



Богословие  
и наука

*Пол Дэвис*

# ПРОЕКТ ВСЕЛЕННОЙ

**НОВЫЕ  
ОТКРЫТИЯ  
ТВОРЧЕСКОЙ  
СПОСОБНОСТИ  
ПРИРОДЫ  
К САМООРГАНИЗАЦИИ**

ББК 20.1  
УДК 215  
Д94



Книга издана при поддержке  
*John Templeton Foundation (USA)*

**Пол Дэвис. ПРОЕКТ ВСЕЛЕННОЙ. Новые открытия творческой способности природы к самоорганизации (серия «Богословие и наука»).** – 2-е изд. – М.: Библейско-богословский институт св. апостола Андрея, 2011. – XXIV + 254 с.

Книга известного физика-теоретика и популяризатора науки Пола Дэвиса адресована читателю, интересующемуся серьезными мировоззренческими вопросами, важнейшим из которых является понимание роли и места человека во вселенной. Автор, основываясь на новейших достижениях естественных наук, находит определенное концептуальное решение этих проблем и подводит читателя к неожиданным философским обобщениям.

**Перевод:** Дмитрий Воробьев

**Редактор:** Борис Режабек

**Обложка:** Дмитрий Купреев

**Верстка:** Татьяна Дурнова

ISBN 978-5-89647-254-4

*Все права защищены. Никакая часть данной книги не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме, включая размещение в сети интернет, без письменного разрешения владельца авторских прав.*

2004 Templeton Foundation Press Edition  
Copyright © 1988 by Orion Publications  
© Библейско-богословский институт  
св. апостола Андрея, 2009, 2011.  
Ул. Иерусалимская, д. 3, Москва, 109316, Россия  
standrews@standrews.ru, www.standrews.ru

# Содержание

Предисловие к русскому изданию (Б. Г. Режабек).....	ix
Предисловие к изданию 2004 года .....	xv
Предисловие к первому изданию .....	xxii
Глава 1. План для космоса .....	1
Происхождение вещей .....	1
Творение из ничего .....	2
Целое и его части .....	5
Глава 2. Пропавшая стрела .....	8
Вселенная как часовой механизм .....	8
Необходимость .....	10
Редукция .....	12
Что же произошло со временем? .....	14
Случайность .....	16
Умирает ли вселенная? .....	20
Глава 3. Проблема моделирования .....	23
Линейные и нелинейные системы .....	26
Мгновенная сложность .....	28
Хартия игрока .....	35
Глава 4. Хаос .....	40
Сон фараона .....	40
Магические числа .....	47
Свести маятник с ума .....	49
Погода, ветреная как бабочка .....	57
Неведомое будущее .....	59

Глава 5. Картография неправильного .....	64
Фракталы .....	64
Ближайшее к тому, что неведомо человеку .....	69
Самое сложное, известное человеку .....	71
Странные аттракторы .....	72
Автоматы .....	73
Обратная видеосвязь .....	79
Глава 6. Самоорганизация .....	83
Творческая материя .....	83
Что такое организованность? .....	84
Новый вид порядка .....	90
Примеры самоорганизации .....	93
Диссипативные структуры: теория формы .....	96
Химические часы .....	99
Материя, обладающая «собственной волей» .....	101
Глава 7. Жизнь: ее природа .....	108
Что такое жизнь? .....	108
Витализм .....	112
Механицизм .....	114
Можно ли свести жизнь к физике? .....	117
Морфогенез: тайна образования форм .....	119
Глава 8. Жизнь: ее происхождение и эволюция .....	125
Теория Дарвина .....	125
Раскол .....	128
Вопрос стрелы времени .....	131
Истоки .....	135
Рецепт чуда .....	139
Глава 9. Разворачивающаяся вселенная .....	142
Космическая организация .....	142
Первая секунда .....	144
Симметрия, и как ее уменьшить .....	148
Исходный источник вселенной .....	151

Саморегулирующийся космос .....	152
Гравитация: источник космического порядка .....	156
Гравитация и загадка термодинамики .....	159
<b>Глава 10. Источник творения .....</b>	<b>162</b>
Третья революция .....	162
Таинственная организующая сила природы .....	163
Абсолютный редукционизм .....	164
Беспричинная созидательность .....	164
Организирующие принципы .....	166
Законы программных средств .....	167
Законы биотонии .....	172
Нисходящая каузальность .....	174
Законы сложности и самоорганизации .....	176
<b>Глава 11. Организующие принципы .....</b>	<b>179</b>
Космические принципы .....	179
Микроскопические организующие принципы .....	183
Новое понятие причинности .....	185
Более вольные идеи .....	188
<b>Глава 12. Квантовый фактор .....</b>	<b>195</b>
Квантовые чудеса и здравый смысл .....	195
Что происходит с атомом, когда за ним наблюдают? .....	198
За пределами кванта .....	201
Квантовое измерение как пример нисходящей причинности .....	203
Первичны ли высшие уровни? .....	207
Нелокальность в квантовой механике .....	209
Квантовая физика и жизнь .....	211
<b>Глава 13. Разум и мозг .....</b>	<b>218</b>
Паттерны мысли .....	218
Память .....	220
Поведение .....	223
Сознание .....	225
За пределами сознания .....	232

Глава 14. Существует ли план? .....	236
Оптимисты и пессимисты .....	236
Возрождение холизма .....	237
Предопределение .....	239
Что все это значит? .....	243
Указатель именной .....	245
Указатель тематический .....	248

## Предисловие к русскому изданию

Книга известного физика-теоретика и популяризатора науки Пола Дэвиса адресована читателю, интересующемуся серьезными мировоззренческими вопросами, важнейшим из которых является понимание роли и места Человека во вселенной.

Пол Дэвис — директор Центра фундаментальных исследований научных понятий в Государственном университете Аризоны. Область исследовательских интересов Дэвиса необычайно широка: происхождение и эволюция вселенной, включая происхождение жизни и сознания, свойства черных дыр, природа времени и квантовая теория поля. Он лауреат многочисленных научных премий, в том числе Темплтоновской премии (1995) и премии Майкла Фарадея, присуждаемой Королевским Обществом (2002).

Начиная с 80-х годов Дэвис опубликовал серию научно-популярных книг, ставших бестселлерами в своей области. В России хорошо известна его книга «Сверхсила». В предлагаемой вниманию читателей книге автор рассказывает о важных открытиях второй половины XX века в области физики, математики и биологии ясным и доступным для широкой аудитории языком. Он просто и интересно говорит о таких вещах, как «фракталы», «множество Мандельброта», «детерминированный хаос», «бифуркационное дерево» и константа Фейгенбаума, «странные аттракторы» в поведении нелинейных систем, «диссипативные структуры» в неравновесной термодинамике, которые еще недавно были известны только узким специалистам. Познакомившись с этими понятиями, читатель узнает, «как соотносятся сложность, произвольность, предсказуемость и детерминизм» в физическом мире и в мире математических моделей. К очевидным достоинствам книги нужно отнести не только несомненную эрудицию автора в разных областях знания — математике, космологии, квантовой физике, физике элементарных частиц, биологии и синергетике, — но и

открытость к обсуждению проблем, традиционно относящихся к области богословия.

Само название книги «Проект вселенной» говорит о преодолении наивно-материалистических представлений о мире, восходящих к Демокриту, который представлял вселенную как результат слепого процесса, итог игры соударяющихся атомов в пустом пространстве. Поняв ограниченность материализма Демокрита, автор избегает и другой опасности: впасть в платонизм, объявляющий наблюдаемый нами мир лишь игрой «теней на стене пещеры», второстепенной проекцией истинно реального «мира идей». Позиция автора по существу ближе к философии Аристотеля, взгляды которого «позднее проникли в христианское богословие и даже сейчас составляют основание западной религиозной мысли. Согласно христианскому вероучению, космический план действительно существует и представляет божественный проект вселенной.

Таким образом, отвергая языческие заблуждения, автор приближается к христианским представлениям о ценности тварного мира, в котором человеку отведена роль ключевого элемента в соответствии с заповедью «хранить и возделывать сей сад» (Быт 2:15). Вопрос о соотношении христианской религии и достижений науки автор деликатно обходит — возможно, из-за своего рода «политкорректности», сегодня предписывающей не упоминать религиозные темы в научно-популярных трактатах. Не помяная Имени Божьего всуе и не вдаваясь в теософские словеса о «Космическом Разуме», автор уверенно свидетельствует о том, что «под калейдоскопом явлений, сбивающим с толку и противящимся изучению, лежит скрытый математический порядок. И более того. Наука исходит из того, что этот подлежащий порядок можно, по крайней мере отчасти, постигнуть человеческим разумом». Такая позиция автора вполне соответствует христианскому миропониманию и позволяет надеяться на то, что, развивая науки, человечество приближается к пониманию замысла Творца. В этом отношении книга «Проект вселенной», как и ряд предшествующих ей, представляет большой интерес для людей, не утративших ни способности мыслить, ни глубины веры, и дает материал для серьезных размышлений о том, как новейшие открытия науки позволяют преодолеть предрассудки атеизма, механицизма и позитивизма,



утвердившиеся в сознании многих ученых, и преграждающие им путь к пониманию того, как многообразны формы, в которых открывается нам божественная мудрость.

В связи с темой книги хочется вспомнить о важнейших работах русских авторов, имеющих прямое отношение к тому, о чем пишет Дэвис. Так, рассказывая об истории возникновения представлений о расширяющейся вселенной, он пишет, что Эйнштейн отказался от введения в свои уравнения «антигравитации» (космологического  $\lambda$ -члена) «в 1920-е, когда Эдвин Хаббл открыл, что вселенная расширяется. Встретившись в 1931 году с Хабблом, Эйнштейн сразу же понял, что антигравитация бесполезна, и отказался от нее, назвав ее "величайшей ошибкой в собственной жизни". После такого фиаско антигравитацию решительно изгнали из повестки дня космологии». Настоящая история интереснее. В 1917 году А. Эйнштейн опубликовал модель замкнутой статической вселенной. В этом же году Слайфер обнаружил, что удаленные туманности с большой скоростью удаляются от нас. В 1921 году замечательный советский математик, физик и метеоролог Александр Александрович Фридман создал первую нестационарную модель вселенной, а через год опубликовал работу «О кривизне пространства», в которой получил решение уравнений Эйнштейна без космологического члена. Из работы Фридмана вытекало, что вселенная может быть нестационарной, может расширяться или сжиматься.

Эйнштейн сначала отнесся к этой статье отрицательно, назвав ее результаты «подозрительными», но после того, как физик Ю. А. Круктов встретился с ним в Берлине, признал свою ошибку и опубликовал заметку, в которой дал высокую оценку работе Фридмана. Фридман умер 15 октября 1925 года от брюшного тифа и не дождался публикации замечательных наблюдений Эдвина Хаббла, подтвердивших его теорию. Но ясно, что Эйнштейн отказался от «космологического члена» задолго до встречи с Хабблом, публикации которого в 1927–1929 гг. надежно подтвердили наблюдения Слайфера. Здесь стоит вспомнить и работы Георгия Гамова, сыгравшие не менее значительную роль в становлении современных космологических представлений. Гамов сделал в 1948 году важнейший вывод о том, что от эпохи Большого взрыва — возникновения вселенной из первоначальной точки — должны остаться следы в виде «реликтового излучения», которое было

обнаружено Пензиасом и Уилсоном в 1965 году и подтверждено наблюдениями со спутников НАСА в 1989. Георгий Гамов является автором идеи о генетическом коде, определяемом четырьмя нуклеотидами, – этой темы Пол Дэвис касается в биологических главах своей книги.

Но если имена Фридмана и Гамова все же известны за рубежом, то имена Эрвина Симоновича Бауэра<sup>1</sup>, выдвинувшего в качестве основного принципа биологии «принцип устойчивого неравновесия» (значительно более глубокий, чем представления Ильи Пригожина, тоже, кстати, выходца из России) и Побиска Георгиевича Кузнецова<sup>2</sup>, продуктивно работавшего над проблемой преодоления противоречия между принципом возрастания энтропии и очевидным существованием прогрессивной эволюции видов, известны гораздо меньше, и я хочу обратить внимание читателей на работы этих авторов, которые сегодня уже начинают (с запозданием в 50 лет) оценивать по заслугам.

На Западе наиболее известными результатами русской науки, связанными с проблемами данной книги, являются работы по изучению «реакции Белоусова – Жаботинского», удивительного с точки зрения классической термодинамики явления химических автоколебаний. Уравнения, позволившие описать открытое Б. П. Белоусовым явление, были созданы в 60-е годы XX века А. М. Жаботинским, работавшим в Пущино на Оке, опиравшимся на работы русских математиков нижегородской школы А. А. Андропова и фундаментальные идеи А. Пуанкаре. Илья Пригожин, приехавший в Пущино, ознакомившись с этими работами в начале 1970-х годов, назвал аналогичные уравнения «брюсселятором» (в честь города, в котором он учился и работал), а в 1977 году стал лауреатом Нобелевской премии по химии «за работы в области термодинамики необратимых процессов, особенно за теорию необратимых структур».

