обрабатывалась еще до ее выхода из клеточного ядра для участия в синтезе белка [121]. С точки зрения теории языка, такая обработка может быть представлена как реализация своего рода генеративной грамматики, так что клеточное ядро наряду со статической задачей накоп-

ления информации выполняет еще и динамические функции, выступая в роли «компилятора», то есть переводя языковые команды в машинные.

Фаза 11. Кодоны: язык символов. Первоначальный механизм транскрипции был основан на конденсации простых органических молекул на третичной структуре РНК, а потому набор оснований ограничивался только аминокислотами, которые в достаточной концентрации образовывались в результате спонтанного синтеза. Например, согласно экспериментам Улама (1965), нагреванием смеси $\text{HCN} + \text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O}$ или $\text{НСОН} + \text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O}$ до 150°C можно получить следующие из «современных» аминокислот: Gly, Ala, Ser, Val, Asp и Lys. Таким образом, первоначальный набор оснований едва ли содержал более 6–10 аминокислот, преимущественно же это были лишь две самые простые и распространенные в природе — глицин и аланин. В результате и «язык пептидов» получился наипростейшим из возможных: двоичная система, котóрую в качестве идентификатора вполне удовлетворял нуклеотид. Последовавшая затем редукция избыточных участков ДНК была, правда, не полной: по стереохимическим причинам образовался сегодняшний триплет, и идентификатор оказался, таким образом, заключен справа и слева от «запятой».

Если в центре находилось, допустим, пиримидиновое основание (U, C), то вводился аланин, а пуриновому основанию (A, G) соответствовал глицин. Однако такая система не располагала хоть сколь-нибудь достаточными структурными резервами, а потому количество оснований росло, и в процесс включались все более сложные аминокислоты. Развитие этой тенденции медленно вело к усложнению элементов системы; поскольку подобные элементы едва ли существовали в системе в нужном количестве, их было необходимо синтезировать, что требовало уже соответствующего каталитического механизма. Поэтому сначала в кодировании, естественно, были задействованы свободно существовавшие аминокислоты; возникшие катализаторы были способны преобразовать простые аминокислоты в более сложные, которые опять-таки могли быть привлечены к процессу, в результате чего возникали более совершенные катализаторы и т. д. Для более точной маркировки дополнительных аминокислот на ДНК производилось считывание нуклеотидов, причем запятые также учитывались в качестве символов. Чтобы исключить возможность внесения рассматриваемыми процессами значительных нарушений в механизм, химические структуры вновь присоединенных аминокислот (закодированных определенным триплетом) должны были сохранять сходство с прежними структурами.

Здесь тоже обнаруживаются типичные признаки процесса разделения функций: 32 триплета (X-пиримидин-X или, соответственно, X-пурин-X),

первоначально наделенные одинаковыми функциями, постепенно обзаводились функциями, все более и более отличными друг от друга. Правда, такого рода процесс, вероятно, никогда не может быть полностью завершен, поскольку необходимости в использовании всех 64 возможных элементов так и не возникло.

Сравним теперь наши гипотетические рассуждения с «записями» о событиях того времени, содержащимся в генетическом коде (рис. 7.10).

	U		C		A		G	
U	UUU	Phe	UCU	Ser	UAU	Tyr	UGU	Cys
	UUC		UCC		UAC		UGC	
	UUA	Leu	UCA		UAA	*	UGA	*
	UUG		UCG		UAG	*	UGG	Try
C	CUU	Leu	CCU	Pro	CAU	His	CGU	Arg
	CUC		CCC		CAC		CGC	
	CUA		CCA		CAA	CGA		
	CUG		CCG		CAG	CGG		
A	AUU	Ile	ACU	Thr	AAU	Asn	AGU	Ser
	AUC		ACC		AAC		AGC	
	AUA	Met	ACA		AAA	Lys	AGA	Arg
	AUG		ACG		AAG		AGG	
G	GUU	Val	GCU	Ala	GAU	Asp	GGU	Gly
	GUC		GCC		GAC		GGC	
	GUA		GCA		GAA	GGA		
	GUG		GCG		GAG	GGG		

Рис. 7.10. Универсальный генетический код упорядочивает символы (триплеты) в соответствии с их значениями (аминокислоты).

Прежде всего бросается в глаза, что в зависимости от того, какой именно нуклеотид находится в центре, аминокислоты могут быть распределены по четырем основным группам; не менее важно и то, каким нуклеотидом занята первая позиция, тогда как третий часто либо совсем остается без внимания, либо учитывается только его пуриновая (или, соответственно, пиримидиновая) природа. Намерение хотя бы в самых общих чертах разобраться в истории возникновения генетического кода предполагает необходимость отыскать в самом коде некую «хронологическую таблицу», содержащую датировку важнейших событий, произошедших в ходе рассматриваемого процесса. Биологическая (да и социальная) эволюция свидетельствует о том, что сложность объектов, как правило, представляет собой величину, кото-

рая, в основном, непрерывно и монотонно возрастает с течением времени. В химическом отношении кодоны (триплеты), в принципе, равно сложны; аминокислоты же, напротив, демонстрируют отчетливые различия по степени сложности химической структуры. Итак, следует найти некую меру для измерения этой сложности: при математическом рассмотрении мы должны определить соотношение количества аминокислот, характеризующее их упорядоченность или по меньшей мере полуупорядоченность. Поверхностное представление о соотношении такого рода можно получить достаточно просто — при условии, что ради этой простоты нам придется пренебречь всеми химическими тонкостями.

Поставим в соответствие аминокислотам натуральные числа и определим таким образом рефлексивное отношение упорядоченности: пусть $Z(A)$ — число содержащихся в аминокислоте A атомов С, О, N или S. Если через $N(Z)$ обозначить число различных аминокислот, количество атомов в которых равно Z , то для существующего на сегодня распределения аминокислот мы получим в очень хорошем приближении распределение Пуассона, что подчеркивает случайный характер введения данных элементов в код. Расположим в таблице генетического кода числа $Z(A)$ вместо триплетов; результат такой замены представлен на рис. 7.11.

	U	C	A	G	
U	12	7	13	7	U
U	12	7	13	7	C
U	9	7	—	—	A
U	9	7	—	15	G
C	9	8	11	12	U
C	9	8	11	12	A
C	9	8	10	12	C
C	9	8	10	12	G
A	9	8	9	7	U
A	9	8	9	7	A
A	9	8	10	12	C
A	9	8	10	12	G
G	8	6	9	5	U
G	8	6	9	5	A
G	8	6	10	5	C
G	8	6	10	5	G

Рис. 7.11. Сложность кодированных аминокислот как мера времени фиксации генетического «синтаксиса».

Эти числа могут быть интерпретированы как основа для отсчета времени фиксации значений соответствующих кодонов. Мы получаем, таким образом, вполне определенную историческую картину. Сначала была изжита двоичная система Ala/Gly, стало возможным точное считывание центрального нуклеотида и присоединение к нему еще двух аминокислот; тем самым была создана система из четырех групп, и каждая из этих групп прошла собственный эволюционный путь. Далее последовало построчное отсечение вырожденного кода, первая буква триплета сначала распознавалась как пурин или пиримидин, а затем точно считывалась. К этому моменту относится фиксация аминокислот из второго столбца приведенной таблицы, в то время как все остальные продолжают развиваться. Промежуточную стадию эволюции генетического кода описывает так называемая гипотеза неоднозначного соответствия Ф. Крика. Количество аминокислот росло, и последний нуклеотид в триplete также регистрировался теперь как пуриновый или пиримидиновый. Но химические свойства аминокислот из первого столбца таблицы уже в достаточной мере отличаются от свойств аминокислот второго столбца, так что и их можно рассматривать как фиксированные, и считывание третьей буквы триплета имеет к ним лишь частичное отношение. Полностью же принцип считывания третьей буквы был реализован в процессе дальнейшей эволюции аминокислот из третьего столбца, после чего произошло окончательная их фиксация. Развитие же аминокислот из четвертого столбца и точное считывание всех нуклеотидов так и не было завершено, прервавшись ввиду установления целостности всего генетического кода, на что указывают и лишь частичное использование аминокислот из четвертого столбца, и позднее введение серосодержащих аминокислот метионина и цистина, а также более сложного триптофана; Met и Trp маркируются только по одному кодону. Кроме того, известно, что в настоящее время 64 кодона являются узнаваемыми только примерно для 40 различных тРНК, и точное считывание всех трех нуклеотидов, таким образом, исключается.

Представленная здесь гипотеза развития генетического кода основана прежде всего на четкой корреляции, существующей между простотой аминокислоты и степенью вырожденности соответствующего триплета. Введение в код серы — в отличие от «нормальных» атомов C, O, N — имеет ряд особенностей, что и отражено в том, что сере в ряду $Z(A)$ соответствует большее натуральное число.

В истории генетического кода нас интересует не только хронология событий, но еще и пути, избранные эволюцией, а потому следующая наша задача заключается в создании своего рода «эволюционного древа» аминокислот. Основанием для такого «древа» нам послужит иррефлексивное

полуупорядочение $A \rightarrow A'$ на множестве аминокислот. Степень сложности аминокислоты определяется не только количеством составляющих ее атомов, но еще и размещением этих атомов в молекуле. Если мы условимся вновь обойти вниманием множество химических тонкостей, то полуупорядочение может быть определено следующим образом: присоединение атомов С, О, N, S к структурной формуле A дает в результате A' . Полученное нами «эволюционное дерево» аминокислот представлено на рис. 7.12. Цифрами в скобках обозначена принадлежность к определенной группе кодонов, а символы п, р, +, – характеризуют физико-химические свойства радикалов в водном растворе при значении pH , равном 7:

п: неполярные;

р: полярные, незаряженные;

+: полярные, положительно заряженные;

–: полярные, отрицательно заряженные.

Разветвления «эволюционного дерева»:

X1: Gly–CH₂–CH₃ (аминомасляная кислота);

X2: Gly–CH₂–CH₂–CH₃ (норвалин);

X3: Gly–CH₂–CH₂–CH₂–CH₃ (норлейцин);

X4: Gly–CH₂–CH₂–CH₂–NH₂ (орнитин).

Сегодня эти аминокислоты не относятся уже к стандартному множеству, однако в процессе эволюции генетического кода они, вероятно, были важны. К примеру, ветвь X4 (орнитин) являлась для аргинина первой ступенью биосинтеза и играла огромную роль в мочевином обмене. Более того, возможно, что именно полиорнитин и был проторепликазой [98].

Рассмотрим «эволюционное дерево» подробнее. Бросается в глаза то, что первые три группы включают в себя относительно однородные ветви, тогда как четвертую группу отличает свойственная только ей гетерогенность. Далее путем сопоставления с таблицей генетического кода можно убедиться в том, что погрешности кодирования внутри группы (например, Phe в первой или Tug в третьей группе) постоянно соответствуют «погрешностям» расположения соответствующей кислоты в структуре дерева. Однако дерево было построено нами только на основании структурных формул

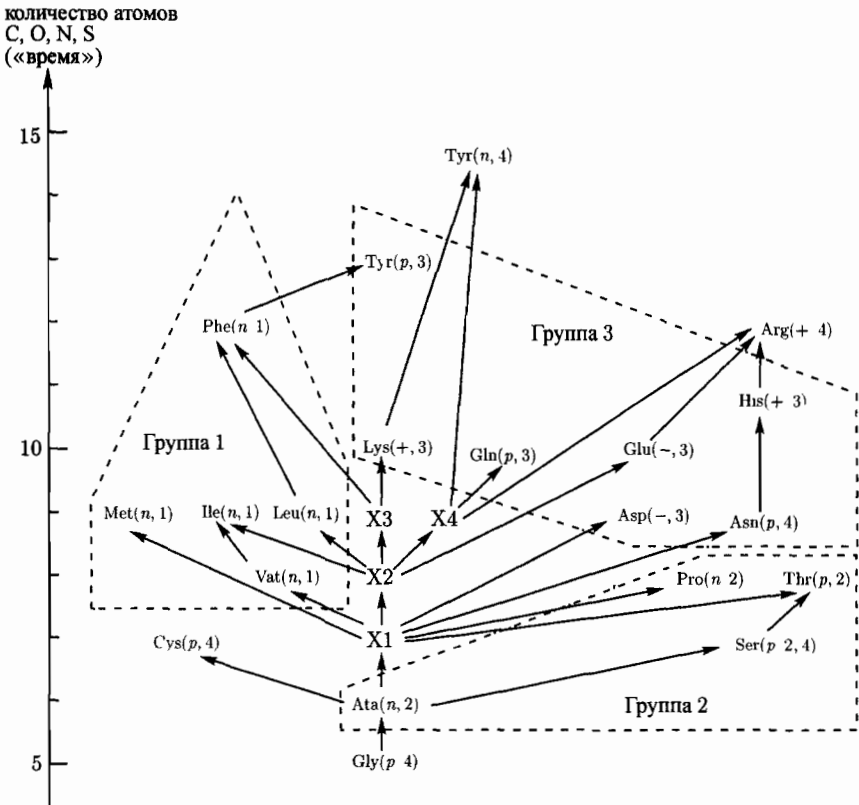


Рис. 7.12. Схема «эволюционного древа» развития генетического кода.

аминокислот, то есть совершенно независимо от таблицы кода, а это значит, что таким образом мы получаем четкое указание на существование связи между эволюцией генетического кода и расширением набора аминокислот.

Все рассматриваемые нами группы возникли из одной общей структуры, образованной из Gly и Ala (с X1 по X4). Как же соотносились между собой химическая активность и полярность (или заряд) аминокислот? Поначалу закрытая вторая группа объединяла как полярные, так и неполярные элементы, иначе говоря, в нее входили и пассивные ингредиенты-наполнители (n), и активные (p) вещества. В результате сформировался весьма эффективный механизм, позволяющий вступать в процессы синтеза элементам первой группы (всем без исключения неполярным). Здесь, возможно, сыгра-

ла определенную роль и термическая неустойчивость отдельных элементов второй группы (Pro, Thr и Ser), так что расширение набора аминокислот стало, ни много ни мало, насущной необходимостью. Начало эволюции третьей группы, все элементы которой полярны, относится к несколько более позднему (по сравнению с первой группой) периоду. Первая и третья группы, таким образом, отражают весь процесс дальнейшего развития второй группы, где произошло разделение функций ингредиентов-наполнителей и активных веществ.

До определенной степени допустимо сравнение третьей группы с ящиком инструментов особого назначения, которые используются в мастерских по производству ферментов. К периоду развития именно этой группы следует отнести и столь важное событие, как соединение прежде раздельных нитей ДНК, предназначенных для синтеза различных белков, а это означало необходимость определения некоего терминатора (выполняющего те же задачи, что и знак «точка» в тексте). Следы каждого из произошедших изменений обнаруживаются и в четвертой группе, однако на полную загрузку ее информационной емкости данных явно не хватило. В то же время это совсем не означает, что аминокислоты, закодированные в четвертой группе, недостаточно важны: цистин, к примеру, имеет фундаментальное значение для синтеза многих белков благодаря содержащимся в этой аминокислоте атомам серы.

Последовательно развивая предлагаемую нами гипотезу о ходе эволюционных процессов, мы достигли фазы возникновения так называемого минимального организма, то есть той фазы, которая с точки зрения молекулярной генетики уже несет в себе все основные черты современного генетического аппарата. Однако в нашей модели, в отличие от других, данная стадия представляет собой результат длительного и сложного процесса эволюции и дифференциации, и структурные звенья химической цепи отнюдь не случайным образом оказались соединены друг с другом, — каждое из этих звеньев к тому времени уже было высокоспециализированной молекулой, развитие которой явилось следствием процессов разделения функций. Эту стадию мы определяем как пороговую в эволюции жизни.

На этом уровне уже представляется вполне сообразным говорить и о языке кодирования ДНК. Во-первых, этот язык применяет символы (триплеты) для описываемого им содержания; такое конечное множество символов образует, в рамках теории языка, терминалы. Во-вторых, существует нетривиальная грамматика, которая упорядочивает данную последовательность терминалов. Это может быть доказано на современной ДНК путем комплексных исследований, выявляющих ее относительно высоко упорядоченную структуру.

Существование такой грамматики подтверждается тем, что порожденный ею ферментативный аппарат подчинен жестким требованиям достижения максимальной селективной ценности. Ферменты, как правило, состоят из активного центра и ряда ингредиентов-наполнителей, придающих всей структуре шаровидную форму. Таким образом, между аминокислотами возникают многочисленные корреляции, выступающие в роли грамматических правил (которые, по сути, представляют собой корреляции между элементами текста).

Фаза 12. Фиксация кода. Селективная ценность коацерватов определялась скоростью их роста, а значит — скоростью их размножения, которая, в свою очередь, зависела прежде всего от продуктивности ферментативного аппарата, находившейся под влиянием нуклеиновых кислот. С уменьшением непосредственного — и увеличением косвенного — влияния их на продуктивность ферментативного аппарата было связано развитие и совершенствование процессов генетического кодирования. Относительная концентрация нуклеиновых кислот (по сравнению с количеством белков) в коацервате непрерывно росла, тогда как физическая доля их в общей массе коацервата по-прежнему оставалась незначительной. В смысле селективной ценности нуклеиновые кислоты с их механизмом кодирования были просто еще одним средством для достижения цели; совершенствование механизма кодирования как таковое утратило самостоятельное значение и поощрялось в ходе отбора только до тех пор, пока это напрямую сказывалось на эффективности ферментативного аппарата и, тем самым, на селективной ценности.

Развитие триплетного кода и возможность использования примерно двадцати аминокислот открыли доступ к структурным и функциональным резервам, которые оказались настолько велики, что далеко не были исчерпаны в ходе последующей эволюции коацерватов. Семантические изменения фиксируемой информации, легко возникавшие в результате точковых мутаций и способные столь же легко реализовываться (посредством оставшегося неизменным механизма считывания и синтеза) в виде фенотипических изменений, были абсолютно достаточны для быстрого повышения селективной ценности. Внесение синтаксических изменений в процесс обработки информации для освоения дополнительных структурных резервов было, тем самым, лишено какого бы то ни было смысла — в них попросту не было ни малейшей необходимости; напротив, изменение синтаксиса (любое, пусть даже частичное) создавало помехи для согласованной работы отлаженного механизма, нанося ущерб непосредственно в момент своего возникновения и не принося совершенно никакой пользы в дальнейшем. На этом уровне развития дальнейшая филигранная отделка генетического кода

или оказалась вовсе ненужной, или необходимость этой работы была по крайней мере на несколько порядков слабее прочих эволюционных факторов, к которым относятся, к примеру, синтез мембран или компартментация коацерватов: они могли существенным образом улучшить обмен веществ и реализоваться на основе несовершенного кода. Посему подобное ограждение синтаксической части генетического аппарата (ДНК для тРНК и мРНК, ДНК для синтеза белков) от мутационных изменений было даже выгодно и обеспечивалось, к примеру, развитием восстановительных ферментов. Таким образом, произошла фиксация генетического кода.

Показательным оказывается [104] сравнение основных черт процессов развития «языка ДНК» и других языков — как естественных, так и искусственных (например, языков программирования). Все известные языки на начальной стадии своего развития физически (то есть на материальном уровне) тесно связаны с теми предметами и явлениями, которые они призваны описывать; затем в процессе ритуализации происходит постепенное обособление языка, в результате чего он становится «чистой информационной средой». Звуки естественных языков несли в себе отражение звукоподражания, представленные, скажем, такими словами, как «шорох», «шепот», «шелест», «шуршание», «шипение» (или соответствующими им по значению «zischen»¹, «whisper»²); при письме применялись упрощенные изображения объектов: весьма показательны в этом отношении как идеографическая письменность майя, так и способ записи римских цифр, где «I» означает «один» (один палец), «V» — «пять» (пальцы одной руки), а «X» — «десять» (пальцы двух рук), и т. д. Первые языки программирования представляли собой наборы последовательностей переключений, а при ДНК-кодировании первоначально использовались последовательности нуклеотидов, выражавшие свое значение непосредственно в виде РНК. В процессе развития произошло слияние знака и значения, и знаковый уровень был физически отделен от понятийного, или объектного, и то, какая последовательность знаков каким объектам соответствует, стало лишь вопросом «договоренности». Именно этот переход мы обозначили очень общим термином «ритуализация» — процесс, в ходе которого образуются символы, сигналы или языки и возникает подлинная система обработки информации, благодаря чему становится возможной быстрая диверсификация знаков. Завершается же этот процесс закреплением за каждым из символов определенного значения.

Так же протекает и процесс развития «языка ДНК»: совершенная система тРНК допускает в конечном счете полностью произвольное распо-

¹ Шипеть (нем.). — *Прим. перев.*

² Шепот (англ.). — *Прим. перев.*

ложение кодонов в аминокислотах, вынужденной взаимосвязи между ними более не существует, что в значительной мере упрощает введение новых знаков, о котором шла речь при рассмотрении предыдущей фазы. Подобное разделение в языках знакового и понятийного уровней на определенном этапе развития приводит к фиксации синтаксиса; это помогает избежать проявлений хаоса, возможных в неудачных последовательностях, то есть служит тем же целям, что и установление общих норм правописания в естественных языках или неременная вненациональная тождественность языков программирования (таких, скажем, как FORTRAN, BASIC, языки C и др.). Фиксацию «языка ДНК» мы уже обсудили выше.

Перейдем к следующему аспекту — так называемой «гладкости» языка, тесно связанной с понятием избыточности. При изучении генетического кода было обнаружено, что сходным кодонам соответствуют, как правило, и сходные аминокислоты. Таким образом, если в кодоне заменить один из нуклеотидов, то обе относящиеся к нему аминокислоты в большинстве случаев окажутся одинаковыми или химически очень схожими. Рехенберг (1973) видит в этом значительное усовершенствование кода, благоприятствующее эволюции: небольшие изменения генотипа соответствуют, преимущественно, небольшим изменениям фенотипа (а существенные — существенным), то есть селективная ценность последовательности в определенном смысле представляет собой постоянную функцию; иными словами, отображение генетического пространства на фенотипическое обладает определенной непрерывностью. Другое объяснение дает теория языка. Широкий спектр терминалов (слов) языка складывается исторически, и при этом отнюдь не случайным образом. Многие слова на основании семантической общности могут быть объединены в группы; связанные гносеологически, члены таких групп обнаруживают лишь незначительные синтаксические отличия друг от друга. Иначе говоря, такие слова образуются в языке из общих корней в результате постепенной дифференциации значений: след, следовать, последовательность, наследие, следить, расследование, исследование и т. д.

Это означает, что небольшие синтаксические изменения (замена знака, «опечатка») часто влекут за собой лишь небольшие семантические «последствия», то есть почти не оказывают влияния на коммуникативную ценность. Полностью аналогичен и случай передачи информации посредством ДНК; массив терминалов, представленный в виде кодонов (или аминокислот), образуется в результате постепенной дифференциации небольшого исходного множества «понятий» (аминокислот), и «гладкость» при этом оказывается неременным сопутствующим явлением, о чем уже было сказано выше.

Воспользовавшись случаем, осветим с этих позиций и часто затрагиваемый в дискуссиях вопрос о том, почему генетический код универсален для всех рецентных организмов. Возможно, речь в данном случае идет об универсальной, всеобщей характеристике развивающихся языковых систем, а потому в центре нашего внимания на этот раз должны оказаться уже не особенности химической кинетики систем нуклеиновых кислот, а нечто иное. С высокой степенью вероятности можно предположить, что процесс образования генетического кода происходил параллельно с бесчисленным множеством других эволюционных процессов. Каждая новая модификация, возникающая на местах в результате таких процессов, сразу же подвергалась строжайшей оценке своей селективной ценности, и отбор позволял выжить лишь одной форме, поскольку взаимодействие между коацерватами сводилось только к конкуренции; обмена информацией не существовало. Развитие популяций, пространственно удаленных друг от друга, протекало независимо, и все-таки эволюция, начинавшаяся очень медленно и во многом обусловленная случайными факторами, постепенно «набирала ход».

Возникшие независимо друг от друга самовоспроизводящиеся единицы могли, таким образом, отличаться по уровню развития на миллионы лет, и на начальных фазах это означало почти несущественную разницу. Однако позднее, когда популяция вырастала уже настолько, что распространялась на значительные пространства, становилось очевидным отставание в развитии соседних популяций, которое (вследствие высоких темпов эволюции) оборачивалось качественным поражением отстававших популяций; популяция, находившаяся на более высоком уровне развития, не имела равных ей по силе противников. Причина для подобной «унификации сверху» заключается, как мы видим, в экспоненциальном ускорении эволюционных процессов. Превосходство определенной популяции, однако, не обязательно сводится к тому, что ее генетический код оказался лучшим, — напротив, побеждает именно тот код, который был использован коацерватами (клетками, организмами), доказавшими в конкурентной борьбе свое фенотипическое превосходство.

Рассмотрим аналоги описанных процессов в рамках развития естественных языков. Много тысяч лет назад континенты были населены людьми, находившимися примерно на одном и том же уровне развития. Повсюду шло развитие рас, языков и общественного строя. Случайные внешние условия способствовали неравномерности развития отдаленных друг от друга групп людей; тогда различия в развитии были незначительны — возможно, на протяжении тысячелетий. Когда же общественный и технический уровень развития европейцев (достигнутый благодаря имевшимся в их распоряжении кораблям, оружию и т. п.) дал им возможности для завоевания

мира, упомянутые отличия в развитии стали почти непреодолимыми. В итоге европейские языки проникли во многие уголки мира, и случилось это не потому, что их синтаксис был более совершенен, но потому, что именно этими языками пользовались более развитые в общественном и техническом отношении группы людей. И все же полной языковой унификации не произошло: люди, жившие в соседних странах, несмотря на языковые различия, обменивались — в противоположность коацерватам — информацией и опытом, что означало возможность сосуществования различных народов вместо абсолютного отбора, так как позволяло каждой стране поддерживать некий уровень развития, сопоставимый с уровнем соседей. Правда, в каждой стране есть переводчики — люди, владеющие более чем одним языком, тогда как существование «двуязычных» коацерватов из-за возникающей в этом случае химической неопределенности никогда не бывает хоть сколько-нибудь продолжительным. Только путем половой рекомбинации много позже стало возможно распространение нового опыта, приобретенного различными частями популяции.

Еще более отчетливо описываемое явление прослеживается на примере вычислительных машин или персональных компьютеров. Было время, когда практические все вычислительные машины работали с перфокартами единого формата, на которые наносились символы в виде рядов перфорационных отверстий, причем комбинации таких отверстий для арабских цифр и букв латинского алфавита были по преимуществу стандартизованы. Сегодня принцип стандартизации действителен, к примеру, для ASCII-кода персональных компьютеров, для используемых операционных систем, для формата дискет и т. п. И в этих случаях код или операционная система не обязательно являются лучшими из всех возможных. Важно другое: они относятся к тому семейству машин, которое вследствие технологического прорыва, достигнутого за несколько последних лет, определяет мировой рынок.

В заключение хотелось бы еще раз подчеркнуть, что фиксация генетического набора символов была завершающим актом процесса самоорганизации первой в мире системы, способной обрабатывать информацию; на Земле возникла жизнь.

7.6. Клеточная организация

Фаза 13. Деление клетки. Механизм деления коацерватов первоначально имел чисто физическую природу. Коацерваты росли в результате химических преобразований и абсорбции молекул из окружающей среды;

с увеличением их диаметра поверхностное натяжение слабело, и поверхность становилась неустойчивой к деформациям. Случайные внешние воздействия (столкновения, волны) могли легко «разбить» крупные капли коацервата, превратив их во множество более мелких. Деление коацерватов было, по сути, следствием и результатом их роста.

Однако сильное уменьшение содержания ДНК по отношению к общей массе коацервата привело к появлению новых факторов. Представим ситуацию, в которой для эффективного кодирования коацервату нужна всего еще одна молекула ДНК; первоначально зависело только от случая, производится ли на этой молекуле ДНК необходимая белковому механизму РНК или же копия ДНК. Если происходило последнее, то в результате из-за удвоения концентрации ДНК и нелинейной ферментативной обратной связи (продукты концентраций) скорость роста коацервата повышалась в 2–4 раза, коацерват «взрывался» и производил нежизнеспособные дочерние коацерваты до тех пор, пока молекулы ДНК не оказывались в разных коацерватах.

Здесь обнаружился ключ к химическому инициированию процесса деления: транскрипция и копирование ДНК должны подчиняться не воле случая — они должны происходить согласованно, в рамках периодической последовательности, где рост (транскрипция) чередуется с делением (копирование) и т. д. Формирование пространственной структуры коацервата, организация деления клеток и развитие генетического кода были тесно сопряженными друг с другом и взаимно обусловленными процессами. Для формирования пространственной структуры требовался как сложный синтез мембран и белков, так и высокоразвитый генетический код. Генетический код, в свою очередь, полностью эффективен только в условиях пространственной организации синтеза при задействованных транспортных механизмах и т. п.

Формирование пространственной структуры требует организованного деления клеток, которое обеспечивает возникновение жизнеспособных дочерних клеток, снабженных полным минимальным набором белков и нуклеиновых кислот, поскольку концентрация последних в материнском коацервате теперь уже неоднородна. Для организованного же деления клеток необходимо формирование пространственной структуры, транспорт белков и нуклеиновых кислот, образование и совершенствование разделительных мембран и т. д. Кроме того, необходим высокоразвитый код, способный справиться с массивом сложных задач управления и быстро эволюционировать с целью совершенствования механизмов деления. С другой стороны, степень развития генетического кода только тогда полностью сказывается на селективной ценности, когда сформированные механизмы организованного деления уже позволяют осуществлять непрерывное производство жизне-

способных зрелых дочерних клеток и допускают появление (в результате случайного отделения) небольшого количества нежизнеспособных дочерних коацерватов.

Произошедшее на описанном этапе эволюции разделение функций привело к дифференциации задач первоначально единого процесса роста-деления. Такое разделение функций сохранилось до сих пор и получило в рецентных живых организмах дальнейшее развитие: высокоразвитые организмы наделены механизмом, который управляет ростом, будучи в значительной степени независимым от механизма размножения.

Фаза 14. Органы чувств. Внутриклеточный обмен веществ значительно прогрессировал благодаря доработке генетического кода и связанному с этим появлению мембран и эффективных катализаторов. Вследствие этого возникла необходимость и возможность контролировать процессы обмена между клетками и средой и управлять ими. Во-первых, речь идет о распознавании поступающих извне веществ и соответствующей химической реакции клетки. Определенный класс веществ создавал клеткам энергетическую и сырьевую базу, и такие вещества должны были поглощаться клеткой, проходя соответствующий метаболический путь. Другие вещества, напротив, могли оказать тормозящее или разрушительное воздействие на обменные процессы клетки; такие токсичные вещества никоим образом не должны были попадать в клетку. Стереохимическое распознавание молекул даже в минимальных концентрациях и оценка результата такого распознавания представляет собой, по сути, не что иное, как чувство вкуса — разумеется, пока (на данном этапе эволюции) в самой примитивной, элементарной форме.

В качестве примера могут быть названы аминокислоты, которые свободно существуют только в виде рацемической смеси, то есть смеси D- и L-форм. При этом L-форма входит в аппарат клетки, тогда как D-форма — химически сходная, но имеющая стереохимические отличия — может, миновав многочисленные стадии, некоторые из внутриклеточных процессов блокировать (сегодня, скажем, можно купить такой инвертированный йогурт, от которого невозможно потолстеть: пищеварительная система попросту не сумеет извлечь из него хоть какой-нибудь «прок»). Был необходим механизм оценки, различавший бы обе формы «по вкусу»; такое оценивание сохранилось и по сию пору, пусть даже и в очень изменившемся виде: L-аминокислоты часто воспринимаются как сладкие, а D-аминокислоты — как горькие. Обеспечение клетки обоими типами молекул наряду с проблемами химической организации потребовало бы еще и полного двойного снабжения ферментами для D- и L-форм, которое наверняка было бы

неэффективно и слишком подвержено сбоям. И все же первые организмы время от времени использовали D-формы, о чем свидетельствует то обстоятельство, что и сейчас в простых пептидах организмов встречаются D-аминокислоты. В результате ускоренного размножения клеток должны были возникнуть первые признаки истощения сырьевых ресурсов окружающей среды, но это касалось, в основном, наиболее используемых типов молекул. Должны были быть открыты иные источники сырья, и произойти это должно было путем дифференцирования и дальнейшего совершенствования первоначальной цепочки обмена веществ.

Неравномерность распределения сырьевых ресурсов преодолевалась посредством нескольких этапов адаптации, аналогично тому, как современный компьютер, прежде чем приступить непосредственно к обработке информации, представленной на разных языках программирования, при помощи программ-компиляторов переводит данные на используемый им «внутренний язык». Следовало организовать требуемые цепочки, приостановив создание других, чтобы избежать бессмысленной траты ресурсов на производство катализаторов. Кроме того, специализация предоставляла явное селективное преимущество как раз тому, кто удовлетворялся чаще всего попадающей пищей. Такую форму реакции на внешние химические раздражители тоже следует считать результатом работы органа вкуса, и подобные системы адаптации до сих пор участвуют в обмене веществ почти всех многоклеточных организмов. В зависимости от вкуса окружающего раствора (то есть от его процентного состава) активировались четко определенные обменные системы.

Вероятно, следующим чувством, развивавшемся в связи с дефицитом сырья, было светоощущение. Энергосодержащие сырьевые материалы обрываются (помимо прочих условий) в результате воздействия света, и поэтому, когда протоклетки уже обладали примитивным двигательным аппаратом (амебы и, возможно, даже ресничные), способность ориентироваться по свету (в основе которой лежит светочувствительность) оказалась явным селективным преимуществом. Для ориентировки использовались, к примеру, молекулы, сходные с порфиринами. Вещества такого типа и их производные обладают, как правило, ярко выраженным цветом (протопорфирины, гем (небелковая часть гемоглобина), хлорофилл), то есть их спектр имеет полосы поглощения в диапазоне видимого света. Такая (или подобная) молекула могла возникнуть как результат неверного соединения четырех молекул аминокислоты пролин. Основной составляющей пролина является пиррол C_4H_5N , из которого и образуются порфирины.

Описанный уровень развития был достигнут довольно примитивными клетками, которые, тем не менее, уже обладали всеми основными свой-

ствами рецентных организмов: они были способны к обмену веществ и к размножению, они передавали своему потомству определенные наследственные признаки, они самостоятельно передвигались и реагировали на внешние раздражители, и т. д. Однако в одном эти существа решительно уступали рецентным: они полностью зависели от того запаса свободной энергии, который в химически связанной форме содержался в спонтанно синтезированных и свободно существовавших углеводородах и подобных им соединениях. Поскольку живые существа представляют собой диссипативные структуры, для продолжения существования они нуждаются в непрерывном притоке свободной энергии. Скорость генерации пригодной для использования свободной энергии (в частности, в результате химических преобразований в «первичном бульоне» под воздействием горячих источников или ультрафиолетового излучения) была не особенно велика, и постоянно растущая скорость размножения живых организмов привела к тому, что местами (по крайней мере, в определенном жизненном пространстве) общая диссипация популяции достигла значений, равных скорости генерации свободной энергии. Поначалу это еще не имело никаких явных последствий, но дальнейшее развитие популяции поглощало все больше и больше накопленных запасов свободной энергии, причем скорость этого поглощения росла экспоненциально. «Хищническая эксплуатация» естественных ресурсов не осталась без последствий, вызвав непрерывно усиливавшийся дефицит энергии. Таким образом, прежние пропорции и масштабы ценности оказались смещены; рост популяции был приостановлен — просто-напросто потому, что в ее распоряжении больше не было достаточного количества пищи. Скорость размножения, которая до сих пор практически определяла селективную ценность, из-за дефицита энергии опустилась почти до нуля. Определяющим селективную ценность критерием стала теперь продолжительность жизни, ведь в новых условиях речь шла уже только о том, чтобы прожить как можно дольше. За фазой экспоненциального развития последовала своего рода катастрофа, полностью изменившая меры ценности различных видов. Прежде «победителями» в борьбе за выживание были те виды, которые обладали самой высокой продуктивностью, — выжить в новых условиях они не могли; кризис пережили только самые эффективные виды, и система стабилизировалась там, где скорость генерации свободной энергии и скорость диссипации различных популяций достигли состояния динамического равновесия.

Таким образом, к этому моменту впервые в истории биологической эволюции возникли серьезные экологические кризисы, сопровождавшиеся полным вымиранием высокоразвитых популяций. Подобные кризисы, вызывавшие исчезновение большей части населявших Землю видов и инди-

видуумов, неоднократно случались и в ходе дальнейшей эволюции и, вероятно, зачастую имели энергетические причины. В кризисной фазе, а также во время следовавшей за ней фазы стабилизации формировались некоторые новые способности:

1. Переход от продуктивности к эффективности.

Первоначально ориентированные только на скорость обменные цепочки теперь подчиняются новому жесткому требованию максимальной энергетической эффективности.

2. Образование трофических структур.

Для каждой клетки все остальные окружавшие ее клетки представляли собой потенциальный источник питания, то есть шанс на выживание. С развитием способности пожирать другие клетки росла и необходимость в совершенствовании собственных защитных функций. Различные виды занимали разные места в трофических цепочках. Процесс закончился, однако, довольно быстро и опять-таки полным уничтожением нижних уровней трофических структур.

3. Использование новых источников энергии.

В некоторых клетках содержались вещества, способные в некоторой степени поглощать световое излучение. Эти небольшие количества энергии поначалу полностью пропадали ввиду низкой эффективности каталитических цепей, и абсорбирующие вещества вовсе не играли хоть сколько-нибудь заметной роли. В условиях же энергетического кризиса наличие в клетке таких веществ давало возможность при сократившихся сырьевых ресурсах (а значит, и энергии) выжить дольше других клеток. Эта способность позволяла повысить скорость производства свободной энергии во всей системе (то есть послужить развитию популяции в целом), тогда как все прочие возможности дальнейшей эволюции были весьма ограничены и только условно могли означать продолжение развития.