Ценность книги и ее полезность для наших читателей трудно переоценить. Пол Дэвис пишет, во-первых, смело, а во-вторых, доступно, даже когда касается сложнейших проблем современной науки — таких, как морфогенез (не избегая дискуссионных вопросов о роли «морфогенетических полей»), теория эволюции, которая, как сегодня стало понятно многим, далеко не сводится

<sup>1</sup> Э. С. Бауэр. Теоретическая биология. М.–Л.: ВИЭМ, 1935, 206 с.

<sup>2</sup> П. Г. Кузнецов. Идеи и жизнь. — М.: Концепт, 1999.

к взглядам Дарвина на естественный отбор как главную причину происхождения видов, и даже проблемы возникновения жизни и сознания. Говоря о возможной телеологичности эволюции, Дэвис упоминает о взглядах Леконта дю Ньюи (ныне почти забытого французского ученого, основателя первого в мире Института биофизики), палеонтолога, богослова и философа Тейяра де Шардена, имя которого стоит рядом с именем В. И. Вернадского в ряду основоположников учения о ноосфере, и взглядах биофизика Френсиса Крика и астрофизиков Фреда Хойла и Чандра Викрамасингха, которые модифицировали старые идеи Г. Рихтера и С. Аррениуса о «панспермии». Идея панспермии переносит проблему возникновения жизни на Земле в просторы вселенной. Сам Дэвис в 1990 году высказывал предположение, что жизнь, возможно, зародилась на Марсе и была доставлена на Землю осколками скал, образовавшихся при столкновении Марса с кометой. Но он понимает, что эта идея «лишь отодвигает загадку на один шаг назад. По-прежнему необходимо объяснить, как жизнь образовалась в другом месте и предположительно в других условиях». Он с известным сочувствием пишет о взглядах А. И. Опарина о происхождении жизни из «первичного бульона», которые, по мнению Дэвиса, «дискредитировал» Т. Д. Лысенко. В России помнят шутку Н. В. Тимофеева-Ресовского, который на вопрос «Что вы думаете о происхождении жизни?» ответил: «Я тогда был еще маленький, не помню — спросите лучше у Опарина!» Дэвис допускает, что «существуют до сих пор неизвестные организующие принципы добиологической химии, которые значительно способствуют образованию сложных органических молекул, подобных живым». В этом плане немалый интерес представляют взгляды талантливого русского химика А. П. Руденко<sup>3</sup>, к сожалению, мало известные на Западе.

Главная мысль Дэвиса, что «неуклонное развертывание организованной сложности во вселенной – это фундаментальное свойство природы», чрезвычайно важна для нового типа мировоззрения, которое формируется в наши дни и которое я называю «ноосферным мировоззрением»<sup>4</sup>. Оно опирается на факт существования

<sup>3</sup> А. П. Руденко. Теория развития открытых каталитических систем. М.: МГУ, 1969.

<sup>4</sup> Б. Г. Режабек. Ноосферное мировоззрение, в кн. Энциклопедия «ГЛОБАЛИСТИКА». М., 2003.

разума в различных формах — от абстрактного «разума», связанного с фундаментальными математическими и логическими структурами вселенной, до человеческого Разума, связанного с творческими способностями человека, в которых проявляется его сотворенность «по образу и подобию» Творца вселенной. Ноосфера — Сфера Разума — с этой точки зрения, является высшим итогом эволюции биосферы — сферы жизни, и носитель разума — человек, гордо именующий себя *Homo sapiens*. *Sapiens* — это не случайное явление, не «плесень на Земном шаре», как думал в начале прошлого века астрофизик Джеймс Джинс, а существо, от решений которого зависит в конечном счете существование и качество жизни во вселенной.

*Борис Георгиевич Режабек,  
Москва, апрель 2009 г.*

*Независимо от того, понимаете ли вы это, нет никаких сомнений в том, что вселенная разворачивается должным образом.*

*Макс Эрманн*

## Предисловие к изданию 2004 года

Если случайно оглянуться вокруг, то физический мир предстанет как совершенно нам непонятный. вселенная настолько сложна, ее структуры и процессы столь разнообразны и прерывисты, что, казалось бы, нет никакой причины, по которой человеческие существа когда-либо добились их понимания. Тем не менее все усилия во имя науки основаны на дерзком предположении – принятом на веру учеными, – что под калейдоскопом явлений, сбивающим с толку и противящимся изучению, лежит скрытый математический порядок. И более того. Наука исходит из того, что этот подлежащий порядок можно, по крайней мере отчасти, постигнуть человеческим разумом.

После трех столетий впечатляющих достижений объекты физической науки можно легко разделить на три широкие категории: а) очень большие, б) очень маленькие и в) очень сложные». Первая категория имеет дело с космологией, общей структурой и эволюцией вселенной. Вторая – царство физики субатомных частиц и поиск основополагающих строительных блоков материи. В последние годы эти две дисциплины начали сливаться, поскольку стало ясно, что Большой взрыв, положивший начало вселенной примерно 14 миллиардов лет назад, высвободил огромную энергию, на краткий миг обнажив конечные составляющие материи. Космологи предполагают, что крупномасштабная структура вселенной обязана собственным происхождением сверхэнергетичным субъядерным процессам, происходившим в первую долю секунды ее существования. В этом смысле субатомная физика помогает выделить общие свойства вселенной. И наоборот, то, каким образом вселенная начала существовать, помогает определить количество и свойства фундаментальных материальных частиц, извергнутых Большим взрывом. Таким образом, малое определяется большим, в то время как большое определяется малым.

В отличие от первых двух, изучение третьего типа объектов науки – сложных систем — все еще пребывает в детском возрасте. Сложность сложна по своей природе и крайне трудна для понимания. И все же становится ясно, что сложность не всегда равна запутанной, неповторимой усложненности. Во многих случаях за поверхностным хаотическим или сложным поведением стоят простые математические принципы. Рост объема и скорости вычислений помогли лучше понять различные виды сложного, обнаруживаемые в природе, и укрепили веру в существование четких законов сложности, дополняющих, но не нарушающих привычные законы физики.

Первое издание этой книги было осуществлено в 1980-х, когда теория хаоса обрела широкую известность. Хотя корни теории хаоса уходят в прошлое на одно столетие или более, выдающееся положение она заняла благодаря осознанию того, что хаос — это общая черта динамических систем, вследствие чего произвольность и непредсказуемость, оказывается, затрагивают не только погоду и биологическое разнообразие, но даже такие обыденные системы, как фондовая биржа. Сегодня ученые признают, что теория хаоса описывает лишь один из множества разнообразных типов сложного поведения, представленных в природе, и что для полного понимания сложности требуется нечто гораздо большее, чем простое определение разницы между обычным и необычным поведением.

Так же как исследования большого и малого начинают сливаться, наука очень сложного начала отчасти совпадать с изучением макромира. Наиболее впечатляющие перемены происходят в области взаимодействия биологических, химических и вычислительных систем. Акроним БИНС был закреплен за «биоинфранано-системами». Они относятся к царству молекулярных машин (объектам так называемых нанотехнологий), масштаб которых измеряется одной миллиардной долей метра), и систем по обработке информации; классический пример для них в природе – это живая клетка. В последнее десятилетие основной целью в этой области была попытка построить квантовый компьютер. Это прибор, разработанный, чтобы использовать квантовое поведение для обработки информации. Сила квантовых систем в том, что они могут существовать во многих квантовых состояниях одновременно.

Атом, например, может быть возбужденным или невозбужденным в одно и то же время. Закрепив информацию за определенными квантовыми состояниями, физики рассчитывают, что скорость ее обработки вырастет экспоненциально по сравнению с обычным компьютером. Если эта попытка увенчается успехом — а исследования до сих пор переживают детскую пору, — она изменит не только науку о сложном, но и наше понимание того, что обозначает этот термин.

В главе 12 я тешу себя мыслью о том, что квантовая механика, возможно, содержит ключ к более точному определению биологической сложности — того, что отличает жизнь от сложных неживых систем. С тех пор, когда я сформулировал эти ранние идеи в первоначальном издании настоящей книги, я более глубоко исследовал данную тему и могу отослать читателей, желающих узнать больше о квантовой биологии, к написанной мною книге «Пятое чудо» (в Великобритании ее название было изменено на «Происхождение жизни»). Я уверен, что квантовые нано-машины вскоре сделают неразличимой границу между живым и неживым и что секрет жизни будет лежать в чрезвычайных способностях живых систем к обработке информации. Грядущее слияние предметов изучения информационной и вычислительной наук, квантовой механики и нанотехнологий приведет к революционным переменам в нашем понимании биологических систем.

Многие из загадок, о которых я писал в 1988 году, например о происхождении жизни, до сих пор вызывают серьезные трудности, и я мало что хотел бы добавить к уже сказанному. Однако одна область сделала впечатляющий шаг вперед за прошедшие годы, — это космология. Успехи последнего десятилетия превратили ее из тихой заводи умозрительных построений в магистральную научную дисциплину. Рассмотрим, например, данные, полученные со спутника, названного Зондом микроволновой анизотропии Вилкинсона (WMAP), опубликованные в 2003 году. В газетах по всему миру была напечатана фотография, представляющая термальную карту неба, тщательно составленную благодаря наблюдениям с высокой надземной орбиты. На самом деле, это моментальный снимок того, как вселенная выглядела 380 000 лет после ее рождения в горячем большом взрыве. Обжигающий жар, сопровождавший рождение вселенной, теперь уменьшился до мягкого

остаточного свечения, омывающего вселенную целиком. WMAP был разработан для того, чтобы нанести на карту этот убывающий первобытный жар, который путешествует практически нетронутым уже более 13 миллиардов лет. В кляксах и размывах этой карты заключены ответы на главные вопросы о космосе, а именно: каков возраст вселенной, из чего она сделана и как погибнет. Извлекая данные из карты, ученые смогли восстановить точную историю вселенной с беспрецедентной точностью.

Возможно, самый значительный факт, открывшийся благодаря работе WMAP и многочисленным наземным наблюдениям, — это существование одного из видов космической антигравитации, который к настоящему времени окрестили «темной энергией». Корни этой истории уходят в 1915 год, когда Эйнштейн опубликовал общую теорию относительности. В этой совершенно гениальной работе предлагается абсолютно новое описание гравитации, силы, которая удерживает наши ноги на земле и действует между всеми телами во вселенной, пытаясь притянуть их друг к другу.

Однако это вселенское притяжение наградило Эйнштейна головной болью. Почему, спрашивал он, вселенная попросту не обрушится большой кучей, втянутая вовнутрь собственной колоссальной массой? Не допустил ли он основополагающей опшибки в своей новой теории?

Сегодня мы знаем ответ. Вселенная не обрушилась (по крайней мере, пока), поскольку галактики разлетаются друг от друга под действием силы Большого взрыва. Однако в 1915 году никто не знал, что вселенная расширяется. Поэтому Эйнштейн принялся описывать статическую вселенную. Для этого он придумал понятие антигравитации. Эта доселе неизвестная сила послужит как противовес массе вселенной, поддерживая ее и предотвращая обрушение. Чтобы ввести антигравитацию в теорию относительности, Эйнштейн наскоро поправил первоначальные уравнения, добавив новый термин, приобретший циничное название «погрешности Эйнштейна».

Сразу же стало очевидно, что антигравитация не походит на какую-либо иную силу. Для начала, она обладала любопытным свойством расти вместе с пространством. Это означает, что мы не сможем заметить ее воздействие на Земле или даже в Солнечной системе. Однако в космических масштабах ее силы крепнут



настолько, что если проделки с цифрами верны, то она может с точностью уравновесить гравитационную силу притяжения между всеми галактиками.

Это была изящная, но недолговечная идея. Крах настиг ее в 1920-е, когда Эдвин Хаббл открыл, что вселенная расширяется. Встретившись в 1931 году с Хабблом, Эйнштейн сразу же понял, что антигравитация бесполезна, и отказался от нее, назвав ее «величайшей ошибкой в собственной жизни». После такого фиаско, антигравитацию решительно изгнали из повестки дня космологии. В 1960-е, когда я был студентом, от нее отказались как от чего-то отталкивающего в обоих смыслах этого слова. Но, как это часто бывает в науке, события развивались непредсказуемым образом. Только то, что антигравитация оказалась ненужной для своей изначальной цели, не позволяло логически заключить, что она не существует, и в 1970-е эта идея воспрянула снова, но в совсем ином контексте. В течение сорока лет физики бились над загадочной природой пустого пространства. Квантовая механика, работающая с процессами на субатомном уровне, предсказывала, что даже при полном отсутствии материи пространство должно бурлить невидимой, или темной, энергией. Известная формула Эйнштейна  $E=mc^2$  означает, что эта темная энергия должна обладать массой, и в результате создавать гравитационную тягу. Попросту говоря, квантовая механика имеет в виду, что даже абсолютно пустое пространство обладает весом.

На первый взгляд, это выглядит абсурдно. Как может само пространство — вакуум — что-либо весить? Но поскольку отхватить кусочек пространства и положить его на весы невозможно, данное утверждение проверить нелегко. Лишь только измерив вселенную целиком, можно определить вес ее (очень немаленького) пространства. Взвешивание вселенной совсем не пустяковое дело, но как я вкратце опишу далее, осуществить его можно.