Светочувствительность протоклеток, ставшая в период энергетического кризиса важнейшим фактором селективной оценки, развилась за это время настолько, что смогла удовлетворить потребность клетки в свободной энергии. Возник хлорофилл или один из его предшественников. Основной функциональной составляющей этой молекулы является почти плоская и чрезвычайно симметричная молекула порфирина, в центр которой «встроен» атом металла. Именно распределением электронов вокруг этого центра и обусловлена способность таких молекул к поглощению. Энергия, сбереженная таким образом, использовалась для преобразования АДФ в АТФ. Аденозин-5-трифосфат, или АТФ, в рецентных организмах

играет роль универсального аккумулятора энергии или своего рода энергетического «платежного средства». АДФ и АТФ являются дериватами аденозин-5-монофосфата, который, в свою очередь, очень схож с нуклеотидом А из состава РНК — аденозин-3-монофосфатом; оба эти варианта в молекуле РНК ничем не отличаются друг от друга, поскольку нуклеотид А в ней связан с остатками фосфорной кислоты как 3-м, так и 5-м атомом углерода рибозного кольца. Напрашивается следующий вывод: механизм фотосинтеза возник в результате функциональной «перестройки» механизма синтеза. С большой долей вероятности можно принять класс появившихся таким образом автотрофных клеток за исходную точку развития (или, имея в виду только хлоропласты и рибосомы, — за «энергостанцию») рецентных клеток, универсальные энергообменные и метаболические процессы в которых основаны на АДФ/АТФ и производных порфирина.

Фаза 15. Половая дифференциация. Возросшая — в связи с развитием хемотаксиса из чувства вкуса и собственного метаболизма — подвижность отдельных индивидуумов, вероятно, сделала возможным и активный внутривидовой поиск партнера для «обмена опытом» на генетическом уровне. Но поначалу сексуальность была, пожалуй, далека от каких бы то ни было нежностей: при пожирании одних клеток другими польза извлекалась не только из поглощенной чужой энергии, но и — при случае — из «съеденного» генетического материала, если он в обеих клетках оказывался в достаточной мере схожим. Огромное преимущество этих первых внутривидовых «коммуникаций» оборачивалось столь же серьезным недостатком, поскольку подобное «поедание себе подобных» приводило к сильному сокращению вида. Выходом из положения и стал, к обоюдной выгоде, обмен генами. Позднее за этим последовали половая дифференциация функций и формирование половой асимметрии.

Вероятно, генеративное размножение тесно связано с образованием клеточных ядер, в которых хранился генетический материал, однако точные причины и механизмы возникновения таких ядер пока неясны.

Преимуществам и недостаткам половой рекомбинации генов посвящена масса научной литературы. В рамках данной книги мы не имеем возможности для широкого обсуждения этих вопросов, однако заметим, что момент «выбора партнера» придает качественно иную глубину понятию селективной ценности, которая, возможно, сыграла важную роль в процессе генетического отделения друг от друга видов, появившихся в результате дифференциации из некоего общего для обоих «корня». Возможно также, что именно здесь кроется биологическое объяснение того факта, что человек наделен чувством прекрасного; в отношении человека к природе это чувство едва ли было необходимо для выживания.

ГЛАВА 8

Эволюция многоклеточных организмов

How does newness come into the
world?
Of what fusions, translations,
conjoinings is it made?
How does it survive, extreme and
dangerous as it is?

Salmon Rushdie.
The Satanic Verses¹

8.1. Морфогенез

Слово «организм» часто используется как синоним словосочетания «живое существо», хотя в узком, буквальном, смысле под этим словом подразумеваются только те живые существа, которые состоят из множества органов, то есть дифференцированные многоклеточные. Однако у нас речь пойдет не о системе классификации видов, их отличительных особенностях и степенях родства, как можно было бы понять из названия главы. В предыдущей главе мы показали, каким образом в результате взаимодействия химических веществ могло произойти зарождение качественно нового явления — жизни. Теперь перейдем к рассмотрению следующего вопроса: каким образом в результате взаимодействия большого числа в принципе однотипных отдельных клеток могло возникнуть качественно новое образование — организм? А поскольку в процессе зарождения жизни центральную роль играет самоорганизация информации путём ритуализации, совершенно особое значение для нас имеет также вопрос об эволюции нейронов и их взаимодействии в нейронных сетях.

¹Как новое приходит в мир?

Из каких слияний, переносов, сочетаний возникает?

Как выживает в мире, полном крайностей и опасностей?

С. Рушди. Сатанинские стихи (англ.). — Прим. перев.

Возникновение многоклеточных организмов, согласно взглядам Эрнста Геккеля, явилось результатом совершенствования процессов образования колоний одноклеточных; мы разделяем эту точку зрения. В научном мире принципиально верным признан также тезис Геккеля о том, что онтогенез (индивидуальное развитие) до определенной степени повторяет филогенез (развитие вида) — здесь, пожалуй, вновь будет уместно вспомнить о цейтраферной киносъемке, — но, разумеется, не без исключений, которые, как известно, только подтверждают правило. Представление о событиях, относящихся ко времени зарождения живых организмов, можно получить, обратившись к онтогенезу современного нам растительного и животного мира, поскольку развитие эмбрионов растений и животных сравнительно легко поддается исследованию. Яйцевая клетка многократно дробится, образует внутреннюю полость (*бластулу*), однослойная клеточная оболочка которой заворачивается внутрь, формируя поясok или мешочек — *гастралу*. Эта схема представляется универсальной для начальных стадий индивидуального развития, вследствие чего можно заключить, что она описывает и процесс становления наших простейших многоклеточных предков.

Прежде чем вплотную заняться эволюционным процессом многоклеточных организмов, а также связанными с этим задачами самоорганизации и способами их решения, еще раз ненадолго вернемся назад, к истории нашей планеты.

С высокой степенью вероятности можно предположить, что на Земле, возникшей около 4.6 миллиардов лет назад, уже примерно 4 миллиарда лет существуют большие связанные между собой массы воды, и для того, чтобы весь этот объем оказался «заселен» клеточными организмами, понадобилось порядка 500 миллионов лет. Прошло еще 2.5 миллиарда лет, прежде чем эволюционная фабрика запустила в производство новейшую серию — эукариотов (одноклеточных, обладающих клеточными ядрами). Одновременно (или лишь немногим позднее) возникли примитивные многоклеточные организмы, и здесь разошлись пути дальнейшего развития животного и растительного мира. И уже к совсем недавнему периоду — менее одного миллиарда лет назад, если судить по окаменелостям, датируемым началом кембрия, — относится неожиданное массовое распространение многоклеточных организмов. Мы приводим здесь все эти приблизительные временные ориентиры лишь потому, что они могут помочь получить хоть какое-то представление о сложности стоящей перед нами проблемы. Совершенно очевидно, что переход от простых одноклеточных существ к «высокотехнологичным», если можно так выразиться, многокле-

точным потребовал больше времени, чем последующее развитие первых многоклеточных в первого человека.

Обратившись к современному состоянию медицинских (и прочих сопряженных с изучением нервной деятельности) наук, нельзя не заметить, насколько мало пока мы посвящены в тайны наших собственных тел; откажемся же от иллюзии, будто живые существа, называемые «зукариотами», уж конечно, не обременят нас столь же значительным множеством тайн. Их сложная и гибкая структура стала, по-видимому, наиважнейшим условием, обеспечившим возможность самоорганизации многоклеточных организмов.

Основные принципы самоорганизации, с которыми мы то и дело сталкивались до сих пор, можно сформулировать следующим образом:

1. Нарушение симметрии на пространственном, временном или функциональном уровне.
2. Ритуализация, необходимая для появления «свободной» информации. (Ритуализация также связана с изменением симметрии, однако в случае ритуализации речь идет о появлении дополнительной симметрии, которую можно обозначить как инвариантность кодирования.)
3. Хемо-топологическая обратная связь.

Можно предположить, что именно на основе последнего из перечисленных принципов сформировался механизм, определяющий строение многоклеточных организмов; рассмотрим его подробнее.

Центральным понятием концепции структурообразования путем самоорганизации является нарушение симметрии. Сложные пространственные структуры возникают при условии, что в ходе определенных процессов (например, по мере роста индивида) происходит постоянное нарушение различных типов пространственной симметрии. Типическая последовательность подобного рода нарушений симметрии в ходе эволюции (то есть в филогенезе) соответствует таковому в процессе роста организма (то есть в онтогенезе).

Представим себе простой одноклеточный организм в виде сферически симметричной капли. В силу топологических свойств нашего пространства сферическая симметрия подобного организма должна неизбежно нарушиться в процессе роста и дробления. Аксель Хундинг сумел очень наглядно и убедительно продемонстрировать тот факт, что процесс подготовки к дроблению одноклеточного организма протекает в полном соответствии с простейшими физическими законами формирования пространственных структур (если не принимать во внимание очень сложных внутренних биохимических процессов). Структуры, обладающие сферической симметрией,

описываются функциями, в которых распределение всех свойств зависит только от радиуса, то есть от расстояния до центра.

Отклонения от сферической симметрии могут быть учтены при помощи ортогональной системы функций (сферические функции, или полиномы Лежандра). Действительно, неустойчивости сферической поверхности проявляются уже в полиномах Лежандра наименьшего порядка.

В результате деления клетки происходит нарушение сферической симметрии, и «двухклеточная» структура сохраняет только цилиндрическую симметрию (относительно связывающей новые клетки оси вращения) и зеркальную симметрию (относительно плоскости, к которой примыкают обе клетки). И та, и другая симметрии также могут оказаться нарушенными — к примеру, в результате функциональной дифференциации клеток (разделение функций может быть обусловлено бистабильностью) или в том случае, когда данное клеточное образование находится в неоднородной среде. Такая среда (заметим, что в природе чрезвычайно широко распространены как раз неоднородные среды) может оказаться причиной вынужденного нарушения симметрии. Приведем аналогию: однояйцевые близнецы, обладающие совершенно идентичным набором генов, не могут одновременно вести одну и ту же машину, занимать в одно и то же время одно рабочее место, вступить в брак с одним и тем же человеком, и т. д. Таким образом, если в наличии имеется большое количество идентичных объектов, способных реагировать на собственное локальное окружение, сам факт их множественности является причиной нарушения симметрии между ними.

Предположим, клетка в результате ряда идентичных репликаций образовала взаимосвязанное клеточное скопление. Клеточный обмен веществ (в силу различия скоростей транспортов внутри скопления и в окружающей это скопление внешней среде) обуславливает пространственные градиенты питательных веществ и отходов. Каждая клетка, будучи знакома только с собственным локальным окружением, узнает благодаря таким градиентам о существовании некоторого отличного направления — «внутри» или «наружу». Реакция клетки сводится к тому, что она продолжает делиться и разрастаться в плоскости, перпендикулярной оси «внутри-наружу», образуя таким образом полый шар, поверхность которого состоит из совершенно равноправных клеток. Для этого достаточно, чтобы абсолютно все клетки имели одинаковое «предписание»: разрастаться исключительно в том направлении, где концентрация некоего определенного вещества X остается постоянной.

Теперь предположим, что такой полый шар больше не пропускает воду снаружи внутрь и не выпускает ее изнутри наружу. (В реальности образование, например, гастролы протекает, разумеется, не настолько просто; но

ведь мы проводим своего рода мысленный эксперимент с целью выяснить, каким образом может произойти простейшее нарушение симметрии.) Если клетки продолжают следовать прежнему «предписанию» и размножаются в указанном направлении $X = \text{const}$, то состоящая из таких клеток оболочка растягивается, и внутри шара возникает вызванное разрежением понижение давления, так как поверхность шара не может увеличиваться, сохраняя при этом неизменным внутренний объем. Шар неизбежно раздувается в случайном направлении, образуя подобие двояковыпуклой линзы. Сферическая симметрия, таким образом, оказывается нарушена, уступая место цилиндрической симметрии; в результате подобных перемен изменяется и распределение равноправных прежде клеток поверхности. Теперь пространственная структура сориентированного поля концентрации X усложняется в соответствии с балансом скоростей транспорта и производства в каждой точке клеточного скопления. Таким образом посредством изменения интенсивности обменных процессов, зависящих от локальных концентраций X , можно, в принципе, управлять всем дальнейшим морфологическим развитием.

Очень важно понять, что хотя генетическое «указание», получаемое и выполняемое всеми клетками, и не содержало в буквальном смысле текста типа «осуществить нарушение симметрии!», все же посредством физических и топологических условий это «указание» воздействовало на клетки именно так, как упомянутый текст мог бы подействовать на людей.

Если бы генетическая программа включала в себя нечто более сложное (допустим, такое: «Удвоение только в том направлении, где концентрации X и Y постоянны!»), то процесс поначалу совпадал бы с описанным выше. Но когда будет достигнуто состояние «линзы», может случиться так, что области, где концентрации X и Y постоянны, уже не совпадают, и рост становится возможен только вдоль линий пересечения этих областей. Если же генетическое «предписание» распространяется уже на три величины X , Y и Z , то к моменту достижения растущим клеточным скоплением состояния «линзы» уже вообще ни одна геометрическая точка пространства, по-видимому, не будет соответствовать заданным программой условиям, и рост прекратится. Таким образом просто и эффективно могут быть запрограммированы не только формы, но также и размеры.

В действительности процессы в клетке протекают под воздействием разнообразных изменений окружающей ее химической и физической среды; сюда относятся изменения как количественного характера (скорости обменных процессов), так и качественные (смена типов обмена). Асимметричное расположение клеток вызывает столь же асимметричную клеточную активность, которая, в свою очередь, посредством химического поля кон-

центрации воздействует на рост клеток и дальнейшее развитие клеточной структуры.

Этот механизм — а он, по нашему мнению, представляет собой главный рабочий принцип в морфогенезе — мы будем называть механизмом хемо-топологической обратной связи.

Возникновение дифференциации клеток внутри колонии можно представить следующим образом. Все клетки выделяют продукты обмена, которые диффундируют наружу. Внутри клеточной колонии диффузия ведет к возникновению постоянных градиентов этих веществ. Поскольку подобные выделения часто оказывают тормозящее действие на другие клетки, эти процессы в определенных диапазонах концентраций могли приводить к смене рабочего режима генетически идентичных клеток или даже к полному подавлению их жизнедеятельности. Следствием этого могло стать возникновение клеточных скоплений со сферически симметричной дифференциацией, а в некоторых случаях появлялись скопления, содержавшие в себе полое пространство; преимущества подобных структур оказались настолько выгодны, что началось развитие механизмов, регулирующих дифференциацию. Возникли аутогенные химические сигнальные вещества, подобные гормонам или халонам, которые в рецентных организмах менее дифференцированы, а следовательно, должны быть более древними с точки зрения эволюции.

Развитие и совершенствование таких веществ могло в итоге привести к тому, что возникли многоклеточные организмы различной величины и с различным строением тканей; появление настолько разнообразных организмов открывало совершенно новые (как в отношении структурообразования, так и в отношении функций) возможности для дальнейшего развития жизни на Земле. Сегодня последовательная, поэтапная дифференциация на базе филогенетических закономерностей (развитие отдельного индивида повторяет — начиная с яйцевой клетки — основные этапы эволюционного развития всего вида) в определенной мере поддается изучению путем наблюдения онтогенетических процессов, причем и здесь ДНК можно рассматривать как своего рода «летопись» всей истории биологической эволюции.

Индивидуальное развитие — точно так же, как и *«большая» эволюция* — состоит из последовательности неустойчивостей и нарушений симметрии, где каждая новая стадия структурообразования представляет собой не что иное, как предпосылку, необходимое условие или, иными словами, *«подготовленное начальное состояние»* для перехода к следующей стадии.

Взрослый организм — это особое состояние, оно может быть представлено как пункт в фазовом пространстве с предельно высокой размерностью, который является средоточием всех возможных типов расположения

клеток в пространстве со всеми возможными биохимическими режимами клеточной деятельности. Равно как и в фазовом пространстве, отражающем процесс «большой эволюции», здесь существует весьма ограниченное количество состояний, которые соответствуют функционирующему организму, то есть состояний, обладающих высокой селективной ценностью. Крайне мала вероятность отыскать эти «островки», мечась по всему фазовому пространству или пытаясь добраться до них, положившись на случай или удачу; скорее, следует, — двигаясь опробованной уже тропой, — пробираться вперед, исследуя встречающиеся по пути развилки и, возможно, кое-где сокращая дорогу, постепенно углубляться в неизведанные «земли». Эта успешная стратегия нашла свое выражение в филогенетической закономерности, сформулированной Геккелем.

Современный одноклеточный организм, относящийся к типу рецентных эукариотов, представляется неким биохимическим микропроцессором, снабженным в качестве программного обеспечения генетической информацией и обрабатывающим входные данные, поступающие к нему в виде концентраций и градиентов морфогенетически значимых веществ. В зависимости от этих данных (то есть от физико-химических условий окружающей организм среды) он способен посредством обратных связей «загрузиться» любой из имеющихся в его распоряжении программ (как система «промотор–репрессор») и начать действовать в нужном режиме. Предполагается также существование целого ряда других «ключей», которые могут, к примеру, модифицировать действие тех или иных программ, запустить или, наоборот, заблокировать определенные функции и т. п. Мы предположили бы, что сюда же относятся и этапы заключительной обработки мРНК перед трансляцией, которая известна нам только по клеткам эукариотов.

Хемо-топологическая обратная связь морфогенетического поля ведет к появлению некоторой избыточности и комплементарности выражения генетической информации. Представим себе полностью развитый организм: его форма и функции, то есть его фенотип, являются реализацией (или, если хотите, отражением) той генетической информации, которую несет в себе данный организм и которую мы можем представить себе в виде набора указаний для проведения клеточных биохимических реакций. Это состояние может рассматриваться как стационарное: существующее здесь распределение веществ больше не вызывает никаких изменений на функциональном или структурообразующем уровне, и клетки остаются в определенных неизменяющихся рамках выработки продуктов обмена, транспорта и потребляемых концентраций. При условии, что такое состояние устойчиво, оно может восстановиться и после возникновения в системе каких-либо нарушений. Допустим, при изменении распределения концентраций проис-

ходит (через переходную фазу) восстановление клетками прежнего уровня концентраций; если нарушается организационная структура клеток, то морфогенетическое поле запускает процессы регенеративного роста. Эти механизмы действуют до тех пор, пока помехи, вызывающие нарушения, не покинут область притяжения данного аттрактора, в каком-либо случае происходит смена конечного состояния.

На основании этого мы говорим о комплементарном и избыточном представлении генетической информации. Она комплементарна, поскольку поле химических градиентов и состояние дифференциации пространственно распределенных клеток представляют одну ту же информацию в двух совершенно отличных друг от друга формах; генетическая информация избыточна, поскольку в принципе каждый раз достаточно было бы всего одной из двух имеющихся форм, чтобы восстановить по ней вторую.

Простые системы обладают меньшим количеством аттракторов или даже полной устойчивостью; комплексные же системы располагают множеством различных областей притяжения, часто с фрактальными сепаратрисами. Таким образом, вряд ли стоит удивляться тому, что простые организмы способны реагировать на телесные повреждения полной регенерацией, тогда как высокоорганизованные наделены этой способностью в весьма и весьма ограниченном объеме, будучи в состоянии регенерировать лишь самые незначительные повреждения.

Хемо-топологическая обратная связь — процесс, который характеризуется высокой степенью нелинейности. Это связано, во-первых, с той нелинейностью, которая необходима для протекания внутриклеточных биохимических реакций с их нелинейными скоростями и многочисленными системами регулирования. Во-вторых, уже само пространственное расположение клеток оказывает определенное (его тоже можно охарактеризовать как нелинейное) влияние на процессы переноса веществ, связанные с потоками и диффузией, и дублирует активные механизмы, управляющие ионными насосами в мембранах, синхронным движением век или перистальтическими сокращениями. При создании математической модели в форме уравнений реакций, диффузии и адвекции нам пришлось бы ввести в такие уравнения не только скорости реакций, но еще и «постоянные» диффузии, сопротивления трению и сложные функции локальных концентраций.

При построении нашей модели мы исходим из того, что динамика представляемой системы локально детерминирована и однородна. «Локально» в данном контексте означает, что отдельная клетка способна воспринимать только свое непосредственное окружение, реагируя на изменения в нем изменениями своего собственного внутреннего состояния и/или процессов вегетативного размножения. «Однородность» подразумевает, что «предпи-

санные» реакции идентичны для всех входящих в систему клеток. Как известно из множества изученных примеров самоорганизации, перечисленные условия представляют собой предпосылку для всех процессов структурообразования. Полученная единая форма называется в физике «*интегралом локальных законов движения*». За простым примером можно обратиться к гидродинамике. Для формулировки представим жидкость как совокупность множества отдельных «клеток» или «ячеек», называемых «*частицами жидкости*». Закон движения этих частиц выражается уравнением Навье–Стокса, которое можно определить как локальное (поскольку в этом уравнении в частных производных изменения в одной точке строго следуют из состояния в этой точке и в ее непосредственном окружении) и однородное (поскольку одно и то же уравнение в равной степени справедливо для всех без исключения частиц жидкости). В некоторых ситуациях (скажем, в ходе эксперимента Бенара), словно по мановению волшебной палочки, в результате совокупного взаимодействия всех частиц возникают упорядоченные макроскопические структуры (так называемые «ячейки Бенара»). По нашему мнению, генетическая информация содержит в себе «программу» морфогенеза — точно так же, как уравнение Навье–Стокса содержит в себе «программу», ведущую к образованию гексагональных ячеек. Таким образом, гены представляют собой не «генеральный план строительства» всего организма, а только некоторое количество «инструкций по сборке», то есть гены — это не архитектурный чертеж готового здания, а указания для каменщика, которые предписывают место каждому отдельному кирпичику. Говоря на языке физики, гены не содержат описание решения некоей системы уравнений — гены сами суть уравнения этой системы, порождающие при соответствующих граничных условиях верное решение.

Отметим, что и в дальнейшем, при рассмотрении других моментов, касающихся работы всего организма, мы в процессе описания моделей всегда будем руководствоваться названными выше принципами *локальности* и *однородности*. Попытаться понять, каким образом в результате взаимодействия локальных причин и совокупности последовательностей различных сущностей происходит зарождение нового качества, — вот главная задача этой книги и, пожалуй, самая захватывающая из всех задач, которые призвана решить теория самоорганизации.

Однако вернемся к морфогенезу и вопросу о том, каким образом была осуществлена в ходе эволюции вторая фундаментальная ритуализация.

Представим себе растущее клеточное скопление. Каждая отдельная клетка располагает одной и той же генетической программой, выделяет продукты обмена веществ, с помощью рецепторов узнает о присутствии света и химических веществ, при благоприятных условиях растет и делится.

Обусловленные пространственной структурой и взаимным ограничением клетками друг друга, в скоплении возникают неоднородные условия (в частности, между клетками внутри скопления и клетками внешней поверхности скопления). Вследствие этого и поведение клеток тоже становится неоднородным: так, к примеру, клетки внутри скопления могут приостанавливать процесс размножения или полностью отмирать из-за недостатка питания или в результате отравления отходами жизнедеятельности.

Но и клетки, находящиеся на поверхности скопления и бывшие поначалу совершенно «равноправными», могут начать со временем весьма отличную друг от друга жизнь, если, скажем, действующие законы реакций и диффузии (они зависят, главным образом, от типа обменных процессов, протекающих в клетках, но также и от размеров скопления) сделают изотропное состояние неустойчивым и в качестве нового устойчивого аттрактора установится дипольное состояние. Такая неустойчивость может быть, естественно, обусловлена или вызвана силой тяжести, светом или другими анизотропными внешними условиями (к примеру, ростом на поверхности вместо свободного роста в пространстве). Таким образом, пока легко представить, что сложные пространственные клеточные структуры могут возникнуть во время роста скопления вследствие постепенно увеличивающейся неустойчивости. Подобное формообразование определяется способом реагирования отдельной клетки на окружающую ее среду, а потому является генетически программируемым — пусть даже очень сложным и ограниченным определенными рамками образом.

Высокоразвитые клетки располагают несколькими генетическими подпрограммами, которые по мере необходимости могут быть активированы или отключены самими клетками. Это происходит, к примеру, путем блокирования экспрессии генов определенных участков ДНК или посредством «настройки» так называемых аллостерических ферментов, которые — выступая в роли химических транзисторов — участвуют в цепных реакциях, оказывая ингибирующее или каталитическое воздействие. Известны организмы, которые способны по мере необходимости запускать механизмы обмена путем ассимиляции или диссимиляции или приспосабливаться к существующему в их распоряжении «ассортименту» питательных веществ. И об этой способности, естественно, свидетельствуют все дифференцированные клетки тканей и органов рецентных многоклеточных, которые ведут свое происхождение из одной-единственной яйцевой клетки и потому наделены одинаковым генетическим «наследством».

Теперь представим себе определенные условия внешней среды, окружающей клетку. Концентрации всех необходимых клетке веществ имеют совершенно определенные численные значения. Множество всех возможных

состояний образует фазовое пространство, где каждому веществу назначена определенная координатная ось, числа на которой обозначают соответствующие значения концентрации этого вещества. Выбранное состояние имеет некое заданное численное значение для каждого вещества и представлено определенной точкой в фазовом пространстве. На каждое из таких состояний — оказавшись в соответствующих условиях — клетка каким-то образом настраивается. Состояние клетки мы, в принципе, можем установить через наличие/отсутствие или некоторую концентрацию определенных белков или продуктов обменных процессов. Теперь представим себе, что каждая точка вышеописанного фазового пространства снабжена подобием таблички. В определенной области состояния клетки будут изменяться лишь ненамного и очень постепенно, однако достижение некоторых критических значений приведет к резким переменам; соединив все критические значения линиями или плоскостями, мы получим так называемую «*бифуркационную сетку*» клеточной кинетики. Поскольку к этому пространству мы намерены еще неоднократно обращаться в дальнейшем, условимся называть его «*морфогенетическим пространством*».

Рене Том в своей теории катастроф тщательно изучил возможные топологические свойства таких бифуркационных сеток для ограниченного класса химических реакций — реакций в так называемых градиентных системах. В ходе исследований Р. Том принимал во внимание проблемы морфогенеза, и потому в нашем изложении мы опираемся в основном на высказанные им соображения.

Отметим, что в общем случае существуют еще и области, в которых клетка может занимать большее число состояний (зависимых от прошлого), и области, где клетка осциллирует или обнаруживает необычное поведение. В таких случаях мы также можем привязать критические ситуации к резким качественным изменениям поведения.

Допустим, что все эти соображения совершенно абстрактны. Однако и проблема, стоящая перед нами, весьма не проста, а потому все же доведем наши рассуждения до конца, до более надежного, так сказать, «фарватера».

В рассматриваемом нами клеточном скоплении возникло определенное распределение концентраций веществ, необходимых для поддержания данного состояния клеток. Следовательно, каждой точке реального пространства соответствует точка в морфогенетическом фазовом пространстве, то есть клеточное скопление представляет собой отображение точек фазового пространства в точки обычного пространства. Таким образом, отображенными оказываются и все критические точки; в итоге полученная нами бифуркационная сетка оказывается определенным образом искривлена. По-

скольку в точках сетки поведение клетки резко изменяется, отображение бифуркационной сетки здесь совпадает с поверхностями органов или тканей.

На основании этих связей становится ясно, что кинетика клетки — являющаяся, в конце концов, лишь выражением ее генетической информации — ведет к образованию конечно протяженных, строго ограниченных и четко определяемых органов. Такой результат полностью соответствует перечисленным нами в самом начале главы принципам *локальности* и *однородности*. Более того — и это один из доводов, приводимых Томом, — упомянутое отображение непрерывно, ведь вследствие постоянного распределения концентраций соседние точки фазового пространства всегда остаются соседними и в обычном пространстве. Отсюда следует локальное сохранение топологии при этом отображении. Это значит, что если поверхность в бифуркационной сетке гладка (близка к плоскости), то и в обычном пространстве, после отображения, она также будет гладкой, но может при этом оказаться сферой, пузырем или тором. Если в исходной бифуркационной сетке возникает, скажем, трехгранный угол, то и в результате отображения должен получиться также трехгранный угол.

Эти свойства, порождаемые описанным нами морфогенетическим механизмом, помогают понять, почему Природа, при всем ее видовом разнообразии, проявляет столь явно выраженную склонность к топологической консервативности. Используемая нами десятичная система счисления появилась благодаря тому, что у людей на руках по десять пальцев, — а этим мы обязаны каким-то древним рыбам, которые, выбравшись на сушу, превратили свои плавники в ноги. Подобно слонам и землеройкам, у нас по две ноздри; точно так же, как у жирафов и кротов, люди имеют по семь шейных позвонков. Учебники по биологии содержат огромное количество такого рода примеров.

Топология, как мы установили, взаимосвязана с переходными процессами в клетке, с бифуркационной сеткой кинетики таких процессов; в какой-то мере топология представляет собой результат работы программ, заложенных в клетке. Геометрия же (то есть все, что касается размеров и кривизны топологических объектов), напротив, напрямую зависит от описанного отображения точек фазового пространства в физическое; геометрические свойства определяются пространственным распределением активных морфогенетических веществ и могут быть легко модифицированы количественным изменением какого-либо параметра (скорости катализа, проницаемости мембран и т. п.). Оставаясь в рамках приведенной метафоры, можно сказать, что для эволюции — как и для программиста — намного проще и безопаснее варьировать вводимые данные, нежели переписывать саму программу.

В онтогенезе развитых многоклеточных имеются четко выраженные «фазы детства». Топологически ребенок похож на взрослого, отличаясь от него только размерами, расположением и пропорциями органов. Морфогенетический принцип должен иметь весьма весомые причины для точного, неукоснительного сохранения топологии в условиях значительной геометрической «гибкости» в процессе «детского» развития — причины, учитывающие то, что оба аспекта реализуются посредством явно разных механизмов.

Думается, теперь можно понять, каким образом в процессе онтогенеза постепенно создавался дифференцированный многоклеточный организм — причем каждая отдельная клетка должна была знать только о химической ситуации в среде, окружающей непосредственно эту клетку (то есть видела, что называется, «не дальше собственного носа»), следуя указаниям генетической программы, предусмотренной для той или иной конкретной ситуации.

Теперь сделаем следующий шаг и попытаемся понять, каким же образом подобный «производственный процесс» развился с начального уровня до его сегодняшнего завершения. Главная задача при этом состоит в выяснении, каким образом могло обеспечиваться все более сложное и совершенное управление конституцией организмов и как оно связано с принципами самоорганизации.

Прежде всего рассмотрим, каким же образом можно реализовать в морфогенетическом и в физическом пространстве сложные многоклеточные структуры. С одной стороны, можно представить некую очень тонкую и сложную бифуркационную сетку. Такой вариант связан с риском, поскольку подразумевает чрезвычайно неустойчивый рабочий режим клетки: уже небольшие изменения среды всегда могут оказаться достаточными для качественного скачкообразного изменения состояния клетки. Вторая возможность заключается в том, чтобы филигранно выстроить пространственное распределение управляющих веществ. Если не учитывать диффузию, то чем тоньше структура с повышенной концентрацией, тем быстрее она погибает под действием второго закона термодинамики. Интерес представляет совершенно иной вариант, не нуждающийся в тонких структурах ни в одном из пространств, — речь идет о повышении размерности морфогенетического пространства. При отображении такого пространства в трехмерное физическое пространство происходит проецирование многомерной бифуркационной сетки, при этом сетка в некоторой степени «расплющивается», образуя в таких «проекциях» намного большее количество клеток с более тонкой структурой. (Именно это происходит при сворачивании гамака, то есть при «уменьшении» его размерности с трех до двух.) Таким образом,

решение проблемы заключается в том, чтобы значительно увеличить число эффективных типов молекул. Это становится возможным благодаря переходу ритуализации.

В начале эволюции морфогенетического механизма все решалось только волею случая. Вещества, возникавшие в качестве отходов обменных процессов и воспринимавшиеся «органами вкусового восприятия» одноклеточных организмов, так или иначе все равно произвольно влияли на рост клеточного скопления. Сообщая отдельным клеткам сведения о структуре всей колонии, такие вещества, однако, еще не использовали сигналов-символов — таких, которые могли, к примеру, происходить из внешних источников, — а потому реакция клетки на эти вещества, скорее всего, оставалась неизменной.

Чтобы в подобной ситуации «сознательно» воздействовать на рост колонии, клетки могли выделять эти управляющие вещества в больших или меньших количествах. Естественно, можно предположить существование клеток, «специализировавшихся» на регулируемом производстве, однако так невозможно достичь хоть сколько-нибудь значительной гибкости и «универсальности» управляющего аппарата.

Ситуация изменилась с появлением в клеточном скоплении относительно изолированного от внешней среды внутреннего пространства. Здесь могли появляться и дифференцироваться модификации исходных веществ, поскольку их «значение» определялись пока только соглашением, действующим внутри организма. Это и был *переход ритуализации*, в результате которого «обычные» вещества (используемые «часто», «как правило», «как принято» — то есть «обычно») стали веществами-«символами» (или веществами-«сигналами», или веществами-«знаками»). Как при всякой ритуализации, при этом оказалась упразднена связь между значением и знаком, и тем самым открыт путь для нейтрального дрейфа существующих внутри системы соглашений. Сохраняя закрепленное за ними значение, знаки могли, таким образом, претерпевать различные видоизменения (например, в сторону упрощения), и в результате постепенной дифференциации возникла возможность диверсификации всего набора символов, вследствие чего символ (опять-таки через изменение значения) мог получить возможность представления большего количества информационных единиц, благодаря чему содержащаяся в данном символе информация становилась еще более точной и емкой.

Так в результате ритуализации после «изобретения» генетического кода возникла вторая подлинно информационная система. Символы этой системы мы обозначим термином *морфогены*. Морфогены — это такие вещества, которые производятся и принимаются организмом с целью осуществления

обмена информацией между различными его частями; происхождением своим морфогены обязаны изначально «не-знаковым» веществам, которые в ходе эволюции приобрели значение, ставшее в конце концов независимым от их физико-химической природы.

Рассматривая отдельную клетку как некий биохимический компьютер, программой которого является наследственная информация, мы можем сравнить морфогены с *данными*, вводимыми в такой компьютер. Каждый тип морфогенов будет *адресом*, которому соответствует некоторое число, обозначающее локальную концентрацию. Хеморецепторы клеток осуществляют непрерывный ввод этих данных, обрабатывают их генетической программой и изменяют содержимое ячеек памяти посредством особого выделения морфогенов. Содержащаяся в организме жидкость, которая занимается транспортировкой и распределением морфогенов, и является общей *информационной шиной* того компьютера с параллельной обработкой данных, каким мы представляем *многоклеточный организм*.

С каждой точкой пространства соотносится точная концентрация, соответствующая определенному морфогену, то есть каждая точка пространства описывается *«вектором»*, компонентами которого и являются эти самые концентрации. Такой вектор указывает на точку в морфогенетическом пространстве. Организм содержит множество точек, и к каждой из них относится соответствующий вектор в морфогенетическом пространстве, где тело, таким образом, также имеет вполне определенную форму, пусть даже и совершенно отличную от той, что существует в обычном физическом пространстве.

8.2. Возникновение нервных клеток

Развитие нервной системы стало возможным благодаря разделению функций клеток в многоклеточных организмах, которое привело к возникновению и совершенствованию особых клеток, специализирующихся на обработке информации. Вследствие этого нервная система, с одной стороны, может рассматриваться лишь в тесной связи с процессами морфогенеза. Однако с другой стороны, развитие нервной системы представляет собой совершенно самостоятельную главу в истории эволюции ввиду присущей нервным клеткам способности обрабатывать информацию (прежде всего это касается мозга животных). Попробуем и здесь отыскать следы использования Природой ее стандартных приемов — разделения функций и ритуализации — и применить обнаруженные факты при интерпретации ин-

тересующих нас явлений. При этом попытаемся также разъяснить функции нейронов, предположив, что

- клетки наиболее «искушены» биохимически: они способны реагировать на химические вещества; внутриклеточные процессы являются процессами преимущественно химическими; клетки оснащены развитым инструментарием для производства молекул;
- на химическом уровне клетками воспринимается только их непосредственное окружение;
- все клетки суть результат дробления одной яйцевой клетки, а потому все они обладают одним и тем же генетическим набором.

Пронаблюдаем процесс формирования нервной системы на примере уже развитого многоклеточного организма, построенного из дифференцированных клеток. Среди них должны быть и такие, что активнее других реагируют на изменения химических концентраций в своем окружении — такие клетки назовем рецепторами. Кроме того, среди клеток должны найтись такие, что способны в определенной ситуации увеличить выделение морфогенов, и такие, что способны на механические реакции (скажем, удар жгутиком), — их назовем эффекторами.

Какие же факторы послужили основанием для эволюционного развития нервных клеток? Для гетеротрофных организмов особенно важна была способность ориентироваться в окружающем их мире, ведь таким образом они отыскивали себе пропитание; возможно, именно поэтому хеморецепторы, расположенные в покрывавшей их оболочке («коже»), были первой и важнейшей формой нервных клеток, необходимых в воде для *«вынюхивания добычи»*. Сигналы, подаваемые рецепторами, естественно, должны были вызывать реакцию организма, то есть сигнал о появлении раздражителя должен был передаваться на эффекторы. (Пресноводная гидра снабжена химическими рецепторами, реагирующими на присутствие в воде органических молекул, выделяемых живыми водяными блохами (пороговое значение концентрации — одна-единственная молекула); получив сигнал от рецепторов, гидра пускает в ход свои щупальца.)

В начале эволюции многоклеточных каждая клетка реагировала только сама за себя, словно она была единственной в мире клеткой, — это были рецептор и эффектор в одном лице. С появлением пространственно протяженных организмов возникла потребность отделить эти функции друг от друга, поскольку ощущения в одном месте требовали реакции в другом (или даже реакции всего организма). Это означало дифференциацию

и пространственное разделение рецепторов и эффекторов (разнесение этих функций во времени, которое произошло позднее, связано с процессами научения). Изображение процесса перераспределения функций универсально оснащенной клетки между двумя специализированными клетками (по одной на каждую задачу) дается нам сравнительно легко; значительно сложнее, на первый взгляд, выглядит проблема коммуникации внутри организма.

В качестве логических моделей напрашиваются два варианта. В первом случае это выглядит как морфогенез по типу своеобразного радио: рецептор, намереваясь послать некое сообщение, выделяет химический эквивалент обращения *«Всем! Всем! Всем!»*; этот метод можно охарактеризовать как медленный и недифференцированный. Второй вариант действует по принципу распространения слухов: сообщение при этом передается от одной клетки другой, соседней, от той — следующей, и т. д. Мы рассматриваем здесь химическое сообщение в качестве эквивалента произнесенным словам, так как полагаем, что подобное описание дает более четкое представление о сущности данных процессов, нежели выражение этой сущности через скорости реакций и разности концентраций. Компьютерные чипы *«общаются»* посредством токов и напряжений, мы с вами делаем это при помощи звуковых волн, а клетки для тех же самых целей используют химические вещества.

Оба описанные варианта обладают своими достоинствами и не лишены при этом недостатков; и тот, и другой применялись для обеспечения коммуникаций внутри организмов доисторических живых существ. Присмотревшись внимательнее, мы заметим, что оба механизма отличаются друг от друга не столько качественно, сколько количественно — примерно так же, как отличаются друг от друга шепот и вой сирены, разница между которыми, в принципе, сводится только к громкости. В действительности же то, что воспринимается клеткой, представляет собой смесь веществ, попадающих в ее окружение извне (внешний *«химический шум»*), и всевозможных выделений ближайших к ней клеток (*«болтовня» соседей*), причем который-то из компонентов может преобладать в зависимости от местоположения клетки. Поступающий из внешнего мира химический сигнал, в принципе, воспринимается всеми клетками, но с определенной разницей во времени и пространственно варьирующейся *«громкостью»*. Клетки реагируют на это выделением особых веществ, которые смешиваются с исходным сигналом и тем самым изменяют его. Изменившийся таким образом сигнал вызывает новую реакцию — клетки отвечают на него выделением опять-таки изменившегося секрета. В итоге возникает пространственно-временное наложение, состоящее из самого внешнего воздействия и продуктов реакций на это воздействие (то есть реакций первого, второго и т. д. порядков).

Доля вкладов различного порядка изменяется в зависимости от пространственного расположения клеток по отношению друг к другу и к внешнему пространству. Что касается «входящей» информации, то клетки, находящиеся на поверхности организма, принимают преимущественно внешние сигналы; клетки же, расположенные во внутреннем пространстве, — только те сигналы, что исходят от «внешних» клеток. «Выходные данные» представляют собой только выделенный клетками поверхности в ответ на раздражение продукт, «внутренние» же клетки лишь передают сообщение в более или менее измененном виде.

Точно так же, как в ориентированном графе, здесь существует три качественно отличных друг от друга типа узлов: истоки без предыдущих, стоки без последующих и узлы, у которых имеются как предыдущие, так и последующие. Соответственно можно представить и процесс дифференциации клеток на рецепторы, эффекторы и связывающие их друг с другом «*релейные станции*» — нейроны. Действительно, многочисленные аргументы говорят в пользу гипотезы о филогенетическом происхождении рецептных нейронов из чувствительных клеток эктодермы.

Образование нейронов как типа клеток, который предназначен исключительно для обработки информации, есть не что иное, как явление ритуализации. Нейрон представляет собой особый химический рецептор, вместо «химии внешнего мира» анализирующий секреторные выделения клеток, — в частности, секреты других нейронов и клеток органов чувств. Поначалу эти вещества-медиаторы были идентичны веществам, поступавшим из внешнего мира, однако со смещением клеток «вглубь» тела стали всего лишь символами реального раздражения, значение которого раньше определялось только соглашением между передающими и принимающими клетками. Тем самым они сохраняли теперь свободу нейтрально-устойчивого состояния, и никакие внешние воздействия не препятствовали больше тому, чтобы один медиатор был заменен другим или начался процесс дифференциации, результатом которого стало появление различных веществ-медиаторов.

Для «крупногабаритных» организмов важную роль наряду с передачей сообщения от клетки к клетке играл и способ распространения сигнала внутри клеток. Многие нейроны обзавелись длинными «кабельными соединениями», по которым можно было передавать отдаленным клеткам испускаемые нейронами электрические импульсы определенной формы. На наш взгляд, это лишь техническое решение проблемы связи, а не свойство нейронов, определяющее принципиальный способ их функционирования; так, к примеру, принцип функционирования компьютера никак не зависит от того, собран он из переключателей, транзисторов или микросхем, соеди-

ненных проводами, дорожками печатных плат или примесями в кристаллах кремния.

8.3. Эволюция нейронных сетей

Будучи не чем иным, как процессом ритуализации, возникновение нейронов положило начало формированию второй (наряду с сигнальной системой медиаторов) важной пассивной степени свободы. Специализация нейронов в качестве клеток, занятых обработкой информации, постепенно освободила их от всех остальных физических и химических «обязанностей», вменяемых остальным клеткам и обеспечивающих поддержание жизнедеятельности организма. Внутриклеточный метаболизм и, в частности, процессы текущей экспрессии генов могли изменяться как угодно, лишь бы по-прежнему выполнялась одна простая задача — реагировать на изменения концентрации различных веществ, принимая или отвергая их. Теперь нейроны всегда были «накормлены», им больше не нужно было заботиться о размножении и производстве каких-либо веществ для организма; как правило, нейроны защищены практически от любых физических и химических воздействий. Таким образом, можно говорить о появлении возможности «индивидуальной специализации» каждой отдельной клетки.

Потенциальная мультистабильность яйцевой клетки, которая позволяет ей постепенную дифференциацию в различные устойчивые типы тканей, основана, главным образом, на комплексных механизмах обратной связи системы активатор–репрессор, задействованных в экспрессии генов, а кроме того, пожалуй, еще и на реконформации (то есть на изменении пространственной структуры) мРНК перед трансляцией, известной нам еще по клеткам эукариотов. Нейроны гораздо более дифференцированы — как по своей форме, так и функционально, — нежели клетки каких-либо других тканей (исключение здесь составляет, пожалуй, только иммунная система). Предполагается, что морфогенетический механизм дифференциации — правда, в особой, модифицированной форме — эффективен и для нейронов. В пользу подобного предположения говорят и результаты исследований, согласно которым в роли «переключателей» между нейронной и всеми прочими экспрессиями генов выступают особые генетические последовательности (идентификаторы), и модели, объясняющие таким переключением специфическую клеточную дифференциацию, и огромное число существующих типов нейронных мРНК и белков (в мозге мыши, к примеру, обнаружено 150 000 различных типов мРНК!), что обуславливает высокий уровень генетической активности нервных клеток в ходе процессов научения.

На входе в нейронную сеть располагается некоторое число рецепторов (например, светочувствительных клеток); на выходе — некоторое число эффекторов (отдельные мышечные волокна). Между ними расположены нейроны, на которых заканчиваются отростки (дендриты и аксоны) других нейронов, и здесь в зависимости от состояния (возбуждение/торможение) материнской клетки происходит передача различных медиаторов в определенных количествах. Эти вещества, выступая в роли химических граничных условий комплексной нелинейной реакционно-диффузионной системы «нейрон», способствуют изменению состояния возбуждения рассматриваемого нейрона (временной паттерн возбуждения может быть как постоянным, так и колебательным или хаотическим), то есть входные сигналы могут комплексно «обсчитываться» в зависимости от состояния нейрона в конкретный момент времени; полученный в результате такой обработки ответ передается через отростки (дендриты и аксоны) «по цепочке» следующим нейронам. Если нейроны индивидуально дифференцированы, они заняты реализацией различных индивидуальных программ обработки, и столь часто обсуждаемое простое суммирование или, иначе, взвешенное линейное комбинирование входов нейронных сетей (перцептрон) представляет собою скорее исключение, нежели правило.

Думается, что эволюция при создании нейронной сети действовала теми же средствами, что и при морфогенезе, когда плодами ее усилий стало возникновение клеточных состояний, которые поражают разнообразием форм и функций и, заполняя собой пространственно протяженные области, образуют ткани и органы. Существующие между дифференцированными клетками различия суть результат различной расшифровки генетической информации. Можно предположить, что и в случае с нейронами генетическая программа тоже была интерпретирована иначе, некоторым отличным образом, только произошло это не во всей «совокупности» огромных клеточных объединений, а *в каждом отдельном нейроне*. В этом смысле каждый отдельный нейрон является для самого себя особой «тканью». Данное обстоятельство никак не противоречит тому факту, что все нейроны функционируют принципиально сходным образом; дело в том, что дифференциация нейронов необходима не для выполнения ими какой-то особой механической защитной функции или производства ими определенных химических продуктов, — задача нейронов сводится к обработке принимаемых ими сигналов, а в рамках выполнения этой функции все нейроны отличаются друг от друга, и каждый действует согласно собственной генетической подпрограмме.

Все нейроны, правда, имеют совместимое «аппаратное обеспечение» (в данном случае — генетическое), но это касается и любого другого «про-

граммного обеспечения» (под которым мы подразумеваем здесь индивидуальные дифференцированные состояния); к тому же, на любом нейроне может быть запущена принципиально любая «программа». Подобное «отделение» программного обеспечения от аппаратного, отделение «телесной» функции нейрона от «духовной» опять-таки представляет собой процесс ритуализации, только теперь уже на гораздо более высоком уровне. Решение, касающееся того, какая именно программа и в каких нейронах будет активирована, принимается в начальный период жизни организма (в процессе научения и обучения).

Возникающее в результате ритуализации безразличное равновесие относительно переключения между различными генетически возможными программами (генетические индивидуальные дифференцированные состояния), то есть нейтральная устойчивость нейронов в этом отношении, позволяет осуществлять нейронное накопление и хранение информации, иными словами, обуславливает способность к научению. Изменения генетических «предписаний» (мутации), обучение или накопление индивидуумом опыта могут вести к смене активных программ нейронов и, таким образом, к изменениям содержимого памяти. С другой стороны, ритуализация всегда означает снятие запрета на нейтральный дрейф и диверсификацию используемого системой набора символов (здесь мы обозначаем его термином «программное обеспечение»). В рассматриваемом случае снятие подобных запретов приводит к тому, что весь набор разнообразных подпрограмм получает возможности для дальнейшего развития.

Возможно, приведенная аргументация при первом прочтении затрудняет понимание; чтобы сделать основную нашу идею доступнее, мы обратимся к аналогии из области электроники.

Электронные приборы конструируются для выполнения ими определенных функций: скажем, проигрыватель компакт-дисков предназначен, что неудивительно, для проигрывания компакт-дисков. Функция и конструкция здесь неразрывно связаны друг с другом — это в полной мере относится и к любой нормальной тканевой клетке. Желая изменить функциональность проигрывателя компакт-дисков, конструктор изменит само устройство: впадет в него новые печатные платы, вмонтирует другие микросхемы. В современном персональном компьютере «CD-проигрыватель» — всего лишь одна из программ. Пожелай мы изменить его функцию, мы сумеем обойтись без паяльника и замены тех или иных деталей компьютера. Преимущество такого универсального устройства, как компьютер, очевидно: оно может работать как проигрыватель компакт-дисков, как калькулятор, управлять базами данных, служить пишущей машинкой и т. д. и т. п. Нейроны, таким образом, можно сравнить с компьютером: нейроны являются элементами

единой нервной ткани, однако каждый нейрон при этом выполняет свою собственную, отличную от других, задачу. Ритуализация и подразумевает такое отделение предназначения аппарата от его конструкции. Первые компьютеры еще были «устройствами», «аппаратами», «механизмами» в узком смысле этих слов: они были способны только к вычислениям, как механические или электрические счетные машины. Однако шаг за шагом программное обеспечение первых компьютеров отдалялось от аппаратного, то есть происходило уже упоминавшееся отделение «духовной» функции от «телесной», физической, конструкции. Диверсификация нейронных программ, ставшая возможной вследствие ритуализации, аналогична диверсификации программного обеспечения по отношению к оставшемуся прежним аппаратному обеспечению — такую диверсификацию компьютерный мир переживает как раз сейчас.

В разделе, посвященном морфогенезу, мы уже поясняли свое представление о клетках вообще и нейронах в частности как о своего рода биохимических компьютерах. Текущая программа такого компьютера является одной из набора генетических программ. Ввод данных сводится к восприятию химического состава окружающей среды. Каждый медиатор есть, по существу, «адрес ячейки памяти», куда заносится некое число, соответствующее концентрации этого медиатора. Вводимые данные непрерывно считываются и биохимически «обрабатываются» действующей на данный момент программой, то есть в клетке просто протекают цепи различных биохимических реакций. В результате «выдаются данные» — происходит выделение веществ-медиаторов определенного типа с определенной скоростью.

Структурные объединения нейронов в сеть формируются и изменяются в процессе пространственного роста клеточных отростков. Существует вероятность, что этими процессами управляет тот же самый механизм, который действует при морфогенезе: рост зависит от внутреннего клеточного состояния, определяемого внешними локальными химическими градиентами (нейротропизм). Если это так, то управление связью между нейронами осуществляется через генетические состояния и химическую активность пространственно распределенных нервных и прочих клеток. С другой стороны, на клеточные состояния и паттерны возбуждения, естественно, оказывает влияние и топология самой сети (мы уже говорили о хемо-топологической обратной связи).

Поскольку рост клеток, процессы экспрессии генов и нейронное возбуждение обычно протекают в трех различных временных масштабах, сетевой структуре — как самой медленной — казалось бы, должна отводиться роль параметра порядка. Взаимная определенность топологии соединения и индивидуальной дифференцированности узлов, возможно, означает, что

размещенная в системе информация дублируется, то есть существует в двух полностью комплементарных формах: во-первых, в качестве полей концентрации веществ, регулирующих и контролирующих рост сети, а во-вторых, в распределении состояний отдельных нейронов. Возможно, как раз этот механизм и обеспечивает функциональную устойчивость к нарушениям и дефектам, — аналогичным образом работают и механизмы морфогенеза.

Любой произвольно взятый нейрон является корневой точкой дерева предвключенных нейронов, достигающего рецепторов. Нейрон, находящийся вблизи от чувствительной клетки, получает и «обсчитывает» только определенный фрагмент передаваемого ею изображения, то есть оценивает его «под определенным углом». Другие нейроны того же уровня оценивают прочие фрагменты с той же или каких-то иных «точек зрения». Последующие за ними нейроны (более удаленные от чувствительной клетки) объединяют множество таких предварительных оценок в одну общую, относящуюся уже к более высокому уровню; чем дальше мы будем продвигаться по ветвям дерева, тем более общим, более абстрактным будет результат оценки — таким образом, отдельные нейроны способны служить материальными носителями того, что принято называть невербальными понятиями.

С другой стороны, любой произвольно взятый нейрон является начальным, исходным, для подключенных «следом за ним» нейронов, доходящих до эффекторов. Нейрон, находящийся вблизи от мышечных волокон, синхронно настроен только на небольшой пучок таких волокон. Более удаленные нейроны способны координировать работу уже определенных групп подобных пучков. Удаляясь от уровня эффекторов, мы обнаружим, что в активную работу включается все большее количество мышц, а процессы, протекающие вследствие возбуждения тех или иных «корневых» нейронов, становятся все сложнее. Таким образом, «на выходе» располагается особый нейрон, работающий с определенной комбинацией активных и неактивных мышечных волокон, предназначенных для выполнения определенной процедуры, которая *«запрашивается»* — то есть запускается — при возбуждении. Группа таких нейронов, подчиненная «высшему» нейрону, представляет собой набор соответствующих *«подпрограмм»*. (Следует учитывать, что эти подпрограммы, относясь к типу статических, могут, однако, столь же успешно вызывать временные колебания или беспорядочную активность.)

Нейроны, которые по отношению друг к другу не являются ни управляющими, ни подчиненными, отвечают за альтернативные формы поведения. Естественно, они используют те же самые эффекторы, так что их паттерны активности интерферируют. Нелинейное конкурентное поведение известно в рамках теории самоорганизации: в зависимости от типа нелинейности происходит либо сегрегация (смещение различных паттернов), либо селек-

ция (паттерны с самым сильным возбуждением вытесняют все остальные), либо гиперселекция (при которой один из активных паттернов вытесняет все остальные, даже более сильные). Все эти три формы хорошо известны в биологии поведения — например, они наблюдаются при взаимном торможении стимулирующих функций.

8.4. Индивидуальное научение

Думается, в общих чертах мы сумели разобраться в том, каким образом совокупность эволюционных процессов мутации/селекции, основанных на принципах самоорганизации (разделение функций и ритуализация), в результате множества различных этапов развития, протекающего в соответствии с определенными — схожими на каждой из стадий — «рецептами», привела от возникновения всевозможных форм обработки информации (то есть возникновения жизни) к появлению нейронных сетей. До сих пор информация накапливалась только на эмпирическом уровне, образуя таким образом видовой «генофонд», где каждый индивидуум выступал в роли своеобразной «рабочей гипотезы», которую Природа либо отбрасывала, либо оставляла для дальнейшей «разработки». Важную роль в обмене генетической информацией внутри вида сыграла половая дифференциация.

Естественно, процесс развития на этом не остановился. Наряду с «генетическим научением» в ходе филогенеза (здесь «попытка» и «ошибка» означали жизнь или смерть индивидуума) возникло еще и «нейронное научение» в ходе онтогенеза: накопление информации происходит не через «генетическую запись» и дальнейшую передачу копий программ, а в нейронных сетях (перенятое от предыдущих поколений поведение в социальных группах, подражание, игра).

Следует отметить особую сложность проблемы обеспечения способности нейронных сетей к научению. Филогенетическое «научение» вида происходит за счет того, что различные варианты одной и той же программы «тестируются» в многочисленных параллельных испытаниях, а все неудачные версии отбраковываются. Еще раз подчеркнем, что при этом не просто удаляются отдельные дефектные части программы — «на выброс» разом отправляется вся программа целиком. Однако при онтогенетическом научении организм располагает всего одним мозгом, а потому не может с той же легкостью отвергать неудачные версии; более того, серьезные дефекты в программе оказываются для отдельного организма фатальными, поскольку влекут за собой его смерть и означают, таким образом, неспособность данного индивидуума ничему больше научиться.

Поведение индивидуума обусловлено совокупным взаимодействием всех нейронов в нейронной сети. При этом отдельный нейрон — в полном соответствии с принципами локальности и однородности — абсолютно ничего не знает о функциях того колоссального механизма, в котором данный нейрон, по сути, является лишь одним из множества «винтиков». Будучи частицей живого существа, приобретающего тот или иной опыт (положительный или отрицательный), нейрон должен — чтобы «научиться» — несколько изменить свою программу. Он может это сделать, только внося изменения в режим работы одного или нескольких нейронов, для чего, в свою очередь, должно быть известно, который из нейронов «виноват» в ошибке. Ну а чтобы наказать виновных (или поощрить отличившихся), синергетическое взаимодействие должно быть до определенной степени декодировано в «обратном» направлении, то есть до выявления «вкладов» отдельных причастных к этому нейронов.

Такого рода механизм, называемый в сетевом моделировании алгоритмом *обратного распространения ошибки*, несовместим с принципом локальности, поскольку требует «старшего преподавателя», который оценивал бы согласованность действий; эту принципиальную трудность в дальнейшем мы сознательно будем игнорировать, так как удовлетворительного объяснения этому противоречию до сих пор не найдено.

Поскольку речь здесь идет о фундаментальной проблеме понимания, поясним это положение, обратившись к следующему сравнению. Центральный процессор персонального компьютера представляет собой аналог нервной клетки; он обладает внутренним состоянием, заданным его ячейками памяти (регистрами): он «локален», так как принимает к сведению только те напряжения, которые поступают непосредственно на информационную шину, и «однороден», потому что его режим работы обусловлен самой конструкцией процессора и не зависит от места программы, которую он выполняет. Как только выполнение программы завершено, процессор получает внешний сигнал, сообщающий ему о результатах проделанной работы («Сделано!» или «Ничего не вышло!»). В соответствии с этим процессор теперь должен решить: занимаемое программой и определившее полученный результат место либо будет зарегистрировано как «хорошее», либо окажется очищенным (то есть оцененным как «плохое»). На это ни один из существующих сегодня компьютеров не способен. Если во время работы программа совершает какие-то ошибки, то необходим программист, знающий принципы связи между отдельными командами программы и ее общей функцией и умеющий на основании обнаруженных функциональных ошибок — часто приложив к этому немалые усилия — «вычислить» ответственную за эти ошибки строку. Каким же образом Природе удается справиться с этой за-

дачей, не прибегая к помощи такого программиста? (Или — если он таки существует — где она его прячет?)

В качестве примера приведем хорошо известную ситуацию: раз обжегшись, ребенок больше никогда не пытается вновь коснуться огня (или горячей плиты и т. п.); подобное поведение, по всей вероятности, не есть проявление разума, присущего только людям, поскольку точно так же ведут себя и кошки, и собаки. Можно предположить, что болевое ощущение должно, таким образом, заставить сработать находящийся где-то в мозге «выключатель», блокирующий в дальнейшем попытки совершения вызвавшего это ощущение действия.

Менее эффективны (но при том еще более загадочны) механизмы, на которых основаны автоматические процессы. Научение письму, вождению автомобиля или игре на фортепиано сопряжено поначалу с весьма значительным напряжением и изрядными усилиями. Однако в ходе занятий, при многократном повторении одних и тех же действий происходит постепенная «автоматизация» процессов, так что в конце концов мы совершаем весь набор действий, которому научились, как бы уже не прилагая к тому никаких сознательных усилий. Допустим, я просто пожелал сыграть мелодию, которую слышу мысленно, а мои мышцы самостоятельно выполняют все требующиеся для этого сложные действия. Или, делая научный доклад, я думаю лишь о логической последовательности изложения, в то время как моя голова наполнена нужными словами и выстраивает их друг за другом в «буфере вывода» в соответствии со всеми грамматическими правилами; каждое «выдаваемое» мною слово требует выдоха определенной силы, сложного сочетания сокращений голосовых связок, движений губ, языка и т. д. Подобных примеров можно привести огромное множество, однако сами принципы организации процессов научения в нейронных сетях до сих пор остаются, по сути, необъяснимыми.

Собственно нейронная активность никогда не была для биологов самоцелью — это, скорее, своеобразный инструмент, при помощи которого паттерны раздражения, получаемые системой извне, отображаются на конфигурации, возникающие из активированных, возбужденных нейронов «на выходе» из системы. Оптимизация такого отображения имеет высокую селективную ценность и неизбежно приводила в ходе эволюции к возникновению все более и более сложных алгоритмов.

Простейшей формой ответа на раздражение является — как безусловный рефлекс — реагирование на определенную ситуацию определенным поведением, стереотипным и сколь угодно часто повторяемым. Весь «репертуар» зафиксирован на генетическом уровне и может быть «улучшен» (так сказать, оптимизирован) только в ходе эволюции, но никак не в течение

отдельно взятой жизни одного индивидуума. Описанная форма ответа на раздражение и по сей день является доминирующей в мире насекомых.

Следующая ступень представляет собой своего рода условные рефлекс: здесь становятся возможны простые процессы научения, отображение «раздражение–реакция» уже не столь однозначно генетически определено и содержит некоторые свободные параметры, которые устанавливаются в ходе индивидуального развития. Так же, как и в ходе эволюции, установление этих параметров происходит только методом проб и ошибок, однако существует и одно существенное отличие. В рамках эволюционного процесса оценкой является вероятность выживания отдельных особей. Иначе обстоит дело, когда речь заходит об индивидуальном научении: в этом случае негативный опыт может обернуться гибелью, а такой результат не может быть использован в дальнейшем, что сказывается, естественно, и на его оценке. Индивидуальное научение требует, таким образом, иного метода оценки результатов активности — оценка должна производиться в самом организме; так вместе с открывающейся свободой действий, даруемой эволюцией, возникает и оценка, базирующаяся, например, на таких понятиях, как «Рай» и «Ад», то есть оценка, осуществляемая через нейроны, классифицирующие чувственное ощущение, — именно в том смысле, в котором об этом уже говорилось выше, — как благоприятные или неблагоприятные, приемлемые или неприемлемые.

Метод проб и ошибок подразумевает следующую последовательность: совершение действия, оценку его результата, выполнение несколько измененного действия, опять-таки оценку его, сохранение и сравнение результатов, а затем и дальнейшее их использование при выполнении других действий. Это может быть реализовано посредством обратной связи: через другие участки нейронной сети исходный паттерн активности, возникший вблизи эффекторов, возвращается на вход в виде следа внешнего раздражения, воспринятого нейронной сетью, производится прогноз, касающийся ожидаемого нового чувственного ощущения, и прогноз этот точно так же пропускается через систему оценки. Последняя процедура представляет собой акт ритуализации, вследствие которого наряду с реальным действием возникает некое виртуальное действие — символ определенного паттерна активности.

Ритуализация завершилась тогда, когда виртуальное действие, сопряженное с улучшенной прогнозирующей сетью, стало более эффективным (по сравнению с реальным экспериментом) методом проб и ошибок. Реальные действия, бывшие первоначально единственной целью нейронной активности, были подавлены и сведены до необходимого минимума; виртуальные действия могли начать собственную жизнь. Цикл прогнозирова-

ния действий мог повторяться многократно; моделируются результаты и оценка отдаленных последствий действий; возникают зачатки логического мышления. Все эти процессы, естественно, шли размеренным, неспешным шагом, нога в ногу с историей изобретения и совершенствования орудий и инструментов, с развитием видов трудовой деятельности в особую, специфическую форму поведения.

Отделение виртуального действия от реального освободило первое из них от законов, которым подчинялось второе. Мысленно могут осуществляться нереальные действия, представляться нереальные ситуации. Свобода голдстоуновской моды этой ритуализации и есть то, что люди называют фантазией.

ГЛАВА 9

Эволюция общества

Рожденные жить, они обречены на смерть!

Гераклит

:

Тропы будущего запутаны, и я знаю лишь немногие. Некоторые широки, другие — узки, многие заканчиваются ничем. И не в моей власти сказать, какие из них будут пройдены, а какие — нет.

*Вольфганг Хольбайн.
Рыцарь Хаген*

9.1. О необходимости перемен

Все мы стали свидетелями колоссальных изменений в обществе, произошедших за последние десятилетия двадцатого века. Потерпела крах попытка развития общественной системы с социалистическими формами хозяйствования в Восточной Европе. После переломного периода, названного в России *перестройкой*, а в Германии *поворотом*, возникла *совершенно новая ситуация*. В терминах теории самоорганизации и эволюции происходящее можно охарактеризовать как кинетический фазовый переход. Действительно, наблюдаемые нами (а зачастую и переживаемые на собственном опыте) явления несут в себе типичные для фазовых переходов черты — такие, например, как образование центров зарождения новой фазы или усиливающиеся флуктуации. Мы в который раз имели возможность убедиться в том, что населяющее земной шар человеческое общество никоим образом не статично, оно подчинено течению эволюционных процессов — точно так же, как биологические системы.

Анализ событий и явлений нашей эпохи с самых общих теоретических позиций — занятие, бесспорно, в высшей степени увлекательное. Увлеч он

и нас — хотя мы, будучи физиками, можем судить об общественных процессах только на дилетантском уровне. Однако мы согласны с Фридрихом Дюрренматтом, написавшем однажды: «То, что касается всех, и решено может быть только всеми».

Еще во времена существования ГДР — страны, в которой авторы этой книги прожили и проработали большую часть своей жизни, — анализ общественной эволюции был для нас весьма захватывающей задачей. Мы постоянно обращались к этой теме, высказываясь, правда, по возможности осторожно, поскольку прекрасно осознавали всю взрывоопасность этой темы. Так, например, в нашей монографии 1982 года мы писали:

Эволюционирующие системы ценой своего существования должны производить инновации, даже если новые благоприятные возможности открываются намного реже, нежели неблагоприятные. И хотя отказ от инноваций в ближайшей перспективе представляется оптимальной тактикой, принятый в качестве стратегии он, как показывает биологическая эволюция, смертелен для системы.

Опираясь на опыт, приобретенный за годы перестроек и поворотов, сегодня можно сказать больше: *«как показывает биологическая и общественная эволюция»*. Теперь мы имеем возможность свободно (и более полно, чем раньше) выразить собственные взгляды на течение эволюционных процессов в обществе.

Однако ввиду сложности поднимаемых проблем мы не можем рассчитывать на то, что все без исключения читатели разделят нашу точку зрения. Взвзвись описывать процессы общественного развития с позиций синергетики, мы все же хотели бы по крайней мере дать читателям некий толчок для дальнейших размышлений. К сожалению, неотъемлемым свойством данной темы является то, что она неразрывно связана с политикой, а значит, любые высказывания по вопросам, имеющим к ней отношение, сразу же превращают нас из *нейтральных наблюдателей* в *активных участников происходящего*.

Во всех естественных науках в принципе всегда существует некая фундаментальная договоренность, своего рода консенсус, достигаемый благодаря тому, что определенные положения признаются научным сообществом как истинные и служат исследователям отправными пунктами для их «экспедиций в непознанное». Будь то дифференциальное исчисление в математике, электродинамика в физике, периодическая система элементов в химии или дарвинизм в биологии — никто уже не сомневается в них всерьез, и повсюду они преподаются студентам как основы научных знаний человечества о мире. Каждая из таких «основ» содержит в себе правила, термины и

обозначения, одинаково применяемые и понимаемые — согласно неписанному закону — во всех странах. Сам по себе этот факт опять-таки имеет отношение к самоорганизации информации, о которой мы уже говорили и к которой мы вскоре еще вернемся. В общественных науках, однако, положение складывается иначе и, с точки зрения ученого-естественника, напоминает ту пеструю чехарду идей, концепций и теорий, что существовала в естествознании времен алхимии. Часто это ведет к резким разногласиям, вызванным тем, что под одними и теми же словами подразумеваются разные вещи. Собственно, подобное положение дел тем более непостижимо, что объектами изучения в этом случае являемся мы сами, и для наблюдения интересующих его процессов исследователь не нуждается ни в микроскопе, ни в ланцете. Но именно в этом-то все и дело: исследователю, самому будучи человеком со всеми его биологическими потребностями и социальными ограничениями, отнюдь не просто занять позицию стороннего наблюдателя, независимого и беспристрастного. Из этого затруднительного положение крайне необходимо отыскать какой-то выход. Наука должна помогать в принятии политических решений точно так же, как она на протяжении уже многих лет помогает решать задачи технические. Человечество стоит лицом к лицу с великим множеством общемировых проблем, которые не могут быть практически разрешены в обозримом будущем.

Любые проявления догматизма и невежественности в равной степени препятствуют пониманию сложных процессов, протекающих в обществе и непосредственно затрагивающих каждого из нас. От попыток совместить с сегодняшними политическими масштабами теории, к примеру, Маркса и Энгельса никакого прока не будет; намного предпочтительнее рассматривать их идеи (и их ошибки) в исторической перспективе, поставив тем самым этих несомненно выдающихся мыслителей в один ряд со многими другими влиятельными призраками прошлого. Об этом свидетельствует и провалившийся колоссальный эксперимент по глубинному преобразованию общества, который был основан на идеях Маркса и Энгельса. Рухнувший в Восточной Европе социализм в самом общем смысле можно рассматривать именно как общественный эксперимент, из которого посредством трезвого анализа должны быть извлечены определенные уроки. По нашему мнению, эксперимент этот имеет еще и исключительную познавательную ценность для общественных наук, и те, кто игнорирует факты, рассматривая произошедшие события в свете собственных политических пристрастий и предубеждений, едва ли поступают в соответствии с научными критериями. С точки зрения общей теории эволюции, общественные формации, смена которых произошла прямо на наших глазах, суть лишь форма общественной эволюции. Эволюция же порождает и многие другие общественные

формации (скажем, рабовладельческое общество). Таким образом, социалистические государства были никак не порождением некоего злого духа, но лишь закономерным продуктом определенного этапа эволюции общества. Они были боковой ветвью эволюционного дерева, своего рода ответвлением пути, лишь спустя некоторое время закончившемся, так сказать, тупиком. Существует множество разных мнений по поводу причин краха мировой социалистической системы, подробное рассмотрение и обсуждение которых здесь, конечно же, будет неуместным. Ограничение свободы передвижений и конвертируемости валюты, дефицит товаров и возведение «железного занавеса», а также всепронизывающая власть органов госбезопасности — все это очевидные симптомы болезни, поразившей общественный организм и глубоко укоренившейся в нем. Прогресс в развитии человечества всегда основывался — и основывается — на разделении труда и свободном обмене товарами и услугами, и если этот фундамент оказывается поврежден правовыми (например, вопросы собственности) или политическими (скажем, ценовая политика) мерами — при этом деньги, к примеру, перестают играть роль всеобщего обменного эквивалента и предпринимаются попытки отменить закон стоимости (об этом подробнее будет сказано ниже), — то потенциальная способность системы к эволюции блокируется, и происходит это зачастую с фатальными для системы (и для живущих внутри нее людей) последствиями. Хотя в том случае, когда централизованное государственное регулирование всех и вся доведено до абсурда, человеческие проблемы, вероятно, не сумеет разрешить и «свободная», буйно разрастающаяся рыночная экономика (симптомами этой болезни являются нанесение непоправимого урона окружающей среде, массовая безработица и резкий рост преступности). Людями должен быть найден здоровый компромисс между саморегулирующимися эволюционными механизмами рынка и сознательной ограничительной политикой; готового рецепта здесь не существует, однако ясно, что каждый шаг, предпринимаемый человечеством, должен быть выверен и опробован — подобно тому, как это происходит в ходе всех эволюционных процессов.

К возникновению социалистических государств привела совершенно определенная историческая ситуация. Идеи (в физическом смысле — флуктуации) ведь только тогда ведут к социальным революциям (нарушениям устойчивости), когда они попадают на благодатную почву, — в умы множества людей, живущих в условиях повсеместной нужды и бедности; именно так обстояли дела в России на рубеже веков. Огромное значение идей и влияние их на ход общественной эволюции можно проанализировать, помимо прочего, на примере развития идей раннего христианства (около двух тысяч лет назад), или гуманистических идей эпохи Возрождения, или отно-

сящихся уже к новому времени идей Французской революции. Очевидно, что в истории любой из этих идей многие положительные цели оказались извращены: об этом напоминают нам омраченная крестовыми походами, инквизицией и охотой на ведьм история средних веков или «пожиравшая детей своих» во имя идей свободы, равенства и братства Французская революция.

Однако следы в истории оставляют и «неудавшиеся» идеи. Заповедь «Не убий» нарушалась в двадцатом веке чаще, чем в течение тех тысячелетий, что прошли со времени ее провозглашения. Тем не менее, даже в эпоху оружия массового уничтожения существует отнюдь не безосновательная надежда на то, что вышеупомянутая Пятая заповедь все же обретет силу, которая позволит исключить войны из арсенала политиков. Или обратимся к другому примеру — к идее свободы, равенства и братства. Можно ли поставить сегодняшнюю конкурентную борьбу хоть в какое-то соответствие с этими идеалами? И все же эта идея оставила заметный след в истории. Подобные «провальные» идеи часто становились основами — своего рода набросками или моделями — для возникавших позднее проектов «нового общественного устройства» (гуманизм перенял от христианства идею любви к ближнему; в некотором смысле из той же христианской любви прорастает и идея социализма). Распространенное в сегодняшней Европе и большей части остального мира ведение хозяйства по законам рыночной экономики (несмотря на все внутренние проблемы), вне всякого сомнения, оказалось естественной, наиболее эффективной и стабильной формой устройства общества, находящегося на теперешнем уровне развития. Однако в силу ряда общемировых проблем, которые по-прежнему остаются нерешенными, такое положение нельзя считать какой бы то ни было гарантией светлого будущего, а значит, успокаиваться на достигнутом еще слишком рано. Отнюдь не исключено, что когда придет время решать новые задачи, на смену ныне вполне достойно действующим формам общественного устройства придут новые, способные с этим справиться. Мы считаем, что в определенном смысле общество — так же, как и любая другая эволюционирующая система — не может достичь конечной стадии развития:

Государство Солнца, придуманное Томасом Мором, существует только на острове Утопия, название которого в переводе с греческого означает «место, которого нет».

Снова и снова должны происходить общественные перемены, ведущие к появлению новых форм сосуществования людей в обществе. Приходящий на смену переменам, удобный во многих отношениях консерватизм явля-

ется «оптимальной тактикой, но в качестве стратегии смертелен для системы».

9.2. Поведение и ритуализация

Сравнивая между собой некие отдельно взятые клетку, человека и общество, наряду со всеми принципиальными отличиями их друг от друга мы обнаруживаем еще и определенную глубинную общность. Воспользовавшись модным теперь словом, можно сказать, что общество обладает самоподобием по отношению к составляющим его элементам. Множество такого рода аналогий основаны на действии принципов самоорганизации и могут оказаться весьма важным инструментом, применив который для сравнительного рассмотрения различных систем, можно выделить из комплексных процессов отдельные взаимосвязанные фазы, а это позволяет лучше понять основные характеристики рассматриваемых систем. Основное внимание в этой главе мы намерены уделить не проблемам политики и экономики, рассмотрение которых могло бы привести нас к созданию некоего готового к применению «эволюционного уравнения общества». Оставим в стороне и всевозможные исторические факты и детали (равно как и нюансы развития человечества в ходе биологической эволюции), относящиеся к череде сменявших друг друга государств, войн и открытий. Наш интерес будет сосредоточен, скорее, на возникновении качественно нового «общества», выросшего из биологической популяции, и на самоорганизации ценностной и информационной системы, представляющей, в нашем понимании, фундаментальные социальные категории: язык, труд и обмен. Следует обратить внимание на эволюционную иерархию, существующую в виде двух ветвей, на которых и основано общество: с одной стороны — биология поведения, с другой — когнитивные процессы. Ни цена, ни собственность не являются физическими свойствами вещей, с которыми они соотносятся, — они существуют только в мозге людей (даже в том случае, когда мы сталкиваемся с их «физическими воплощениями», то есть с товарами или деньгами).

Синергетика сложных молекул приводит к возникновению простейшей формы жизни, к клетке; взаимодействие множества клеток — к появлению организма; взаимодействие же множества организмов, в свою очередь, к возникновению законов поведения в популяции. Комплексное поведение становится возможным в результате обработки информации, осуществляемой нейронными сетями; качественно новой формой нейронной деятельности являются мышление, язык и сознание. Общество состоит, с одной стороны, из совокупности взаимодействий множества «биологических еди-

ниц», или «тел», которые чем-то питаются, передвигаются и размножаются, а с другой стороны — из совокупности взаимодействий такого же множества «нейронных единиц», или «душ», занимающихся сбором, обменом и обработкой информации.

Решающий шаг от неорганической химии к органической жизни, от неживого к живому состоит в том, что информация приобретает способность накапливаться в генах и передаваться; аналогичным образом, по нашему мнению, и скачок от животных к человеку может быть объяснен качественно новым способом накопления и передачи информации посредством языка и мышления. В обоих случаях — пусть даже на двух совершенно различных уровнях — речь идет о самоорганизации информации, о ритуализации. Дать строгое и притом компактное определение термина «ритуализация» не так-то просто (впрочем, то же относится и к строгим определениям других подобных понятий — скажем, понятия «физика»). В таких случаях удачно подобранный пример всегда помогает пояснить смысл понятия, которое не поддается краткой формулировке.