Прежде чем приступить к вопросу о том, сколько весит данный объем пространства, следует рассказать о непростых свойствах темной энергии. Пространство не только обладает весом, но и оказывает давление. Согласно теории Эйнштейна, давление, так же как и масса, создает гравитационную тягу. Например, внешнее давление Земли немного увеличивает вес вашего тела. Здесь можно запутаться, поскольку давление толкает наружу и одновременно

создает гравитационную силу, тянущую внутрь. Когда дело доходит до темной энергии, возникает обратное положение — ее давление оказывается отрицательным. Попросту говоря, пространство засасывает. И так же как давление создает гравитацию, засасывание порождает *антигравитацию*. Если собрать все воедино, вывод ошеломляет: пространство засасывает так сильно, но его антигравитация оказывается сильнее. Итог таков, что темная энергия в точности подражает погрешности Эйнштейна!

Несмотря на это удивительное совпадение, немногие ученые посвятили себя делу темной энергии. Теоретики надеялись, что она как-нибудь уйдет прочь. Затем, в 1998 году, разорвалась настоящая бомба. Астрономы из Австралии и других мест производили перепись взрывающихся звезд. По свету этих так называемых сверхновых они могли рассчитать расстояния, на которых произошли взрывы. Скоро стало ясно, что эти бурные события случились слишком далеко, чтобы вписаться в стандартную модель вселенной, начавшейся с Большого взрыва и позднее замедлившей постепенно свое расширение. Единственное объяснение, казалось, состояло в том, что когда-то в прошлом темпы расширения снова начали расти, словно под действием таинственного космического отталкивания. Темная энергия неожиданно снова оказалась в моде.

Результаты этих наблюдений вместе с данными WMAP показывают, что лишь около 5 процентов вселенной сделано из обычной материи, такой как атомы. Примерно четверть состоит из темной материи некоего вида, который только предстоит установить, однако многие убеждены, что это экзотические субатомные частицы, извергнутые наружу Большим взрывом. Львиная доля вселенной существует в виде темной энергии. Говоря языком цифр, пустое пространство наблюдаемой вселенной весит примерно сто триллионов триллионов триллионов триллионов тонн, намного больше, чем все звезды вместе взятые. Возможно, это и много, но для сравнения скажем, что вес пространства внутри автомобиля составляет несколько триллион-триллионных грамма.

Теоретики никак не могут понять, почему темная энергия весит именно столько. На самом деле, их мнения разделились относительно того, представляет ли собой темная энергия антигравитацию Эйнштейна или же это некое более сложное и экзотическое явление. Каково бы ни было объяснение, темная энергия, вероятно,

творит судьбу космоса. С течением времени, по мере того, как темпы космического расширения будут расти, галактики будут все дальше и дальше уноситься друг от друга, постоянно наращивая скорость. В конце концов, даже галактики рядом с нашим Млечным путем (или тем, что останется от него) будут удаляться быстрее света, а потому станут невидимы. Если не произойдет ничего, что могло бы изменить такой ход событий, конечным состоянием вселенной будет темное, почти пустое пространство на веки вечные. Такое предположение удручает.

Однако есть луч надежды. Те физические процессы, что запустили инфляционный взрыв в пору рождения вселенной, можно, в принципе, воссоздать. Располагая триллионами лет на соответствующие размышления, наши потомки в отдаленном будущем могут найти способ, как произвести новый большой взрыв в лаборатории и создать в результате новорожденную вселенную. Теория предполагает, что новая вселенная раздуется, создавая по пути свое собственное пространство и время, и в конечном итоге отделится от материнской вселенной. На некоторое время мать и дитя будут соединены пуповиной пространства, представляющего мост между старой вселенной и новой. Нашим потомкам, возможно, удастся протиснуться в новую вселенную и вступить в новый цикл эволюции и развития космоса. Это будет конечной стадией переселения: отправка во вновь созданный космос, изготовленный, будем надеяться, с учетом дружелюбия к биологическим формам жизни!

На протяжении более семи десятилетий идея темной энергии то пользовалась благоволением, то лишалась его. Если верить астрономическим свидетельствам, то она снова в моде, причем надолго. Хотя темная энергия сулит крах вселенной, она может также стать основой для спасения космоса. Если это так, то величайшая ошибка Эйнштейна может все еще обернуться его величайшим триумфом. И если законы вселенной — это действительно своего рода космический план, как я полагаю, то они также могут стать планом для выживания.

*Пол Дэвис  
Сидней, январь 2004 г.*

## Предисловие к первому изданию

Создание вселенной обычно представляется как внезапное событие, произошедшее в далеком прошлом. Такую картину поддерживают как религия, так и научные свидетельства о Большом взрыве. Эта простая идея, однако, скрывает то, что вселенная никогда не переставала быть созидательной.

Сейчас космологи уверены, что сразу после Большого взрыва вселенная находилась в состоянии, по большей части бескачественном, и что вся структурированность и сложность физического мира, наблюдаемого нами сегодня, каким-то образом появилась позднее. Очевидно, существуют физические процессы, способные превратить вакуум – или нечто, близкое к нему, — в звезды, планеты, кристаллы, облака и людей.

Каков же источник этой удивительной созидательной силы? Могут ли известные физические процессы объяснить неизменную созидательность природы или же здесь задействованы дополнительные организационные принципы, придающие форму материи и энергии и направляющие их к состояниям большей упорядоченности и сложности?

Лишь совсем недавно ученые начали понимать, как сложность и организованность могут возникать из отсутствия свойств и хаоса. Исследования в таких разнообразных областях, как турбулентность жидкостей, рост кристаллов и нейронные сети, открывают чрезвычайную способность физических систем спонтанно создавать новые состояния порядка. Ясно, что *самоорганизующиеся процессы* существуют в любой ветви науки.

И здесь встает основополагающий вопрос. Представляют ли собой, на первый взгляд, бесконечные разновидности природных форм и структур, появляющиеся по мере разворачивания вселенной, лишь случайный результат действия произвольных сил? Или же это в какой-то степени неизбежный итог творческой деятельности вселенной? Некоторые ученые, например, рассматривают происхождение жизни как чрезвычайно редкое случайное событие,

однако другие считают его естественным конечным состоянием циклов самоорганизующихся химических реакций. Если богатство природы встроено в ее законы, означает ли это, что настоящее состояние вселенной в некотором смысле предопределено? Существует ли, выражаясь метафорически, «космический план»?

Эти глубокие бытийные вопросы, конечно, не новы. Тысячелетиями ими задавались философы и богословы. Особенно уместными в настоящий момент их делает то, что новые открытия драматическим образом меняют взгляд *ученых* на природу вселенной. В течение трех столетий в науке господствовала Ньютонова и термодинамическая парадигмы, которые представляют вселенную либо как бесплодный механизм, либо в состоянии вырождения и разрушения. Сейчас имеется новая парадигма созидательной вселенной, признающая прогрессивный и инновационный характер физических процессов. Новая парадигма подчеркивает свойства коллективности, сотрудничества и организованности в природе; по взглядам она ближе к синтезу и целостности, чем к анализу и редукации.

Настоящая книга представляет собой попытку привлечь внимание широкого читателя к этим существенным переменам. Она охватывает новые исследования во многих дисциплинах, от астрономии до биологии, от физики до неврологии – где бы ни появились сложность и самоорганизация. Я стремился включать в изложение как можно меньше технических деталей, однако эта книга не может обойтись без нескольких основных разделов, требующих более внимательного прочтения. Особенно это относится к главе 4, содержащей несколько технических диаграмм. Все же я настоятельно прошу читателя проявить терпение, поскольку суть новой парадигмы невозможно полноценно усвоить без некоторых математических идей.

В составлении материала огромную помощь мне оказали мои коллеги из Университета Ньюкасла на Тайне, которые, естественно, не обязательно согласны с моими выводами. Особую благодарность заслужили профессор Кеннет Бертон, д-р Ян Мосс, д-р Ричард Рохвер и д-р Дэвид Тритон. Я хотел бы поблагодарить д-ра Джона Барроу, профессора Роджера Пенроуза и профессора Фрэнка Типлера за полезные обсуждения.

# 1

## План для космоса

*Бог больше не архивариус, разворачивающий бесконечный свиток текста, созданного им раз и навсегда. Он продолжает труд творения сквозь времена.*

Илья Пригожин<sup>1</sup>

### Происхождение вещей

**Н**ечто, скрытое в глубинах человеческого духа, принуждает нас размышлять над творением. Даже если бросить случайный взгляд, становится очевидно, что вселенная замечательным образом упорядочена на всех уровнях. Распределение материи и энергии не является ни однородным, ни случайным, но вместо этого они организованы в связанные различимые структуры, иногда высокой сложности. Откуда появились мириады галактик, звезд и планет, кристаллы и облака, живые организмы? Как оказались они соединены столь гармоничными и искусными узлами зависимости друг от друга? Космос, его наводящая ужас бескрайность, богатейшее разнообразие форм и поверх всего прочего взаимосвязанное единство нельзя просто принять как бессмысленный факт.

Существование *сложного* еще более примечательно, учитывая по большей части тонкую и специфичную природу его организации, ведь его беспрестанно осаждают всевозможные разрушительные силы из окружающей среды, нисколько не заботящиеся

---

<sup>1</sup> Ilya Prigogine, 'The Rediscovery of Time', в Sara Nash (ed.), *Science and Complexity* (Northwood, Middlesex, Science Reviews Ltd, 1985), p. 11.

о его выживании. Тем не менее перед лицом, по всей видимости, бессердечной Матери-Природы упорядоченный строй вселенной умудряется не только выжить, но и процветать.

Всегда существовали те, кто предпочитал видеть в космических гармонии и порядке свидетельство существования метафизического проектировщика. Для них существование сложных форм представляет собой проявление творческой силы этого проектировщика. Однако развитие современной науки изменило рациональный подход к проблеме происхождения вещей. Было открыто, что вселенная не всегда была такой, как сейчас. Свидетельства геологии, палеонтологии и астрономии предполагают, что огромный ряд форм и структур, населяющих наш мир, существовал не всегда, но они *появлялись* в ходе бесчисленных временных эпох.

Недавно ученые осознали, что никакие из объектов и систем, составляющих физический мир и доступных нашему восприятию в настоящий момент, не существовали в начале. Каким-то образом все разнообразие и сложность вселенной появились с момента ее происхождения в ходе внезапной вспышки, названной Большим взрывом. Современная картина бытия состоит из космоса, начинающегося с состояния, полностью лишенного свойств, и развивающегося далее, шаг за шагом, – можно сказать разворачивающегося – вплоть до калейдоскопа организованной деятельности в настоящее время.

## Творение из ничего

Философ Парменид, живший за 1500 лет до Христа, учил, что «ничто может появиться из ничего». С тех пор это изречение повторялось множество раз, оно образует основание для подхода к творению во многих мировых религиях, таких как иудаизм и христианство. Последователи Парменида пошли гораздо дальше, заключив, что в физическом мире не может быть действительных изменений. Все кажущиеся перемены, утверждали они, – иллюзия. Их вселенная мрачна и бесплодна, она не способна произвести что-либо фундаментально новое.

Люди, верящие в изречение Парменида, не могут допустить, что вселенная начала существовать спонтанно; она, должно быть, существовала всегда либо ее создала сверхъестественная сила. Библия открыто утверждает, что Бог создал мир, и христианские

богословы развивают идею творения *ex nihilo* – буквально из ничего. Лишь Бог, говорят они, обладает силой совершить это.

Проблема первоистоков физической вселенной лежит на границе науки. На самом деле, многие ученые сказали бы, что она лежит полностью за пределами научной сферы. Тем не менее в последнее время были предприняты серьезные попытки понять, как вселенная могла появиться из ничего и не нарушить каких-либо физических законов. Но как может что-либо обрести существование без причины?

Ключ к осуществлению этого кажущегося чуда – квантовая физика. Квантовые процессы по своей сути непредсказуемы и недетерминированы; как правило, невозможно предсказать, как поведет себя квантовая система от одного момента к другому. Закон причины и следствия, столь крепко укорененный в основании повседневного опыта, здесь терпит неудачу. В мире кванта спонтанные изменения не только разрешены, но и неизбежны.

Хотя квантовые эффекты обычно ограничены микромиром атомов и их составляющих, в принципе, квантовая физика должна подходить для всего. Стало модным исследовать квантовую физику целой вселенной, это направление известно как квантовая космология. Подобные исследования носят пробный и чрезвычайно умозрительный характер, однако ведут к соблазнительной возможности. Теперь не считается полным абсурдом представление о том, что вселенная обрела существование спонтанно из ничего в результате квантового процесса.

То, что новорожденный космос, по-видимому, был лишен формы и содержания, существенно упрощает загадку его первоистоков. Гораздо легче верить, что состояние бескачественной простоты появилось спонтанно из ничего, чем полагать, что текущее крайне сложное состояние вселенной попросту впрыгнуло в существование в готовом виде.

Решение одной задачи, однако, немедленно ведет к другой. Сейчас наука столкнулась с необходимостью объяснить, путем каких физических процессов организованные системы и тщательно спланированная деятельность, окружающие нас сегодня, появились из перевозданной чистоты Большого взрыва. Отыскав способ позволить вселенной быть самосозидающей, мы должны приписать ей способность быть *самоорганизующейся*.



Все большее число ученых и писателей осознает, что способность физического мира организовывать себя, составляет фундаментальное и глубоко загадочное свойство вселенной. То, что природа обладает *созидательной силой* и способна производить все более широкое разнообразие сложных форм и структур, бросает вызов самому основанию современной науки. «Величайшая загадка космологии, – пишет Карл Поппер, широко известный философ, – вполне может состоять в том... что вселенная, в некотором смысле, созидательна»<sup>2</sup>.