Воспользовавшись именно этим способом, известный исследователь поведения Конрад Лоренц в своей книге *«Так называемое зло»* сумел чрезвычайно точно объяснить смысл понятия «ритуализация». Поскольку нам вряд ли удастся сделать то же лучше, чем это получилось у Лоренца (а кроме того, значение процесса ритуализации выходит далеко за рамки этологии), позволим себе привести здесь точную цитату из его книги:

Чтобы объяснить эти механизмы, мне снова придется начать издалека. И прежде всего я постараюсь описать один все еще очень загадочный эволюционный процесс, создающий поистине нерушимые законы, которым социальное поведение многих высших животных подчиняется так же, как поступки цивилизованного человека подчиняются самым священным обычаям и традициям.

Когда мой учитель и друг сэр Джулиан Хаксли незадолго до первой мировой войны предпринял свое в подлинном смысле слова пионерское исследование поведения чомги, он обнаружил чрезвычайно занимательный факт: некоторые действия в процессе филогенеза утрачивают свою собственную, первоначальную функцию и превращаются в чисто символические церемонии. Этот процесс он назвал ритуализацией. Он употреблял этот термин без каких-либо кавычек, т. е. без колебаний отождествлял культурно-исторические процессы, ведущие к возникновению человеческих ритуалов, с процессами эволюционными, породившими столь удивительные церемонии животных. С чисто функциональной точки зрения такое отождествление вполне оправданно, как бы мы ни стремились сохранить сознательное различие между историческими и эволюционными процессами. Мне предстоит теперь выявить поразительные аналогии

между ритуалами, возникшими филогенетически и культурно-исторически, и показать, каким образом они находят свое объяснение именно в тождественности их функций.

Прекрасный пример того, как ритуал возникает филогенетически, как он приобретает свой смысл и как изменяется в ходе дальнейшего развития, — предоставляет нам изучение одной церемонии у самок утиных птиц, так называемого натравливания. Как и у многих других птиц с такой же семейной организацией, у уток самки хотя и меньше размером, но не менее агрессивны, чем самцы.

Поэтому при столкновении двух пар часто случается, что распаленная яростью утка продвигается к враждебной паре слишком близко, затем пугается собственной храбрости и торопится назад, под защиту более сильного супруга. Возле него она испытывает новый прилив храбрости и снова начинает угрожать враждебной паре, но на этот раз уже не расстается с безопасной близостью своего селезня. [...]

Сложность, чрезвычайно затрудняющая анализ общей картины, состоит в том, что вновь возникшее в результате ритуализации инстинктивное действие является наследственно закрепленной копией тех действий, которые первоначально вызывались другими стимулами. Разумеется, это действие от случая к случаю проявляется очень различно — при различной силе вызывающих его независимых стимулов, — так что вновь возникающая жесткая инстинктивная координация представляет собой лишь один часто встречающийся вариант. Этот вариант затем схематизируется — способом, весьма напоминающим возникновение символов в истории человеческой культуры. [...] Вновь возникшее инстинктивное движение становится господствующим не сразу; сначала оно всегда существует наряду с неритуализованным образом и в первое время лишь слегка на него накладывается. [...]

Процесс, только что описанный на примере натравливания кряквы, типичен для любой филогенетической ритуализации. Она всегда состоит в том, что возникают новые инстинктивные действия, форма которых копирует форму изменчивого поведения, вызванного несколькими стимулами. [...]

Насколько далеко отходит в процессе прогрессирующей ритуализации форма этих движений от формы их неритуализованных прообразов, настолько же меняется и их значение. [...]

У настоящих уток и у нырков смысловое значение натравливания развивалось в прямо противоположном направлении. У первых крайне редко случается, чтобы селезень под влиянием натравливания самки действительно напал на указанного ею «врага», который здесь на самом деле нуждается в кавычках. У кряквы, например, натравливание означает просто-напросто

брачное предложение; причем приглашение не к спариванию — специально для этого есть так называемое «покачивание», которое выглядит совершенно иначе, — а именно к длительному брачному сожительству.¹

Так представляет нам суть ритуализации Конрад Лоренц [123]. Другой этолог, Гюнтер Темброк, обозначает термином «ритуализация» сам процесс возникновения действий-сигналов из обыденных действий [169]. Нам хотелось бы выйти за рамки этого понимания, определив ритуализацию как более общий процесс самоорганизации информации.

Ритуализация может относиться как к объектам, так и к процессам. Как первые, так и вторые изначально представляют собой некоторые значения, воплощают некоторый смысл — непосредственно, уже одним своим существованием. При определенных условиях этот смысл может становиться неустойчивым из-за нарушающих симметрию флуктуаций. В результате начинается дифференциация прежде целостного объекта, которая и приводит затем к многократному его изменению и возникновению символа первоначального объекта (то есть налицо типичный процесс разделения труда или функций). К таким условиям относятся существование или возникновение системы обработки информации, с помощью какой системы символ оказывается способен представлять первоначальное значение косвенно, опосредованно. Ритуализация в этом смысле означает отделение символа от его материального источника, то есть возникновение «свободной» информации. Этот процесс обнаруживает в себе основные черты кинетического фазового перехода второго рода.

В то время как форма и функция исходного объекта или процесса подчинена присущим системе законам (и является, таким образом, фиксированной), возникающий в результате ритуализации символ этим законам уже не подчиняется. Так в системе появляется новая степень свободы, которая — и это чрезвычайно важно — обладает нейтральной устойчивостью относительно действующих в системе законов, то есть (воспользуемся специальной терминологией) находится в состоянии безразличного равновесия. Теории самоорганизации такая ситуация известна — в частности, в случаях фазовых автогенераторов, хаотических аттракторов или химических волн. Такая нейтральная мода может дрейфовать в результате воздействия случайных или подчиненных процессов, и значение соответствующего параметра порядка определяется только спецификой истории ее возникновения или случаяем, в то время как система в целом является инвариантной как к способу кодирования, так и к правилам поверки.

¹Цит. по русскому изданию: Лоренц К. *Агрессия (так называемое «зло»)*. М.: Изд. группа «Прогресс», «Универс», 1994. Пер. с нем. Г. Ф. Швейника.

Особым случаем является тот, когда возникшая символика (или информация) используется многими обрабатывающими системами: система функционирует только тогда, когда символы соответствуют определенному соглашению, так что взаимосвязь между знаком и значением для всех участвующих в их обработке систем одинакова и не возникает никаких смещений и путаницы. По этой причине при эволюционных процессах по окончании ритуализации происходит, как правило, фиксация нейтральной моды, и возникшие символы прописываются посредством особых механизмов, которые хотя и не останавливают рассеяние моды, но понижают скорость дрейфа до незначительного минимума. Этой цели могут служить, наряду с прочими, и избыточность записи, и коррекция ошибок, т. е. те или иные восстановительные механизмы. Если же фиксация, или стандартизация, в силу определенных причин не происходит или происходит позднее, состояние нейтральной устойчивости допускает возникновение быстрых изменений, диверсификацию или дифференциацию.

Подобный порядок оказывается весьма удобен для науки, занимающейся исследованием эволюционных процессов, поскольку нейтральная мода представляет собой, в принципе, некий накопитель информации, содержание которого благодаря фиксации сохраняется неизменным. Информационные системы, возникшие в результате ритуализации, таким образом, всегда сохраняют в своих правилах кодирования и проверки запись собственной истории возникновения. «Продолжительность жизни» такой записи ограничена только скоростью случайного дрейфа.

9.3. Информация и язык

Глядя на то, что досталось для исследования коллеге-лингвисту, физик, занимающийся изучением принципов эволюции, может лишь позавидовать. Развитие естественных языков — это отдельная обширная тема, которую мы попытаемся представить здесь буквально в нескольких словах.

Устная и письменная речь является для людей важнейшим средством коммуникации, то есть передачи информации (и в том числе — от поколения к поколению). Возникновение языков теснейшим образом связано с развитием способности людей к производительному труду, с формированием мышления, с процессами социальной кооперации и накопления знаний. Мы рассмотрим здесь более формальный аспект эволюции языка.

Устная речь преобразует обыденное действие «дыхание» в действие-сигнал. Подражание различным шумам само по себе является вопло-

щением их семантики, и получателям этой информации для ее интерпретации никакой «договоренности» не требуется. В результате ритуализации звукоподражание сводится к некоторому акустическому символу, а значит, появляется возможность его свободного видоизменения. Звукоподражательные слова даже в современных языках до сих пор указывают на историю своего возникновения.

Однозначность при передаче информации требовала закрепления за словом определенного значения, то есть фиксации моды в локальном коммуникационном пространстве (при первоначально исключительно прямой, непосредственной коммуникации это относилось к сравнительно небольшим зонам — деревням и другим поселениям, расположенным в одной местности, но в эпоху массовых коммуникаций коммуникационное пространство охватывает уже значительно большие области). Формировалось нечто вроде моральной нормы: и по сей день неумение «хорошо говорить» считается в школе позором, таким социальным пороком.

Свобода символики в полной мере проявляется в многообразии языков и диалектов, существующих на нашей планете; о все еще продолжающемся дрейфе свидетельствуют различия в произношении и написании слов, первоначально совпадавших — каждый из нас может непосредственно наблюдать изменения разговорного языка, являющиеся следствием непрерывных фонетических модификаций.

Письменная речь возникла из графических представлений описываемых объектов или процессов; это подтверждается практически всеми древними письменностями. Ритуализация свела их к абстрактным символам, называемым буквами и цифрами. Процесс зарождения и развития письменности был весьма сложным и долгим и занял более двух тысячелетий человеческой истории [104]. Растущее значение письменности для зарождающегося государства обусловило ее фиксацию вследствие появления синтаксических предписаний (нормированное правописание, создание словарей); процессы дрейфа в письменной речи протекают заметно медленнее, чем в устной.

Естественные языки в силу их многообразия, степени сложности внутренней организации и доступности для изучения являются своего рода летописными книгами, почти идеальными хранилищами истории развития человечества. Сравнительный лингвистический анализ позволяет ученым сделать ряд выводов о развитии естественных наук, а также о ходе исторических процессов и наблюдаемой этнографической взаимосвязи. Предполагается, что с применением в этой области более совершенной вычислительной техники станет возможным и гораздо более значительный прогресс в деле расшифровки этой «книги».

Карл Саган однажды высказал идею о том, что дельфины, возможно, общаются между собой при помощи акустических образов, так называемых сонограмм. Мы воспользуемся здесь этой идеей, поскольку она позволяет пояснить процесс ритуализации на примере некоего гипотетического языка (отличного от известных нам естественных). Дельфины — это единственные обитающие в водной среде животные, которые — подобно летучим мышам — ориентируются в пространстве при помощи сонара. Для успешного ориентирования, не уступающего по эффективности объемному зрению, требуется высокая эффективность работы мозга, и как раз поэтому, вероятно, и то, и другое в развитой форме встречается только у птиц и млекопитающих — и, по всей видимости, обуславливает постоянную температуру их тел.

Дельфинам ориентироваться в пространстве особенно нелегко. Скорость звука в воде составляет около 1500 м/с, и для того, чтобы «видеть» небольшие объекты — вроде рыб, которыми дельфины питаются, — нужны очень высокие частоты. Много хуже, однако, то, что из-за жесткой зависимости скорости звука от температуры воды и уровня содержания в ней солей звук в воде всегда распространяется не по прямой; примерно так выглядел бы для человеческих глаз и окружающий нас мир, если бы все пространство вокруг было наполнено огромными линзами и отражающими все подряд зеркальными поверхностями. Дельфин живет, можно сказать, в непрерывно изменяющемся естественном зеркальном лабиринте. Метрика мира, окружающего дельфина, искривлена, однако движение дельфина в этом мире происходит в плоском пространстве. Дельфин должен хорошо уметь учитывать оба эти обстоятельства одновременно; можно предположить, что такая комплексная эффективность (а она равно важна и при бегстве, и при охоте, и для защиты, и для брачных игр) и привела к тому, что дельфины обладают столь высокоразвитым мозгом. В остальном жизнь дельфинов можно назвать райской: им не нужны ни дома, ни одежда, они не вынуждены трудиться, потому что вокруг всегда достаточно еды, и у них нет никаких серьезных естественных врагов.

Человеческий язык зародился из дыхательных шумов, которые сначала использовались для имитации естественных шумов, а затем обособились от них и обрели самостоятельность, став речью. Дельфины с самого начала были способны производить сонарные шумы: совершенно очевидно, что именно их они и могли использовать для имитации естественных в водной среде шумов. Это, однако, не определяет главного направления развития, поскольку в воде нет того многообразия звуков, которое свойственно жизни на суше. Наверняка гораздо важнее было развитие способности имитиро-

вать сонограммы, чтобы получить возможность таким образом сообщать друг другу о своих наблюдениях или привлекать брачного партнера. Итак, предполагается, что язык дельфинов представляет собой некий акустический «образный язык», и дельфин «видит», что «говорят» ему его собратья. У человека нет ничего подобного; мы могли бы, впрочем, сравнить это с картиной или фильмом, приняв их в качестве языка. Люди не имеют органов, способных генерировать изображения.

Степень ритуализации человеческой устной и письменной речи очень высока; степень же ритуализации фильма, к примеру, — гораздо ниже, так что каждый человек способен понять фильм (мы имеем в виду видеоряд, а не звук), и для этого едва ли нужны какие-то договоренности и соглашения. То, до какой степени ритуализирован язык дельфинов, можно было бы выяснить, используя особый тест: если ритуализация имела место, то договоренности и соглашения должны передаваться от поколения к поколению и быть локально дифференцированы, подобно человеческим языкам. Итак, если дельфины, обитающие в водах Черного моря, способны с ходу понять дельфинов, живущих вблизи калифорнийского побережья, то степень ритуализации их дельфиньего языка не может быть очень уж высокой. Результаты подобных тестов, если таковые проводились, авторам, к сожалению, неизвестны.

Можно ли «увидеть» дельфиньи «фильмы», будучи человеком? В принципе, конечно, можно. Архитектурная акустика занимается проблемами расчета рефлектограмм в простых помещениях, и это, надо сказать, совсем не так просто. Обратная задача — реконструкция геометрии помещения по имеющейся рефлектограмме — почти столь же сложна, как и распознавание человеческим мозгом визуальных или аудиальных образов. Ко всему прочему в водной среде добавляются еще и неравномерное и криволинейное распространение звука с ярко выраженными дифракционными эффектами. Мы понимаем наш собственный «звуковой» язык только потому, что наш мозг автоматически «переводит» значение получаемых нами речевых сигналов. Нам неизвестно, как именно у него это получается, и потому мы до сих пор не можем создать машину, которая *понимала* бы человеческий язык, то есть была бы способна анализировать содержащуюся в нем семантику и соответствующим образом манипулировать ею.

Даже если бы удалось «перевести» на «образный» язык, понятный человеку, последовательности звуков, издаваемых дельфинами, мы сумели бы понять полученные цепочки символов только в том случае, если бы знали о жизни дельфинов намного больше и наблюдали бы соотношение их речи и их поведения, их самочувствия и состояния окружающей их среды.

9.4. Обмен и стоимость

Популяции животных биологи описывают двумя важными категориями: поведением животных и их потребностями. Обе названные категории тесно связаны друг с другом. Важнейшими потребностями являются территориальные, сексуальные и социальные, в том числе и потребность в заботе и защите. Удовлетворение этих потребностей в животном мире часто происходит с применением физической силы, однако в некоторых случаях используются и средства внутривидовой коммуникации — запаховые метки, ритуальные бои или яркая окраска коралловых рыб. Подобный переход от физической борьбы (или изображения таковой — в качестве промежуточной стадии перехода) к чисто химическим или оптическим символам представляет собой не что иное, как уже известный нам процесс ритуализации. То, какой именно используется при этом цвет или запах, определяется внутривидовым соглашением и процессами нейтрального дрейфа.

Из биологических категорий в ходе развития человечества сформировались две фундаментальные общественные категории — труд и собственность. Образование государства было весьма существенно связано с защитой собственности, и символы, относящиеся к праву собственности, в дальнейшем отошли от первоначальной борьбы, перейдя, например, в форму торговых договоров или документов, удостоверяющих право собственности.

Когда в первобытном обществе люди оказались в состоянии (по ряду не обсуждаемых здесь причин) производить больше, чем было нужно им лично, появилась возможность обмена излишками с другими людьми: одни продукты труда к обоюдной выгоде обеих сторон обменивались на другие. Подобный обмен освобождал людей от необходимости создавать все необходимое для жизни своими руками и, тем самым, позволял возникнуть специализации, которая, в свою очередь, вела к дальнейшему росту производства и, следовательно, увеличению количества излишков. Разделение труда росло, оказавшись выгодным для всех участвующих в процессах производства; таким образом, неустойчивость к инновациям способствовала фазовым переходам второго рода.

Некоторые произведенные продукты (к примеру, свежая пища) должны быть использованы в кратчайшие сроки после того, как они были произведены. Допустим, производитель таких продуктов хотел бы получить в обмен на них волов, которые представляют собой эквивалент огромного количества продуктов питания, или деревянный плуг, который будет готов только через полгода. В этих случаях не обойтись без своего рода

кредита: покупатель продуктов питания должен получить подтверждение (в какой-то универсальной, признаваемой всеми форме) уже состоявшейся части обмена. Подтверждением должно было стать нечто такое, ценность чего соответствовала бы ценности сделки, причем по понятным причинам важно, чтобы эта ценность оказалась бы достаточно долговечной. С этой целью использовались благородные металлы и драгоценные камни, а также редкие жемчужины и даже перья. Так обмен продуктами питания породил денежное хозяйство, которое значительно превосходило обмен благодаря гибкости и универсальности возможных теперь меновых сделок. Чтобы золото не пришлось постоянно взвешивать, начали чеканить монеты: кусочки золота, на которых был указан их вес.

Однако даже лучшие монеты изнашивались от употребления и теряли ценность, а кроме того, их сравнительно легко было подделать (скажем, чеканя монеты со сниженным содержанием золота); помимо упомянутых существовал еще целый ряд причин, обусловивших переход от золотого обмена к обмену клочками бумаги, которые сами по себе, в сущности, ничего не стоили, однако содержали запись о требуемом количестве золота — так появились бумажные деньги, векселя, чеки и т. п. Степень изношенности таких денег больше не означала уменьшения указанной на них ценности. Естественным, произошедшим переход от золотых к бумажным деньгам стал возможным только благодаря развитию государства и права, — государства, желавшего, как обычно, удовлетворить свою потребность в золоте и товарах при помощи разноцветных бумажек.

Переход от золотых денег к бумажным, отделение цифры на монете от материальной ценности этой монеты, образование опосредованной репрезентации из непосредственной реализации значения — все это ритуализация. С возникновением бумажных денег появилась новая величина — новая степень свободы в экономике — количество бумажных денег, представляющих определенную действительную ценность, своего рода единица измерения ценности. Единицы измерения всегда избираются свободно и произвольно и не могут оказывать влияния на измеряемые величины — неприятностей от них следует ожидать только в том случае, если они не приведены к некоторому эталону и постоянно изменяются. То же самое относится и к деньгам, особенно потому, что на практике не существует способа измерить абсолютную величину ценности и тем самым «эталонировать» деньги окончательно, раз и навсегда. Ценность может быть реализована только как средняя цена, отражающая подъемы и спады спроса и предложения на рынке. Ценность содержит в себе значительный «общественный компонент» и не может быть сведена только лишь к конкретной физической величине (как это происходит, скажем, с материалами и рабочим временем).

Экономический закон стоимости управляет циркуляцией ценности и на этапе производства, и при сбыте, и при накоплении и потреблении. Точно так же, как другие законы природы, закон стоимости действителен совершенно независимо от выбора единицы измерения. Проще говоря, если бы за ночь все цены и зарплаты увеличились вдвое, это не оказало бы равным счетом никакого влияния на основные экономические процессы — производство, распределение и потребление. Разумеется, существуют определенные исключения — к их числу относятся долги, вклады в сберегательную кассу, прогрессивные налоги и внешняя торговля, — поскольку ценности в этих случаях рассчитываются количественно, в денежном эквиваленте, и единица измерения при этом отнюдь не безразлична.

Под термином «ценность» здесь и в дальнейшем мы понимаем меновую стоимость товара. Однако прежде всего нас интересует вопрос, касающийся собственно значения понятия «мена», «обмен», и то, каким образом это понятие привело к возникновению такой величины, как «ценность». В частности, мы хотим разобраться в том, почему меновая стоимость, будучи (как ясно из самого названия) величиной, характеризующей состояние обмениваемого объекта, вдруг оказалась в роли такого динамического параметра, как ценность товара. Физикам известно, насколько важно четко разграничивать эти два понятия. Вероятно, такая постановка вопроса представится экономистам несколько надуманной, но ведь и «модус операнди» экономистов далеко не всегда представляется физикам столь уж естественным и понятным.

В рамках эволюционной теории все структуры и явления суть порождение предыдущих этапов развития. Поведение животных определяется их потребностями: так, к примеру, им требуется место, где они могли бы жить (пещера, берлога, логовище, нора), и какая-то добыча, какое-то пропитание. Добиваясь удовлетворения этих потребностей властью сильнейшего, животные получают все, что им требуется.

В ходе развития человеческого общества в результате ритуализации из потребностей возникла собственность, а из власти распоряжаться ею — право владения. Право и собственность являются теми общественными категориями, которые выросли из физической силы и связанной с ней власти; однако и право, и собственность — после ритуализации только символы власти (угрозы власти), основанные лишь на соглашениях, на договоренности, на условности (например, на торговом договоре или на торговой сделке, скрепленной рукопожатием). (Так красочная внешность коралловых рыб, по Конраду Лоренцу, есть не что иное, как символ их потребности — и права — жить среди кораллов, занимать именно это жизненное пространство, это тоже власть, способная угрожать, — читай «агрессия».)

Обмен основан на представлениях о собственности и поэтому между животными невозможен; однако некоторые формы отношений, предшествующие обменным (услуга за услугу или товар за услугу), у животных все же существуют: к примеру, предложение пищи в качестве жеста примирения или элемента брачного поведения. Обмен подразумевает обмен собственностью, первоначально происходивший путем смены владельца (физическая передача собственности от одного владельца к другому), в дальнейшем — все чаще сводящийся всего лишь к договоренности, к соглашению о праве владения. Обмен не является физическим процессом, и обмениваемые товары не претерпевают в ходе собственно процесса обмена никаких изменений.

В процессе обмена участвуют три объекта: два обменивающиеся владельца собственности и сама обмениваемая собственность — товар. Если товар имеет некую ценность, то эта ценность является для владельцев параметром обмена, а для самого товара параметром состояния. Что же касается меновой стоимости, то ни один объект не имеет ее изначально, предмет получает меновую стоимость, только становясь товаром, то есть предметом обмена. (Точно так же ни одно живое существо в мире само по себе не имеет селективной ценности — оно получает ее только в процессе борьбы за выживание.)

В случае единичного обмена между двумя владельцами речь еще не идет об образовании стоимости как таковой, потому что оба владельца ведут обмен, основываясь на субъективных представлениях о величине стоимости товара, то есть исходят из того, насколько данный предмет ценен для них лично. Вожди африканских племен в свое время воспринимали цветные бусы как нечто столь же ценное, как пара молодых мужчин из их же собственного племени. Кроме того, ценность товара была различна для каждого владельца и, следовательно, не являлась еще тем качеством товара, тем параметром его состояния, по которому можно было бы соотнести разные товары друг с другом. Возможность подобного соотношения возникла только с началом рыночной экономики (каковая отнюдь не является изобретением нового времени, а существует уже на протяжении пары тысяч лет). Опять-таки что же представляет собой рынок? Для нас с вами рынок — это система, состоящая из большого числа собственников, обменивающихся между собой различными товарами без временной задержки (если один из них приобрел какие-то товары, то он может сразу же вновь начать обменивать эти товары на что-либо другое).

Таким образом, каждый на рынке может обмениваться с любым из остальных участников — при условии, что обе стороны согласны на обмен. «Согласие» определяется интересами партнеров; в понятие «интере-

сы» включено все то, что управляет собственным поведением человека (зачатками будущих человеческих интересов можно назвать инстинкты и побуждения, которые управляют поведением животных).

Рынок позволяет измерять стоимость. Что значит «измерять»? Альберт Эйнштейн в «Основах общей теории относительности» описал процесс измерения как нельзя более понятно: «Для того чтобы измерить расстояние между двумя точками, я беру некую мерку и отсчитываю, сколько раз эта мерка между ними поместится. Таким образом я перевожу физическую реальность в численное значение, которое является символом, представляющим расстояние. Это число привязано к длине мерки, выбранной в качестве единичного отрезка». В данном случае нам, разумеется, совершенно безразлично, какова длина мерки и из какого материала она сделана; необходимо лишь, чтобы все результаты измерения, которые мы хотим сравнить друг с другом или связать между собой, были соотнесены с одной и той же меркой. Из практических соображений выбирать следует такие мерки, с которыми человеку легко управиться, по возможности более доступные, то есть всегда находящиеся под рукой, как можно менее подверженные старению и погодным воздействиям. Известными примерами такого рода «единичных отрезков» являются стопа и локтевая кость.

На рынке одинаковые товары могут быть предложены несколькими разными торговцами. Прежде чем совершить обмен, стоит попытаться сравнить предложения. Проще всего сделать это, «измеряя» предлагаемые товары, то есть узнавая, какое количество единиц («мерок») «содержит» покупаемый товар, который я должен обменять за единицу предлагаемого товара. Таким «покупаемым товаром» являются деньги, полученные из золота в результате ритуализации; сами по себе они не представляют совершенно никакой ценности, однако на основании общественной договоренности деньги приняты в качестве общего обменного эквивалента — потенциальной ценности, которая при определенных обстоятельствах снова может быть обращена в ценность действительную (товар). «Измеряемое» мною в единицах денег (покупаемый «товар») численное значение выбранного товара является ценой этого товара.

Естественно, с самого начала каждый торговец запрашивает за товар свою цену. Эта цена представляет собой предварительную, временную оценку стоимости товара самим продавцом. В этот момент начинаются, так сказать, «быстрые процессы» (в основном в головах торговцев), обуславливающие единую рыночную цену, — цену, которая определяет стоимость товара именно на данном рынке в данное время. Пока на рынке существует разница цен на один и тот же товар, могут происходить циклические процессы обмена, способствующие тому, что имущество одного торговца

этим товаром растет, а другого — уменьшается. Подобное положение дел, естественно, противоречит интересам последнего, и единственная возможность избежать этого заключается в установлении единой цены, которая возникает как результат поиска компромиссного решения, учитывающего интересы всех сторон. Коль скоро циклический обмен больше не обуславливает прибыли или убытки обменивающихся сторон, стоимость товара уже не зависит от пути, проходимого этим товаром (то есть зависит лишь от первого и последнего состояния товара, но не от способа и последовательности актов обмена, состоявшихся между двумя состояниями), и таким образом становится требуемой динамической величиной, характеризующей состояние, свойство товара.

В результате самоорганизации, когда каждый торговец действует в соответствии со своими собственными интересами, возникает меновая стоимость товара, носящая комплексный характер (то есть она определяется не только лишь качествами товара или интересами торговца). Общее количество всех товаров, являющихся собственностью одного лица, называется его имуществом. Поскольку мы соотнесли каждый из товаров с некоторой стоимостью, мы можем определить стоимость и всего имущества. Это число, измеряемое в денежных единицах, называется личным состоянием.

То определение, которое мы дали понятию стоимости, позволяет высказать следующее суждение общего порядка: совокупное состояние всех лиц, участвующих в процессе обмена, остается величиной неизменной. Итак, перед нами — формулировка закона стоимости. Закон стоимости имеет локальный характер, схожий с характером дифференциальных уравнений в физике, и потому действителен для обмена «бесконечно малых» количеств товара. Конечная цель обмена заключается не в умножении состояния, а в качественном изменении состава имущества. Какая польза от ста зонтиков, если нет кровати, — пусть даже стоимость этих предметов совпадает? Если же произвести обмен, то сам по себе размер состояния останется неизменным, однако изменится форма имущества. Вследствие обмена изменятся и интересы обменивавшихся сторон, а значит, опосредованно (как компромисс интересов) изменится и стоимость.

Меновая стоимость товаров определяет выживание производителей в мире рыночной конкурентной борьбы подобно тому, как селективная ценность определяет выживание вида в ходе дарвиновской эволюции, и это сходство подтверждается соответствующими математическими моделями, которые содержат совершенно аналогичные уравнения и характеристики. Причем речь идет, по нашему мнению, никак не о «наивном социальном дарвинизме», то есть о чисто формальном сходстве, — в данном случае мы имеем дело с принципиально важными аналогиями, характеризующими те-

чение эволюционных процессов. Именно поэтому мы и попытались здесь дать четкую картину естественного возникновения *«меновой стоимости»* — экономической величины, фундаментом для которой стала биологическая популяция; точно так же в предыдущей главе мы пытались прояснить возникновение биологической селективной ценности, отнеся источник ее происхождения к химическому уровню, где селективная ценность определялась скоростью протекания реакций в растущих коацерватах. Математическое моделирование динамики подобных определяющих процессов хотя и сложно, однако все же возможно [33, 37, 28, 19, 20].

ГЛАВА 10

Энтропия, порядок и сложность

Ключевое слово для представления феномена уровней сложности уже дано: *информация*. Мы должны отыскать некий алгоритм, некое предписанное законами природы основание для возникновения информации.

Манфред Эйген.
Ступени к жизни

10.1. Энтропия как мера случайности

Со времен основополагающих работ (начало которым еще в середине девятнадцатого века положил Рудольф Клаузиус, бывший тогда доцентом Артиллерийской школы в Берлине) мы имеем «в лице» энтропии адекватную меру порядка и хаоса. В рамках современных разработок, проводимых в области теории самоорганизации и исследований хаоса, понятие «энтропия» приобрело, как мы покажем в дальнейшем, новую глубину и полноту. Настоящая глава — равно как и следующая за ней — потребует несколько более серьезной математической подготовки, и читатель может, в крайнем случае, ее просто пролистать.

Понятие «энтропия» занимает центральное положение в физике и теории информации. В первых главах мы уже говорили об энтропии; теперь рассмотрим связанные с ней вопросы несколько подробнее. Определенное Клаузиусом и Планком поначалу только для макроскопических систем в состоянии термодинамического равновесия, понятие энтропии было затем распространено как на неравновесные состояния (Больцман, Онсагер, Майкснер, Пригожин, Зубарев), так и на системы обработки информации (Сцилард, Хартли, Шеннон, Бриллюэн). В отличие от ситуации, сложившейся в области исследований равновесных состояний, для неравновесных состояний до сих пор не разработано ни статистической механики, ни единой

термодинамики закрытых систем. Это утверждение относится, в первую очередь, к хаотическим процессам и процессам самоорганизации [152, 124].

Мы показали, что история формирования упорядоченного *космоса* — это история самоорганизации структур и функций и что весьма и весьма существенный вклад в понимание этих процессов вносит теория самоорганизации и современные исследования хаоса. При этом становится совершенно ясно, что наш с вами сегодняшний мир может быть представлен только как результат длинной цепи взаимосвязанных процессов самоорганизации. В конечном счете мы приходим к более глубокому пониманию уровня сложности мира. Предлагаемый теорией самоорганизации новый подход позволяет отправить в архив созданную Клаузиусом призрачную картину глобального возрастания энтропии и последующей тепловой смерти вселенной.

Как было показано в разделе 3.4, самоорганизация может быть теоретически описана на нескольких отличных друг от друга уровнях. На одном из таких уровней энтропия как мера упорядоченности играет важную, но при этом еще и крайне неоднозначную роль. Это проявляется уже в том, что каждому из возможных уровней описания соответствует собственное характерное понятие состояния, из которого выводится и различное для всех уровней понятие энтропии. В термодинамике разность энтропий двух равновесных состояний определяется, по Клаузиусу, через приведенные количества теплоты:

$$S(2) - S(1) = \int_1^2 d'Q/T. \quad (10.1)$$

При этом переход (1) \rightarrow (2) следует полагать обратимым; через $d'Q$ обозначено количество теплоты, участвующее при этом переходе в обмене системы с окружением при температуре T . Для определения энтропии неравновесного состояния может быть построен замещающий процесс, ведущий от равновесия к желаемому состоянию. Более точным в этой связи представляется введенное Мушиком понятие «сопутствующего состояния» [129]. Поскольку энтропия является термодинамическим параметром, значение которого не зависит от пути, может быть вычислено изменение энтропии для любого пути (а значит, и для замещающего, или сопутствующего, процесса). Один из важных для спонтанного структурообразования класс неравновесных состояний характеризуется тем, что в небольшом элементе объема, который на макроскопическом уровне все еще может содержать множество частиц, равновесные отношения между термодинамическими величинами действительны, и макроскопическая система находится локально в состоянии приближительного термодинамического равновесия. Это условие часто

выполняется в хорошем приближении, к примеру, в нелинейных химических реакциях и гидродинамических потоках. Особый вклад в изучение термодинамических свойств этого класса неравновесных состояний, характеризующихся локальным равновесием, принадлежит Гленсдорфу и Пригожину. Рассмотрим понятие энтропии в термодинамике подробнее.

Итак, нас интересует энтропия на уровне стохастической динамики. Если $p(x)$ — плотность вероятности для серии из d параметров порядка x , то энтропия Шеннона (H -функция) определяется следующим образом:

$$H = - \int dx p(x) \log p(x). \quad (10.2)$$

В случае дискретных переменных, которые мы пронумеруем $i = 1, 2, \dots, s$ и которым поставим в соответствие вероятности p_i , энтропия Шеннона составляет

$$H = - \sum_{i=1}^s p_i \log p_i. \quad (10.3)$$

Согласно Рюэлю (1993) [154], энтропия H есть мера случайности, содержащейся в системе. Как известно, энтропия Шеннона образует краеугольный камень теории информации (к этому обстоятельству мы еще вернемся в разделе 10.2).

Понятие энтропии в статистической механике сформировалось благодаря фундаментальным работам Больцмана, Планка и Гиббса. Энтропия макросостояний в статистической механике определяется, по Больцману и Планку, как логарифм термодинамической вероятности:

$$S = k \ln W. \quad (10.4)$$

Термодинамическую вероятность W получают, вычисляя число молекулярных конфигураций, соответствующее исследуемому макросостоянию. Рассмотрим теперь идеальные газы, изучением которых занимался Больцман; они не обязательно должны находиться в состоянии термодинамического равновесия. Согласно Больцману, энтропия системы, состоящей из N не взаимодействующих друг с другом частиц (идеальная система во внешнем поле), может быть выражена через одночастичную функцию распределения $f(p, q, t)$, которая зависит от координат q и импульсов p :

$$S = -k \int (dp dq / h^3) f(p, q, t) \ln f(p, q, t), \quad (10.5)$$

$$N = \int (dp dq / h^3) f(p, q, t), \quad (10.6)$$

где h — постоянная Планка.

Обобщение для систем взаимодействующих частиц имеет, согласно Гиббсу, следующий вид:

$$S = -k \int dp dq \rho(p, q) \ln \rho(p, q), \quad (10.7)$$

где через ρ обозначено распределение вероятностей в $6N$ -мерном фазовом пространстве системы, в которой производится интегрирование согласно уравнению (10.7). Оказывается, если в качестве пространства описания системы выбрано микроскопическое фазовое пространство N молекул, то существует тесная связь между информационной энтропией по Шеннону и статистической энтропией по Гиббсу. Если f или ρ являются равновесными распределениями, то статистическая и термодинамическая энтропии приводят к эквивалентным результатам. Это позволяет вывести основное уравнение Гиббса из канонического распределения для ρ . Энтропия Гиббса S охватывает все эффекты межмолекулярного взаимодействия и эквивалентна термодинамической энтропии равновесного состояния. Учет взаимодействия почти всегда уменьшает энтропию; уравнение справедливо для идеальной системы, когда ρ выражено произведением одночастичных функций распределения. На разницу между энтропией Больцмана (10.5) и энтропией Гиббса (10.7) можно не обращать внимания до тех пор, пока молекулярное взаимодействие не начинает весьма ощутимо влиять на термодинамические характеристики. В том случае, когда речь идет о системах с фиксированной энергией, энтропия Гиббса сводится к известной формуле Больцмана–Планка (10.4), где W — число равновероятных макроскопических состояний.

Введенное Больцманом, Планком и Гиббсом определение энтропии в статистической механике применимо как для случаев равновесия, так и для неравновесных систем. Об этом Макс Планк говорил в одном из своих докладов в Лейденском университете (в 1908 году) [143]:

Итак, энтропия пропорциональна логарифму вероятности ($S = k \log W$). Это утверждение дает нам новый, далеко выходящий за рамки вспомогательных средств обычной термодинамики, метод вычисления энтропии системы, находящейся в заданном состоянии. При этом определение энтропии распространяется не только на равновесные состояния, как это почти всегда происходит в обычной термодинамике, но в точности так же и на любые динамические состояния; для вычисления энтропии больше не нужно — как это было во времена Клаузиуса — вводить обратимый процесс, реализация которого всегда выглядит, по меньшей мере, сомнительно . . .

Теперь рассмотрим взаимосвязь энтропии и фазового объема. Число равновероятных состояний соответствует доступному при данной энергии фазовому объему (так называемая микрооболочка). Статистическая энтропия при фиксированной энергии пропорциональна, таким образом, логарифму доступного объема фазового пространства $\Omega(A)$:

$$S \sim \log \Omega(A). \quad (10.8)$$

Через A в данном случае обозначена вся совокупность макроскопических условий. Мы вновь убеждаемся в том, что величина энтропии выражает количество возможных состояний системы; воспользуемся формулировкой, предложенной Рюэлем [154]:

Энтропия есть мера количества случайности, содержащейся в системе.

Для закрытой системы доступная часть фазового пространства ограничивается гиперповерхностью постоянной энергии $H(q, p) = E$. Если система закрыта, однако изначально не находится в состоянии равновесия (а находится, к примеру, в состоянии заторможенного равновесия), то сначала доступна только часть гиперповерхности. При релаксации к состоянию равновесия плотность вероятности распределяется по всей гиперповерхности. При равновесном состоянии гиперповерхность перекрыта полностью и равномерно (гипотеза *a priori* постоянных вероятностей). Макроскопические условия для образования стационарных неравновесных структур исключительно разнообразны; в случае движения имеются дополнительные ограничения. Доступная часть фазового пространства задается как пересечение гиперповерхностей, определяемых макроскопическими условиями, которые обуславливают наблюдаемое стационарное неравновесное состояние.