Лауреат Нобелевской премии, бельгиец Илья Пригожин, написавший в соавторстве с Изабель Стенгерс книгу «Порядок из хаоса», приходит к сходным выводам<sup>3</sup>: «Наша вселенная обладает плюралистическим, сложным характером. Структуры могут исчезать, но также они могут и появляться». Пригожин и Стенгерс посвятили свою книгу Эриху Янчу, который в своей более ранней работе «Самоорганизующаяся вселенная» также высказывает мнение, что природа обладает своего рода «свободной волей», а потому способна создавать новое<sup>4</sup>:

«Однажды мы, возможно, поймем самоорганизующиеся процессы вселенной, которая не определяется слепым выбором начальных условий, но обладает способностью к частичному самообусловливанию».

Распространение новых идей не ускользнуло от внимания авторов книг о науке. Луиза Янг, например, в лирическом стиле описывает вселенную как «незаконченную» и развивает тему Поппера<sup>5</sup>: «Я утверждаю, что мы наблюдаем – на самом деле участвуя в нем – акт творения, происходящий в пределах времени. Также как во всех подобных попытках, конечный продукт нельзя было ясно предвидеть в начале». Она сравнивает разворачивающуюся организацию космоса с творческим действием художника: «задействовав изменение и рост, оно идет вперед путем проб и ошибок, отвергая и преобразуя подручные материалы по мере появления новых возможностей».

<sup>2</sup> Karl Popper and John Eccles, *The Self and Its Brain* (Berlin, Springer International, 1977), p. 61.

<sup>3</sup> Ilya Prigogine and Isabelle Stengers, *Order out of Chaos* (London, Heinemann, 1984), p. 9.

<sup>4</sup> Erich Jantsch, *The Self-Organizing Universe* (Oxford, Pergamon, 1980), p. 96.

<sup>5</sup> Louise B. Young, *The Unfinished Universe* (New York, Simon and Schuster, 1986), p. 15.

В последние годы уделяется большое внимание вопросу так называемого происхождения вселенной и научно-популярные книги о «Творении» появляются в изобилии. Создается впечатление, что вселенная была создана целиком и сразу в Большом взрыве. Однако становится все очевиднее, что творение – это, на самом деле, продолжающийся процесс. Существование вселенной не объясняется большим взрывом: доисторический взрыв стал лишь началом всего.

Теперь мы должны спросить: как может вселенная, обретая бытие, впоследствии порождать нечто совершенно новое, следуя законам природы? Или, другими словами: каков источник творческой способности вселенной? Это будет главным вопросом данной книги.

## Целое и его части

Для большинства людей очевидно, что вселенная образует единое целое. Мы признаем, что огромное число составляющих сопутствуют друг другу, образуя все совокупное бытие, однако, кажется, что они обретаются вместе, если и не в сотрудничестве, то, по крайней мере, на условиях мирного сосуществования. Говоря коротко, мы обнаруживаем порядок, единство и гармонию в природе там, где могли бы быть противоречия и хаос.

Греческий философ Аристотель создал картину вселенной в тесном согласии с этим интуитивным чувством объединяющей гармонии. Стержневым в философии Аристотеля было понятие *телеологии*, или, грубо говоря, конечной обусловленности. Он предполагал, что отдельные объекты и системы подчиняют собственное поведение общему плану или судьбе. Особенно это очевидно, по его утверждению, в живых системах, где составляющие части действуют в сотрудничестве, чтобы достичь конечной цели или конечного продукта. Аристотель верил, что живые организмы ведут себя как единое целое, поскольку существует полная и совершенная «идея» всего организма еще до того, как он развился. Развитие и поведение живого, таким образом, направляется и контролируется, согласно общему плану так, чтобы он мог успешно приблизиться к предуготовленному для него концу.

Аристотель распространил эту анимистическую философию на весь космос в целом. Существует, утверждал он, то, что сегодня

мы можем назвать *космическим планом*. Вселенная рассматривалась как своеобразный гигантский организм, раскрывающийся неким систематическим и управляемым путем навстречу предписанной ему участи.

Финализм и телеология аристотелианства позднее проникли в христианское богословие и даже сейчас составляют основание западной религиозной мысли. Согласно христианскому вероучению, космический план действительно существует и представляет божественный проект вселенной.

Полной противоположностью Аристотелю были греческие атомисты, например Демокрит, учившие о том, что мир – не что иное, как атомы, движущиеся в вакууме. Все структуры и формы считались лишь по-разному расположенными атомами, а все изменения и процессы объяснялись исключительно изменением положения атомов.

Для атомиста вселенная – это механизм, где каждый составляющий его атом движется под полным контролем слепых сил, производимых его соседями. Согласно этой схеме, конечных причин не бывает и нет общего плана или конечного состояния, к которому все эволюционирует. Телеология отвергается как нечто мистическое. Единственные причины, вызывающие перемены, обуславливаются формой и движением других атомов.

Атомизм не подходит для того, чтобы описать, не говоря уж о том, чтобы объяснить, порядок и гармонию мира. Рассмотрим живой организм. Трудно противиться впечатлению, будто атомы организма *сотрудничают*, так что их коллективное поведение составляет единое целое. Организованное функционирование биологических систем не может быть представлено путем описания, в котором каждый атом всего лишь отталкивается либо притягивается вслепую его соседями, безотносительно общего порядка. Таким образом, уже в Древней Греции наличествовал глубокий конфликт между целостным подходом и редукционизмом, сохранившийся до наших дней. С одной стороны стояла склонная к синтезу и целеустремленная вселенная Аристотеля, а с другой – строго материалистический мир, который в конечном итоге можно разложить или редуцировать до простой механической активности его элементарных составляющих.

В последующие столетия Демокритов атомизм стал лицом того, что мы называем сейчас научным подходом к миру. Идеи

Аристотеля были изгнаны из физики во времена Ренессанса. В биологии они выжили немного дольше, и то лишь потому, что живые организмы столь явно демонстрируют целенаправленное поведение. Однако теория эволюции Дарвина и развитие современной молекулярной биологии привели к подчеркнутому отказу от любых видов анимизма или финализма, и большинство современных биологов придерживается крайне механистичного и редукционистского подхода. Сегодня живые организмы рассматриваются, главным образом, лишь как сложные машины, запрограммированные на молекулярном уровне.

Научная парадигма, согласно которой все физические явления сводятся к механическому поведению их первичных составляющих, оказалась крайне успешной и привела ко многим новым и важным открытиям. Тем не менее не знающий различий редукционизм вызывает все большую неудовлетворенность и ощущение того, что целое действительно больше суммы его частей. Анализ и редукция всегда будут играть главную роль в науке, однако многие люди не могут смириться с тем, что эта роль единственная. Особенно в физике синтетический или целостный подход все больше входит в моду при решении определенных задач.

Но, даже если признать необходимость дополнить редукционизм целостным взглядом на природу, многие ученые все еще будут отвергать идею космического плана как чересчур мистическую, поскольку она означает, что вселенная имеет цель и представляет собой произведение метафизического проектировщика. Подобные убеждения в течение длительного времени считались запретными среди ученых. Возможно, кажущееся единство вселенной – всего лишь антропоцентрическая проекция. Или, может быть, вселенная ведет себя *так, будто* она пользуется планом или проектом, но, тем не менее, по-прежнему развивается, слепо следуя бесцельным законам?

Эти глубокие бытийные вопросы сопутствовали прогрессу знания с самой зари научной эпохи. Столь уместными сегодня их делает бурный характер последних открытий в космологии, фундаментальной физике и биологии. В следующих главах мы увидим, как ученые, строящие картину того, как организованность и сложность появляются в природе, начинают понимать происхождение творческой силы вселенной.

## Пропавшая стрела

### Вселенная как часовой механизм

**Л**юбой опытный стрелок знает, что если пуля не попала в мишень, значит, он плохо прицелился. Банальное утверждение, казалось бы, но в нем кроется глубокая истина. То, что пуля летит от дула к мишени по строго определенной траектории, которая полностью зависит от величины и направления вектора начальной скорости, наглядно демонстрирует так называемую предсказуемость природы. Стрелок, полагаясь на неизменную взаимосвязь между причиной и следствием, может заранее вычислить направление полета пули. Он знает, что если ружье нацелено точно, то пуля поразит цель.

Уверенность стрелка основывается на огромном корпусе знания, известном как классическая механика. Своими корнями она уходит в глубокую древность. Аюбой первобытный охотник, вероятно, не мог не признать, что полет камня, выпущенного из пращи, или стрелы, посланной из лука, не был делом случая. При этом наиболее неопределенным был сам акт предсказания. Однако лишь в семнадцатом веке, с появлением работ Галилео Галилея и Исаака Ньютона, законы движения были впервые адекватно сформулированы. В монументальном труде «Начала», опубликованном в 1687 году, Ньютон изложил свои знаменитые три закона, управляющие движением материальных тел.

Согласно трем законам Ньютона, представленным в виде математических уравнений, движение некоего тела в пространстве можно определить по действующим на него силам, при условии, что его начальное положение и скорость известны. В случае с

пулей единственная значимая сила – притяжение земли. Под ее действием траектория пули становится параболической. Ньютон также признавал, что гравитация влияет и на орбиты планет, движущихся вокруг Солнца, делая их эллипсами. Огромное достижение Ньютона состоит в том, что его законы правильно описывают не только форму, но и период движения планет по орбите. Таким образом, он показал, что даже небесные тела подчиняются всеобщим законам движения. Ньютону и его современникам удалось создать на тот момент наиболее точное и подробное описание функционирования Солнечной системы. А астроном Галлей, например, рассчитал орбиту своей прославленной кометы и предсказал дату ее возвращения.

По мере увеличения точности (и сложности) расчетов стало возможным все более точно предсказывать положение планет, комет и астероидов. Если же возникало какое-то несоответствие, его устраняли, пытаясь выявить воздействие некоей неучтенной силы. Планеты Уран, Нептун и Плутон были открыты только благодаря тому, что их гравитационные поля вызывали в орбитах других планет возмущения, которые нельзя было объяснить иначе.

Несмотря на то, что точность любого расчета, очевидно, ограничена, среди ученых того времени преобладало мнение о том, что, в принципе, движение любой материальной частицы во вселенной можно рассчитать с произвольной точностью, если учесть все действующие силы. Это предположение, казалось, нашло замечательное подтверждение в астрономии, где гравитация – это основная сила. Однако не так все просто оказалось в случае с малыми телами, подверженными действию разнообразных малоизученных сил. Тем не менее предполагалось, что законы Ньютона применимы ко *всем* частицам материи, не исключая и отдельные атомы.

И тут пришло время сделать те ошеломительные выводы, которые напрашивались сами собой. Если законы Ньютона действуют на каждую частицу материи, так что ее движение полностью определяется первоначальными условиями и соотношением сил, проистекающих от других частиц, тогда все, происходящее во вселенной, вплоть до малейшего движения атома, можно предсказать с абсолютной точностью.

Это захватывающее предположение озвучил французский физик Пьер Лаплас в своем знаменитом утверждении<sup>1</sup>:

Представьте себе разум, который для любого данного момента знал бы все силы, управляющие природой, и относительное расположение ее составных частей. Если бы он, кроме того, был достаточно обширен, чтобы подвергнуть эти данные анализу, то обнял бы в единой формуле движения самых огромных тел во вселенной и самого легкого атома; для него не было бы ничего неясного, и будущее, как и прошлое, предстало бы у него перед глазами.

Утверждение Лапласа подразумевает, что все, что когда-либо произошло во вселенной, все, что происходит сейчас и произойдет когда-либо в будущем, было с неумолимостью предопределено в самый первый момент времени.

Будущее, возможно, и кажется нам неопределенным, однако оно *уже прописано во всех мельчайших подробностях*. Какое бы решение ни принял человек, что бы он ни сделал, ему не удастся изменить судьбу даже одного атома, поскольку и мы тоже – часть физической вселенной. Какими бы свободными мы себя ни чувствовали, любое наше действие, по Лапласу, полностью предопределено. В самом деле, он низвел космос до гигантского часового механизма, где каждая деталь с математической точностью, рабски и безупречно исполняет некую предзаданную функцию. Таково общее следствие механики Ньютона.

## Необходимость

Детерминизм, заложенный в Ньютонову картину мира, можно выразить так: любое событие происходит *по необходимости*. Оно *должно* произойти; у вселенной нет иного выбора. Давайте обратим более пристальное внимание на определение такой необходимости.

Основа парадигмы Ньютона состоит в том, что миру или его частям можно приписать некое *состояние*. Им может быть положение и скорость частицы, температура и давление газа или же некий более сложный набор показателей. Когда что-то случается в этом мире, меняются и состояния физических систем. В пара-

---

<sup>1</sup> P. S. Laplace, *A Philosophical Essay on Probabilities* (New York, Dover, 1951, original publication 1819), p. 4.

дигме Ньютона эти изменения можно описать посредством сил, действующих на данную систему, в соответствии с определенными законами динамики, которые сами по себе не зависят от состояния системы.