Рассмотрим некую произвольную неравновесную систему (рис. 10.1) с фиксированной (посредством абсолютной изоляции системы от ее окружения) энергией: энтропия такой системы $S(E, X, t)$ будет возрастать до тех пор, пока не достигнет равновесного значения $S_{eq}(E, X)$; одновременно будет увеличиваться часть заполненного фазового объема в микрооболочке.

Согласно Больцману, среди всех состояний, характеризуемых заданным значениям макроскопических величин, термодинамическое равновесие оказывается состоянием с наибольшей энтропией (или, соответственно, наименьшей степенью упорядоченности). В закрытой системе с фиксированной энергией E энтропия увеличивается до тех пор, пока не достигнет максимума. Далее предположим, что параметр u является мерой интервала, отделяющего систему от состояния термодинамического равновесия. Если

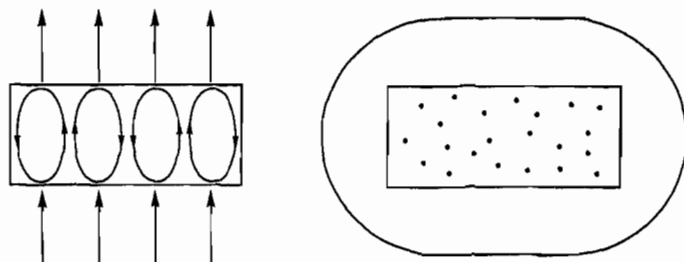


Рис. 10.1. Неравновесная структура (на примере ячейки Бенара) к моменту времени t оказывается полностью изолирована от окружения, в результате чего наблюдается увеличение разупорядоченности и, как следствие, рост энтропии.

в качестве примера мы рассмотрим жидкость, то u может быть безразмерной величиной типа числа Рейнольдса, числа Тейлора и т. п. Сопоставим состоянию термодинамического равновесия значение $u = 0$. Если система вынуждена покинуть равновесное состояние, то при $u > 0$ она переходит сначала в стационарные состояния на так называемой термодинамической ветви. Если значение u продолжает увеличиваться, то термодинамическая ветвь при некотором определенном критическом значении $u = u_{\text{крит}}$ может стать неустойчивой. «Ответвляются» новые устойчивые стационарные состояния, которые отделились от термодинамического равновесия в результате неустойчивости, возникшей при $u = u_{\text{крит}}$. Устойчивость таких состояний тоже может быть ограничена, так что при достаточно больших значениях u следует дальнейшее нарушение устойчивости. Весьма наглядными примерами такого общего сценария может послужить обтекание водой в реке опоры моста (рис. 10.2) или образование ячеистых структур Бенара в подогреваемой снизу жидкости. Если же закрытая система, находящаяся в стационарном неравновесном состоянии, вдруг оказывается изолирована от окружения, она релаксирует к состоянию равновесия. На протяжении процесса релаксации энтропия растет в полном согласии со вторым законом термодинамики.

Обозначим снижение энтропии величиной

$$\delta S = S(E, X) - S(E, X, t). \quad (10.9)$$

Эту разность между энтропией достигнутого системой равновесного состояния и энтропией исходного ее состояния (в обоих состояниях система обладала одной и той же энергией) мы определяем как степень упорядоченности наблюдаемого неравновесного состояния. Идея использования соотношенной с определенной энергией энтропии в качестве количествен-

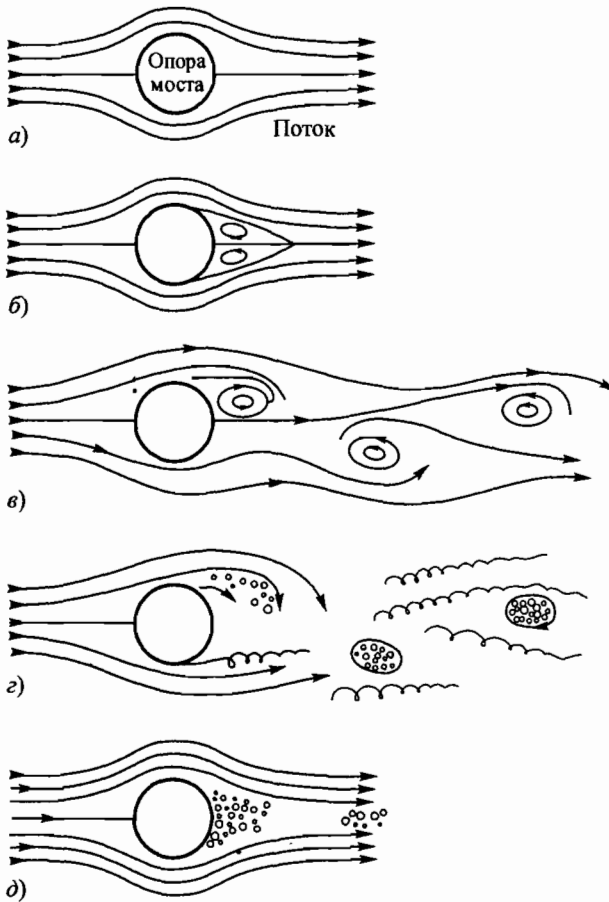


Рис. 10.2. Схематическое изображение потока вокруг опоры моста для различных значений числа Рейнольдса.

ной меры структурированности стационарного неравновесного состояния лежит в основе S -теоремы [106, 107]. Согласно этой теореме, снижение энтропии оказывается тем большим, чем более удалена система от термодинамического равновесия. Если стационарное неравновесное состояние определяется несколькими независимыми внешними параметрами $u \in C^n$, то $S(u)$ можно наглядно представить как положительно определенную гиперповерхность в пространстве параметров. Для случая пуазейлева течения

жидкости в трубке S -теорема утверждает, что энтропия жидкости с растущим числом Рейнольдса монотонно убывает при условии, что энергия при этом остается постоянной, в то время как температура жидкости соответствующим образом снижается. Это утверждение наглядно подкрепляется различными расчетами нелинейных осцилляторов и для турбулентных течений [37, 107].

Согласно S -теореме Ю. Л. Климонтовича, снижение энтропии δS есть мера, увеличивающаяся с ростом отклонения системы от состояния равновесия. Безразмерную величину

$$w(E, X) = 1 - \exp(\delta S/Nk) \quad (10.10)$$

можно рассматривать как удобную меру относительного заполнения фазового пространства в микрооболочке.

10.2. Энтропия и информация

Как уже было сказано, энтропия в стохастическом описании соответствует информационной энтропии. Согласно Шеннону [163], средняя неопределенность нормированного распределения вероятностей

$$H = M[\ln(1/p(x))] = - \int dx p(x) \ln p(x) \quad (10.11)$$

называется информационной энтропией этого распределения. При этом x_1, \dots, x_d определяют состояние системы относительно наблюдаемых степеней свободы. Если величина x представлена полным набором координат и импульсов частиц макроскопической системы $x = (q_1, \dots, q_f, p_1, \dots, p_f)$, то справедливо равенство:

$$S = k_B H, \quad (10.12)$$

где k_B — постоянная Больцмана. Иными словами, статистическая энтропия макроскопического состояния соответствует информации, которая необходима для описания микроскопического состояния исследуемой системы. Информационная энтропия не является ковариантной величиной, так как она изменяется при нелинейной трансформации переменных состояния.

В противоположность S прирост информации при переходе от распределения $p(x, t)$ к распределению $p'(x)$ (называемый также относительной энтропией или переданной информацией) является величиной ковариантной:

$$K[p, p'] = - \int dx p(x, t) \ln(p/p'). \quad (10.13)$$

Приросту информации отводится важная роль в теории марковских стохастических процессов. Если зависимые от времени и стационарные распределения удовлетворяют уравнению Фоккера–Планка или основному уравнению, то верны следующие неравенства:

$$\begin{aligned} K[p, p'] &\geq 0, \\ (d/dt)K[p, p'] &\leq 0. \end{aligned} \quad (10.14)$$

Следовательно, K представляет собой так называемый функционал Ляпунова распределений p и p' .

Информационная энтропия не связана напрямую со статистической энтропией, если фазовые переменные x не образуют полный набор микроскопических переменных. Фазовые переменные часто строятся на основе редуцированного описания (параметр порядка), причем производится сокращение «нерелевантных» микроскопических степеней свободы. Информационная энтропия распределения вероятностей параметров порядка представляет собой всего лишь часть совокупной статистической энтропии, — но часть, которая так и имеет решающее значение для структурообразования, поскольку диссипативные структуры характеризуются коллективными модами. Самоорганизация и структурообразование осуществляются на макроскопическом уровне и определяются макроскопическими степенями свободы.

Существует тесная взаимосвязь между энтропией и недостатком информации, и поэтому мы вкратце опишем метод, используемый в теории информации [94] (сначала вне какой бы то ни было связи с физикой) для исследования круга проблем, связанных с принятием решения на основании неполных данных. Релевантность этого метода для физики заключается в том, что он позволяет делать и далеко идущие физические выводы. Более того, почти во всех отраслях науки уже существуют весьма плодотворные области, предполагающие использование именно этого метода. Положим, из некоторого распределения вероятностей $P(x)$ известны только m ожидаемых значений

$$\langle A_i \rangle = \int dx P(x) A_i(x), \quad i = 1, \dots, m. \quad (10.15)$$

Согласно Джейнсу, взаимосвязь между энтропией и информацией может быть использована в таком случае и для определения неизвестных распределений вероятностей. Предположим, мы измерили все величины из набора $A(x)$, что позволило нам определить средние значения $A_i(x)$:

$$\langle A_i(x) \rangle.$$

Требуется найти распределение P . Поскольку для однозначного определения P оказывается недостаточным просто задать конечное множество ожидаемых значений, Джейнс предложил определять P из вариационной задачи и максимизировать информационную энтропию, соблюдая дополнительные условия, а также нормирующее условие для распределения вероятностей. Из всех распределений с требуемыми ожидаемыми значениями $\langle A_i(x) \rangle$ отбираются распределения с наибольшей неопределенностью. Этот метод, доказывал Джейнс, соответствует описанной ситуации: каждая отличная от оптимальной функция распределения с заданными ожидаемыми значениями должна бы быть основана на дополнительной информации, которая, согласно начальным условиям, отсутствует.

Применим этот метод к макроскопической системе, которая находится в контакте с источником тепла, так что полная энергия системы сохраняется постоянной:

$$E = \langle H(p_1, \dots, q_f) \rangle, \quad (10.16)$$

здесь H — так называемый гамильтониан системы, который выражает энергию через импульсы и координаты частиц. Получим каноническое распределение

$$\begin{aligned} \varrho(p_1, \dots, q_f) &= Z \exp[-\beta H(p_1, \dots, q_f)], \\ \beta &= 1/k_B T. \end{aligned} \quad (10.17)$$

Далее Джейнс постулирует применимость принципа максимальной информационной энтропии и к неравновесным состояниям. Если удастся отыскать набор величин $A_i(x)$, ожидаемые значения которых полностью характеризуют параметры системы в неравновесном состоянии, то из принципа максимальной информационной энтропии получается так называемый релевантный статистический оператор $\varrho(t)$ [152]. Разумеется, такой статистический оператор не точно удовлетворяет уравнению Лиувилля – фон Неймана, ведь в уравнении появляется дополнительный член, нарушающий временную симметрию. Здесь мы снова имеем дело с достаточно сложной проблемой соотношения обратимости микроскопических уравнений и необратимости макроскопических процессов; качественно эта проблема уже рассматривалась во второй главе. Требуемый дополнительный член в динамических уравнениях может быть интерпретирован как бесконечно малое взаимодействие системы с источником энергии [152]. С определением $\varrho(t)$ одновременно определяется энтропия неравновесного состояния.

Применимость принципа максимальной энтропии в закрытой системе основана на втором законе термодинамики, каноническое распределение может быть выведено и иным, независимым путем; ситуация же с неравновесной системой с накачкой куда менее ясна. Кроме того, следует под-

черкнуть, что принцип максимальной информационной энтропии оставляет открытым вопрос о том, какая именно из величин $A_i(x)$ должна быть выбрана в каждом конкретном случае или, соответственно, какими должны быть дополнительные условия. Фиксация энергии, которая становится в системе такого рода дополнительным условием, теряет, тем самым, свою господствующую роль. Чтобы ограничить произвольность при выборе дополнительных условий, Хакен [78] объединил принцип максимальной информационной энтропии с концепцией параметра порядка и теорией бифуркации. Это позволило определять, к примеру, функцию распределения для однододового лазера в том случае, когда в качестве дополнительных условий фиксируются корреляционные функции интенсивности и флуктуаций интенсивности эмиттерного света.

10.3. Энтропия и макроскопический хаос

Во второй главе уже говорилось о том, что нормальная ньютоновская или гамильтоновская механика оказались не в состоянии разрешить противоречие между обратимостью и необратимостью. Требовалось введение нового понятия — неустойчивость движения относительно изменения начальных условий (сюда входит и расходимость траекторий). Такое понятие неустойчивости или, соответственно, расходимости движений, в свою очередь, связано с еще одним представлением об энтропии — энтропией Колмогорова.

Под неустойчивостью мы понимаем свойство траекторий определенных систем устремляться прочь друг от друга. Две поначалу соседние траектории за короткий промежуток времени расходятся и даже «разбегаются»; иными словами, небольшое изменение начальных условий приводит к значительным отклонениям по истечении даже малого времени (рис. 10.3).

Небольшая неопределенность в описании начальных условий спустя короткое время приводит к весьма значительному отклонению действительного состояния системы. Для неустойчивых (стохастических) областей фазового пространства отклонение двух первоначально тесно соседствовавших друг с другом траекторий экспоненциально растет с увеличением временного интервала. Такие системы сегодня называют хаотическими. Неустойчивость механических движений в современном понимании обуславливает и неупорядоченный характер движения молекул в газах и макроскопических телах. Количественную меру расходимости траекторий называют показателем Ляпунова. С показателем Ляпунова тесно связана так называемая энтропия Колмогорова. В самом общем случае эта величина

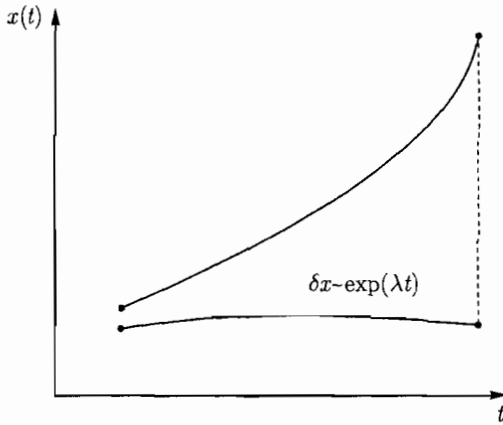


Рис. 10.3. Характерное для хаотической динамики экспоненциальное расхождение соседних траекторий. Коэффициент λ под экспонентой называется показателем Ляпунова.

равна сумме положительных показателей Ляпунова, характеризующих то или иное движение. Колмогоров, как и Ляпунов, был русским математиком; он умер несколько лет назад, но до того успел внести значительный вклад в разработку новых идей. При помощи современных компьютеров из численных решений ньютоновских уравнений для многочастичных систем получены важные результаты. Как уже говорилось ранее, Орбан и Беллеманс исследовали динамику ста дисков, движение которых подчинялось уравнениям Ньютона и законам упругого соударения. В качестве начальных условий для дисков были заданы случайные положения и случайно направленные скорости. Используя эти данные, Орбан и Беллеманс рассчитали траектории всех частиц и с их помощью определили затем больцманову H -функцию, то есть энтропию. Наблюдения показали, что H -функция (отрицательная энтропия) монотонно убывает.

Почему же энтропия, предоставленная самой себе, всегда лишь увеличивается, но никогда не убывает? Интерпретация, предложенная Больцманом (к ней присоединяется и Рюэль [154]), такова: исходные состояния, не приводящие к термодинамическому равновесию, чрезвычайно маловероятны. Они соответствуют лишь относительно малому объему фазового пространства, то есть весьма незначительной мере случайности. Со временем система — вследствие неустойчивости движения — занимает все большие и большие объемы фазового пространства. Эта тенденция соответствует переходу к более вероятным состояниям. В принципе возврат к исходному

состоянию возможен (при обратимости микроскопических процессов); однако поскольку требуемые промежутки времени превышают возраст метagalактики, то возможен он только математически. Течение времени в нашем космосе подчинено второму закону термодинамики.

Следует подчеркнуть, что и спустя сто лет после написания Больцманом своих работ многие вопросы остаются открытыми, так что окончательное решение проблемы энтропии человечеству еще предстоит найти. Совершенно необходимо при этом учитывать и космологические аспекты данной проблемы. Однако уже сегодня есть нечто, в чем ученые уверены абсолютно: подлинным основанием для макроскопической направленности является неустойчивость, расходимость микроскопических движений, то есть микроскопический хаос [148]. Хаотический характер микроскопического движения многочастичных систем приводит к возникновению качественно нового явления — макроскопической необратимости. Переход же к необратимости движений, в свою очередь, является решающим фактором, обуславливающим рост энтропии.

10.4. Энтропия и сложные последовательности

Сложными мы называем системы, состоящие из множества элементов. Понятие сложности играет сегодня ведущую роль при описании высокоорганизованных систем, хотя до сих пор и не имеет единого определения [23, 6]. Мы придерживаемся той точки зрения, что существующие на сегодняшний день различные определения сложности охватывают лишь отдельные аспекты этого понятия. Сложность, с одной стороны, связывается с длиной описания, а с другой — с количеством возможностей. Мы также ограничимся здесь именно этими аспектами сложности и рассмотрим в этом контексте линейные структуры — последовательности.

Последовательностью называется упорядоченный ряд символов. Молекула ДНК в этом смысле представляет собой последовательность нуклеотидов, обозначаемых символами А, Ц, Г и Т. Числа — это последовательности, составленные из символов-цифр: 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9. Немецкий текст — это последовательность букв немецкого алфавита, в основу которого положена латиница. Компьютерные программы являются последовательностями, состоящими из символов двоичного алфавита — нулей и единиц. Аналогичным образом — в виде двоичных последовательностей — современная цифровая техника позволяет зашифровать и телефонные разговоры, музыкальные произведения и массу другой информации. И хотя линейное кодирование — отнюдь не единственный способ кодирования, возможный

в природе и в технике, он все же является основным методом кодирования информации. Таким образом, обсуждение проблем энтропии и сложности последовательностей ни в коем случае нельзя отнести к задачам второго плана; напротив, именно эти проблемы оказываются ключевыми для нашей темы. Кроме всего прочего, последовательности теснейшим образом связаны с динамикой процессов. К примеру, траектории процессов в дискретных фазовых пространствах могут быть представлены в виде последовательностей символов, каждый из которых будет обозначением определенного дискретного состояния. И наоборот: последовательность символов алфавита A_1, \dots, A_λ всегда можно интерпретировать как процесс в фазовом пространстве. Более того, все процессы могут быть аппроксимированы посредством последовательностей символов в непрерывном фазовом пространстве, если оно разбито на ячейки (символическая динамика). Итак, последовательности и динамика также оказываются тесно связаны между собой. Обсуждаемые вопросы следует рассмотреть также и с позиций динамики (с той точки зрения, которая восходит к работам Шеннона) — см. [73, 34, 40, 7, 1, 42].

Тесные связи существуют и между характером процесса и типом корреляции соответствующих этому процессу последовательностей. Так, например, процессы Бернулли описываются совершенно некоррелируемой (хаотической) последовательностью символов; периодические же процессы, напротив, соответствуют упорядоченным (периодическим) последовательностям символов. Марковские процессы порождают последовательности с быстро достижимой упорядоченностью элементов. Мы покажем и случай, в котором на границе между упорядоченностью и хаосом существует характерный медленно достижимый порядок. Итак, мы систематически подходим к тому, чтобы применить представленные в предыдущем разделе понятия к последовательностям. Предположим, что некий алфавит

$$A_1, A_2, \dots, A_\lambda,$$

состоящий из λ символов, представляет, к примеру, уже упоминавшиеся нуклеотиды А, Ц, Г и Т (то есть для ДНК $\lambda = 4$) или нули и единицы (для компьютерных программ $\lambda = 2$). Рассматриваемая же последовательность представляет собой конечный или бесконечный ряд символов. Пусть некоторая подпоследовательность длины n имеет вид

$$A_1, A_2, \dots, A_n \quad A_i \in \{A_1, A_2, \dots, A_\lambda\}.$$

Грассбергер предложил называть такие подпоследовательности блоками. Далее положим, что вероятность отыскания в общей последовательности

блока $A_1 \dots A_n$ равна

$$p^{(n)}(A_1 \dots A_n),$$

а через

$$p^{(n)}(A_1 \dots A_n | A_k)$$

обозначим вероятность того, что вслед за блоком $A_1 \dots A_n$ встретится символ A_k в позиции $(n+1)$. Теперь дадим определения следующим величинам:

1. Энтропия для блока длиной n (энтропия блока):

$$H_n = - \sum p^{(n)}(A_1 \dots A_n) \log p^{(n)}(A_1 \dots A_n). \quad (10.18)$$

Энтропия блока описывает среднюю неопределенность блоков длиной n :

$$H_n = -(\log(1/p^{(n)}(A_1 \dots A_n))). \quad (10.19)$$

2. Энтропия для одного символа, входящего в блок длиной n :

$$H^{(n)} = H_n/n. \quad (10.20)$$

3. Условная энтропия как неопределенность символа, следующего за блоком длиной n :

$$h_n = H_{n+1} - H_n, \quad \text{если } n \geq 1, \quad h_0 = H_1. \quad (10.21)$$

4. Энтропия источника по Шеннону, Хинчину и Макмиллану:

$$h = \lim_{n \rightarrow \infty} H_n/n = \lim_{n \rightarrow \infty} h_n. \quad (10.22)$$

Последняя величина представляет собой дискретный аналог исследованной Колмогоровым и Синаем энтропии динамических систем (введены в предыдущем разделе). Для процессов Бернулли справедливо отношение

$$h_1 = h_2 = \dots = h_n = h = \log \lambda.$$

Это означает, что неопределенность всегда одинакова и не может быть уменьшена в результате наблюдения. Для марковских процессов первого порядка условная энтропия уменьшается только на первом этапе, так что справедливо неравенство

$$h_0 > h_1 = h_n = h.$$

Для марковских процессов m -го порядка верно следующее:

$$h = h_n = h_m, \quad \text{если } n \geq m. \quad (10.23)$$

Особый интерес вызывают процессы с долговременной памятью; такие процессы обнаруживают обширные корреляции с последовательностями. Макмиллан и Хинчин доказали, что для эргодических процессов справедливо неравенства

$$H_{n+1} \geq H_n, \quad H^{n+1} \leq H^{(n)} \quad (10.24)$$

и что предел в уравнении (10.22) действительно существует [103]. В своих прежних работах мы выдвигали гипотезу о действительности для целого очень обширного класса последовательностей следующей асимптотики [34, 40]:

$$H_n = nh + gn^{\mu_0} (\log n)^{\mu_1} + e, \quad (10.25)$$

причем предполагается, что

$$0 \leq \mu_0 < 1 \quad \text{или} \quad \mu_0 = 1, \quad \mu_1 < 0. \quad (10.26)$$

При $g \neq 0$ последовательность всегда содержит протяженный упорядоченный участок. Особенно интересен случай

$$g > 0, \quad h = 0 \quad \text{или} \quad h \ll 1. \quad (10.27)$$

Тогда асимптотика может быть записана следующим образом:

$$H_n = gn^{\mu_0} (\log n)^{\mu_1} + e + nh, \quad (10.28)$$

$$H^{(n)} = gn^{\mu_0-1} (\log n)^{\mu_1} + e/n + h. \quad (10.29)$$

Энтропия блоков демонстрирует при этом длинные корреляции. Частными случаями являются логарифмический закон

$$H_n = g(\log n) + e \quad (10.30)$$

и степенной закон

$$H = gn^{\mu_0} + e, \quad \mu_0 < 1. \quad (10.31)$$

Наша рабочая гипотеза состоит в том, что последовательности, несущие информацию, обнаруживают во многих случаях весьма протяженные корреляции, что для упорядоченных процессов соответствует долгосрочной памяти. Для доказательства существования таких корреляций (или «эффектов памяти») необходим анализ энтропии с особым учетом асимптотики для больших n .

Рассматриваемые нами определенные последовательности практически всегда имеют конечную длину (человеческие молекулы ДНК, текст телеграммы или книги), вследствие чего особое значение приобретает анализ энтропии последовательностей конечной длины. Со времен знаменитой работы Шеннона об энтропии английских текстов [163] энтропийный анализ относится к числу стандартных процедур прикладной информатики [92]. Для вычисления энтропий m -го порядка нам необходимы вероятности отыскания всех возможных блоков длины n ; в общей же сложности существует λ^n различных блоков (слов).

Анализируя последовательность длины L , можно оценить вероятности путем вычисления относительных частот. Для малых блоков, удовлетворяющих условию

$$: \quad \lambda^n \ll L,$$

такая оценка не вызывает серьезных проблем. Вслед за новаторской работой Шеннона появился целый ряд исследований не только текстов на различных языках, но и музыкальных произведений [92]. Существование протяженных корреляций в текстах (по крайней мере, порядка $n < 100$) сегодня признается практически всеми. Наступает ли при $n > 100$ состояние насыщения (исчезновение корреляций), как предполагают, к примеру, Бертон и Ликлайдер, пока неясно. Некоторые авторы [84, 40, 42] на основании произведенного ими анализа приходят к выводу о медленном сокращении корреляций в текстах согласно корневой зависимости

$$H^{(n)} \approx g/\sqrt{n}. \quad (10.32)$$

В 1970-х годах начались и энтропийные исследования структуры биологических последовательностей. Весьма существенным результатом таких исследований следует считать обнаружение факта сходства структуры биологических последовательностей со структурой марковских процессов высокого порядка [33, 131, 83]. Величина этого порядка на сегодняшний день еще точно не установлена. И анализ Гатлина, и новейшие исследования [83] указывают на то, что порядок здесь равен шести или больше. Рассмотрим теперь некоторые методические вопросы, связанные с оценкой вероятностей (и, соответственно, энтропии). Для начала предположим, что у нас имеется ансамбль из N слов, из которых N_1 относятся к типу 1, N_2 — к типу 2 и т. д. Если через $\langle N_n \rangle$ обозначить соответствующие средние значения, то средние относительные частотности слов

$$q_n = \langle N_n \rangle / N$$

дают лучшую оценку вероятностей в смысле обсуждавшейся в главе 2 максимизации энтропии. На графике (рис. 10.4) представлена относительная частотность слов длины 4, 9 и 16 в английском тексте; этот график построен Парето и Ципфом и отражает зависимость частотности слова от его ранга. Очевидно, что для слов фиксированной длины неприменима широко используемая аппроксимация по степенному закону. Кроме того, данные кривые показывают, что с увеличением длины слов распределение становится все более пологим и приобретает ступенчатую форму. Математическим обоснованием этой особенности может послужить теорема, доказанная Макмилланом и Хинчиным для эргодических процессов [92].

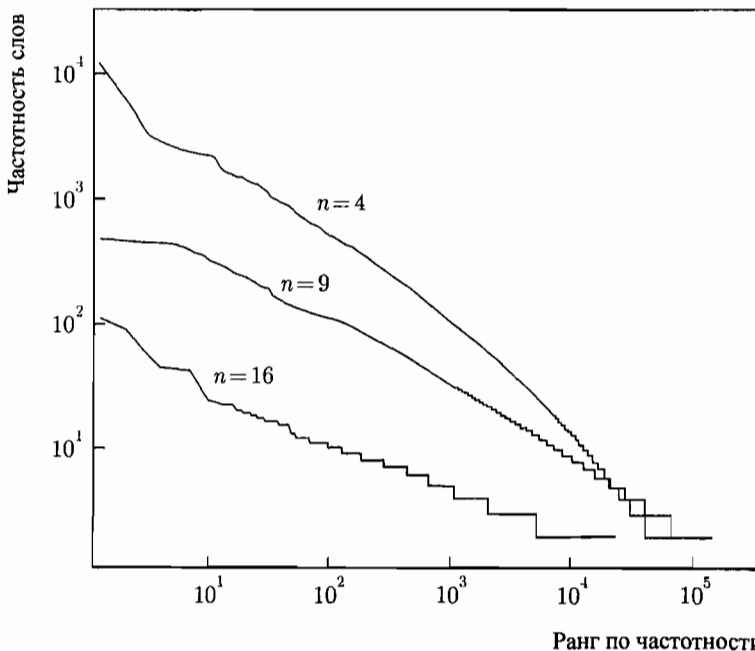


Рис. 10.4. Относительная частотность слов различной длины ($n = 4, n = 9, n = 16$) для английского текста на примере романа Германа Мелвилла «Моби Дик».

Для расчета энтропии нам необходима величина $p^{(n)} \log p^{(n)}$, которую можно оценить, используя средние значения

$$\langle (N_n/N) \log(N_n/N) \rangle.$$

В предельном случае при $\lambda^n \gg L$ каждое слово может встретиться в тексте

лишь однажды, а следовательно, окажется справедливо следующее:

$$\langle (N_n/N) \log(N_n/N) \rangle \approx (\log N)/N. \quad (10.34)$$

Противоположный (10.34) предельный случай предполагает оценку (см. [83])

$$\langle (N_n/N) \log(N_n/N) \rangle \approx p^{(n)} \log p^{(n)} - 1/2. \quad (10.35)$$

Здесь мы используем уже упоминавшуюся выше эргодическую теорему Макмиллана – Хинчина. Для достаточно больших n множество слов заданной длины n распадается на два класса:

1. Класс стандартных слов, которые встречаются часто. Сумма вероятности для слов этого класса близка к единице. К данному классу могут относиться M различных слов. Согласно Макмиллану и Хинчину, такие слова встречаются примерно с одинаковой частотой и вероятность их появления в тексте приблизительно равна $1/M$.
2. Класс нестандартных слов, которые встречаются очень редко. Сумма вероятностей появления этих слов близка к нулю. Графическое представление этой особенности аналогично показанному на рис. 10.4 формированию ступенчатого распределения частотности. Количество стандартных слов зависит от величины энтропии и равно

$$M = \lambda^{H_n}. \quad (10.36)$$

Полученные соотношения для предельных случаев можно связать между собой простыми интерполяционными формулами. Эти формулы можно использовать для вычисления предельного значения, каждый раз производя оценку и посредством итераций все лучше аппроксимируя эмпирическое среднее из последовательностей длины N . Преимуществом здесь оказывается и возможность одновременной подгонки наиболее полного набора эмпирических данных для последовательностей различной длины (входящих, впрочем, в один и тот же текст). Такую подгонку можно осуществить различными способами [40, 43]. Для кодирования мы использовали либо полный алфавит (без различия прописных и строчных букв, $\lambda = 32$), либо сокращенный его вариант, в котором различаются только гласные, согласные и прочие знаки ($\lambda = 3$). Таким образом для текстов были получены следующие результаты (в единицах $\log \lambda$):

$$(\lambda = 3): \quad H_n / \log 3 = 4.84\sqrt{n} - 7.57 + nh, \quad (10.37)$$

$$(\lambda = 32): \quad H_n / \log 32 = 0.9\sqrt{n} + 1.7 + nh, \quad (10.38)$$

где

$$h \sim 0.01 - 0.1.$$

Графически рост энтропии текстов представлен на рис. 10.5; очевидно, что описание посредством корневой зависимости здесь оказывается вполне уместным.

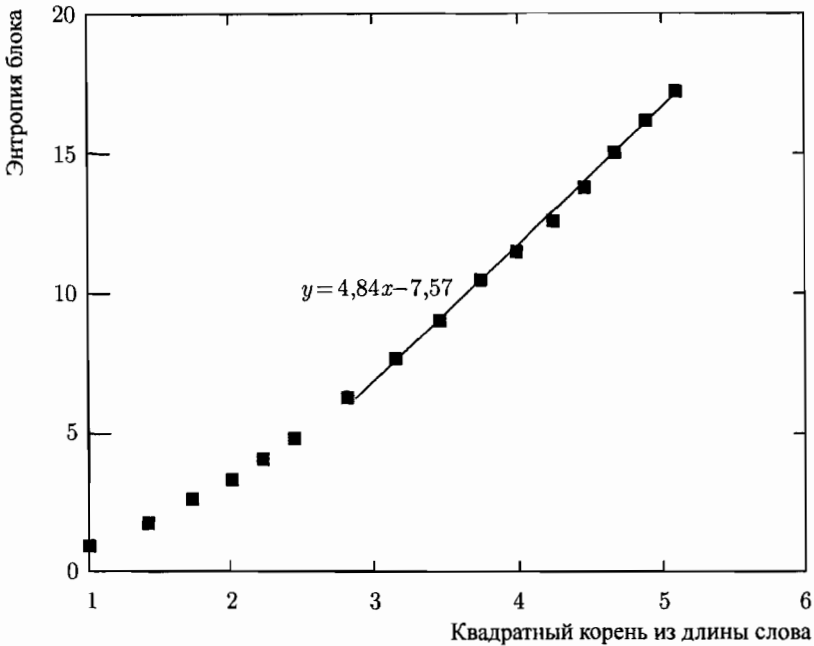


Рис. 10.5. Энтропия блоков для романа «Моби Дик», закодированного трехсимвольным алфавитом.

Для классической музыки (к примеру, соната 31/2 Л. ван Бетховена), закодированной в алфавите $\lambda = 3$ (высокие ноты, низкие ноты, прочие знаки) обнаруживается совершенно иной характер поведения энтропии [43]:

$$(\lambda = 3): \quad H_n / \log 3 = 2(\log_3 n + 1). \quad (10.39)$$

Отсюда следует, что музыка — по сравнению с текстом — обладает явно меньшей вариабельностью (иначе говоря, в ней значительно меньше «слов»); таким образом, музыка характеризуется более высокой, нежели

текст, степени упорядоченности. Следует заметить, правда, что такого рода исследования пока только начаты, и поэтому высказывать какие-либо систематические суждения о протяженных корреляциях сегодня еще невозможно.

Главная цель нашего исследования заключается в выяснении роли энтропии в описании и характеристике хаоса и порядка. При этом мы исходим из предположения, что особый интерес здесь представляет тот класс процессов, который относится к «пограничной» между упорядоченностью и хаосом зоне. Стремясь обосновать это предположение, мы тщательно исследовали тексты и нотные записи; в результате мы действительно обнаружили указания на существование протяженных корреляций. Следует упомянуть и о том, что протяженные корреляции демонстрируют и спектры рассмотренных последовательностей [159, 4].

Значительно более сложным, нежели анализ текстов и музыкальных произведений, оказывается исследование биополимеров [83]. В седьмой главе было подробно показано, насколько важна роль полимеров в протекании всех процессов, связанных с жизнедеятельностью. Особое значение при этом имеют полинуклеотиды ДНК и РНК и белки. В контексте настоящей главы эти молекулы можно рассматривать как своего рода «тексты», алфавит которых состоит из 4 (или 20) букв, то есть $\lambda = 4$ (или, соответственно, для белков $\lambda = 20$). Итак, имеем

$$N_n = \lambda^n \quad (10.40)$$

различных возможностей генерирования последовательностей длины n . Очевидно, что возможное число биологических последовательностей экспоненциально растет с увеличением длины, и это число для $n > 100$ настолько велико, что реализация всех этих возможностей в природе совершенно невозможна. Таким образом, действительно существующие ДНК-, РНК- и белковые последовательности — точно так же, как и языковые и музыкальные тексты, — должны быть результатом исключительно жесткого отбора. С формальной точки зрения, отбор означает, что не все слова длины n возникают в тексте с равной вероятностью. Согласно эргодической теореме Макмиллана–Хинчина, количество часто встречающихся слов определяется энтропией, и верно равенство

$$N_n^* = \lambda^{Hn}. \quad (10.41)$$

Следовательно, с учетом вышеприведенных результатов, для текстов получаем:

$$N_n^* = C\lambda^{nh+g\sqrt{n}}. \quad (10.42)$$

Перед нами — так называемый *закон пологого экспоненциального роста*: рост при этом происходит значительно медленнее, чем в случае нормального экспоненциального закона. Для музыкального произведения (закодированного в виде нотной последовательности) с увеличением длины n число различных кодовых групп (мотивов) начинает расти существенно медленнее. Действительно, в силу (10.39) и (10.41),

$$N_n^* = C \cdot n^2 \cdot \lambda^{nh}. \quad (10.43)$$

При условии, что $h \ll 1$, в обоих случаях получаем

$$N_n^* \ll \lambda^n. \quad (10.44)$$

Иными словами, при записи языковых или музыкальных текстов используется лишь ничтожная часть всех комбинаторно возможных вариантов, что и свидетельствует о происходящем здесь очень жестком отборе.

Энтропия представляет собой универсальную меру жесткости критериев такого отбора, результатом которого являются последовательности, несущие информацию. Точное значение энтропии источника h сегодня еще не известно. Для языковых и музыкальных текстов, по нашим оценкам, оно составляет от 1 до 10 процентов от максимально возможного значения.

Значение энтропии для немецкого языка еще в 1954 году оценил Кюпфмюллер:

$$h \approx 1.3 \text{ бит}. \quad (10.45)$$

По данным, полученным Хильбергом (они подтверждены и результатами наших собственных исследований), более вероятным представляется другое, значительно меньшее, значение $h \approx 0.01 - 0.1$ в связи с очень слабым затуханием по корневому закону. По степенным законам (10.42–10.43) существование корреляций обнаруживается во всех масштабах [159].

Столь же невозможно вынести сегодня и какие-либо окончательные суждения относительно энтропии музыки [92]. Вспомним о том, что (с чисто формальной точки зрения) музыка представляется нам как одномерная нотная последовательность. Такое представление является, естественно, крайне упрощенным, однако для рассматриваемой нами проблемы существования протяженных корреляций это упрощение существенного значения иметь не должно. В классических исследованиях Пинкертон (1956) музыка из сборника детских песен отображается последовательностью семи нот одной-единственной октавы (до, ре, ми, фа, соль, ля, си) и знака «О» для обозначения «прекращения звучания ноты». Музыкальный текст записан в виде последовательности восьмых долей. В нашей работе точно так же в виде

последовательности восьмых долей была закодирована одна из сонат Бетховена. При этом сначала был использован значительно сокращенный алфавит из 3 букв (высокая нота, низкая нота и символ прекращения или, соответственно, паузы), а затем и алфавит, состоящий из 32 букв (21/2 октавы, пауза и прекращение тона). Обобщенные в уравнениях (10.39) и (10.43) результаты позволяют сделать вывод о существовании протяженных корреляций и в звуковых последовательностях. Иными словами, и музыка (по крайней мере — хорошая музыка) обитает там, где проходит граница между хаосом и порядком.