В большой степени успех этого научного подхода объясняется тем, что ученому удалось открыть универсальные законы, позволяющие выделить некоторые общие черты для разных физических систем. Например, пуля летит по параболе. Если бы для каждой системы понадобилось собственное описание, известная нам наука прекратила бы свое существование. С другой стороны, мир, в котором для описания всего происходящего хватает только законов движения, был бы, в самом деле, скучен. На практике этими законами описываются *типы* поведения системы. В каждом отдельном случае их нужно применять исходя из начальных условий. К примеру, стрелку следует узнать направление и скорость движения пули в дуле оружия, чтобы с точностью предсказать ее полет по параболе в каждом конкретном случае.

Состояния системы и законы динамики связаны таким образом, что, согласно законам, состояние системы в один момент *определяет* ее состояния во все последующие моменты. Этот детерминизм, заложенный в законах механики Ньютона, стал преобладать во всей научной мысли. На нем основывается *опытное исследование* в науке, поскольку детерминизм позволяет делать предсказания.

Научный подход зиждется на способности ученого отражать или воссоздавать реальные события с использованием математического аппарата. Физик-теоретик, например, может вывести релевантные динамические законы в виде уравнений, подставить в них данные о начальном состоянии моделируемой им системы, а затем решить эти уравнения, чтобы выяснить, как эта система изменится. Последовательность событий, происходящих в реальной системе, отображается математическим языком. В этом смысле можно утверждать, что математика способна подражать реальности.

Следует отметить некоторые требования, которые предъявляют к уравнениям, чтобы описать некую меняющуюся физическую систему. Очевидно, во-первых, что уравнение для всех состояний системы должно иметь решение. Далее, это решение должно быть единственным, иначе математика примется подражать более чем



одной возможной реальности. Это двойное условие – существовать и быть единственным – серьезно ограничивает тип уравнений, которые могут быть задействованы. На практике физик обычно пользуется дифференциальными уравнениями второго порядка. Детерминистским связям между последовательными состояниями физических систем соответствуют логические зависимости между математическими величинами в уравнении. Нагляднее всего это можно наблюдать, когда компьютер решает уравнения, чтобы создать модель развития некоей динамической системы. Здесь каждый новый этап расчетов логически вытекает из предыдущего.

За три столетия, прошедшие со времени публикации «Начал», физика пережила значительные потрясения, а изначальная Ньютонова картина мира чрезвычайно расширилась. Сейчас материальные объекты, действительно лежащие в основе мира, рассматриваются не как частицы, а как *поля*. Частицы считаются возмущениями в этих полях, а потому теперь они не первичная величина, а производная. Тем не менее к полям до сих пор применяют парадигму Ньютона и измеряют их по законам движения плюс начальные условия. Суть этой парадигмы осталась прежней даже после квантовой и релятивистской революций, которые так сильно изменили наши представления о пространстве, времени и материи. До сих пор во всех случаях некую систему описывают как набор состояний, которые меняются по строгим, неизменным законам динамики. Будь то поле или частица, что бы ни происходило – все случается «по необходимости».

## Редукция

Парадигма Ньютона хорошо согласуется с философией атомизма, обсуждавшейся в предыдущей главе. Поведение макроскопического тела можно свести к движению составляющих его атомов, перемещающихся в соответствии с законами Ньютоновой механики. Разбивать физическую систему на мельчайшие составляющие и пытаться объяснить ее поведение на самом нижнем уровне – значит прибегать к *редукционизму*. Он оказал мощное воздействие на научное мышление.

Редукционизм так глубоко проник в физику, что ее конечная цель теперь состоит в том, чтобы дать описание фундаментальным

полям (а значит, и частицам) и их динамическим взаимодействиям. В последние годы в этом направлении были достигнуты выдающиеся успехи. В техническом плане цель теоретика – вычислить формулу, известную как лагранжиан и названную так в честь французского физика Жозефа Лагранжа, который нашел изящное математическое выражение для законов Ньютона. На основании функции Лагранжа для некоей системы (состоящей из полей, частиц или из них обоих) можно вывести динамические уравнения, прибегнув к строгой математической процедуре.

Этот метод вызвал к жизни своеобразную философию, которая состоит в убежденности, что стоит только открыть лагранжиан, точно описывающий некую систему, как ее поведение можно считать «объясненным». Короче говоря, *лагранжиан равнозначен объяснению*. Таким образом, если некоему теоретику удастся вывести лагранжиан, верно описывающий все наблюдаемые поля и частицы, то ничего больше, по-видимому, и не потребуется. И если кто-нибудь попросит объяснить ему вселенную целиком, во всей сложности и хитросплетениях ее внутренних связей, теоретик лишь укажет на лагранжиан со словами: «Вот! Я объяснил ее всю!»

Уверенность в том, что все в конечном итоге восходит к единому основополагающему лагранжиану, почти не подвергается сомнению в физическом сообществе. Кратко ее выразил Леон Ледерман, директор Национальной ускорительной лаборатории Ферми, расположенной недалеко от Чикаго: «Мы надеемся объяснить вселенную целиком в одной простой формуле [т.е. в лагранжиане], которая уместится у вас на футболке»<sup>2</sup>.

Не так давно физик-теоретик Стивен Хокинг высказался в том же духе, выступая с приветственной речью по случаю своего назначения на должность профессора математики в Кембридже. Возможно, как и подобает человеку, который занял место, некогда принадлежавшее Ньютону, Хокинг нимало не сомневается в конечном успехе парадигмы Ньютона. Вдохновленный тем, как быстро новый подход, известный как супергравитация, продвигает вперед поиски основополагающего лагранжиана для всех известных полей, Хокинг выступил с лекцией «Близок ли конец теоретической

<sup>2</sup> Richard Wolkowicz, 'Quark City', *Omni*, February 1984, p. 41.

физики?» Конечно, он имел в виду, что такой лагранжиан станет высшей точкой развития для теоретической физики, и после него ей останется заниматься лишь техническими вопросами. Мир будет «объяснен».

## Что же произошло со временем?

Если будущее полностью определяется настоящим, то в каком-то смысле будущее уже содержится в настоящем. Вселенной можно приписать состояние в настоящем, содержащее всю информацию, необходимую для строительства будущего и, как показывает обратное преобразование этого аргумента, прошлого тоже. Таким образом, все существование вложено в замороженном состоянии в единственное мгновение. Время существует лишь как параметр для измерения интервала между двумя событиями. Ни прошлое, ни будущее не имеют реального значения. Фактически нет ничего, что бы *происходило*.

Пригожин назвал время «забытым измерением» из-за того бессилия, которое приписывалось ему в Ньютоновой картине мира. В обыденном же опыте время совсем не такое. Субъективно мы ощущаем, что мир меняется, эволюционирует. Прошлое и будущее имеют явное – и различающееся – значение. Мир предстает перед нами как кино. Присутствует деятельность, что-то случается; время *течет*.

Субъективное видение деятельного, меняющегося мира подкрепляется наблюдениями. Изменения, случающиеся вокруг нас, – нечто большее, чем простая Демокритова перестановка атомов в вакууме. В самом деле, атомы перегруппируются, но происходит это систематическим образом, позволяя отличить прошлое от будущего. Стоит лишь посмотреть кино на обратной перемотке, чтобы заметить многие ежедневные физические процессы, асимметричные во времени. И не только на примере собственного непосредственного опыта. Вселенная как целое вовлечена в *однонаправленное изменение*. Это нарушение симметрии часто символически изображают в виде воображаемой «стрелы времени», идущей от прошлого к будущему.

Как же примирить эти две отличающиеся точки зрения на время?

Время Ньютона заимствовало одно из главных свойств законов движения: они обратимы. То есть эти законы не отличают «время вперед» от «времени назад»; стрела времени может указывать в обоих направлениях. По логике этих законов фильм, показанный в обратном порядке, будет совершенно приемлемой последовательностью реальных событий. Однако, с нашей точки зрения, такая обратная последовательность невозможна, поскольку большинство физических процессов, происходящих в реальном времени, *необратимы*.

Необратимость почти всех природных явлений – простейший факт опыта. Попробуйте представить себе, как можно разбить яйцо обратно, заставить реку течь в гору либо вымешать молоко из чая. В этих случаях повернуть время вспять просто невозможно. Однако здесь возникает любопытный парадокс. Если основополагающие законы, управляющие деятельностью каждого атома этих систем, обратимы, то на чем же основывается необратимость?

Намек на ответ был найден в середине девятнадцатого столетия при изучении термодинамики. Физики, интересовавшиеся работой тепловых двигателей, вывели ряд законов, связанных с теплообменом и преобразованием тепла в другие формы энергии. Из них так называемый *второй закон термодинамики* стал проводником к стреле времени. Согласно первоначальной формулировке второго закона, грубо говоря, тепло не может само по себе перетекать от холодных тел к теплым. Это, конечно, очень нам знакомо по обыденному опыту. Когда мы опускаем лед в теплую воду, вода растапливает лед, поскольку тепло течет от теплой жидкости к холодному льду. Обратный процесс, когда тепло покидает лед и делает воду еще теплее, наблюдать невозможно.

Эти идеи получили четкое выражение благодаря введению величины, названной *энтропией*. В простой системе, например, в колбе с водой или воздухом, если во всей колбе температура однородна, ничего не произойдет. Система остается в неизменном состоянии, называемом *термодинамическим равновесием*. Конечно, колба будет содержать тепловую энергию, но эта энергия ничего не сможет сделать. Она бессильна. В противоположном случае, если энергия тепла будет сосредоточена в «горячем участке», тогда что-то произойдет, например конвекция и изменения в плотности. Эти события будут происходить до тех пор, пока тепло не рассеется и система не достигнет равновесия при однородной температуре.

В определении энтропии такой системы задействованы и тепловая энергия, и температура, оно состоит в том, что чем больше «потенция» тепловой энергии, тем ниже энтропия. Состояние термодинамического равновесия, при котором потенция тепловой энергии нулевая, обладает максимальной энтропией. В связи с этим второй закон термодинамики можно выразить следующим образом: *В закрытой системе энтропия не может уменьшиться.* Если система выходит из состояния покоя, например, при неоднородном распределении температур, т.е. при относительно малой энтропии, тепло будет распространяться, а энтропия – расти, пока не достигнет максимума, когда температура выровняется и установится термодинамическое равновесие.

Требование закрытости системы важно. Если система сможет обмениваться теплом или другими формами энергии с окружающей средой, то энтропию, несомненно, можно будет снизить. Именно это и происходит, например, в холодильнике, где тепло извлекается из холодных тел и переносится в теплую окружающую среду. Однако за это нужно заплатить определенную цену, в случае с холодильником это – расход энергии. Если принять эту цену во внимание и включить холодильник, его энергоснабжение, окружающую атмосферу и прочее в одну большую систему, то с учетом всего общая энтропия системы вырастет, хотя на местном уровне (внутри холодильника) она сократилась.

## Случайность

Чтобы точно уяснить себе, как действует второй закон, полезно будет изучить пример теплообмена между газами. В девятнадцатом веке кинетическая теория газов была разработана Джеймсом Клерком Максвеллом в Великобритании и Людвигом Больцманом в Австрии. Эта теория рассматривала газ как огромное скопление молекул в нескончаемом хаотическом движении, постоянно сталкивающихся друг с другом и стенками емкости. Температуру газа связали с уровнем возбуждения молекул, а давление поставили в зависимость от непрекращающихся ударов о стенки емкости.

При помощи этой яркой картины становится очень легко понять, почему тепло перетекает от теплого к холодному. Представьте, что в одной части сосуда газ горячее, чем в другой. Более

быстро движущиеся молекулы в горячей области скоро передадут часть избыточной энергии своим более медленным соседям посредством многократных столкновений. Если молекулы движутся беспорядочно, то очень скоро избыточная энергия распределится более или менее равномерно и будет распространяться по всему сосуду, пока не установится равновесная температура.

Причину, по которой мы рассматриваем такое выравнивание температуры как необратимое, лучше всего пояснить на примере тасования карт. Эффект столкновения молекул сходен со случайным перемешиванием колоды карт. Если вы разложите карты в определенном порядке – например по номерам и масти, – а затем перетасуете колоду, то вы не станете ждать, что вновь перетасованные карты вернутся к первоначальной упорядоченности. Случайное тасование обычно создает путаницу. Оно превращает порядок в одну путаницу, а эту путаницу – в новую путаницу, но практически никогда не превращает путаницу в порядок.

Можно прийти к выводу, что переход от упорядоченной последовательности карт к путанице необратим и определит стрелу времени таким образом: порядок → беспорядок. Этот вывод, однако, зависит от одной тонкости. Есть предположение, что мы можем опознать упорядоченную последовательность, когда видим ее, однако не отличаем одну спутанную последовательность от другой. С учетом этого предположения ясно, что карточных последовательностей, которые будут обозначены как «спутанные», окажется гораздо больше тех, которые назовут «упорядоченными». Отсюда следует, что, пока карты действительно тасуются случайно, спутанные последовательности будут появляться гораздо чаще, чем упорядоченные, поскольку их значительно больше. По-другому выразить это можно следующими словами: последовательность, выбранная наугад, с гораздо большей вероятностью окажется спутанной, чем упорядоченной.