Если бы представленные нами выводы о структуре текстов и музыкальных произведений подтвердились, в них можно было бы усмотреть и подтверждение предложенной Биркгофом теории эстетических ценностей. По Биркгофу, для того, чтобы произведение искусства было оценено как «прекрасное» (или хотя бы «занимательное»), оно не должно быть слишком правильным и предсказуемым — и одновременно не должно быть «перенапряженно сюрпризами» [159].

Что же касается биологических последовательностей, то научные данные о них на сегодняшний день даже еще более скудны, нежели сведения о текстах и музыкальных произведениях. Нам известно лишь, что биологические последовательности имеют чрезвычайно сложную структуру [50, 83]. Удалось показать, что специфические энтропии для полинуклеотидов соответствуют пятому или шестому порядку [83]. В 1972 году Гатлин, оценивая энтропию для печени кролика, получил значение

$$h \approx 1.94 \text{ бит.} \quad (10.46)$$

Однако думается, что дальнейшие точные исследования приведут к существенно меньшим значениям.

В заключение следует констатировать, что величина энтропии не только является центральной физической величиной, но имеет также огромное значение и для исследования структуры последовательностей, несущих информацию. И наконец, следует еще раз подчеркнуть тот факт, что именно энтропию можно назвать красугольным камнем в количественном описании понятия сложности.

ГЛАВА 11

Синергетика эволюции

Девушка с ореховыми глазами
побывала во всех далях Вселенной,
перенесла много тягот и лишений. Но —
добравшись вдруг до цели — не поняла она,
как нечто столь чудесное
можно найти столь незаметно.

Хельга Кёнигсдорф.

Маленький принц и девушка с ореховыми глазами

11.1. О задачах синергетики

Основанная Германом Хакеном *междисциплинарная наука синергетика изучает самоорганизующееся поведение комплексных систем, ведущее к возникновению структур и/или функций*. Мы покажем здесь, насколько методы и принципы синергетики применимы для отыскания прочных взаимосвязей между понятиями *хаос* и *космос* и для формулировки встающих перед исследователями задач на языке математики. Читатели, которые готовы довольствоваться всего лишь обзором данной темы, могут, разумеется, просто пролистать настоящую главу. Здесь в сжатой форме будут представлены принципы и методы синергетики и описано применение их к рассматриваемым в книге задачам. Несколько выходя при этом за рамки физики, мы займемся разработкой таких универсальных характеристик, как самовоспроизводство, критичность, оценка, стохастичность и историчность. Прежде чем перейти к изложению выводов, сделанных нами в ходе исследований, мы еще раз коротко остановимся на важнейших принципах и этапах эволюции жизни и ее проявлений.

Начнем с основных идей. Научная дисциплина, называемая синергетикой, была основана Германом Хакеном в конце 60-х – начале 70-х годов двадцатого века. Фундаментальным понятием синергетики является понятие самоорганизации, которое мы подробно рассматривали во второй и третьей главах. Хакен определяет синергетику как новую область междисциплинарных исследований, посвященных изучению самоорганизующегося поведения, которое приводит к образованию структур и формированию

функций. Само же понятие самоорганизация уже было определено нами как процесс, протекающий в системе спонтанно, то есть процесс, структурируемый самой системой, без какого-либо регулирования или привнесения функций извне. Функция при этом представляет собой высшую (по отношению к структуре) форму. То, что подобные процессы имеют место в природе, на множестве примеров было показано в предыдущих главах: сюда относятся почти все явления биологической и социальной сферы, а также многие физические, геологические и климатические процессы. Прибегая к более строгой формулировке, можно сказать, что под самоорганизацией мы понимаем спонтанное образование упорядоченных структур или функций в системах с накачкой, действующих на некотором превышающем критическое отдалении от равновесного состояния. *Накачка* в данном контексте означает, что ценность подаваемой в систему энергии выше, нежели ценность энергии, выводимой из системы; для процессов самоорганизации это — *conditio sine qua non*, необходимое условие. На языке термодинамики *накачка высокоценной энергией* называется *экспортом энтропии*, поскольку энтропия является количественной мерой обесценивания энергии. Развитие понятия самоорганизация мы связываем с такими известными в истории науки именами, как Больцман, Оствальд, Пуанкаре, Андронов, Шрёдингер, Бергаланффи, фон Фёрстер, Тьюринг, Пригожин, Эйген и уже упомянутый основатель синергетики — Хакен. Подход, предложенный Хакеном, носит междисциплинарный характер; ученый пишет об этом так:

Главный вопрос синергетики касается существования универсальных принципов, которые управляют самоорганизующимся образованием структур и/или функций как в живой, так и в неживой природе.

Сегодня, когда история успешного (об успешности свидетельствует почти сотня опубликованных книг по данной теме) развития синергетики насчитывает более двадцати лет, само существования подобных принципов, собственно, больше не подвергается сомнению. Задача заключается, скорее, в более четкой разработке этих принципов для различных отраслей науки. Мы преследуем именно эту цель, опираясь на общие принципы эволюции и оставаясь в рамках, которые предполагает синопсис, задуманный нами в качестве заключительной части книги. В отличие от наших прежних работ, которые были посвящены, скорее, разработке *физики эволюционных процессов* [37], эта книга делает первые шаги по направлению к «синергетике эволюции». Разумеется, все изложенное в предыдущих главах остается, по существу, действительным и для дальнейшего рассмотрения, однако в силу более общего характера положений, выдвинутых Г. Хакеном, нам также следует сделать некоторые обобщения. *Естественно, в первую очередь речь*

пойдет об изучении функций комплексных биологических, экологических и социальных систем. Частной задачей совершенно особого класса (мы уже приводили ряд различных рассуждений на эту тему) является формулировка четких критериев оценки и развитие методов обработки информации.

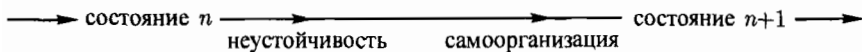
Таковы, в общих чертах, перспективы работы над синергетическими проблемами хаоса–космоса, коль скоро мы намерены оправдать взятые на себя обязательства. Естественно, нам приходится существенно ограничить круг рассматриваемых вопросов. Как было уже сказано, центральными для нас являются проблемы, связанные с обработкой информации и ролью процессов оценки; при этом мы — в отличие от прежних чисто качественных рассуждений — обсудим и некоторые математические подходы к проблемам такого рода.

Главная задача синергетических исследований, касающихся эволюции космоса из первоначального хаоса, состоит в отыскании основополагающих принципов, которые и обусловили в итоге формирование существующего сегодня космоса со всем разнообразием входящих в него структур, и в частности биосферы Земли. Выяснение этих принципов представляется нам единственным надежным способом, позволяющим прогнозировать возможное будущее человечества и окружающего его мира. Эти вопросы мы непременно обсудим чуть позже — в заключительной двенадцатой главе. Среди самых важных проблем следует назвать также и изучение процессов, связанных с образованием ценности и информации. Некоторые из нижеследующих рассуждений суть не что иное, как возвращение к уже представленным в первых девяти главах точкам зрения, только на несколько более «высоком» в смысле математических требований уровне.

Эволюция в природе и обществе понимается нами как бесконечная цепь процессов самоорганизации; такой подход к эволюции был тщательно обоснован нами в начале книги. Следуя гегелевским представлениям, можно говорить и о спиралях, состоящих из циклов самоорганизации. Каждый из циклов содержит, в свою очередь, следующие стадии:

- I. *Относительно устойчивое эволюционное состояние становится неустойчивым в результате изменения внутренних или внешних условий.*
- II. *Неустойчивость запускает процесс самоорганизации, который и порождает новую структуру.*
- III. *В результате самоорганизации возникает новое относительно устойчивое эволюционное состояние, которое опять может стать началом нового цикла.*

Можно изобразить эти стадии в виде следующей схемы:



То, что на нашей схеме изображена только линейная цепочка, — не более чем графическое упрощение. В действительности же речь идет, скорее, о сложной высокоорганизованной сети, состоящей из цепей и спиралей (рис. 11.1).

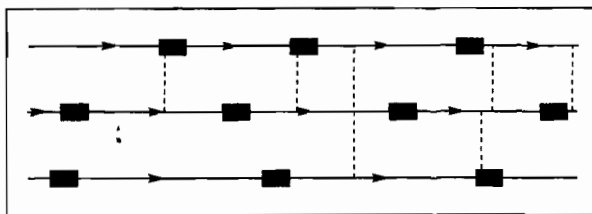


Рис. 11.1. Объединение цепочек циклов самоорганизации в высокоорганизованную сеть.

Динамика отдельных циклов самоорганизации в основном оказывается нелинейной. Переходы между циклами носят характер бифуркаций и во многом аналогичны фазовым переходам в термодинамике. Хорошо известно, что термодинамические системы вблизи фазовых переходов демонстрируют определенные особенности: мощные флуктуации, долгие времена релаксации, обширные пространственные корреляции, структуры на разных масштабах, особые спектры шумов. Сходным образом выглядит ситуация и при переходе от одного цикла самоорганизации к другому. Представим себе, что неустойчивость, сопровождающая переход, соответствует критическому значению $a_{\text{крит}}$ некоторого параметра. В таком случае вблизи этого значения наблюдаются те особенности, о которых уже говорилось выше. По предположению, выдвинутому датским ученым Пером Баком и его коллегами, критическое состояние эволюционных систем оценивается особым образом; в этой связи говорят о «самоорганизующейся критичности» [11]. Идея самоорганизующейся критичности (SOC) — подкрепленная, между прочим, рядом убедительных аргументов — заключается в том, что такие системы самоорганизуются только при критических условиях. С определенной очевидностью можно утверждать, что самоорганизующаяся критичность является существенным элементом эволюционных процессов. Разумеется, представление о роли, которую самоорганизующаяся критичность играет в синергетических исследованиях, еще нуждается в доработке.

Теперь перейдем к следующему существенному аспекту — *историчности эволюции*. Эволюция — это исторический процесс, который (по оценкам сегодняшней физики) начался 16–20 миллиардов лет назад с расширения раскаленной неупорядоченной плазмы. Этот протокосмос можно сравнить с батареей, «под завязку» заряженной высокоценной энергией; космос таил в себе колоссальный созидательный потенциал [127]. В пятой главе уже рассказывалось о том, как примерно 17–20 миллиардов лет наш мир возник из чудовищно горячей, плотной, неупорядоченной первоматерии. Будучи абсолютно неструктурированной, первоматерия находилась в состоянии высочайшей симметрии. В ходе длительного процесса в результате самоорганизации первоначальные симметрии одна за другой нарушались; образовывались все новые и новые структуры. История формирования упорядоченного *космоса* — это история самоорганизации. Развитие из первоначального *хаоса* наблюдаемых сегодня различных уровней сложности и процессов биологической и технической обработки предполагает обязательное наличие в нем мощного созидательного потенциала. Значительным вкладом в понимание созидательности хаотических состояний мы обязаны теории самоорганизации и современным исследованиям хаоса, которые ввели в науку концепцию неустойчивости движений, подробно рассмотренную во второй и третьей главах.

В пятой главе, посвященной течению эволюции, было выделено 12 фаз, или эпох; еще раз сжато повторим их последовательность. За первые несколько минут после начала расширения наш космос пережил целых восемь чрезвычайно насыщенных событиями этапов, в ходе которых была сформирована физико-химическая структурная основа сегодняшней вселенной с фотонами, нейтрино, электронами, ядрами и т. д. Девятая эпоха отмечена тем, что именно тогда произошел захват ядрами электронов, в результате чего образовались молекулы; непрозрачная плазма была преобразована в прозрачный нейтральный газ. К этому времени (отстоящему от момента начала расширения на несколько сотен тысячелетий) изжила себя существовавшая до тех пор чрезвычайно плотная связь материи и излучения; после «разрыва» материя и излучение зажили каждый своей жизнью, следуя собственному пути развития. Материя под воздействием гравитационных неустойчивостей образовывала скопления; так началась пространственная самоорганизация, которая и привела к формированию базовых пространственных структур. Эти структуры были выстроены иерархически (и остаются таковыми до сих пор); первые из них образовались в масштабах галактик, состоящих из горячих звезд и их более холодных спутников, планет. Материальные структуры были погружены (так же, как сейчас) в почти совершенно холодное море фотонов так называемого фонового излучения.

Термическая неоднородность этой системы в одиннадцатой эпохе привела в действие механизм, который мы назвали *фотонной мельницей*. Фотоны с раскаленной поверхности звезд «падают» (слегка задерживаясь на планетах) в холодное фотонное море. Этот «светопад» приводит в действие на планетах своеобразную «мельницу эволюции». Наконец, в ходе двенадцатой эпохи началась самоорганизация материи в системы, способные обрабатывать информацию.

Способ, «изобретенный» эволюцией в ходе двенадцатой эпохи для материального воплощения объединенных в высокоорганизованную сеть цепей (спиралей) циклов самоорганизации, оказался прост и изящен: самовоспроизводство плюс мутации и селекция. Самовоспроизводство отличало уже полимерные цепочки (полинуклеотиды), спонтанно возникавшие в результате естественных процессов синтеза, и позволяло осуществлять передачу определенных структурных элементов гетерополимерных цепочек. Полипептиды (белки) при поддержке катализаторов способствовали дальнейшему совершенствованию механизма самовоспроизводства. Мутации представляют собой результат ошибочного самовоспроизводства, а потому являются, по существу, стохастическим феноменом. Эволюция, таким образом, есть не что иное, как постоянное чередование необходимого и случайного.

В ходе дальнейшего совершенствования процессов самовоспроизводства полинуклеотидных молекул при каталитической поддержке полипептидов развивались способы кодирования информации в первичной последовательности и методы передачи такой закодированной информации. Подробности этого процесса пока еще покрыты тайной, однако среди наиболее значительных достижений современной науки следует все же упомянуть тот факт, что ученые, по крайней мере, приблизились к решению этой — важнейшей — проблемы самоорганизации биомолекул, и таким образом — к пониманию процесса возникновения биологической информации. С точки зрения современной науки, обработка информации может рассматриваться как особая форма (особо высокоразвитая) самоорганизации [47, 30, 180, 131]. Вершиной такого рода процессов, конечно, можно считать живую природу, мир живых организмов. Под живыми организмами мы понимаем естественные структурированные и способные к обработке информации системы, возникшие в результате процессов самоорганизации и эволюции. При этом в отличие от многих биологически ориентированных определений мы связываем понятие «жизнь» только с возникшей в ходе естественной эволюции способностью обрабатывать информацию. Системы, способные обрабатывать информацию, но возникшие в результате деятельности других систем, обладающих той же способностью, таким образом оказываются исключены из рассмотрения. Пограничный случай, не попадающий (или попадающий

лишь с оговорками) под это определение, представлен живыми организмами, которые являются продуктом так называемых генных технологий (ряд подобных манипуляций сегодня уже возможен). Согласно нашему определению, продукты, полученные таким образом, не могут считаться живыми организмами; генные технологии здесь являются вмешательством в ход естественной эволюции. Наконец, в этой связи следует упомянуть и о том, что все большее число исследователей оказывается занято кругом проблем, определяемым словосочетанием «artificial life», «искусственная жизнь».

Выражая собственное мнение, отметим, что перечисленные выше вопросы интересны не только с точки зрения развития науки, но также и с позиции неизбежного развития новой этики. Представим себе, к примеру, ситуацию, неоднократно описанную Станиславом Лемом: наши потомки, путешествуя на своих космических кораблях, однажды сталкиваются с чужой информационной системой. Каким же образом следует рассматривать подобные системы? Применимы ли к ним человеческие нормы — к примеру, пятая заповедь? Имеют ли такие системы право на защиту и заботу, или их следует рассматривать как технические объекты? Как показывает Веркор в своем романе «Люди или животные?», для ответов на эти вопросы необходимы прежде всего законодательные определения. Думается, наши потомки при встрече с чужаками (с чужими системами обработки информации) должны будут непременно выяснить их происхождение. Если эти существа (системы) окажутся результатом естественной эволюции, они — независимо от их материальной структуры — должны быть восприняты (со всеми вытекающими отсюда этическими последствиями) как живые организмы. Если же эти существа окажутся лишь отчасти порождением естественной эволюции, а в остальном — продуктом технологической цивилизации, своего рода биоконструктом, то вопрос об их классификации останется открытым, и наши потомки при его решении должны будут руководствоваться собственным здравым смыслом. Мы с вами можем только догадываться о том, насколько непростыми окажутся все связанные с подобными проблемами этические последствия.

11.2. Элементы синергетической теории эволюции

Следующий раздел будет посвящен рассмотрению методических вопросов. С точки зрения математики они достаточно сложны, и при желании читатель может их просто пропустить. В третьей главе уже говорилось о том, что процессы самоорганизации и эволюции могут быть описаны на различных уровнях. Мы выделяем пять таких уровней.

1. Феноменологически-кинематические модели (описание посредством перечисления во временной последовательности).
2. Модели в рамках термодинамической теории (равновесная термодинамика, термодинамика необратимых процессов, химическая кинетика, диффузионная теория, гидродинамика и т. д.).
3. Модели детерминистской динамической теории (дифференциальные уравнения параметров порядка).
4. Модели стохастической динамической теории (марковские уравнения распределения вероятностей параметров порядка).
5. Микроскопическая теория (статистическая механика, кинетическая теория).

Развиваемая Германом Хакеном синергетика занимается преимущественно описаниями на детерминистском и стохастическом уровнях, причем оба уровня взаимно дополняют друг друга. Термодинамическое описание и микроскопическая (статистико-механическая) теория составляют своего рода обрамление для двух этих уровней. Фундаментом для детерминистской теории служат по большей части формулировка и анализ систем нелинейных дифференциальных уравнений, тогда как стохастическая теория основывается на аппарате марковских процессов. В синергетической теории значение детерминистского описания отступает на задний план, поскольку оно не учитывает существенных стохастических элементов эволюционных процессов. Мы уже указывали на то, что важнейшим элементом эволюции является возникновение *нового*. Под *новым* мы понимаем первое проявление типов объектов, прежде не существовавших (элементарные частицы, ядра, атомы, молекулы, микроорганизмы, биологические виды и т. д.). Таким образом, эволюция является историческим процессом, и исследования в этой области должны вестись с использованием исторических методов [136], а следовательно, такие исследования выходят за рамки классического естествознания. Важным элементом исследования оказывается определение времени появления нового вида, соотнесение этого события с определенным моментом в ходе исторического процесса. Особого внимания при этом заслуживает то обстоятельство, что не только сам факт возникновения, но и процесс внедрения нового являются случайными. Дело в том, что сначала новое возникает, как правило, в единственном экземпляре (или нескольких, но немногочисленных); вследствие этого внедрение нового путем самовоспроизводства подчинено случайным флуктуациям. Соответствующая теория должна быть теорией стохастической [175, 37].

Идея так называемого формализма чисел заполнения заключается в следующем.

Пронумеруем различные виды, присвоив им значения

$$i = 1, 2, 3, \dots, s$$

и введем числа заполнения:

$$N_1, N_2, N_3, \dots, N_s.$$

Рассматриваемый нами формализм чисел заполнения — в отличие от действующего в химии и экологии так называемого формализма концентраций — работает только с целыми неотрицательными числами

$$N_i = 0, 1, 2, 3, \dots$$

Появление первого экземпляра какого-то совершенно нового вида соответствует стохастическому переходу

$$N_i = 0 \longrightarrow N_i = 1.$$

В рамках теории для этого формулируются определенные вероятности перехода, точно так же, как и для всех прочих переходов между числами заполнения в таких процессах, как самовоспроизводство, мутация, селекция и т. д.

Понятие «селекция», или «отбор», уже неоднократно упоминалось нами, однако четкого его определения до сих пор дано не было. Селекция в эволюционных системах всегда связана с оценкой и конкуренцией. Селекция подразумевает отбор в ходе конкурентной борьбы между видами тех из них, что были оценены положительно. Конкуренцию мы в самом общем виде определяем как коллективный процесс, протекающий в динамической системе, в которую входят несколько различных видов. Конкуренция возникает, если все эти виды (подсистемы) в данных условиях оказываются принципиально способны к существованию и достигают общей цели, поскольку не все виды добиваются этого одним и тем же способом. Некий когерентный процесс приводит в таких условиях к исчезновению из системы одного или нескольких видов (подсистем). Конкуренция известна и в физике: к примеру, лазерные моды или гидродинамические моды течения вступают в конкурентную борьбу за имеющиеся в системе энергетические ресурсы. В экологии о конкуренции говорят, когда необходимый для выживания ограниченный ресурс потребляется двумя или более видами.

Конкуренция ведет к отбору, который осуществляется по результатам оценки. По Чарлзу Дарвину, в конкурентной борьбе выживает наиболее приспособленный вид; эта идея очень точно передана выражением «survival of the fittest». Множество споров возникло вокруг вопроса о том, не является ли данное выражение тавтологией. Мы убеждены, что само существование «синергетики эволюции» тем и обусловлено, что формулировка Дарвина – Спенсера не только не является тавтологией, но еще и выражает основной закон эволюции. В этой связи следует упомянуть и о том, что понятие «fitness»¹ представляет собой пример объективизации в эволюционном процессе.

С целью уточнения приведенных в главах 3, 4, 7 и 8 рассуждений, вернемся еще раз к новому фундаментальному понятию ценности. Как уже было показано, важнейшим понятием в теории конкуренции и селекции является «ценность» (или «fitness» — «пригодность, приспособленность» в дарвиновском смысле). О появлении в научном обиходе термина «ценность» мы уже рассказывали. Для общей теории эволюции основополагающее значение имеет идея адаптивных ландшафтов. Адаптивные ландшафты мы определяем как ландшафты, образованные скалярными значениями в пространстве фенотипов, то есть в векторном пространстве, оси которого соответствуют отдельным фенотипическим свойствам. В качестве примеров таких квантифицированных свойств могут рассматриваться, к примеру, вес и рост индивидуума. Под ценностью мы понимаем нефизическое свойство вида (подсистемы) в динамическом смысле. Ценность выражает сущность биологических, экологических, экономических или социальных взаимодействий и взаимосвязей в контексте динамики всей системы в целом. В рамках синергетической теории ценность вводится как аксиоматический элемент.

Мы уже говорили о том, что и в физике понятие ценности сыграло определенную роль. В физику этот термин попал почти тогда же, когда началась его разработка в биологической теории эволюции, ввел же его Клаузиус в связи с понятием энтропии. И сам Клаузиус, и вслед за ним и другие ученые (прежде всего — Гельмгольц и Оствальд) полагали, что энтропия тела есть мера обесценивания энергии, содержащейся в данном теле. Сущность второго закона термодинамики тесно связана с ценностью энергии; чрезвычайно важным поэтому представляется вновь ввести в физику понятие ценности.

Понятие «ценность» для физической энтропии связано, впрочем, еще и с негэнтропией Шрёдингера и снижением энтропии по Климонтовичу. Напомним о том, что в системе с фиксированной энергией энтропия дости-

¹Пригодность, приспособленность (англ.) — *Прим. перев.*

гает максимума, когда система находится в состоянии термодинамического равновесия. Если через X обозначить набор экстенсивных термодинамических фазовых переменных, а через y — набор параметров порядка, который выражает отклонения от равновесного состояния, то верно следующее:

$$S_{\text{эКВ}}(E, X) = \max S(E, X, y). \quad (11.1)$$

Теперь, согласно Климонтовичу, назовем постоянно положительную величину

$$\delta S(y) = S_{\text{эКВ}}(E, X) - S(E, X, y) \quad (11.2)$$

снижением энтропии. По S -теореме Климонтовича, снижение энтропии δS есть мера структурированности, выражающая рост отклонения от равновесия. Перемена знака в соотношении Больцмана–Планка дает нам, согласно Эйнштейну, вероятность того, что неравновесное состояние возникнет в результате некоторой спонтанной флуктуации. Эйнштейновская вероятность определяется как

$$W(y) = \text{const} \exp[-\delta S(y)/k]. \quad (11.3)$$

Перед нами мера спонтанного возникновения некоторого состояния, характеризуемого набором параметров порядка y , и, тем самым, мера удаления от равновесного состояния, а значит, и мера ценности содержащейся в теле энергии с учетом эффективной мощности, потому как в состоянии равновесия система не располагает энергией для совершения работы. Снижение энтропии тесно взаимосвязано с негэнтропией, то есть с отрицательной энтропией тела — понятием, введенным Шрёдингером в его знаменитой книге «Что такое жизнь?». Снижение энтропии отличается от отрицательной энтропии тела только величиной (постоянной) равновесной энтропии. В том контексте, в котором мы в дальнейшем будем использовать термин Шрёдингера также и для снижения энтропии, сдвиг на постоянную величину может рассматриваться как незначительное отличие. Чрезвычайно важна роль понятия «ценность» и в рамках теории информации. Усилия ученых направлены сейчас на то, чтобы понятие ценности информации описать количественно.

11.3. Эволюционная динамика

Понятием «эволюционная динамика» мы обозначаем законы движения эволюционной системы, которые основываются на какой-либо форме оценки. Прежде чем мы перейдем к математическим формулировкам, необходимо сначала сказать несколько слов о фазовом пространстве эволюционных

систем. Рассмотрим системы, состоящие из различных подсистем (видов), которые мы обозначим индексами

$$1, 2, 3, \dots, i, \dots, s.$$

Нетривиальную задачу может представлять собой уже установление порядка перечисления. Подсистемы или виды, образующие эволюционную систему, часто характеризуют последовательностью букв, представляющей некий обобщенный «генотип»; примерами могут служить последовательности, представляющие РНК и ДНК биологических видов. Здесь упорядочение целых чисел может следовать известному закону Гёделя. Множества всех последовательностей образуют абстрактное метрическое пространство, так называемое пространство генотипов. Непосредственным объектом оценки является, как правило, не генотип, а соответствующий ему фенотип, то есть множество поддающихся количественной оценке характеристических свойств. Используя термин «фенотип», следует иметь в виду то множество сведений, что приводится в энциклопедическом словаре для характеристики определенного вида. Как уже было показано выше, из множества фенотипов могут образовываться пространства — так называемые пространства фенотипов, — в которых определяется адаптивный ландшафт. В простейшем случае каждому виду i жестко сопоставлено некоторое действительное число V . Следующее допущение заключается в том, что каждый вид i может быть соотнесен с числом N_i или классом x_i . Термином «класс» мы обозначаем здесь среднюю относительную долю различных родов в общей популяции.

$$x_i = \langle N_i \rangle / N; \quad N = \sum \langle N_i \rangle. \quad (11.4)$$

Результаты конкурентной борьбы между видами, то есть выигрыши и потери, могут быть затем выражены увеличением или уменьшением соответствующих долей в общей популяции. Общий случай, подробно рассмотренный Фишером (1930) и Эйгеном (1972), представляет конкурентную борьбу посредством сравнения со средними значениями по популяции в целом:

$$\langle V \rangle = \sum V_i x_i. \quad (11.5)$$

Растет численность всех тех видов, чья ценность оказалась выше этого среднего «популяционного значения»:

$$V_i > \langle V \rangle; \quad (11.6)$$

уменьшается же численность тех видов, которые до средних значений «не дотянули»:

$$V_i < \langle V \rangle. \quad (11.7)$$

Такая тенденция ведет, в свою очередь, к увеличению среднего значения. В конце концов победу в конкурентной борьбе одерживает вид с самым высоким значением ценности в популяции. Интересен частный случай, в котором значения ценности оказываются логарифмической функцией от класса:

$$V_i = -\log x_i. \quad (11.8)$$

Оценка здесь указывает на то, что победа останется за равновесным распределением. В физике этот случай ведет к энтропии, которая опять-таки оказывается частным случаем в общей системе с оценкой.

В биологии или экологии оценка в простейшем случае осуществляется только по скорости воспроизводства E_i . Этот случай дает нам и простейшую модель эволюционной динамики — динамическую систему Фишера и Эйгена. Для классов в этой модели верно следующее дифференциальное уравнение:

$$\dot{x}_i = (E_i - k_0(t))x_i(t). \quad (11.9)$$

Скорости распада следуют из нормирующего условия

$$\begin{aligned} \sum x_i &= 1, \\ k_0(t) &= \sum E_i x_i = \langle E \rangle. \end{aligned}$$

В результате получаем динамическое уравнение

$$\dot{x}_i = (E_i - \langle E \rangle)x_i. \quad (11.10)$$

В этом примере — через сравнение со средним значением — явно наблюдается эффект конкурентной борьбы. В конечном итоге в системе остается только вид, обладающий самой высокой скоростью репликации:

$$E_m > E_i; \quad i = 1, 2, \dots, s; \quad i \neq m. \quad (11.11)$$

Модель Фишера–Эйгена является самой простой из всех моделей конкуренции и отбора. Обобщение касается систем, в которых виды конкурируют из-за некоего общего ресурса (индекс 0). Динамические детерминистские уравнения принимают в этом случае следующий вид:

$$\begin{aligned} \dot{x}_0 &= \Phi_0 - \sum k_i x_0 x_i, \\ \dot{x}_i &= (k_i x_i - k'_i) x_i, \quad i = 1, \dots, s. \end{aligned} \quad (11.12)$$

С помощью анализа устойчивости можно показать, что победителем в этом случае становится вид, для которого соотношение скоростей образования и распада окажется наибольшим:

$$k_m/k'_m > k_i/k'_i. \quad (11.13)$$

Еще более общие модели включают полный спектр взаимодействий Лоттки–Вольтерра [140]. Вопрос о том, который же из видов победит в описываемых такими моделями условиях, требует более сложного математического анализа.

Представленная в общих чертах теория носит детерминистский характер и оказывается не в состоянии справиться с чрезвычайно существенной особенностью эволюционного процесса — возникновением новых видов. Выше уже говорилось о том, что для адекватного описания этого аспекта необходимо введение чисел заполнения вместо классов. Элементарный процесс самовоспроизводства соответствует в таком случае переходу

$$N_i \longrightarrow N_i + 1,$$

а гибель вида —

$$N_i \longrightarrow N_i - 1.$$

Процессу обмена соответствует переход

$$N_i \longrightarrow N_i + 1 \quad \text{и} \quad N_j \longrightarrow N_j - 1.$$

Процессу возникновения *нового* вида соответствует переход «0–1»:

$$N_i = 0 \longrightarrow N_i = 1.$$

При разработке стохастической теории этих переходов предполагался марковский характер и принимались определенные допущения относительно вероятностей переходов. Соотношение с детерминистской картиной устанавливается через процесс усреднения:

$$x_i(t) = \text{const} \langle n_i(t) \rangle.$$

Суждения о вероятности определенных состояний системы требуют вычисления функций распределения для чисел заполнения

$$P(N_1, N_2, \dots, N_i, \dots, N_s, t).$$

Стохастическая теория эволюции очень сложна, а потому мы не имеем возможности обсудить ее здесь более подробно (см. [175, 37]).

11.4. Синергетика эволюционных процессов

Одной из главных проблем синергетики эволюции оказывается выяснение взаимоотношений между самоорганизацией и информацией. Сюда входит и решение по крайней мере двух вопросов:

1. Каковы в общем случае отношения этих двух основных понятий и каким образом эти отношения могут быть выражены количественно?
2. Каким образом в ходе эволюции произошло спонтанное возникновение процессов обработки информации?

Оба эти вопроса уже поднимались нами в четвертой и седьмой главах; теперь эти рассуждения следует обобщить и дополнить с позиций синергетики. Сначала подчеркнем: ни одна из названных проблем не может сегодня считаться решенной окончательно, однако все же можно говорить о том, что в последние годы наука сделала весьма важные шаги на пути к их решению. Особое значение для развития такого рода исследований имеют работы Эйгена, Хакена и Волькенштейна. К ключевым понятиям в области взаимосвязи самоорганизации и информации, несомненно, относится введенное Больцманом, Планком и Гиббсом понятие статистической энтропии. В двадцатом веке этот термин успешно применялся к информационным процессам (Сцилардом, Шенноном, Бриллюэном), о чем мы уже упоминали в десятой главе.

Вернемся еще раз к идее, положенной Шенноном в основу его определения энтропии; именно определение Шеннона носит наиболее универсальный характер. Согласно Шеннону [163], средняя неопределенность нормированного распределения вероятностей $p(x)$

$$H = M[\ln(1/p(x))] = - \int dx p(x) \ln p(x) \quad (11.14)$$

называется информационной энтропией этого распределения. При этом состояние системы относительно наблюдаемых d степеней свободы определяется

$$x = (x_1, \dots, x_d).$$

Теперь обратимся к понятию энтропии в статистической механике — им мы обязаны основополагающим работам Больцмана, Планка и Гиббса. В статистической механике энтропия макросостояния для системы в равновесии определяется, по Больцману и Планку, как логарифм термодинамической вероятности:

$$S = k_B \ln W. \quad (11.15)$$

Термодинамическая вероятность может быть получена путем вычисления количества молекулярных конфигураций, соответствующих данному макросостоянию. Обобщение этой формулы энтропии для взаимодействующих систем (не обязательно в равновесном состоянии), согласно Больцману и Гиббсу, записывается следующим образом:

$$S = -k_B \int (dp dq / h^6 N) \varrho(p, q) \ln \varrho(p, q), \quad (11.16)$$

где $\varrho(p, q)$ — это распределение вероятностей в $6N$ -мерном фазовом пространстве системы. Если $\varrho(p, q)$ — равновесные распределения, то статистическое и термодинамическое понятия энтропии приводят к эквивалентным результатам. Это обстоятельство позволяет, к примеру, вывести из канонического распределения для ϱ основное уравнение Гиббса. Для случая систем с фиксированной энергией энтропия Гиббса сводится к указанной выше формуле Больцмана–Планка, причем W — число равновероятных микроскопических состояний.

Для выяснения взаимосвязи между информационной энтропией и статистической энтропией следует остановиться на следующем определении. Положим, что x — полный набор координат и импульсов частиц некоторой микроскопической системы:

$$\begin{aligned} p(x) &= \varrho(p, q), \\ q &= (q_1 \dots q_3 N), \quad p = (p_1 \dots p_3 N), \end{aligned}$$

тогда верно, что

$$S = k_B H. \quad (11.17)$$

Иными словами, статистическая энтропия макросостояния соответствует информации, которая необходима для описания этого макросостояния. Информационная энтропия не связана напрямую со статистической энтропией, если фазовые переменные x составляют не полный набор микроскопических переменных. Часто x строится на основе редуцированного описания (параметр порядка), причем «быстрые» микроскопические степени свободы сокращаются. Информационная энтропия распределения вероятностей параметров порядка составляет лишь часть общей статистической энтропии, однако эта часть оказывается решающей для процессов структурообразования, поскольку диссипативные структуры характеризуются коллективными модами. Самоорганизация и структурообразование осуществляются на микроскопическом уровне и определяются микроскопическими степенями свободы. Для количественной формулировки этой идеи представим вероятности Гиббса как произведение вероятностей полагаемых дискретными

параметров порядка и условных вероятностей [29]:

$$\varrho(p, q) = \sum p_i \varrho(p, q|i). \quad (11.18)$$

При этом p_i — это вероятность того, что полагаемый здесь дискретным параметр порядка принимает i -е значение, а

$$\varrho(p, q|i)$$

есть условная вероятность микроскопического распределения при фиксированном значении параметра порядка i . После замены несложный подсчет дает с учетом аддитивности логарифма произведений

$$S = k_B H + S_b,$$

где

$$S_b = \sum p_i S(i),$$

$$S(i) = -k_B \int (dp dq / h^{3N}) \varrho(p, q|i) \ln \varrho(p, q|i). \quad (11.19)$$

Здесь $S(i)$ — это условная статистическая энтропия для данных значений параметра порядка i . Таким образом мы доказали, что содержащаяся в параметрах порядка энтропия является определенной (в общем случае — очень небольшой) частью общей энтропии. Рассмотрим в качестве примера переключатель с двумя положениями (состояниями); в этом случае

$$S = k_B \log 2 + S_b, \quad (11.20)$$

причем S — нормальная термодинамическая энтропия при одном из двух положений переключателя. Для молекулы ДНК длины n с четырьмя состояниями это выражение принимает следующий вид:

$$S = k_B n \log 4 + S_b. \quad (11.21)$$

Здесь первое слагаемое — это энтропия, содержащаяся в закодированной информации, а второе слагаемое — нормальная физическая энтропия молекулы с фиксированной первичной структурой. Оба типа могут преобразовываться друг в друга в том смысле, который рассматривался Сцилардом и Бриллюэном. Информация в макроскопических состояниях упорядоченности может быть преобразована в термодинамическую энтропию и обратно. Второй закон термодинамики остается всегда действительным лишь для

общего баланса и не ограничивает способности к преобразованиям. Производство информации может осуществляться в системах с накачкой (то есть в системах, экспортирующих энтропию). Можно показать, что процессы с хаотической динамикой играют здесь особую роль. Создание информации оказывается особой формой самоорганизации. Разложение энтропии на две составляющие

$$S = Z + Y$$

было произведено Клаузиусом еще в 1864 году в его знаменитой книге «Механическая теория теплоты». Через Y Клаузиус обозначил преобразуемую теплоту, а через Z — дисгрегацию. Точной интерпретации Клаузиусом вышеприведенного разложения в исторических источниках обнаружить не удалось. С точки зрения современной науки, смысл видится в интерпретации, примыкающей к предложенному Гельмгольцем разложению энергии на свободную и связанную:

$$E = F + TS.$$

Потенциал F Гельмгольца, в соответствии с этим, является той частью энергии, которая свободна, то есть может быть употреблена для совершения работы. Естественным представляется поискать аналогичную интерпретацию и для разложения энтропии [32]: часть $k_B H$ выражала бы «свободную энтропию», употребляемую для обработки информации, а часть S_b — связанную энтропию теплового движения. Можно высказать следующее предположение: свободная энтропия при определенных условиях относительной изоляции не может расти спонтанно — аналогично тому, как не может увеличиваться спонтанно свободная энергия в изотермических системах. На данный момент неясно, каким образом эта гипотеза — а она могла бы претендовать в теории обработки информации на роль основного закона — может быть подтверждена или опровергнута путем дальнейших изысканий в этой области.

ГЛАВА 12

Синописис эволюции¹

Если мы, анализируя наше уходящее далеко вглубь истории прошлое, попытаемся понять, кто мы такие, то мы сможем тем самым в определенной мере заглянуть и в наше будущее.

Ричард Э. Лики, Роджер Левин.
Как человек стал человеком

12.1. Quo Vadis Evolutio?²

Уже неоднократно авторам данного сочинения ставили, особенно молодые люди, в упрек, что все разумные пути в будущее уже безвозвратно выстроены неправильно, что движение осуществляется только к уже видимому закату.

На это можно возразить, что эволюция обладает исключительной в своем роде силой изобретения. Эволюция уже миллионы раз попадала в кажущиеся бесперспективными ситуации и все снова и снова находила из них выход. На то, что она и на этот раз найдет выход из затруднительной ситуации, нет гарантии, существует лишь, может быть, оправданное ожидание, что человечество найдет способ вернуться к разумному поведению и не возьмет курс в обратном направлении. Хороший пример способности выживания у способных к эволюции существ — формирование жабр и легких в эволюционной ветви, проходящей через позвоночных животных. Как дошло до того, что живые существа развили у себя такие сложные, собственно говоря, очень неудобные для пользования формообразования? Около 2–3 миллиардов лет назад Земля обходилась восстановительной атмосферой, в которой кислород встречался лишь в форме оксидов. Уже существовавшие в то время микроорганизмы вступали в жестокую борьбу за выживание, ибо пропитание в форме спонтанно возникающих органических веществ было очень скудным. Некоторые особенно «изобретательные» микроорганизмы

¹Пер. с нем. Е. Н. Князевой.

²Куда идешь, эволюция? (лат.) — *Прим. перев.*

нашли выход, «додумавшись» до того, чтобы воспользоваться непосредственно первичным источником ценной энергии, солнечным излучением. Был «изобретен» фотосинтез. Дело дошло до возникновения растений и гетеротрофии. Часть живых существ жила по новой системе, другие придерживались старой, а третий класс жил паразитически. Растительные системы старательно производили посредством фотосинтеза кислород, который все более обогащал атмосферу, пока, наконец, газовая оболочка Земли не приобрела кислородный характер. Кислород же был смертельно ядовит для нерастительных живых существ. Благодаря «эгоистическим» действиям своих растительных современников они попали из благоприятной для них окружающей среды в отравленную и, в конечном счете, смертельную окружающую среду. Из этого тупика существовал только один выход: находящиеся под угрозой живые существа приспособились путем самоорганизации к «загрязнению» окружающей их среды. Особо изобретательная их часть образовала у себя жабры и легкие, которые обеспечивали выживание в новом мире. Люди ведут свое происхождение именно от этих творческих живых существ. Наш пример показывает ключевую роль самоорганизации в процессе эволюции.

Современный вариант вышеупомянутой истории, по-видимому, может быть описан следующим образом: примерно 3–4 миллиарда лет после возникновения жизни на Земле (в XX и XXI веках современного летоисчисления) вследствие гипертрофированного роста числа особей ресурсы ценной энергии и сырья вновь стали очень ограниченными. Тогда некий «особо изобретательный вид Ч.» придумал выход, который состоял в том, чтобы начать расходовать и эксплуатировать накопленные на Земле благодаря фотосинтезу запасы ценной энергии в форме угля и других энергетических ресурсов. В процессе развития вида и его технического окружения произошло взрывное увеличение численности, и вид Ч. за короткий период времени превзошел все до сих пор существовавшие на Земле виды. Безоглядная эксплуатация энергетических ресурсов, которые были заложены другими видами (растениями) на протяжении миллиардов лет, привела, однако, к новому глобальному кризису. Из-за неконтролируемой эксплуатации всех ресурсов, ограничения возможностей существования для других видов и, особенно, загрязнения окружающей среды двуокисью углерода и отходами производства «изобретательный вид Ч.» подверг всех живых существ на Земле опасности уничтожения. Особой проблемой стали «ножницы» между использованием ценной энергии и имеющимся в распоряжении сырьем, которые возникли именно в результате стараний вида Ч. обеспечить собственное существование. Менее чем одна пятая часть представителей этого вида, живущая в странах, которые мы называем «высокоразвитыми»,

пользовалась особой привилегией претендовать на во много раз большее среднего потребление энергии и сырьевых ресурсов. «Привилегированная пятая часть» в итоге отняла у других более чем в пять раз большую среднего долю в пользовании ценной энергией и возмнила, что она теперь вправе вести войну за сохранение и расширение этих привилегий. Стремясь сохранить свои привилегии, *привилегированная пятая часть* вида Ч. систематически создавала ножницы между уровнями развития и между объемами потребления, например, между Севером и Югом, Западом и Востоком. С одной стороны, в долгосрочной перспективе эти ножницы, как оказалось, несли потенциальную опасность для глобальной политико-экономической стабильности. С другой стороны, пределы экологическо-экономической стабильности, очевидно, уже давно были достигнуты. Доказательством этого могла служить повсеместная гибель лесных массивов, усугубленная угрозой гибели морей. Законы роста для таких важнейших параметров, как энергия, численность населения и т. д., из экспоненциальных превратились в гиперболические, как было показано, например, Пешелем, Менде и Альбрехтом [140, 2]. После 2010 года ожидается сингулярность, сопровождающаяся непременным переходом к новому режиму роста с последующим переходом к насыщению.

В такой ситуации находимся сегодня мы с вами. Существование «изобретательного вида Ч.» поставлено под угрозу по его собственной вине. Одновременно под угрозой находится также и существование всех жизненных форм на Земле. Прежде чем обсуждать возможные выходы из этого положения, мы хотели бы начать с как можно более трезвого естественнонаучного анализа ситуации. Рассмотрим сначала физические аспекты. Жесткие барьеры для дальнейшей эволюции обусловлены с физической точки зрения ограниченностью имеющихся в нашем распоряжении потоков ценной энергии или энтропии, возрастающей нагрузкой, которую вынуждена испытывать окружающая среда вследствие выброса в нее отходов производства и потребления, и границами стабильности всей экологическо-экономической системы Земли. Поток ценной солнечной энергии, попадающей в среднем на Землю, составляет примерно 230 Вт/м^2 ; равный по интенсивности энергетический поток, но более низкого качества (более низкая температура излучения), покидает Землю и уходит обратно в космическое пространство. Этот поток дает толчок развитию почти всех событий и обуславливает почти все процессы самоорганизации на нашей планете, от погоды до фотосинтеза; в этой связи нами было впервые пущено в научный оборот понятие фотонной мельницы. Энергетический поток, транспортируемый солнечными фотонами, уравнивается «экспортным» потоком энтропии, мощность которого составляет приблизительно 1 Вт/К на квадратный метр поверх-

ности Земли. Если за длительный срок энтропии производится больше, нежели 1 Вт/К на квадратный метр земной поверхности, то накапливается «энтропийный мусор». Он и определяет окончательные, обусловленные физическими факторами, границы роста. Даже если использовать все «топливо», то в качестве стимула в распоряжение всех протекающих на Земле процессов — а именно, метеорологических, биологических, экологических и экономических — попадет не более 230 Вт ценной солнечной энергии на квадратный метр. На фотосинтез, например, приходится всего лишь одна пятидесятая часть этого потока, т. е. меньше, чем 1/10 Вт/м². Если бы каждому из примерно 5 миллиардов граждан Земли требовался поток ценной энергии мощностью лишь в 1 кВт, то каждый квадратный метр площади земного шара (диаметр которого составляет 12 000 километров) «потребил» бы примерно в 1/10 Вт энергии. Это примерно соответствует тому, что может произвести фотосинтез. Тот, кто ежедневно 2–3 часа ездит на своей машине с мощностью двигателя 100 кВт, вечером смотрит телевизор и включает еще кое-какие электрические приборы, может легко истратить за день до 200–300 кВт, тем самым он достигает объема потребления ценной энергии в среднем в 10 кВт в час, «снимая» со своего личного энергетического счета сумму, превышающую остаток на нем. Он — паразитическое существо на теле эволюции, живущее за счет жизнедеятельности других существ. Гражданин Европы потребляет сегодня в среднем почти 10 кВт в час, а потребление энергии гражданином США еще выше. Здесь ограничения неизбежны, дальнейший неограниченный рост потребления ценной энергии просто невозможен. Как нам представляется, распространенное по всему земному шару энергопотребление, превышающее 10 кВт в час на обитателя Земли, может, судя по всему, привести к всеобщему коллапсу. Допустимый верхний предел должен, по идее, быть ниже 10 кВт, этот предел либо уже достигнут гражданами индустриально развитых стран, *привилегированной пятой частью* населения Земли, либо давно превышен ими.

Особая проблема заключается в анонимности воздействий. Представим себе нормального гражданина, относящегося к *привилегированной пятой части*, скажем, городского служащего, и его нормальный рабочий день. Он практически ежедневно снимает со своего личного энергетического счета сумму, превышающую остаток на нем, но непосредственно видеть следствия этого превышения он не может. Возможно, он отнимает тем самым у какого-то ребенка из третьего мира нечто жизненно для того необходимое, а может быть, в результате его действий пострадает в будущем и его собственный правнук. Однако служащий, несмотря на всю серьезность своей «вины», ничего о ней не знает. Даже движимый добрыми намерениями, он, по причине сложности причинных связей в современном мире, едва ли

сможет окинуть своим взглядом отдаленные последствия своего поведения. Может быть, он неосознанно и опосредованно лишил других людей даже минимальных средств для поддержания жизни. Но ведь последствия его «преступления» лежат в будущем, и его поведение не противоречит ни одному имеющему ныне силу закону. Так он продолжает жить как прежде, и только время от времени, услышав критический комментарий в средствах массовой информации или прочтя книгу вроде нашей, он вдруг ощущает слабые угрызения совести.

Значительную проблему составляет в настоящее время и нагрузка, которую налагает на энергетическое хозяйство и экологическо-экономическое равновесие транспорт. В самом деле, постоянное передвижение людей и отправка товаров на автомобилях и самолетах, непрерывно возрастающие объемы и скорости являются, по сути, необузданным хищническим отношением к добываемым энергоносителям и к качеству воздуха, которым мы дышим. Конечно, увеличившаяся мобильность в известной мере вносит вклад и в повышение качества нашей жизни, например, именно мобильность позволяет нам во время отпуска бросить взгляд на чужие страны и их культуру. Существует, однако, и совершенно бессмысленная мобильность, например, когда стаканчики с йогуртом или бутылки пива перевозятся к потребителям по забитым пробками автобанам на многие сотни километров, хотя совсем рядом с теми самыми потребителями тоже производятся йогурт и пиво. Такая же большая проблема — огромное количество упаковочных материалов, основной источник мусора. Непомерной нагрузкой на энергетическое хозяйство и окружающую среду является также уйма бумаги, которую современное общество исписывает и, по большей части не читая, выбрасывает. Здесь количество мусора умножают, в особенности, ворохи рекламных листов, горы желтой прессы, секс-издания и прочие бесполезные продукты. Набирает обороты и бессмысленное перебрасывание служебными бумагами. Величайшим «грехом» против всего разумного безусловно являются постоянно вспыхивающие воинственные противоборства между народами и террористические акты. Кого заботит расточительное потребление энергии, загрязнение воздуха и отравление земли и воды, когда с помощью бомб и танков преследуются эгоистические цели и срываются баснословные прибыли?

Благонамеренные попытки сократить потребление энергии и уменьшить непомерную нагрузку на окружающую среду посредством призывов к разуму до сих пор не дали результатов. Современным обществом движет, очевидно, собственная вынуждающая динамика, и проматывание всего, что есть, равно как и обострение противоречий, по-видимому, неразрывно с нею связаны. Однако не следует думать, будто мы обречены. Поскольку

до сих пор нам не вполне удавалось «экономить ценную энергию», нам следует, прежде всего, мобилизовать все возможные резервы. Во-первых, можно освоить новые источники энергии — например, ценную энергию можно получать посредством сжигания легких ядер. Последовав этим путем, мы, вероятно, сумеем в новом тысячелетии разгрузить наши напряженные балансы. Гораздо лучшей альтернативой является, конечно, более полное использование солнечной энергии,

99.9999995 %

которой по причине малого телесного угла, образуемого Землей, попадает в отвалы космического мусора. Можно, например, построить в космическом пространстве коллекторы, улавливающие солнечный свет и собирающие его в лазерные пучки, принимаемые на Земле. Использование большего количества энергии означает, разумеется, производство большего количества энтропии. Как нам представляется, это — всего лишь техническая проблема, которую человечество вполне могло бы решить. Кроме того, возможно потребуются создать некий буфер, т. е. принять какие-то временные, промежуточные меры, результатом которых может в итоге стать появление новых решений. Если, например, временное расточительство определенного типа энергетических ресурсов будет единственным способом обеспечить, посредством рыночных механизмов, денежные вливания, способные подвинуть науку и технологию на новые открытия, то при наличествующих стесненных обстоятельствах это представляется вполне оправданным.

Какие же новые пути развития еще открыты перед нами? Одна из возможностей, которая вырисовывается уже сейчас, состоит в том, что в будущем благодаря использованию высоких технологий в коммуникации многие виды работ смогут выполняться на дому. Ежедневные перевозки людей до места работы и обратно, а также к местам проведения конференций по всему миру, можно будет тогда, по-видимому, сильно сократить. Благодаря новым технологиям (в их число входят и технологии генной инженерии) потребление энергии в промышленности для производства товаров и реализации отходов можно будет свести к совершенно ничтожному объему. Новые развернутые в пригородах технологии производства продовольственных товаров и предметов личного потребления смогут, по-видимому, гарантировать сокращение объемов бессмысленной перевозки товаров по перегруженным улицам. Новые методы передачи энергии и тепла могут поспособствовать тому, что расточительное потребление ископаемых горючих веществ в целях отопления будет значительно ограничено.

Все эти цели лежат за высоким потенциальным барьером, для их достижения требуются успешные исследования, отыскание стимулов к развитию и инвестициям, кроме того, намеченные выше возможности развития

наверняка скрывают в себе какие-то риски и опасности. Но ведь в конце концов эволюция всегда шла словно на ощупь в темном лесу. Увертываться от рисков, с которыми сопряжены новые пути решения проблем, означает стагнацию, это — «в ближайшей перспективе оптимальная тактика, в качестве долговременной стратегии смертельная для системы». Мы хотели бы здесь также вынести на размышление тезис о том, что о вещах отнюдь не всегда можно судить с первого взгляда. В этой связи вспомним снова фразу из «Фауста»: «Я есть часть силы той, что без числа творит добро, всему желая зла». До сих пор эволюция всегда находила новые решения, принимая неожиданные повороты, найдет она их и в будущем. Все зависит от того, узнаем ли мы их и сможем ли осуществить.

Еще более драматичным, чем растущее потребление энергии, представляется нам постоянное отравление атмосферы и океана всевозможными отходами, которое уже причиняет ущерб как всей биосфере (пищевым цепочкам, производству сырья), так и непосредственно нам с вами (аллергия, рак и пр.). Единственно возможным решением здесь являются замкнутые производственные циклы, при которых перерабатываются сырье, вода и воздух, но не высвобождается никаких вредных веществ. В голову приходят двигатели, сжигающие водород, города, фильтрующие моющие средства из своих сточных вод, и т. д. С точки зрения сегодняшнего уровня технологий такие решения являются пожирателями энергии. Какая же проблема серьезнее: чрезмерное потребление энергии или избыточная нагрузка на окружающую среду? Вероятно, все же вторая. Во всяком случае, освоив новые способы получения ценной энергии, мы откроем для себя и новые возможные решения проблемы избавления окружающей среды от непомерных нагрузок.

Наиболее неотложной является проблема роста населения на нашей планете. Мы видим, что по этому вопросу нет никакого согласия, что мировые организации и большинство государств способны лишь беспомощно следить за этим процессом, а первые же критические замечания сталкиваются с мощным сопротивлением солидных организаций. Политика противодействия разумным решениям, означает, быть может, миллионные смерти в будущих поколениях.

12.2. Можно ли еще спасти будущее?

«Можно ли еще спасти будущее?» — именно так поставил вопрос известный футуролог Осип Флехтхайм, анализируя возможные, вероятные и желательные варианты развития будущего для человеческого общества и его

природного окружения на нашей планете [65]. Как мы уже видели, вопрос Флехтхайма напрямую связан с основными вопросами самоорганизации и эволюции. Существующие диспропорции являются результатом ничем не сдерживаемой самоорганизации и неуправляемой нестабильности, за которые фактически ответственен человек и созданные им технические и экономические системы. В предыдущем разделе мы уже предложили набросок некоторых идей о том, как можно найти выход из кризисной ситуации. Решающее изменение должно состоять в том, что все изобилие изобретательских возможностей эволюции человека следует направить не на максимизацию комфорта сегодня (что мы наблюдаем в настоящее время), а на поиск способов выхода из кризиса в перспективе. Торной дороги для этого, правда, не существует, как учит нас история эволюции. Обеспечивающие выживание дороги в будущее никогда не программировались заранее, их необходимо отыскать и в современной кризисной ситуации — посредством длительного адаптивного процесса выбора из огромного разнообразия потенциальных возможностей. Впрочем, нет причин впадать в панику — наше положение пока еще не совсем безнадежно.

У нас есть шанс выжить, если мы, опираясь одновременно на теорию самоорганизации, теорию сложных систем и исследования хаоса, сможем указать пути построения для человечества такого будущего, в котором жизнь рассматривается важнейшей ценностью. И ничто не меняется от того, что существующие диспропорции являются результатом ничем не сдерживаемой самоорганизации и неуправляемых нестабильностей. Как нам представляется, нестабильности и частично хаотический характер развития могут играть и позитивную роль. Некоторые соображения на этот счет уже были высказаны ранее.

Наше предложение относительно стратегии «спасения будущего» заключается в следующем: ограниченная самоорганизация и развернутая диверсификация в сочетании с терпимостью — вот заповеди, соблюдение которых необходимо для построения экологически-экономического и социокультурного будущего. Результатом наших размышлений стали пять заповедей, которые в упрощенной форме гласят:

- 1-я заповедь. Каждый обязан придерживаться экологически допустимого среднего уровня потребления ценной энергии и производства энтропии. Превышение экологически допустимого среднего уровня есть «смертный грех». Мерой искупления являются высокие штрафные выплаты. В случае рецидива размер выплат увеличивается.
- 2-я заповедь. Каждый обязан сохранять и защищать окружающую среду. Всякая экологически неприемлемая нагрузка на окружающую среду

есть «смертным грех», угрожающий человеческому существованию. Мерой искупления также являются высокие штрафные выплаты.

- 3-я заповедь. Каждый обязан почитать высочайшим приоритетом обеспечение качества жизни будущих поколений. Рост народонаселения в мире и увеличение производимого им оборота энергии и сырья следует ограничить на добровольной основе, сведя к энергетически и экономически возможному и экологически допустимому.
- 4-я заповедь. Каждый обязан, сознавая ограниченность термодинамического ресурса, содействовать поддержанию разнообразия во всех отношениях, начиная с разнообразия биологических видов и заканчивая разнообразием в этнической, языковой, социальной, духовной и культурной областях. Эгоистическая экспансия и препятствование разнообразию наказываются высокими штрафными выплатами.
- 5-я заповедь. Каждый обязан способствовать креативности, инновациям и поиску новых решений во всех областях. Отсутствие терпимости, ограничивающее креативность других, является «грехом». Общественные правила и экономические механизмы, ограничивающие стремление к инновациям в обществе, подлежат замене на позитивные механизмы.

Эти сформулированные в общих чертах заповеди для дальнейшей жизни носят характер моральных императивов, вследствие чего без дополнительных законов и предписаний они в известной мере остаются ни к чему не обязывающими. Первые три заповеди обусловлены ограниченностью природных ресурсов. Последние две, несмотря на неизбежные ограничения, должны оставлять открытыми множество возможных путей в будущее и соответствующие возможности решения проблем.

Ключевой вопрос состоит в том, чтобы решить, кто будет контролировать следование этим «заповедям» и какие органы будут уполномочены принимать решения о правилах, носящих характер закона. Трудно сказать заранее, но все же приходит мысль о том, что выполнение этих задач возьмут на себя международные организации — такие, как ООН. Это соответствовало бы глобальному характеру многих стоящих перед нами проблем. Особенно таких, как проблема сохранения разнообразия биологических видов, климатическая проблема и проблема справедливого распределения ресурсов нашей планеты — их можно решить только в глобальном масштабе. Рассмотрим в качестве примера распределение ресурсов. Сегодня в высокоразвитых индустриальных государствах живет около 20 % населения

мира. *Привилегированная пятая часть* забирает себе ныне порядка 80 % потоков ценной энергии. Гипотетический внеземной наблюдатель счел бы такое соотношение весьма несправедливым. Он посоветовал бы нам целенаправленно сократить эти экстремальные различия и направить свои усилия на достижение стабильного, справедливого положения дел. Как мы знаем, однако, в настоящее время, вместо того чтобы сглаживаться, градиенты еще более возрастают. Можно, пожалуй, представить себе, что если бы такие градиенты существовали в рамках одной страны, то в долговременной перспективе эту страну обязательно ожидали бы экстремальные напряжения и противостояния. Очевидно, что богатые 20 % мирового населения и в дальнейшем не откажутся добровольно от своих привилегий. И в глобальном масштабе такие большие градиенты ведут к нестабильностям, которые когда-нибудь обернутся для нас новым порядком. Предвестниками этих неизбежных переломов являются усиливающиеся блуждания и те отчасти враждебные реакции в странах с сильным иммиграционным притоком, которые мы сегодня наблюдаем. Лишенное привилегий большинство пытается совершить скачок в привилегированную пятую часть мира в индивидуальном порядке, т. е. посредством эмиграции в одну из привилегированных стран.

Никто не может предсказать заранее, каким образом произойдет переход к справедливому экономическому мировому порядку — революционно или эволюционно. Желательным в любом случае остается мирное решение проблем путем проведения справедливой глобальной экономической политики, которая медленно сгладит опасные градиенты. С точки зрения глобальной синергетики можно оценить положительно все те механизмы, которые затормозят потоки сырья и энергии и повысят стоимость перевозок. На словах все выглядит просто, а на деле в глобальном масштабе это можно осуществить лишь с большим трудом. Еще в 1971 году «Римский клуб», как известно, обнародовал свои прогнозы о «пределах роста» и потребовал повысить цены на энергию и сырье и удешевить человеческую рабочую силу.

К решению многих упомянутых здесь проблем можно приступить сначала в масштабе отдельных стран. Так можно подумать о целесообразности введения специального эконалога, который взимался бы государством за потребление энергии и сырья, а также за транспортные перевозки и загрязнение окружающей среды. Для компенсации этого государство могло бы понизить сборы за предоставление работы рабочим. С точки зрения общей синергетики общественных процессов, такие шаги, если их предпринимать в умеренном темпе и масштабах, наверняка приведут к позитивным последствиям.

Как, в частности, показал Герман Хакен, сложные системы имеют, как правило, небольшое число параметров порядка, на которые и настраиваются управляющие воздействия. При попытке сознательного управления следует использовать как можно более простые механизмы с тем, чтобы избежать развития рискованных нестабильностей. Нельзя не принимать в расчет и то, что нестабильности эти при некоторых обстоятельствах могут иметь драматические последствия, которые лишь ограниченно предсказуемы. Со всяким управляющим воздействием на общественные процессы связаны риски. Чрезмерно сложное управление может привести к катастрофическим последствиям, что нам не так давно продемонстрировало крушение общественных систем в Восточной Европе. Поэтому необходимо срочно убедить людей в опасности попыток управления путем «избыточного вмешательства государства», т. е. с большим количеством уровней управления, сложными сводами правил и избытием бюрократических мероприятий.

Принимая во внимание особенности сложных систем и постоянно угрожающие им нестабильности, можно посоветовать управлять осторожно и осмотрительно. Внешние вмешательства могут приводить к драматическим последствиям, поэтому в любом случае гораздо менее рискованно добиваться правильного поведения путем использования достаточно простых внутренних механизмов. В любом случае при создании новых механизмов регулирования следует ориентироваться на параметры порядка. Как мы уже показали, особое значение имеют центральные параметры порядка в биологических и общественных системах. Подход, при котором на поведение воздействуют через осознание расходов, взимание налогов и понимание моральных ценностей, кажется нам поэтому наиболее перспективным и многообещающим. При этом не должно создаваться впечатление, что решения всех проблем сегодня уже известны. Для того, чтобы найти эти решения, простые и эффективные, необходимы междисциплинарные исследования. Не менее необходимы и эксперименты. Нужно, чтобы у нас хватило смелости экспериментировать с новыми механизмами регулирования, и нельзя скоропалительно отбрасывать даже отрицательные результаты. Никогда не следует забывать о том, речь здесь идет не о частных интересах, а о выживании человека и о сохранении окружающей его среды на Земле.

Подобно тому, как в доисторический период развития человечества и в ранние исторические эпохи были выработаны в ходе творческого эволюционного процесса такие правила поведения, которые сделали возможным его выживание и существование в форме племен, семей, деревень, городов или государств, сегодня от человечества требуются напряженные творческие усилия. Особенно это касается молодого поколения, на которое мы

возлагаем надежды, что оно окажется в состоянии разрушить заскорузлые структуры и развить новые идеи.

Перечислим еще раз наиболее важные выводы. Конструирование такого будущего для наших детей, внуков и правнуков, в котором жизнь будет считаться главной ценностью, требует новых форм самоорганизации совместной жизни людей и их взаимодействия с природой. Рост должен перейти с количественного уровня на качественный, бессмысленная трата ресурсов должна смениться развитием разнообразия и поощрением стремления к инновациям. Самоорганизация общества требует некоторых ограничений через механизмы регулирования параметров порядка. Необходимые и неизбежные нестабильности также требуют приложения известных управленческих усилий. Будущее через ограниченную самоорганизацию и контролируруемую нестабильность означает разнообразие видов и форм движения, стилей жизни и образов мышления на фоне самоограничения термодинамических трат и облегчения нагрузки на природную окружающую среду, означает креативность и толерантность, означает следование новым моральным заповедям и соблюдение государственных или глобальных законов.

Пути в будущее, обеспечивающие выживание, не запрограммированы заранее, они должны быть найдены путем оценки и оптимизации в длительном адаптивном процессе поиска среди огромного разнообразия потенциальных возможностей. Перспективные стратегии для оформления и конструирования «желаемого будущего» требуют:

- ограниченной самоорганизации и контролируемой нестабильности,
- разнообразия видов и форм движения, стилей жизни и образов мышления,
- самоограничения в термодинамических и экологических тратах,
- креативности, способности к инновациям и толерантности,
- принятия во внимание интересов будущих поколений.

В заключение следует подчеркнуть, что большинство из рассмотренных здесь проблем еще очень далеки от окончательного решения. Однако можно надеяться, что широкое общественное согласие, междисциплинарное сотрудничество различных наук и международное сотрудничество различных государств, а также, в особенности, творческий вклад молодых поколений будут способствовать прогрессивным сдвигам в этом направлении. Учитывая особенности сложных систем, мы, разумеется, понимаем,

что непосредственно управлять будущим нашей планеты и планировать это будущее в принципе невозможно. Но и пустить развитие будущих событий на самотек — безответственная позиция по отношению к нашим детям, внукам и правнукам. Нравственный императив обязывает нас использовать имеющиеся в нашем распоряжении знания и активно содействовать формированию будущего нашей планеты, ибо, как сказал однажды швейцарский писатель Фридрих Дюрренматт,

«То, что касается всех, может быть решено только всеми».

Литература

- [1] Albrecht K.-F., Mende W. *Application of the Evolution Model to Evolution and Energy Growth Processes*. Proc. Conf. Dynamical Systems and Environmental Models, Wartburg-Eisenach. Berlin: Akademie-Verlag, 1987, 253–264.
- ⋮
- [2] Albrecht K.-F., Mende W. *Cooperative Growth Processes in Complex Social Systems*. Math. Research 64 (1991) 288–295.
- [3] Allen P., Ebeling W., Peschel M., Savageau M., Schuster P., Svireshev Yu. (Eds.). *Mathematical Ecology and Evolution*. Bd. 1–7. Berlin: Akademie-Verlag, 1987–1991.
- [4] Anishchenko V. S. et al. *Power Law Distributions of Spectral Density and Higher Order Entropy*. Chaos, Solitons & Fractals 4 (1994), 69.
- [5] Antoniou I. E., Prigogine I. *Intrinsic Irreversibility and Integrability of Dynamics*. Physica A 192 (1993), 443.
- [6] Atmanspacher H. *Die Vernunft der Metis. Theorie und Praxis einer integralen Wirklichkeit*. Stuttgart-Weimar: Verlag Metzler, 1993.
- [7] Atmanspacher H., Kuhrts J., Scheingraber H., Wackerbauer R., Witt A. *Complexity and Meaning in Nonlinear Dynamical Systems*. Open Systems & Information Dynamics 1 (1992), 269.
- [8] Arrhenius S. *On the Influence of the Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of Ground*. Phil. Mag. 41 (1896), 237–275.
- [9] Attenborough, D. *Das Leben auf unserer Erde*. Hamburg-Berlin: Parey-Verlag, 1979.

- [10] *Atmosphäre, Klima, Umwelt*. Heidelberg: Spektrum der Wissenschaft, 1990.
- [11] Bak P., Chen, K. *Selbstorganisierte Kritizität*. Spektrum der Wissenschaft, März 1991.
- [12] Biebricher C. K. *Darwinian Selection of RNA-Molecules in vitro*. In *Evolutionary Biology* (eds. M. K. Hecht et al.). New York: Plenum Press, 1983.
- [13] Biebricher C. K., Nicolis G., Schuster P. *Self-Organization in the Physical and Life Sciences*. Report to the Comm. of the European Communities. PSS *0396 (1994).
- [14] Blome H. J., Priester W. *Urknall und Evolution des Kosmos*. *Naturwissenschaften* 71 (1984), 515.
- [15] Böhme H., Hagemann R., Löther R. *Beiträge zur Genetik und Abstammungslehre*. Berlin: Volk und Wissen Verlag, 1976.
- [16] Boldirev, V. (Ed.) *Climate System Monitoring. Dec 1988–May 1991*. WMO, 1992.
- [17] Bothe H. G. et al. *Dynamical Systems and Environmental Models*. Berlin: Akademie-Verlag, 1987.
- [18] Bresch C. *Zwischenstufe Leben. Evolution ohne Ziel*. München–Zürich: Piper-Verlag, 1977.
- [19] Bruckner E. et al. *Stochastic Dynamics of Instabilities in Evolutionary Systems*. *Systems Dynamics Reviews* 5 (1989), 176.
- [20] Bruckner E. et al. *Stochastic Effects of Substitution — An Evolutionary Approach*. *J. Evolutionary Economics*, submitted.
- [21] *Chaos und Fraktale. Spektrum der Wissenschaften*. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag, 1989.
- [22] Capra F. *Wendezeit*. Bern–München: Scherz-Verlag, 1983.

- [23] Cramer F. *Chaos und Ordnung: Die komplexe Struktur des Lebendigen*. Insel Verlag, 1993.
- [24] Davies P. *Prinzip Chaos*. München: C. Bertelsmann-Verlag, 1988.
- [25] Davies P. *Mehrfachwelten*. Düsseldorf-Köln: Diederichs, 1981.
- [26] Dolgov A., Zeldovich Ya. *Cosmology and Elementary Particles*. Rev. Mod. Phys. 53 (1981), 1.
- [27] Dress A., Hendrichs H., Küppers G. *Selbstorganisation*. München-Zürich, 1986.
- [28] Dosi G., Freeman Ch., Nelson R., Silverberg G., Soete L. (Eds.). *Technical Change and Economic Theory*. London: Pinter, 1988.
- [29] Ebeling W. *Strukturbildung bei irreversiblen Prozessen*. Leipzig: Teubner-Verlag, 1976. (На рус. яз.: Эбелинг В. *Образование структур при необратимых процессах*. М., Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2003.)
- [30] Ebeling W. *Chaos, Ordnung und Information*. Leipzig-Frankfurt/M.: Urania-Verlag, Verlag H. Deutsch, 1989.
- [31] Ebeling W. *Random Effects in Innovation Processes*. J. Scientific & Industrial Research 51 (1992), 209.
- [32] Ebeling W. *Entropy and Information in Processes of Self-Organization: Uncertainty and Predictability*. Physica A 194 (1993), 563.
- [33] Ebeling W., Feistel R. *Physik der Selbstorganisation und Evolution*. Berlin: Akademie-Verlag, 1982, 1986.
- [34] Ebeling W., Nicolis G. *Entropy of Symbolic Sequences, the Role of Correlations*. Europhys. Letters 14 (1991), 191.
- [35] Ebeling W., Feistel R. *On the Evolution of Biological Macromolecules*. Studia biophysica 75 (1979), 131.

- [36] Ebeling W., Sonntag I., Schimansky-Geier L. *On the Evolution of Biological Macromolecules II: Catalytic Networks*. *Studia biophysica* 84 (1981), 87.
- [37] Ebeling W., Engel A., Feistel R. *Physik der Evolutionsprozesse*. Berlin: Akademie-Verlag, 1990. (На рус. яз.: Эбелинг В., Энгель А., Файстель Р. *Физика процессов эволюции*. М.: УРСС, 2001.)
- [38] Ebeling W., Engel H., Herzel H. *Selbstorganisation in der Zeit*. Berlin: Akademie-Verlag, 1990.
- [39] Ebeling W., Volkenstein M. W. *Entropy and the evolution of biological information*. *Physica A* 163 (1990), 398.
- [40] Ebeling W., Nicolis G. *Word Frequency and Entropy of Symbolic Sequences: A Dynamical Perspective*. *Chaos, Solitons & Fractals* 2 (1992), 635.
- [41] Ebeling W., Muschik W. (Eds.). *Statistical Physics and Thermodynamics of Nonlinear Nonequilibrium Systems* (WE-Heraeus-Seminar; 101). Singapore: World Scientific, 1993.
- [42] Ebeling W., Pöschel T. *Entropy and Long-Range Correlations in Literary English*. *Europhys. Letters* 26 (1994), 241.
- [43] Ebeling W., Pöschel T., Albrecht K.-F. *Entropy, Transinformation and Word Distribution of Information – Carrying Sequences*. Preprint 230, ITP-HUB 1993; *Int. J. Bifurc. Chaos* (im Druck).
- [44] Ebeling W., Kraeft W. D., Kremp D. *Theory of Bound States and Ionization Equilibrium*. Berlin: Akademie-Verlag, 1976. (На рус. яз.: Эбелинг В., Крефт В., Кремп Д. *Теория связанных состояний и ионизационного равновесия в плазме и твердом теле*. М.: Мир, 1979.)
- [45] Ebeling W., Jimenez-Montano M. A., Bruckner E., Scharnhorst A. *A Stochastic Model of Technological Evolution*. In *Economic Evolution and Demographic Change* (Eds.: Haag G., Mueller O.). Berlin u. a.: Springer-Verlag, 1993, 75–95.

- [46] Eccles J. C. *Das Gehirn des Menschen*. München–Zürich: Piper-Verlag, 1976.
- [47] Eigen M. *The Self-organization of Matter and the Evolution of Biological Macromolecules*. *Naturwissenschaften* 58 (1971), 465. (На рус. яз.: Эйген М. *Самоорганизация материи и эволюция биологических макромолекул*. УФН, 109 (1973), 545.)
- [48] Eigen M. *Wie entsteht Information?* *Ber. Bunsenges. Phys. Chem.* 80 (1976), 1059.
- [49] Eigen M. *Darwin und die Molekularbiologie*. *Angew. Chemie* 93 (1981), 221.
- [50] Eigen M. *Stufen zum Leben: Die frühe Evolution im Visier der Molekularbiologie*. München–Zürich: Piper-Verlag, 1987.
- [51] Eigen M., Schuster P. *The Hypercycle*. *Naturwissenschaften* 64 (1977), 541; 65 (1978), 341.
- [52] Eigen M., Schuster P. *The Hypercycle: A Principle of Natural Self-Organization*. Berlin u. a.: Springer-Verlag, 1979.
- [53] Eigen M., Winkler R. *Das Spiel: Naturgesetze steuern den Zufall*. München–Zürich: Piper-Verlag, 1985.
- [54] Eigen M., Winkler-Oswatitsch R. *Transfer-RNA: The Early Adaptor*. *Naturwissenschaften* 68 (1981), 217; *Transfer-RNA, An Early Gene?* *Naturwissenschaften* 68 (1981), 282.
- [55] Eilenberger G. *Komplexität: Ein neues Paradigma der Naturwissenschaften*. In *Mannheimer Forum 89/90: Ein Panorama der Naturwissenschaften*. München, 1990.
- [56] Einstein A. *Grundzüge der Relativitätstheorie*. Berlin–Oxford–Braunschweig: Akademie-Verlag, Pergamon Press, Vieweg & Sohn, 1969.
- [57] Erben H. K. *Evolution*. Stuttgart: Enke-Verlag, 1990.

- [58] Erpenbeck J. *Wollen und Werden*. Konstanz: Universitätsverlag, 1993.
- [59] Faber M., Niemes H., Stephan G. *Entropy, Environment and Resources*. Berlin: Springer Verlag, 1987.
- [60] Feistel R. *On the Evolution of Biological Macromolecules*. *Studia biophysica* 93 (1983), 113, 121; 95 (1983), 107, 133.
- [61] Feistel R. *On the Value Concept in Economy*. In *Proc. Conf. MOSES* (Gosen, Nov. 1990). Berlin: Akademie-Verlag, 1991.
- [62] Feistel R. *Ritualisation und die Selbstorganisation der Information*. In *Selbstorganisation: Jahrbuch für Komplexität* (Hrsg.: U. Niedersen). Berlin: Duncker & Humblot, 1990.
- [63] Feistel R., Ebeling W. *Evolution of Complex Systems*. Dordrecht-Boston-London: Kluwer, 1989.
- [64] Feistel R. *Abstammungsgeschichte des Menschen*. Jena: Gustav Fischer Verlag, 1978.
- [65] Flechtheim O. *Ist die Zukunft noch zu retten?* Hamburg: Rowohlt-Verlag, 1990.
- [66] Fox S. W., Dose K. *Molecular Evolution and the Origin of Life*. San Francisco: Freeman & Co., 1972.
- [67] *Gehirn und Geist*. Spezial 1. Heidelberg: Spektrum der Wissenschaft, 1993.
- [68] Georgescu-Roegen N. *The Entropy Law and the Economic Process*. Cambridge: Harvard University Press, 1971.
- [69] Gierer A. *Die Physik, das Leben und die Seele*. München-Zürich: Piper-Verlag, 1986.
- [70] Glansdorff P., Prigogine I. *Thermodynamic Theory of Structure, Stability and Fluctuations*. London-New York-Sydney-Toronto: Wiley-

Interscience, 1971. (На рус. яз.: Гленсдорф П., Пригожин И. *Термодинамическая теория структуры, устойчивости и флуктуаций*. М.: Мир, 1973.)