Пример с тасованием карт помогает ввести две важные идеи. Во-первых, концепция необратимости была поставлена в зависимость от порядка и беспорядка, концепций, которые отчасти субъективны. Если придавать всем последовательностям карт равное значение, то не возникло бы понятия «огромного количества состояний путаницы» и тасование рассматривали бы просто как преобразование одной частной последовательности карт в другую

частную последовательность. Во-вторых, здесь задействован основополагающий момент *статистики*. Переход от порядка к беспорядку не *полностью* неизбежен. Конечно, существует крохотная, но не нулевая возможность того, что за счет тасования спутанная последовательность карт превратится в порядок по масти. На самом деле, если тасовать достаточно долго, то проявятся *все* возможные последовательности, в том числе и первоначальная.

Вследствие этого кажется, что если тасовать карты без устали, то в конце концов можно вернуться к изначальной упорядоченной последовательности. Очевидно, что разрушение первоначального упорядоченного состояния в конечном счете не является необратимым: тасованию карт не свойственна какая-либо временная асимметрия. Следовательно, стрела времени здесь – это иллюзия? Не совсем. Конечно, можно сказать, что *если* первоначально карты были разложены по порядку, а затем их перемешали несколько раз, то наиболее вероятно, что после колода будет менее упорядочена, чем до того. Однако эта стрела явно не происходит от тасования как такового, скорее, она обязана своим происхождением особой, упорядоченной природе первоначального состояния.

Эти соображения довольно прямолинейно подводят нас к случаю с газом. Состояние газа в каждый момент представлено путем обозначения местоположения и скорости каждой молекулы. Если бы нам действительно удалось наблюдать газ на молекулярном уровне и если бы мы рассматривали все состояния как одинаково значимые, то стрелы времени не существовало бы. Газ просто «перетасовывал бы» себя из одного частного состояния в другое. Однако на практике нас не интересует точное положение и скорость каждой молекулы, да и в действительности мы не можем наблюдать их. Мы рассматриваем большинство состояний как попросту «спутанные» и не различаем их. Если изначально газ находится в относительно упорядоченном состоянии (таково состояние, при котором на одном конце горячо, а на другом – холодно), тогда, скорее всего, столкновения молекул приведут к менее упорядоченному состоянию, по одной простой причине: существует значительно больше способов сделать газ хаотичным, а не упорядоченным.

Выразить все это в количественном выражении можно, если подсчитать число способов, которыми могут быть организованы

молекулы на микроскопическом уровне, притом что на макроскопическом уровне каких-либо перемен заметно не будет. Этот предмет называется *статистической механикой*. Объем коробки делят на небольшие секции, представляющие предел разрешающей способности наших инструментов. Далее предполагается, что молекула либо находится в определенной секции или же ее там нет. Нам не важно, где точно в секции она располагается. Нечто подобное продельвается и в отношении скоростей. Дальнейшее вычисление разнообразных перестановок молекул между секциями – дело нехитрое. Теперь состояние газа, с точки зрения макроскопического наблюдателя, будет представлено за счет определения чего-то наподобие количества молекул в каждой секции.

Далее, некоторые состояния газа будут достижимы крайне немногочисленными способами; например, состояние, когда все молекулы в одной секции. Другие состояния будут достижимы огромным количеством способов. В целом, чем менее упорядоченно состояние, тем больше число путей, которыми молекулы можно распределить между секциями, чтобы достичь его.

Одно состояние будет представлять «максимальный беспорядок». Это состояние может быть достигнуто наибольшим количеством способов. Отсюда следует, что если состояния «тасуются» наугад, то наиболее вероятным конечным состоянием будет максимально неупорядоченное состояние. Как только газ достиг этого состояния, он, скорее всего, останется в нем, поскольку дальнейшее случайное тасование лишь с еще большей вероятностью вновь воспроизведет это состояние, достигаемое наибольшим числом способов, чем другое состояние, менее разнообразное. В связи с этим состояние максимального беспорядка соответствует условиям термодинамического равновесия.

Можно установить статистическую величину, представляющую «степень беспорядка» газа. Больцман доказал, что пока молекулы сталкиваются хаотичным образом (в довольно точном смысле), то эта величина будет, с подавляющей вероятностью, расти. Как мы видим, такое поведение ничем не отличается от термодинамического свойства, называемого энтропией. Таким образом, Больцман нашел в статистической механике величину, соответствующую ключевой термодинамической величине энтропии. И доказал он это, продемонстрировав, по крайней мере на простой модели газа,



как второй закон термодинамики делает свое дело, увеличивая энтропию, пока она не достигает максимума.

Труды Максвелла и Больцмана обнаружили стрелу времени посредством введенной ими в физику концепции *случайности*. Французский биолог Жак Моно описывал природу как взаимодействие между случайностью и необходимостью. В мире Ньютоновой необходимости нет стрелы времени. Больцман обнаружил некую стрелу, спрятанную в молекулярной рулетке, в которую играет природа.

## Умирает ли вселенная?

Вероятно, самый страшный результат, когда-либо полученный в истории науки, впервые был обнаружен немецким физиком Германом фон Гельмгольцем в 1854 году. Вселенная, заявил Гельмгольц, обречена.

Это апокалипсическое предсказание основывалось на втором законе термодинамики. Безжалостный рост энтропии, сопровождающий любой естественный процесс, в итоге может привести лишь, заявил Гельмгольц, к прекращению любой вызывающей интерес активности повсюду во вселенной, в то время как весь космос неотвратно соскальзывает в состояние термодинамического равновесия. Каждый день вселенная истощает собственный запас доступной свободной энергии, расходуя ее на бесполезное тепло. Это неизбежное проматывание конечных и невозстановимых ресурсов означает, что вселенная медленно, но верно умирает, задыхаясь в собственной энтропии.

Наблюдать это нескончаемое наступление космического упадка мы можем следующим образом: Солнце и звезды сжигают свои запасы ядерного горючего, разливая высвобожденную энергию в глубинах пространства. Рано или поздно это горючее закончится и звезды померкнут, оставив после себя холодную, темную, безжизненную вселенную. Ни какой-либо новый процесс, ни механизм, сколь бы хитроумен он ни был, не смогут отменить эту обреченность, поскольку любой физический процесс подчиняется императиву второго закона.

Этот мрачный прогноз известен как «тепловая смерть» вселенной. Он оказал сильное воздействие на науку и философию

в прошлом веке. Рассмотрим, к примеру, реакцию Бертрانا Рассела<sup>3</sup>:

То, что все труды всех времен, вся преданность, вся дневная яркость человеческого гения приговорены к уничтожению, и весь храм человеческих достижений неизбежно должен быть погребен под обломками разрушенной вселенной – все это, если и не совсем бесспорно, но почти настолько определено, что никакая философия, отрицающая это, не может надеяться на выживание. Лишь опираясь на эти истины, только на крепком основании нестигаемого отчаяния можно выстроить надежное обиталище для души.

Некоторые мыслители оставили без внимания ужас тепловой смерти и нашли выход. Философ-марксист Фридрих Энгельс верил, что в конечном итоге второго закона термодинамики можно избежать<sup>4</sup>:

Неким способом, продемонстрировать который позднее станет научно-исследовательской задачей, нужно будет научиться преобразовывать тепло, излученное в пространство, в другой вид движения, посредством которого его можно будет хранить снова и активизировать. Таким образом, исчезает главная трудность на пути обратного преобразования потухших солнц в раскаленный пар.

Большинство ученых, однако, смогли лишь подтвердить полностью непреложную природу второго закона и безнадежность попыток избежать неумолимого увеличения энтропии. Сэр Артур Эддингтон сформулировал это так<sup>5</sup>:

Закон о постоянном увеличении энтропии – второй закон термодинамики – занимает, по моему мнению, главенствующее положение среди законов Природы. Если кто-нибудь укажет вам, что ваша излюбленная теория вселенной противоречит уравнениям Максвелла – тем хуже для уравнений Максвелла. Если окажется, что она противоречит наблюдениям – ну, эти экспериментаторы, на самом деле, иногда делают грубые ошибки. Но если окажется, что ваша теория противоречит второму закону термодинамики, я не смогу хоть как-либо обнадежить вас; ей останется лишь пасть в глубочайшем позоре.

Итак, кажется, что Больцман с коллегами открыл стрелу времени, но она указывает «в неверном направлении», по мнению многих людей, в направлении вырождения и смерти.

Наряду со стрелой энтропии существует и другая стрела времени, настолько же основополагающая и не менее тонкая по

<sup>3</sup> B. Russell, *Why I Am Not a Christian* (New York, Allen & Unwin, 1957), p. 107.

<sup>4</sup> F. Engels, *Dialectics of Nature* (London, Lawrence & Wishart, 1940), p. 23.

<sup>5</sup> A. S. Eddington, *The Nature of the Physical World* (Cambridge University Press, 1928), p. 74.

природе. Ее происхождение окутано тайной, но ее присутствие невозможно отрицать. Я имею в виду то, что вселенная *прогрессирует* – посредством устойчивого роста структурированности, организованности и сложности – в сторону все более развитых и совершенных состояний материи и энергии. Это одностороннее движение вперед можно назвать оптимистической стрелой, в отличие от пессимистической стрелы второго закона.

Некоторым ученым свойственно попросту отрицать существование оптимистической стрелы. Возникает вопрос: почему? Возможно, потому, что наше понимание сложности все еще рудиментарно, тогда как второй закон имеет крепкое основание. Возможно, отчасти также оттого, что ей до сих пор сопутствует привкус антропоцентрической сентиментальности, а также популярность среди многих религиозных мыслителей. Тем не менее прогрессивная природа вселенной – объективный факт, и его нужно как-то примирить со вторым законом термодинамики, который почти наверняка неизбежен. Только в последние годы успехи в изучении сложности, самоорганизации и коллективных феноменов показали, как эти две стрелы могут сосуществовать в действительности.

## Проблема моделирования

«**В**селенная не создана до конца, она непрерывно продолжает создаваться. Ее рост, возможно, неограничен...» Так писал Анри Бергсон<sup>1</sup>, один из выдающихся философов двадцатого столетия. Бергсон признавал, что новые формы и структуры вступают в существование постоянно, вследствие чего вселенная продвигается вперед или эволюционирует по определенной стреле времени. Современная наука подтверждает это: вселенная началась с бескачественной простоты, и со временем ее конструкция становится все более искусной.

Хотя эта однонаправленность очевидна, нелегко определить, какое из свойств вселенной развивается. Один из кандидатов – сложность. Первозданная вселенная, вероятно, пребывала в состоянии крайней – возможно, наибольшей – простоты. И наоборот, в текущую эпоху сложность изобилует во всех размерностях – от молекул до гигантских скоплений галактик. Таким образом, существует нечто вроде закона возрастающей сложности. Но изучение сложности до сих пор во многом не выросло из детского возраста. Остается надеяться, что благодаря изучению сложных систем в разнообразных отраслях науки будут открыты новые универсальные принципы, которые, возможно, прольют свет на то, как сложность возрастает со временем.

Во времена моего детства центральное отопление было у немногих. Когда я вставал с постели ранним утром холодного зимнего дня, мне нравилось разглядывать сверкавшие в утреннем свете замысловатые узоры инея, украшавшие окна спальни. Даже те, кому не довелось узнать этого на собственном опыте, удивились

<sup>1</sup> H. Bergson, *Creative Evolution* (London, Macmillan, 1964), p. 255.

бы тщательно продуманному строению снежинки. Поразительным образом оно сочетает в себе сложность с шестиугольной симметрией.

Мир природы изобилует сложными структурами, которые сплавляют воедино правильное с неправильным: береговые линии, леса, горные цепи, ледниковые щиты, скопления звезд. Материя проявляется, казалось бы, в неограниченном разнообразии форм. Как же подступиться к их научному изучению?

Главная трудность в том, что по своей природе сложные формы обладают высокой степенью индивидуальности. Мы узнаем в снежинке снежинку, но ни одна из них не похожа на другую. Традиционная наука пытается дать исчерпывающее объяснение в рамках общих принципов. Объяснять форму снежинки или береговой линии таким образом совершенно невозможно.

Ньютонова парадигма, основанная на том разделе математики – дифференциальном исчислении, который рассматривает изменение как плавное и непрерывное, не слишком приспособлено для операций с неправильным. Традиционный подход к сложным, нерегулярным системам состоит в создании их модели на основе аппроксимации к регулярным системам. Чем более нерегулярна реальная система, тем менее удовлетворительным становится такое моделирование. Например, галактики не распределены ровно по пространству, но объединяются в скопления, нити, пласты и другие, зачастую запутанные и геометрически неправильные формы. Попытки смоделировать эти свойства по методу Ньютона связаны с использованием гигантских компьютерных моделей, требующих многих часов даже на современных машинах.

Когда дело доходит до самых высокоорганизованных систем, таких как живая клетка, задача моделирования путем аппроксимации к простым, непрерывным и плавно изменяющимся свойствам, становится безнадежной. Именно по этой причине попытки социологов и экономистов подражать физикам и описывать предмет исследований при помощи только математических уравнений редко бывают убедительными.

В общем, сложные системы не удовлетворяют требованиям традиционного моделирования по четырем причинам. Первая относится к их образованию. Сложность чаще появляется внезапно, а не путем медленной и непрерывной эволюции. Мы встретим мно-

жество подтверждений этого. Во-вторых, сложные системы часто (хотя и не всегда) имеют очень большое количество составляющих (степеней свободы). В-третьих, они редко представляют собой закрытые системы; в самом деле, обычно их направляет сама присутствующая им крайняя открытость к сложной окружающей среде. И наконец, такие системы в подавляющем числе случаев «нелинейны» – эту важную концепцию мы тщательно изучим в следующем разделе.