- [71] Glaser R. *Biophysik*. Jena: G. Fischer Verlag, 1986.
- [72] Gould S. J. *Das Buch des Lebens*. Köln (vgs), 1993.
- [73] Grassberger P. *Finite Sample Corrections to Entropy*. Physics Letters A 128 (1990), 369.
- [74] Gribbin J. *Auf der Suche nach Schrödingers Katze*. München–Zürich: Piper-Verlag, 1984.
- [75] Haefner K. (Ed.) *Evolution of Information Processing Systems*. Berlin u. a.: Springer-Verlag, 1991.
- [76] Haken H. *Synergetics*. Berlin–Heidelberg–New York: Springer-Verlag, 1978. (На рус. яз.: Хакен Г. *Синергетика*. М.: Мир, 1980.)
- [77] Haken H. *Erfolgsgeheimnisse der Natur*. Stuttgart: Dt. Verlagsanstalt, 1981. (На рус. яз.: Хакен Г. *Тайны природы. Синергетика: учение о взаимодействии*. М., Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2003.)
- [78] Haken H. *Information and Selforganization*. Berlin–Heidelberg–New York: Springer, 1988.
- [79] Haken H., Haken-Krell M. *Entstehung von biologischer Information und Ordnung*. Darmstadt: Wiss. Buchgesellschaft, 1989.
- [80] Haken H., Haken-Krell M. *Erfolgsgeheimnisse der Wahrnehmung*. Stuttgart: Dt. Verlagsanstalt, 1992. (На рус. яз.: Хакен Г., Хакен-Крелль М. *Тайны восприятия*. М.: Институт компьютерных исследований, 2002.)
- [81] Hassenstein B. *Biologische Kybernetik*. Heidelberg: Quelle & Meyer, 1967.

- [82] Hawking S. W. *Eine kurze Geschichte der Zeit*. Hamburg: Rowohlt-Verlag, 1988. (На рус. яз.: Хокинг С. *Краткая история времени*. СПб.: Амфора, 2000.)
- [83] Herzel H., Schmitt A. O., Ebeling W. *Finite Sample Effects in Sequence Analysis*. *Chaos, Solitons & Fractals* 4 (1994), 97.
- [84] Hilberg W. *Grenzwert der redundanzfreien Information in Texten*. *Frequenz* 44 (1990), 243.
- [85] Hey T., Walters P. *Quantenuniversum*. Heidelberg: Spektrum der Wissenschaften, 1990.
- [86] Hinde R. A. *Animal Behaviour*. New York: McGraw-Hill Book, 1970.
- [87] Hofbauer J., Sigmund K. *Evolutionstheorie und dynamische Systeme*. Hamburg: Parey-Verlag, 1984.
- [88] Holland H. D. *The Chemical Evolution of the Atmosphere and the Oceans*. Princeton: Princeton University Press, 1984.
- [89] Houghton J. T., Jenkins G. J., Ephraums J. J. (Eds). *Climate Change. The IPCC Scientific Assessment*. Intergovernmental Panel on Climate Change, 1990.
- [90] Hupfer P. *Das Klimasystem der Erde*. Berlin: Akademie-Verlag, 1991.
- [91] Jantsch E. *Die Selbstorganisation des Universums*. München-Wien: Hanser-Verlag, 1992.
- [92] Jaglom A. M., Jaglom I. M. *Wahrscheinlichkeit und Information*. Berlin: Dt. Verlag der Wissenschaften, 1984.
- [93] Jänicke M., Mönch H., Binder M. u.a. *Umweltentlastung durch industriellen Strukturwandel*. Berlin: Bohn Verlag, 1992.
- [94] Jaynes E. T. *Where do we Stand?* In *The Maximum Entropy Formalism*. Cambridge: Cambridge University Press, 1979.

- [95] Kämmerer W. *Einführung in mathematische Methoden der Kybernetik*. Berlin: Akademie-Verlag, 1974.
- [96] Kämpfer B., Lukáčz B., Paal G. *Cosmic Phase Transitions*. Stuttgart–Leipzig: Teubner-Verlag, 1994.
- [97] Kahlke H. D. *Das Eiszeitalter*. Leipzig–Jena–Berlin: Urania-Verlag, 1981.
- [98] Kaplan R. W. *Der Ursprung des Lebens*. Stuttgart: Georg Thieme Verlag, 1978.
- [99] Karmeshu K. (Ed.). *Mathematical Modelling of Science and Technology Studies*. J. Scientific & Industrial Res. (Special Issue) 51 (3) (1992).
- [100] Kauffman S. A. *Dynamics of Evolution*. Physica 42D (1990), 135.
- [101] Kauffman S. A. *Antichaos and Adaptation*. Scientific American, August 1991.
- [102] Kauffman S. A. *The Origins of Order*. New York: Oxford University Press, 1993.
- [103] Khinchin A. *Mathematical Foundation of Information Theory*. New York: Dover, 1957.
- [104] Klix F. *Erwachendes Denken*. Berlin: Dt. Verlag der Wissenschaften, 1980.
- [105] Klix F. *Die Natur des Verstandes*. Göttingen: Hogrefe-Verlag, 1992.
- [106] Klimontovich Yu. L. *Statistical Theory of Open Systems*. Dordrecht: Kluwer, 1995. (На рус. яз.: Климонтович Ю. Л. *Статистическая теория открытых систем*, т. I, II. М: Янус, 1995, т. III. М: Янус, 2001.)
- [107] Klimontovich Yu. L. *Turbulent Motion. The Structure of Chaos*. Dordrecht: Kluwer, 1991. (На рус. яз.: Климонтович Ю. Л. *Турбулентное движение и структура хаоса*. М: Наука, 1990.)
- [108] Kolb E. W., Turner M. S. *The Early Universe*. Redwood: Addison-Wesley, 1990.

- [109] Körner U. *Probleme der Biogenese*. Jena: G. Fischer-Verlag, 1979.
- [110] Ksanfomaliti K. *Planeten*. Leipzig–Jena–Berlin: Urania-Verlag, 1985.
- [111] Küppers B. O. *Molecular Theory of Evolution*. Berlin u. a.: Springer-Verlag, 1983.
- [112] Küppers B. O. *Der Ursprung biologischer Information*. München–Zürich: Piper-Verlag, 1986.
- [113] Küppers B. O. *Ordnung aus dem Chaos: Prinzipien der Selbstorganisation und Evolution des Lebens*. München–Zürich: Piper-Verlag, 1987.
- [114] Kuhn H. *Evolution biologischer Information*. Berichte der Bunsenges. 80 (1976), 1209.
- [115] Kuhn H. *Model Considerations for the Origin of Life*. Naturwissenschaften 63 (1976), 68.
- [116] Lamb H. H. *Climate History and the Modern World*. London–New York: Methuen, 1982.
- [117] Landsberg P. T. *The Enigma of Time*. Bristol–Boston: Adam Hilger Ltd., 1982.
- [118] Lanius K. *Natur im Wandel*. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag, 1994.
- [119] Leakey R. E., Lewin R. *Wie der Mensch zum Menschen wurde*. Hamburg: Hoffmann und Kampe, 1978.
- [120] Lewi W. L. *Die Jagd nach dem Gedanken*. Leipzig: Urania-Verlag, 1975.
- [121] Lewin R. *Evolution des Menschen*. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag, 1991.
- [122] Linde A. D. *Elementarteilchen und inflationärer Kosmos: Zur gegenwärtigen Theorienbildung*. Heidelberg–Berlin–Oxford: Spectrum Akademischer Verlag, 1993.

- [123] Lorenz K. *Das sogenannte Böse*. Wien: Dorothea-Schoeler, 1963.
- [124] Mahnke R., Schmelzer J., Röpke G. *Nichtlineare Phänomene und Selbstorganisation*. Stuttgart: Teubner-Verlag, 1992.
- [125] Malchow H., Schimansky-Geier L. *Noise and Diffusion in Bistable Systems*. Leipzig: Teubner-Verlag, 1986.
- [126] Mandelbrot B. B. *Die fraktale Geometrie der Natur*. Basel: Birkhäuser-Verlag, 1987. (На рус. яз.: Мандельброт Б. *Фрактальная геометрия природы*. М.: Институт компьютерных исследований, 2002.)
- [127] Meier K., Strech K.-H. *Tohuwabohu: Chaos und Schöpfung*. Berlin: Aufbau-Verlag, 1991.
- [128] Miller S. L., Orgel S. E. *The Origins of Life on Earth*. Englewood Cliffs, N. J.: Prentice Hall, 1973.
- [129] Muschik W. *Aspects of Nonequilibrium Thermodynamics*. Singapore: World Scientific, 1990.
- [130] Neugebauer G. *Relativistische Thermodynamik*. Berlin: Akademie-Verlag, 1980.
- [131] Nicolis J. S. *Chaos and Information Processing*. Singapore: World Scientific, 1991.
- [132] Nicolis G., Prigogine I. *Die Erforschung des Komplexen*. München-Zürich: Piper-Verlag, 1987.
- [133] Nowikow I. D. *Evolution des Universums*. Leipzig: Teubner-Verlag, 1992. (На рус. яз.: Новиков И. Д. *Эволюция Вселенной*. М.: Наука, 1990.)
- [134] Oparin A. I. *Das Leben*. Jena: G. Fischer-Verlag, 1963. (На рус. яз.: Опарин А. И. *Жизнь, её природа, происхождение и развитие*. М.: Наука, 1968.)
- [135] *Ozeane und Kontinente*. Heidelberg: Spektrum der Wissenschaft, 1984.

- [136] Parthey H. *Das NEUE: Seine Entstehung und Aufnahme in Natur und Gesellschaft*. Berlin: Akademie-Verlag, 1989.
- [137] Peebles, P. J. E. *The Large-Scale Structure of the Universe*. Princeton, NJ: Princeton University Press, 1980. (На рус. яз.: Пиблс Ф. Дж. Э. *Структура вселенной в больших масштабах*. М.: Мир, 1983.)
- [138] Peitgen H.-O., Richter P.H. *The Beauty of Fractals: Images of Complex Dynamical Systems*. Berlin–Heidelberg: Springer-Verlag, 1986. (На рус. яз.: Пайтген Х.-О., Рихтер П. Х. *Красота фракталов. Образы комплексных динамических систем*. М.: Мир, 1993.)
- [139] Penrose G. *Computerdenken*. Heidelberg: Spektrum der Wissenschaft, 1991.
- [140] Peschel M., Mende W. *Leben wir in einer Volterra-Welt?* Berlin: Akademie-Verlag, 1983.
- [141] Peterson I. *Mathematische Experimente*. Heidelberg: Spektrum Akademische Verlagsgesellschaft, 1992.
- [142] Petrosky T., Prigogine I. *Poincaré Resonances and the Limits of Trajectory Dynamics*. Proc. Natl. Acad. Sci. USA 90 (1993), 9393.
- [143] Planck M. *Wege zur physikalischen Erkenntnis*. Leipzig: Hirzel-Verlag, 1934.
- [144] Ponnampereuma C. *Organic compounds in the Murchison meteorite*. Ann. NY Acad. Sci. 194 (1972), 56–70.
- [145] Prigogine I. *Structure, Dissipation and Life*. In *Theoretical Physics and Biology* (Ed. M. Marois). Amsterdam: North Holland, 1969.
- [146] Prigogine I. *Vom Sein zum Werden: Zeit und Komplexität in den Naturwissenschaften*. München–Zürich: Piper-Verlag, 1979.
- [147] Prigogine I., Stengers I. *Dialog mit der Natur*. Heidelberg–München: Piper-Verlag, 1981. (На рус. яз.: Пригожин И., Стенгерс И. *Порядок из хаоса: новый диалог с природой*. М.: Прогресс, 1986.)

- [148] Prigogine I., Stengers I. *Das Paradox der Zeit: Zeit, Chaos und Quanten*. Heidelberg–München: Piper-Verlag, 1993.
- [149] Rechenberg I. *Evolutionstrategie 94*. Stuttgart–Bad Cannstadt: Fromman-Holzboog Verlag, 1994.
- [150] Rein D. *Die wunderbare Händigkeit der Moleküle*. Basel–Boston–Berlin: Birkhäuser-Verlag, 1993.
- [151] Reinbothe H., Krauß G.J. *Entstehung und molekulare Evolution des Lebens*. Jena: G. Fischer-Verlag, 1982.
- [152] Röpke G. *Statistische Mechanik für das Nichtgleichgewicht*. Berlin: Dt. Verlag der Wissenschaften, 1987.
- [153] Riedl R. *Evolution und Erkenntnis*. München–Zürich: Piper-Verlag, 1982.
- [154] Ruelle D. *Zufall und Chaos*. Berlin u. a.: Springer Verlag, 1993. (На рус. яз.: Рюэль Д. *Случайность и хаос*. Ижевск: РХД, 2001.)
- [155] Rutten M. G. *The Origin of Life by Natural Causes*. Amsterdam–London–New York: Elsevier, 1971. (На рус. яз.: Рутген М. *Происхождение жизни (естественным путем)*. М.: Мир, 1973.)
- [156] Sagan C. *Die Drachen von Eden*. München–Zürich: Droemer Knaur, 1978.
- [157] Sagan C., Agel J. *Nachbarn im Kosmos*. München: Kindler Verlag, 1975.
- [158] Schrödinger E. *What is Life?* Cambridge, 1944. (На рус. яз.: Шредингер Э. *Что такое жизнь? Физический аспект живой клетки*. М., Ижевск: РХД, 2002.)
- [159] Schroeder M. *Fractals, Chaos, Power Laws*. New York: Freeman & Co., 1991. (На рус. яз.: Шредер М. *Фракталы, хаос, степенные законы*. М., Ижевск: РХД, 2001.)
- [160] Schuster H. G. *Deterministisches Chaos*. Weinheim: Verlag Chemie, 1984.

- [161] Schwefel H. P. *Numerische Optimierung von Computermodellen mittels der Evolutionsstrategie*. Basel–Stuttgart: Birkhäuser-Verlag, 1977.
- [162] Segal J., Körner U., Leiterer K. P. *Die Entstehung des Lebens – ein biophysikalisches Problem*. Jena: G. Fischer-Verlag, 1982.
- [163] Shannon C. E. *A Mathematical Theory of Communication*. Bell System Tech. J. 27 (1948), 370, 623.
- [164] Silk J. *The Big Bang*. New York: Freeman & Co., 1989.
- [165] Silk J. *A Glimpse of Heavenly Features*. Nature 367 (1994), 316.
- [166] Sinz R. *Lernen und Gedächtnis*. Berlin: Verlag Volk und Gesundheit, 1980.
- [167] Smith J. M. *The Evolution of Sex*. Cambridge: Cambridge University Press, 1978.
- [168] Szilard L. *Über die Entropieverminderung in einem thermodynamischen System bei Eingriffen intelligenter Wesen*. Z. Physik 53 (1929), 840.
- [169] Tembrock G. *Grundlagen des Tierverhaltens*. Berlin: Akademie-Verlag, 1977.
- [170] Trenberth K. E. *Climate System Modeling*. Cambridge: Cambridge University Press, 1993.
- [171] Turner M. S. *Why is the Temperature of the Universe 2.726 Kelvin?* Science 262 (1994), 861.
- [172] Unsöld A. *Kosmische Evolution*. Naturwiss. Rundschau 28 (1975), 3.
- [173] Volkenshtein M. V. *Biophysics*. Moscow: Mir Publishers, 1983. (На рус. яз.: Волькенштейн М. В. *Биофизика*. М.: Наука, 1988.)
- [174] Völz H. *Information I, II*. Berlin: Akademie-Verlag, 1982, 1983.
- [175] Weidlich W., Haag G. *Concepts and Models of a Quantitative Sociology*. Berlin–Heidelberg–New York: Springer Verlag, 1983.

- [176] Weinberg S. *Die ersten drei Minuten*. München–Zürich: Piper-Verlag, 1977. (На рус. яз.: Вайнберг С. *Первые три минуты*. М.–Ижевск: РХД, 2000.)
- [177] Weizsäcker E. U. von. *Erdpolitik. Ökologische Realpolitik an der Schwelle zum Jahrhundert der Umwelt*. Darmstadt, 1990.
- [178] Wilson E. O. *Biologische Vielfalt*. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag, 1993.
- [179] Wolfe W. L. *The Infrared Handbook*. Arlington: Office of Naval Research, 1985.
- [180] Wolkenstein M. W. *Entropie und Information*. Berlin–Frankfurt/M.: Akademie-Verlag, Verlag H. Deutsch, 1990. (На рус. яз.: Волькенштейн М. В. *Энтропия и информация*. М.: Наука, 1986.)
- [181] Zuckerkandl E. *The appearance of new structures and functions in proteins during evolution*. J. Mol. Evol. 7 (1975), 1.
- [182] Zuckerkandl E. *Evolutionary Processes and Evolutionary Noise at the Molecular Level*. J. Mol. Biol. 7 (1976), 269.
- * * *
- [183] Бudyко М. И. *Эволюция биосферы*. Л.: Гидрометеиздат, 1984.
- [184] Волькенштейн М. В. *Общая биофизика*. М.: Наука, 1978.
- [185] Камшилов М. М. *Эволюция биосферы*. М.: Наука, 1974.
- [186] Климонтович Ю. Л. *Введение в физику открытых систем*. М.: Янус-К, 2002.
- [187] Островский Ю. М. *Биохимия о происхождении жизни*. Минск: Наука и техника, 1979.
- [188] Романовский Ю. М., Степанова Н. В., Чернавский Д. С. *Математическое моделирование в биофизике*. М.: Наука, 1975.

- [189] Романовский Ю. М., Степанова Н. В., Чернавский Д. С. *Математическая биофизика*. М.: Наука, 1984; Ижевск: РХД, 2005.
- [190] Стратонович Р. Л. *Теория информации*. М.: Сов. Радио, 1975.
- [191] *Термодинамика и регуляция биологических процессов* (под ред. А. И. Зотина). М.: Наука, 1984.
- [192] Файстель Р., Романовский Ю. М., Васильев В. А. *Эволюция гиперциклов Эйдена, протекающих в коацерватах*. *Биофизика* 25 (1980), 882.
- [193] Шноль С. Э. *Физико-химические факторы биологической эволюции*. М.: Наука, 1979.

Предметный указатель

- Абиссаль 128–137
Абсорбция 119–123, 141, 203, 206, 209
Автомат 150
Ад 156, 235
Аксиома 16, 85, 289
Алфавит 114, 271, 277–279
Альбедо 119
Антиматерия 98
Аррениус С. 140
Атмосфера 112, 119–133, 137–141, 155, 160, 164, 300, 304
Аттрактор 64, 72–75, 82, 132, 137–140, 215, 245

Бак П. 65, 283
Баланс 17, 57, 141, 212, 303
Белок (протеин) 76, 158, 162, 166, 176–192, 278, 284
Биомасса 171
Бифуркация 62–65, 153, 219–222, 268, 283
Бозон 96
Больцман Л. 35–38, 60, 70, 80, 140, 145, 148, 258–260, 262, 266, 270, 282, 289, 295
Борн М. 38
Будущее 18, 29, 33, 64, 75, 137, 217, 299

Вегенер А. 23
Вентиль 120, 126, 130, 140
Вероятность 60, 78, 96, 146, 165–174, 179, 201, 209, 259–278, 287, 289, 293–296
Ветер 20, 120, 128, 130–133, 141, 156
Вещества питательные 156, 212, 219
Взрыв Большой 26, 40, 70, 87, 92, 102
Vis vitalis («жизненная сила») 145
Вкус 151, 205, 209, 222
Власть 241, 251, 254
Водород 88, 103–113, 140, 155, 304
Водоросли синезеленые 160–164
Война 26, 241, 303
Волны 19–21, 119, 122, 130, 156, 203, 245
Вольтерра В. 49, 65, 293
Восприятие 10, 226, 231
Время 10, 18, 21, 24, 31, 35, 40, 57, 94, 270
Время настоящее 18, 137, 156
Вселенная 33, 87, 94, 166, 284

Газ углекислый, CO₂ 34, 123, 138–143, 155, 300
Галактика 26, 46, 87–91, 105, 108, 284
Галилей Г. 26, 40

- Гамильтон У.Р. 35, 268
Геккель Э. 85, 151, 160, 210, 214
Гелий 29, 87–91, 102–106, 112
Гельмгольц Г. 33, 37, 81, 145, 289, 297
Ген 217, 233, 244
Генотип 42, 180, 201, 291
Гиббс Дж. У. 35, 60, 98, 259, 295
Гидродинамика 21, 217, 287
Гиперцикл 113, 165, 170, 174, 179
Гипотеза неоднозначного соответствия 194
Глансдорф П. 50, 259
Государство 81, 203, 241, 249, 252, 308
Гравитация 14, 100, 105, 108–109, 112, 284
Грамматика 186, 192, 198
Граф 153, 174, 226

ДНК, дезоксирибонуклеиновая кислота 72, 78, 116, 158, 162, 172, 176–178, 180–193, 198, 205, 214, 219, 271, 273, 278, 291, 297
Дарвин Ч. 23, 50, 56, 84, 145, 150, 155, 239, 257, 288
Делимость 16
Деньги 71, 252–255, 303
Деструктуризация 46
Дивергенция 46, 56, 268
Диверсификация 151, 200, 222, 229, 247, 305, 311
Диссипация 119, 208
Дифференциация 177, 183, 198, 201, 209, 214, 222, 226–229, 245
Диффузия 148, 160, 168, 214–217, 222, 229, 287
Договоренность 11, 72, 151, 200, 222, 228, 245–251
Дрейф 151, 222, 229, 247–251

Закон 14, 21, 30–34, 55–57, 71–75, 81, 92, 100, 108, 129, 145, 245, 255
Закон движения 16, 49, 217, 291
Закон стоимости 252, 255
Законы термодинамики 19, 33–37, 40, 49–52, 62, 71, 81, 96, 145, 267, 270, 297
Звезда нейтронная 106, 112
Звук 20, 72, 78, 226, 249
Значение собственное 176

Избыточность 151, 189–192, 200, 215, 247
Излучение 12, 26, 50, 87, 102, 108–112, 119–128, 132, 137, 165, 172, 206, 284, 301
Излучение реликтовое 98, 103
Излучение солнечное 111, 119, 123, 128, 138, 145, 299
Излучение фоновое 40, 78, 87–92, 103–109, 284
Имитация 233, 247
Индивидуум 20, 24, 42, 68, 80, 148–153, 168, 208, 210, 214, 229–235, 289
Инженерия генная 285, 304
Инновация 29, 58, 151, 238, 251
Интеграл 80, 82, 217
Интерес 82, 254
Историчность 24, 31, 55, 281, 284

- История 24, 50, 56, 70, 208, 258, 284
 Источники 35, 145, 151, 156–162, 222, 226, 272, 279
- Каннибализм 151
 Кант И. 23, 48, 50, 108
 Карно Н. Л. С. 33, 109
 Каскад 158, 172, 176
 Кастельянос М. Э. 10
 Катализатор 148, 171–176, 183–186, 189, 192, 205
 Категориальность 16 :
 Кванты 19, 21, 35, 81, 100
 Кварк 94–98
 Кеплер И. 40
 Кинетический момент 105–108
 Кирхгоф Г. Р. 81, 88
 Кислород 29, 87, 140, 155, 160, 164, 299
 Кислота цианистоводородная (си-
 нильная) 156
 Клаузиус Р. 14, 19, 33–37, 81, 87, 109, 258, 261, 289, 297
 Коацерват 113, 158, 164–190, 198–205, 257
 Кодирование 71, 150, 158, 190, 195, 198, 203, 211, 247, 271
 Кодон 150, 192–195, 200
 Колесо водяное 119
 Колмогоров А. Н. 38, 268
 Колония 151, 211, 214, 222
 Коммуникация 150–155, 201, 209, 247, 251, 303
 Компромисс 67, 150, 241, 255
- Компьютер 38, 68, 72, 75–78, 119, 151, 155, 162, 206, 222, 226, 231, 270
 Конвекция 42, 52, 108, 129, 133
 Конкуренция 84, 160, 201, 233, 241, 288, 292
 Конрад М. 85, 155
 Кооперация 49, 179, 247
 Красота 68, 151, 209
 Креативность 40, 284, 306, 311
 Крик Ф. 194
 Культура 24, 29, 244, 303
- Лагранж Ж. Л. 21
 Лайель Ч. 23
 Ламарк Ж. Б. 23
 Ландсберг П. 24
 Лаплас П. С. 31, 108
 Лем С. 285
 «Ловушка для холода» 140
 Лоренц К. 254
 Лотка А. 49, 65, 293
 Лошмидт Й. 35–38
 Ляпунов А. М. 38, 266, 268
- Майер Ю. 37, 145
 Максвелл Дж. К. 20, 35, 80, 140
 Маркс К. 84, 239
 Машина паровая 120, 126, 137
 Медиатор 153, 226, 229
 Мельница фотонная 108–111, 119, 284, 301
 Метагалактика 40, 41, 68, 87–96, 98–102, 108, 270
 Метан 112, 155
 Метрика 249

- Механика 20–24, 30–40, 57, 81, 258–260, 268, 287, 295
- Микропроцессор 214
- Микрореактор 114, 168, 176, 179
- Множества Жюлиа 64, 68, 82
- Мозг 10, 14, 78, 224, 234, 249
- Море 20, 124, 129–135, 138, 141, 156, 160, 249
- Морфоген 151–155, 215–224
- Морфогенез 82, 151, 214, 217, 222, 226, 229
- мРНК 162, 190, 200, 215, 228
- Мультистабильность 228
- Мутация 29, 114, 158, 176, 178, 186, 190, 229, 233, 284, 288
- Мышление 10, 21, 50, 235, 243, 247
- Мюллер И. 145
- Накопление 247, 252
- Нарушение симметрии 42, 55, 62, 67, 94–101, 150, 153, 211–214
- Научение, обучение 155, 226–229, 233–235
- Небо 23, 38, 118, 122, 235
- Независимость 16, 71
- Нейрон 153, 210, 226–235
- Нейтрино 92, 94, 98–101, 284
- Нейтрон 98, 100–102, 106
- Необратимость 34, 37–40, 48, 57–62, 78, 82, 267–270
- Необходимость 10, 285
- Неприводимость 82
- Непротиворечивость 16
- Неупорядоченность 35, 48–52, 71, 261
- Неустойчивость 37–40, 50, 60, 65, 80, 170, 212, 241, 251, 262, 268, 283, 305, 308
- Николис Г. 24, 69, 271, 273, 285
- Новое 29, 60, 68, 287, 293
- Нуклон 91, 98–103
- Ньютон И. 20–23, 33, 37–40, 68, 82, 105, 268
- Обеспечение аппаратное 155, 229
- Обеспечение программное 229
- Облака 119–129, 132, 137, 140, 156
- Обмен 11–17, 114, 132–135, 150, 160, 190, 212, 243, 251–255
- Обратимость 33–40, 78, 259, 261, 267–270
- Объективность 16
- Океан 78, 118, 122, 126–141, 148, 155–156, 160, 304
- Окружение 11–16, 40, 71, 114, 151, 203, 212, 215, 224, 259–265
- Онтогенез 42, 210, 220, 233
- Опарин А. И. 112, 114, 145, 164, 168
- Оптимизация 69, 81–87, 235, 305, 311
- Опыт 16, 20, 24, 30, 41, 46, 76, 87, 91, 151, 203, 209, 229, 234
- Организм 68, 75, 82, 122, 141, 153, 155, 160, 190, 201, 205, 209, 210, 214–228, 234, 243
- Оствальд В. Ф. 81, 145, 282, 289
- Отбор 151
- Отношение 40, 71, 81, 85, 289
- Отображение Бернулли 72–75, 78, 82
- Отправитель 11, 70, 150

- Оценка 69, 81, 84–87, 151, 155, 205, 233, 235, 282, 288, 291, 311
- Пар водяной 112, 123–126, 137–141, 155
- Параметр порядка 55, 58–62, 245
- Параметр состояния 14–17, 252, 255, 258
- Параметр управляющий 42, 62–64
- Передача от поколения к поколению 233, 247
- Переход фазовый 42, 55, 64, 71, 150, 183, 238, 245, 251, 283
- Период кембрийский 155, 164, 211
- Плазма 98, 101–103, 106, 158, 284
- Планк М. 10, 35, 81, 93, 258–260, 289, 295
- Поверхность раздела сред 123, 130, 150
- Погода 26, 40, 78, 128–132, 135–138
- Позитрон 98, 101
- Показатель Ляпунова 38, 268
- Поле 31, 50
- Полнота 16
- Полугруппа 34, 40, 78
- Полупорядочение 194
- Получатель 11, 70–72, 150
- Порядок 42, 46, 50, 55, 58, 151, 212, 226, 258, 262, 271–274, 278, 297, 306
- Последовательность 72, 76, 150, 201, 228, 271–273, 277–280, 291
- Потепление 123, 129, 133, 141
- Право 252
- Предложение 176, 219, 252, 255
- Предсказание 14, 26
- Пригожин И. 24, 35, 40, 48–50, 69, 78, 81, 111, 146, 258, 282
- Принципы моделирования 16
- Причина 18, 21, 141, 217
- Причинность 10, 18, 21
- «Промотор–репрессор» 215, 228
- Прогноз 14, 16, 23, 26, 75, 78, 148, 155
- Программа 49, 76, 151, 155, 200, 212, 215–222, 229–234, 271
- Пространство состояний 17, 64, 67, 132, 137, 271, 291
- Пространство фазовое 38, 82, 214, 260, 265, 268, 296
- Протеиноид 113, 164, 166, 177
- Протон 98–101, 106
- Прошлое 18, 24, 33, 75, 100, 137, 219
- Пуанкаре А. 31, 35–40, 282
- РНК, рибонуклеиновая кислота 72, 116, 158, 172–183, 186–190, 200, 203, 209, 278, 291
- Разделение функций 158, 177, 179, 182, 190, 193, 196, 205, 209, 224, 233, 251
- Райт С. 85
- Рассеяние 34, 122
- Рассеяние моды 247
- Репликаза 113, 116, 158, 172, 176–184
- Рехенберг И. 201
- Рецептор 123, 151, 217, 224–228, 231, 247
- Риски 143

- Ритуализация 71, 76, 150–155, 158, 200, 210, 217, 222, 238, 244, 255
- Рынок 252–257, 303
- Ряд временной 34
- Свет солнечный 70, 116, 119, 160, 303
- Связь обратная 54, 138, 141, 146, 162, 178, 211, 214
- Сексуальность 151, 209
- Семантика 247, 251
- Сенсор 153, 162
- Сероводород 112, 155, 160
- Сигнал 72, 150–153, 200, 214, 222–229
- Сила тяжести 140, 217
- Символ 71, 76, 150–155, 192–203, 239, 245–255
- Симметрия 40, 42, 55, 78, 82, 94–101, 151, 211, 284
- Синапсы 153
- Синергетика 48, 84, 87, 239, 243, 281–295, 308
- Синописис 26, 281
- Система сигнальная 72, 222, 228
- Скин-эффект 132
- Скорость убегания 140
- Следствие 14, 18
- Случай 10, 67, 72, 146, 150, 153, 205, 212, 222, 258–261, 270, 285
- Смешение, смесь 94, 135
- Смещение красное 88
- Смит А. 84
- Смит М. 151
- Собственность 20, 243, 251, 254
- Содержание соли 126, 133, 249
- Солнце 12, 26, 30, 41, 70, 88, 108–112, 118–120, 130, 133, 156, 165, 301
- Сообщение 11, 71, 76, 150, 226, 234
- Сопряжение 12, 68, 148–151
- Состояние 12–17, 60–75, 133–140, 214–217, 255, 258–260, 265, 267
- Состояние (богатство) 255
- Спектр инфракрасный 119, 123, 128, 132, 141
- Спрос 252
- Спутник 118, 126, 130
- SST (Sea Surface Temperature) 123, 129
- Стагнация 304
- Стандартизация 186, 247
- Старение 135
- Стенгерс И. 35, 69, 270
- Стоимость меновая 71, 82, 252–255
- Стохастика 60, 68, 281
- Стратегия 214, 238, 243, 304
- Структура 12, 40–78, 96, 105–113, 145, 150, 183, 211, 258, 265, 274, 279, 281
- Темброк Г. 245
- Теория катастроф 153, 219
- Теория относительности 18, 91, 254
- Теплота 12, 18, 33, 52, 109–112, 119–143, 259, 267, 297
- Технология 24, 29, 58, 68, 303
- Товар 58, 71, 82, 243, 252–255
- Толерантность 184, 305, 311
- Том Р. 153, 219

- Топология 153, 220, 231
Траектория 17, 21, 37, 41, 56, 63, 65, 78, 268–271
Транскрипция 158, 162, 190, 205
Трансляция 162, 215, 228
тРНК 190, 195, 200
Турбулентность 48, 82, 112, 132, 156, 160
Уоллес А. 23, 84
Условие граничное 30–34, 38, 44, 50, 80, 84, 129, 217, 229
Условие начальное 30–33, 37–40, 67, 70, 78, 129, 214, 268
Фантазия 237
Фейгенбаум М. 64
Фенотип 42, 82, 85, 151, 164, 180, 200, 289
Ферма П. 81
Фиксация 195, 198, 203, 247
Филогенез 210, 233, 244
Fitness 84, 288
Фишер Р. А. 84, 291
Фотоны 26, 40, 87–94, 98–105, 108, 109, 120, 165, 284
Фотосинтез 151, 155, 299
Фрактал 68
Фрустрация 67
Хаббл Э. П. 88, 100
Хакен Г. 48, 50, 55, 58, 62, 69, 85, 267, 281, 287, 295
Хаксли Дж. 150, 244
Хеморецепторы 151, 222–226
Хлорофилл 123, 160, 206, 209
Хокинг С. 24
Цена 72, 238, 243, 252, 255
Ценность 19, 35, 42, 52, 55, 80–87, 210, 252–255, 259, 282, 288–291, 308
Ценность селективная 76, 82, 150, 170, 179–184, 198–201, 205, 208, 235, 254, 257
Цепочка пищевая 123, 162, 304
Цермело Э. 35
Цианид калия 156
Цианобактерии 155, 160–164
Циановодород 165
Цикл предельный 64
Частица 19–21, 30, 37, 52, 92–108, 140, 166, 217, 259, 266, 270, 296
Чувство 12, 68, 72, 148, 153, 206, 209, 226, 231, 235
Шеннон К. Э. 80, 258–260, 265, 271–274, 295
Шрёдингер Э. 19, 48, 145, 282, 289
Шум 78, 148, 156
Шустер П. 62, 85, 113, 145, 165, 174, 179
Эйген М. 48, 50, 85, 145, 164, 174, 179, 258, 279, 282, 285, 291, 295
Эйлер Л. 21
Эйнштейн А. 14, 18, 35, 50, 88, 100, 254, 289
Экспрессия генов 219, 228, 231
Электродинамика 20, 35, 239

- Электрон 34, 40, 50, 60, 71, 94, 98, 101, 103, 106, 209, 284
- Эмиссия 124
- Энгельс Ф. 50, 239
- Энергия свободная 156, 297
- Энтропия 14, 19, 26, 34–38, 46–50, 52, 57–62, 70, 80–84, 103, 109, 119, 129, 165, 258–280, 282, 289, 292, 295–297, 300–303, 305
- Эренфест П. С. 35
- ERS-1 (European Remote Sensing Satellite), спутник 132
- Этология 150, 244
- Эукариот 160–164, 192, 211, 214
- «Эффект холодильника» 126
- Эффект парниковый 124, 128, 130, 140
- Эффектор 153, 224–228, 233, 235
- Эшер М. 10
- Язык, речь 11, 14, 40, 76, 150, 158, 198–206, 243, 247–251, 274, 279

Интересующие Вас книги нашего издательства можно заказать почтой или электронной почтой:

subscribe@rcd.ru

Внимание: дешевле и быстрее всего книги можно приобрести через наш Интернет-магазин:

<http://shop.rcd.ru>

Книги также можно приобрести:

1. Москва, ФТИАН, Нахимовский проспект, д. 36/1, к. 307,
тел.: 332-48-92 (почтовый адрес: Нахимовский проспект, д. 34)
2. Москва, ИМАШ, ул. Бардина, д. 4, корп. 3, к. 414, тел. 135-54-37
3. МГУ им. Ломоносова (ГЗ, 1 этаж)
4. Магазины:

Москва: «Дом научно-технической книги» (Ленинский пр., 40)
«Московский дом книги» (ул. Новый Арбат, 8)
«Библиоглобус» (м. Лубянка, ул. Мясницкая, 6)
Книжный магазин «ФИЗМАТКНИГА» (г. Долгопрудный,
Новый корпус МФТИ, 1 этаж, тел. 409-93-28)
С.-Пб.: «С.-Пб. дом книги» (Невский пр., 28)

Вернер Эбелинг, Райнер Файстель

ХАОС И КОСМОС

Синергетика эволюции

Дизайнер М. В. Ботя

Технический редактор А. В. Щиробоков

Компьютерная верстка С. В. Высоцкий

Корректор М. Г. Пушель

Подписано в печать 02.08.2005. Формат 60 × 84¹/₁₆.

Печать офсетная. Усл. печ. л. 19,53. Уч. изд. л. 19,23.

Гарнитура Таймс. Бумага офсетная №1. Тираж 700 экз. Заказ № 3962.

АНО «Институт компьютерных исследований»

426034, г. Ижевск, ул. Университетская, 1.

<http://rcd.ru> E-mail: borisov@rcd.ru

Отпечатано в полном соответствии с качеством
предоставленных диапозитивов в ОАО «Дом печати — ВЯТКА»

610033, г. Киров, ул. Московская, 122

ISEN 5-93972-454-X



9 785939 724548