Некоторые полагают, что природная сложность – это своего рода досадное отклонение от нормы, застопорившее научный прогресс. Лишь совсем недавно появился совершенно новый взгляд, согласно которому сложность и нерегулярность рассматривают как норму, а плавные кривые – как исключение. При традиционном подходе сложные системы считают усложненными скоплениями простых систем. То есть сложные или нерегулярные системы в принципе *можно разложить* на простые составляющие, и, как полагают, поведение целого можно свести к поведению составляющих частей. Согласно новому подходу, сложные или нерегулярные системы по праву играют первостепенную роль. Их просто нельзя «разрубить» на серии простых кусочков так, чтобы при этом сохранились характерные для них свойства.

Можно назвать этот новый подход синтетическим или целостным, в отличие от аналитического или редуccionистского, поскольку он рассматривает систему как целое. Так же, как при редуccionистском подходе, некие идеализированные простые системы (например, элементарные частицы) используются в качестве строительных блоков, следует искать идеализированные сложные или нерегулярные системы, чтобы использовать их в целостном подходе. Далее реальные системы можно рассматривать как приближенные к этим идеализированным сложным или нерегулярным системам.

Новая парадигма означает, что философия, господствовавшая триста лет подряд, перевернута с ног на голову. Говоря словами физика Предрага Цвитановича: «Выкиньте ваши старые уравнения и поищите совета в повторяющемся рисунке облаков»<sup>2</sup>. Короче говоря, это не что иное, как совершенно новый этап в описании природы.

<sup>2</sup> P. Cvitanović (ed.), *Universality in Chaos* (Bristol, Adam Hilger, 1984), p. 4.

## Линейные и нелинейные системы

Каковы бы ни были недостатки традиционного моделирования, на самом деле многие физические системы можно удовлетворительным образом приближенно представить как регулярные и непрерывные. Часто в этом задействовано свойство, играющее решающую роль и известное как *линейность*.

Линейной называется такая система, в которой причина и следствие пропорциональны относительно друг друга. В качестве простого примера рассмотрим натягивание резинового шнура.

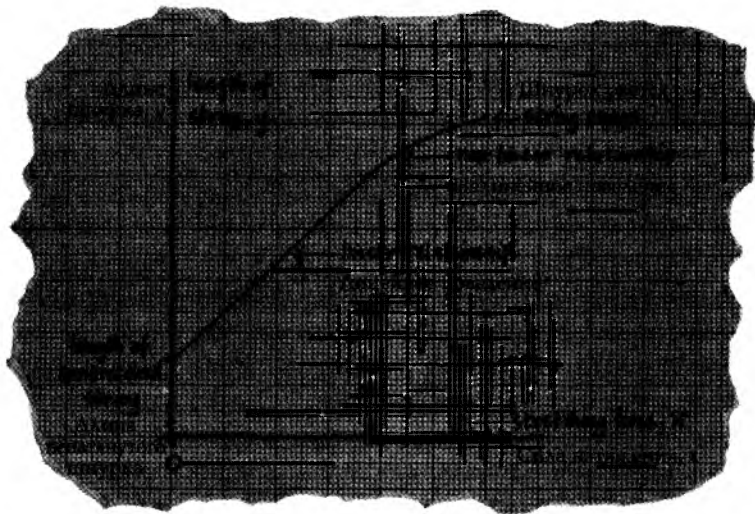


Рис. 1. Утверждается, что длина резинового шнура,  $y$ , «линейно» связана с растягивающей силой,  $x$ , когда график  $y$  относительно  $x$  представляет собой прямую. В случае реального шнура нелинейное поведение вступает в силу при большом натяжении.

Если резина растягивается на определенную длину при определенной силе натягивания, то при двойном натяжении она растягивается вдвое длиннее. Это называется линейным соотношением, поскольку если начертить график, показывающий длину шнура по отношению к силе натяжения, то он будет представлять собой прямую линию (рис. 1). Эту линию можно описать при помощи уравнения  $y=ax+b$ , где  $y$  – длина шнура,  $x$  – сила, а  $a$  и  $b$  – константы.

Если шнурок растянуть намного, его эластичность начнет сдавать, и пропорциональность между силой и натяжением будет потеряна. График отклоняется от прямой линии по мере того, как шнурок растягивается; система становится нелинейной. В конечном итоге шнурок оборвется, и это будет крайне нелинейный ответ на приложенную силу.

Великое множество физических систем описывается величинами, связанными линейно. Важный пример – движение волны. Особая форма волны описывается через решение некоего уравнения (в математическом выражении это будет так называемое дифференциальное уравнение, типичное почти для всех динамических систем). Это уравнение будет обладать также и другими решениями, соответствующими волнам различной формы. Свойство линейности позволяет для получения волны, возникающей при наложении двух волн, являющихся решением уравнения, просто сложить их

Большинство волн, встречающихся в физике, линейны с большой степенью приближенности, по крайней мере, до тех пор, пока их амплитуда остается малой. В случае со звуковыми волнами гармоничность звучания музыкальных инструментов зависит от линейности вибраций в воздухе, на струнах и т.д. Электромагнитные волны, такие как световые и радиоволны, также линейны, что крайне важно для техники связи. Колебания в электрических сетях также очень часто линейны, и большая часть электронного оборудования спроектирована для линейной работы. Нелинейности, случающиеся иногда в неисправном оборудовании, могут привести к искажениям на выходе.

Важнейшее открытие в области линейных систем сделал французский математик и физик Жан Фурье. Он доказал, что любую периодическую математическую функцию можно представить при помощи (вообще говоря, бесконечной) серии чистых синусоидальных волн кратных частот. Это означает, что любой периодический сигнал, как бы сложен он ни был, можно *разложить* на последовательность простых синусоид. По сути, линейность означает, что движение волны, как и любое периодическое действие, можно разбить на части и снова соединить без каких-либо искажений.

Линейность свойственна не только волнам; ею обладают также электрические и магнитные поля, слабые гравитационные поля,



нагрузки и напряжения во многих материалах, тепловой поток, газовая и жидкостная диффузия и многое другое. Большая часть современной науки и технологии обязаны своим происхождением удачному совпадению, состоящему в том, что так много важного и интересного в современном обществе связано с линейными системами. Грубо говоря, линейной является система, в которой целое – всего лишь сумма его частей. Таким образом, как бы сложна ни была линейная система, ее всегда можно понять как сумму, либо наложение, либо мирное сосуществование множества простых частей, присутствующих вместе друг с другом, но не «встающих на пути друг у друга». Поэтому такие системы можно разобрать, или разложить, или редуцировать до их независимых составляющих. Неудивительно, что до сих пор большая часть бремени научного исследования приходилась на развитие технических навыков для изучения и управления линейными системами. В отличие от них, нелинейными системами сильно пренебрегали. В нелинейных системах целое гораздо больше суммы его частей, его нельзя редуцировать или разложить на простые субъединицы, действующие совместно. Свойства, появившиеся в результате, могут быть неожиданными, сложными и с трудом подвергаться математическому анализу.

Однако в последние годы все больше и больше усилий прилагается для изучения нелинейных систем. Важным итогом этих исследований стало то, что даже очень простые нелинейные системы могут демонстрировать чрезвычайное богатство и тонкое разнообразие поведения. Можно предположить, что для сложного поведения требуется сложная система с многочисленными степенями свободы, но это не так. Мы рассмотрим крайне простую нелинейную систему и обнаружим, что ее поведение в действительности бесконечно сложно.

## Мгновенная сложность

Легче всего пониманию поддается тип движения, присущий отдельной точечной частице, которая внезапно перепрыгивает из одного места в другое вдоль одной линии. Мы рассмотрим соответствующий пример, где движение играет определяющую роль, то есть когда каждое местоположение точки полностью определяется

ее предыдущим положением. В этом случае оно определяется раз и навсегда, как только задано первоначальное положение, посредством назначения некоей процедуры или алгоритма для расчета последующих прыжков.

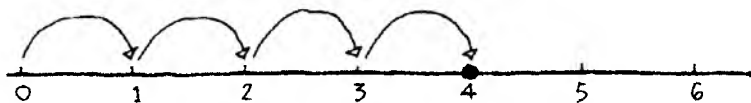


Рис. 2. Каждая точка на линии соответствует числу. «Частица» – это подвижная точка,двигающаяся вдоль линии прыжками по маршруту, предписанному арифметическим алгоритмом. Здесь алгоритм – это всего лишь «плюс один».

Для создания математической модели прыгающего движения можно закрепить за точками на линии числа (рис. 2), а затем применить простой алгоритм, чтобы генерировать последовательность чисел. Далее эта последовательность приводится в соответствие с рядом позиций частицы, при этом каждое использование данного алгоритма представляет одну единицу времени (т.е. «тиканье часов»). Рассмотрим простейший пример. Если мы начнем с точкой на 0 и применим простой алгоритм «плюс один», то получим последовательность 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, ..., которая описывает частицу, прыгающую равными шагами направо. Это пример линейного алгоритма, а получающееся в итоге движение ни в коем случае нельзя назвать сложным.

На первый взгляд кажется, что для создания сложной последовательности чисел нужен сложный алгоритм. Трудно вообразить что-либо более далекое от истины. Рассмотрим алгоритм «умножить на два», который может дать последовательность 1, 2, 4, 8, 16... Этот алгоритм в действительности тоже линеен и вызывает ограниченный интерес, однако небольшая поправка изменит все непредвиденным образом.

Вместо обычного удвоения рассмотрим «часовое удвоение». Имеется в виду операция удвоения продолжительности времени, которую показывают часы. На циферблате часов имеются цифры

от 1 до 12, затем они повторяются: 12 рассматривается как 0, и снова начинается отсчет по кругу. Если что-то занимает 5 часов и начинается в полдень, то заканчивается в 5 часов. Если оно занимает вдвое больше, то заканчивается в 10 часов. Еще вдвое дольше займет у нас не до 20, а до 8 часов, поскольку мы снова начинаем с 0, когда часовая стрелка минует 12.

Здесь происходит не удвоение длины, а скорее удваивается угол. Когда углы достигают  $360^\circ$ , мы снова возвращаемся к началу на 0. Если говорить о линейных отрезках, то это равносильно замещению бесконечной линии кругом.

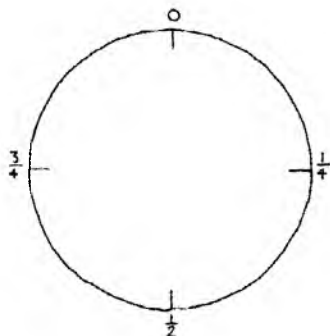


Рис. 3.

Мы собираемся использовать часовое удвоение как алгоритм для создания маршрута точки, прыгающей по линии. Числа на «часах» будут лежать между 0 и 1 (рис. 3). По достижении 1 мы снова начинаем на 0. Удвоение числа менее  $1/2$  происходит как обычно: например,  $0,4$  удваивается до  $0,8$ . Однако числа больше  $1/2$  при удвоении превышают 1, поэтому мы опускаем 1 и оставляем лишь десятичную долю.

Таким образом  $0,8$  удваивается до  $1,6$ , которые становятся  $0,6$ . Хотя традиционное удвоение линейно, часовое удвоение обладает ключевым свойством нелинейности.

Наглядно процедура часового удвоения представлена на рис. 4. Начиная с сегмента линии от 0 до 1, сначала растяните его длину вдвое (рис. 4 а). Это соответствует удвоению числа. Теперь разрежьте растянутый сегмент посередине (рис. 4 б) и поместите две половинки в точности друг над другом (рис. 4 в). В конце соедините два сегмента в один, чтобы получилась линия той же длины, с которой вы начали (рис. 4 г). Все эти действия можно повторить для следующего шага алгоритма. Процедуру последовательного растягивания и соединения можно сравнить с раскатыванием теста.

Для расчета подробного маршрута «частицы» по данному алгоритму вы можете использовать либо калькулятор, либо диаграмму, подобную той, что показана на рис. 5. Горизонтальная ось содержит линейный отрезок от 0 до 1, а начинаем мы с выбора

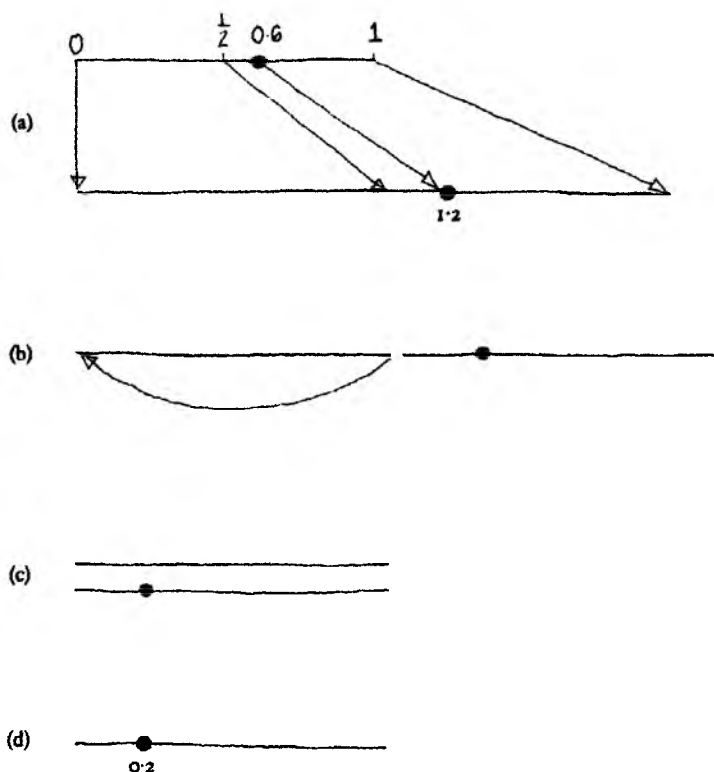


Рис. 4 (а). Линейный отрезок от 0 до 1 растянут в двое длиннее: каждое число в отрезке удваивается. (б) Растянутый отрезок разбивается по середине. (в) Оба сегмента ставятся друг на друга. (г) Составленные друг на друга линейные сегменты сливаются, вследствие чего они восстанавливают отрезок, равный единице длины. Эта последовательность операций равнозначна удвоению чисел и выделению только десятичной части. В качестве примера показан случай с 0,6, которые становятся 0,2.

точки, обозначенной  $x_0$ . Чтобы создать следующую точку,  $x_1$ , двигайтесь вертикально от  $x_0$  до жирной линии, затем горизонтально до пунктирной линии. Теперь вычислите новую величину,  $x_1$ , на горизонтальной оси. Затем эту процедуру можно повторить, чтобы найти следующую точку,  $x_2$ , и так далее.

Несмотря на простоту данного алгоритма, он порождает поведение, которое столь богато, сложно и изменчиво, что оказывается совершенно непредсказуемым. Фактически в большинстве случаев частица прыгает взад-вперед как будто бы произвольным образом!

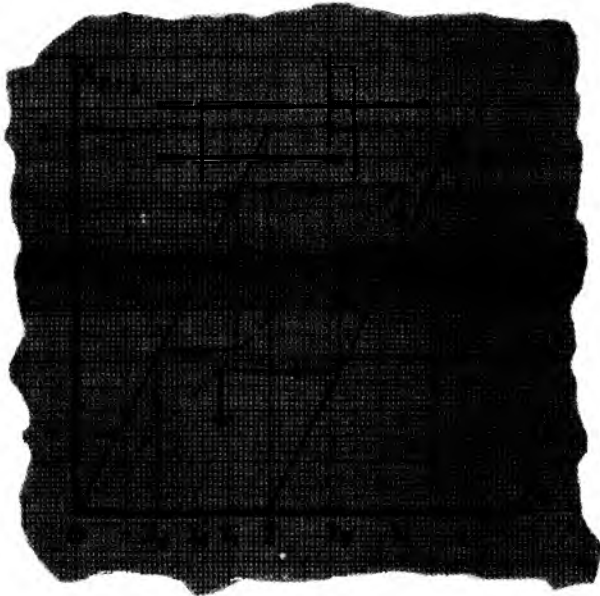


Рис. 5. Предрешенность против предсказания. Данная дорожка создает полностью детерминированным образом последовательность чисел  $x_1, x_2, x_3, \dots$ . Эти числа можно представить как маршрут частицы, прыгающей между 0 и 1 на горизонтальной линии. Несмотря на то, что маршрут частицы раз и навсегда неповторимым образом определен начальной позицией  $x_0$ , при большинстве значений  $x_0$  частица движется произвольно; ее передвижение неизбежно становится непредсказуемым, если только неизвестно *точное* значение  $x_0$ , а такого никогда не бывает.

Показать это удобно при помощи двоичных чисел. Двоичная система – это способ представления всех чисел с использованием только двух символов, 0 и 1. Так, типичное двоичное число между 0 и 1 – это 0,10010110100011101. Читателю нет необходимости беспокоиться о том, как преобразовать обычные первые десять чисел в бинарную форму. Понадобится только одно правило. Когда обычные числа умножаются на 10, требуется только переместить запятую, отделяющую целое от дроби, вправо; так,  $0,3475 \times 10 = 3,475$ . Двоичные числа подчиняются тому же правилу за исключением того, что запятую смещает умножение на 2, а не на 10. Таким образом, 0,1011 после удвоения становится 1,011. Это правило естественным образом адаптируется к алгоритму удвоения: его последовательное применение к числу 0,1001011 дает, например, 0,001 011, 0,010 11,

0,1011, 0,011, 0,11 и так далее (не забываем поставить 1 за запятую, если такое число появится).

Если отрезок от 0 до 1 представить линией (рис. 6), тогда числа менее  $1/2$  будут лежать слева от середины, а числа более  $1/2$  – справа. В двоичной системе они соответствуют числам, у которых первый знак после запятой будет 0 или 1 соответственно. Так, 0,1011 лежит справа, а 0,01011 – слева. Мы можем представить два отсека или секции, помеченных  $L$  и  $R$  для левого и правого отрезков и приписать каждое число к  $L$  или  $R$ , в зависимости от того, с чего начинается его двоичное разложение – с 0 или 1. Алгоритм удвоения заставляет частицу прыгать туда и обратно между  $L$  и  $R$ .

Предположим, что мы начали с числа 0,011010001, которое соответствует точке в левом отсеке, поскольку первый знак после запятой 0.

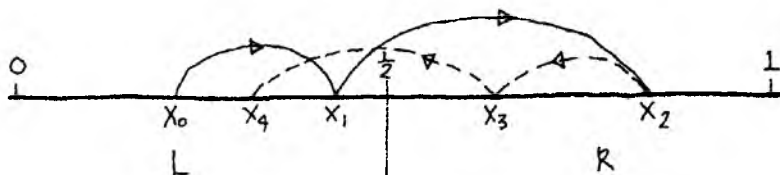


Рис. 6. Отрезок линии от 0 до 1 здесь разделен на два сегмента,  $L$  и  $R$ . Прыгая вдоль линии, частица может переместиться из  $L$  в  $R$  или наоборот. Полная последовательность  $LR$  в точности соответствует двоичному разложению исходного числа  $x_0$ . Изображенная последовательность относится к примеру, представленному на рис. 5.

Вследствие этого частица начинает путь в  $L$ . При удвоении это число становится 0,11010001, которое расположено справа, т.е. частица прыгает в  $R$ . Повторное удвоение дает 1,1010001, а наш алгоритм требует, чтобы мы сбросили 1 за запятую. Первый знак после запятой – это 1, поэтому частица остается в  $R$ . Продолжая таким образом, мы создаем последовательность прыжков  $LRRLRLLL$ .

Из последующего станет ясно, что судьба частицы (т.е. будет она находиться в  $L$  или  $R$ ) на  $n$ -ном этапе будет зависеть от того,

будет ли  $n$ -ный знак 0 или 1. Таким образом, два числа, одинаковые до  $n$ -ного десятичного разряда, но отличающиеся в позиции  $n + 1$ , создадут одну ту же последовательность прыжков от  $L$  до  $R$  для  $n$  шагов, однако далее, на следующем шаге, припишут частицу к разным отсекам. Другими словами, два начальных числа, которые очень близки друг к другу и соответствуют двум очень близким друг к другу точкам на прямой, дадут начало последовательностям прыжков, которые в конечном итоге будут отличаться очень значительно.

Становится ясно, почему движение частицы непредсказуемо. Если *точное* начальное положение частицы неизвестно, то неопределенность будет расти и расти, пока наконец мы не утратим полностью возможность делать прогноз. Если, например, нам известно начальное положение частицы с точностью до 20 двоично-десятичных разрядов, мы не сможем предсказать, будет ли она располагаться с левой или с правой стороны линейного отрезка после 20 прыжков. Поскольку для *точного* указания начальной позиции нужно *бесконечное* разложение на десятичные дроби, *любая* ошибка рано или поздно приведет к расхождению между предсказанием и действительностью.

В результате повторяющихся удвоений диапазон неопределенности растягивается с каждым шагом (на самом деле он растет экспоненциально), поэтому независимо от того, насколько мал он в начале, в конечном итоге он охватит весь отрезок линии целиком, и на этом предсказательная сила будет утеряна безвозвратно. Так, перемещение точки, хотя и полностью обусловленное, обладает настолько острой чувствительностью к исходным условиям, что малейшей неопределенности в нашем знании достаточно, чтобы предсказуемость потерпела крах уже после ограниченного числа прыжков. Таким образом, в некотором смысле поведение частицы характеризуется *бесконечной сложностью*. Чтобы с точностью описать перемещения частицы, потребуется указать бесконечный числовой ряд, содержащий бесконечное количество информации. И конечно, на практике этого достичь невозможно.

Хотя данный простой пример выглядит как математическая игра с высокой степенью идеализации, он в буквальном смысле имеет космическое значение. Часто предполагается, что непредсказуемость и необусловленность идут рука об руку, но сейчас

можно увидеть, что это необязательно так. Можно представить полностью обусловленную вселенную, где, тем не менее, будущее неизвестно и не может быть узнано. И это немаловажно: даже если законы физики строго детерминированы, у вселенной есть возможность творить и производить нечто непредвиденное и новое.

## Хартия игрока

Глубокий парадокс лежит в самом сердце классической физики. С одной стороны, законы физики детерминированы. С другой стороны, нас окружают процессы, которые явно произвольны. Любой управляющий казино зависит от «законов случая», позволяющих ему сохранить свое дело. Но как может такой физический процесс, как бросок кости, соответствовать в одно и то же время детерминистическим законам физики и закону случая?

Из предыдущей главы мы узнали, что Максвелл и Больцман ввели понятие случайности в физику, рассматривая движение больших ансамблей молекул при помощи статистической механики. Существенной составляющей их работы было предположение о том, что столкновения молекул случаются произвольно. Произвольность движения молекул газа основывается на их огромном количестве, что не дает ни малейшей возможности отследить, куда какие молекулы движутся. И при броске костей никому не могут быть известны точные условия броска и все силы, действующие на кость. Иными словами, произвольность можно отнести к действию сил (или неких показателей), на практике скрытых от нас, но, в принципе, детерминированных. Так, демон Лапласа, способный уследить за любыми уворотками и извивами скопления газовых молекул, не воспринял бы мир как произвольный. Но для нас, простых смертных, с нашими ограниченными способностями, произвольность неизбежна.

Загадка же в следующем: если произвольность вызвана невежеством, то она приобретает субъективный характер. Как нечто субъективное может вести к законам случая, столь надежно обуславливающим действия таких материальных объектов, как колесо рулетки и игральные кости?

Поиски источника произвольности в физических процессах радикально изменились после открытия примеров, подобных



прыгающей частице. Здесь имеется процесс, непредсказуемый в истинном смысле азартных игр, однако обходящийся без понятия большого количества частиц или скрытых сил. В самом деле, едва ли можно вообразить более понятный, простой и детерминированный процесс, чем тот, который был описан в предыдущем разделе.

В действительности можно доказать, что действия прыгающей частицы во всех отношениях так же произвольны, как и бросок монетки. Приводя эти доводы, я следую за изящным изложением вопроса, представленным Джозефом Фордом из Технологического института Джорджии<sup>3</sup>. Изложение Форда требует краткого введения в теорию чисел. Вернемся ненадолго к обычной арифметике; отрезок от 0 до 1, очевидно, содержит бесконечное число точек, которые можно обозначить посредством бесконечного набора десятичных чисел. Среди них некоторые представляют дроби, например  $1/2$ ,  $1/3$ ,  $1/4$ , и т.д. Некоторые дроби обладают конечным десятичным разложением, например,  $1/2 = 0,5$ , тогда как другие, например  $1/3$ , требуют бесконечного числа десятичных разрядов:  $1/3 = 0,333\ 333\ 333\dots$  Конечные последовательности можно рассматривать как простые случаи бесконечных последовательностей, если добавить к ним нули: так  $1/2 = 0,5000\ 000\dots$  Заметьте, что все дроби либо имеют конечное число десятичных разрядов с последующими нулями, либо в конечном итоге повторяются неким периодичным образом: например,  $3/11 = 0,272\ 727\ 272\dots$ , а  $7/13 = 0,538\ 461\ 538\ 461\dots$

Хотя любая дробь обладает десятичными разрядами, не все десятичные числа можно представить как дроби. То есть набор всех бесконечных десятичных чисел содержит больше чисел, чем набор всех дробей. На самом деле этих «лишних» десятичных чисел (известных как «иррациональные») существует бесконечно больше, чем дробей, несмотря на то, что уже имеется целая бесконечность этих дробей. Заслуживают внимания некоторые примеры подобных чисел:  $\pi$ ,  $\sqrt{2}$  и основание натуральных логарифмов – число «e». Подобные числа никаким способом не могут быть представлены дробями, как бы сложны они ни были.

При попытках записать число  $\pi$  как ряд цифр (3,14159...) всегда используется некоторая степень аппроксимации, поскольку

<sup>3</sup> Joseph Ford, 'How random is a coin toss?', *Physics Today*, April 1983, p. 4.

эту последовательность в какой-то момент необходимо прервать. Если применить компьютер для создания все большего числа десятичных разрядов числа  $\pi$ , то обнаруживается, что периодически повторяющихся последовательностей здесь нет (в отличие от десятичного разложения дроби). Хотя можно напрямую связать это с простым отсутствием конечного числа десятичных разрядов, однако имеется возможность доказать, что систематическая периодичность не появится здесь никогда. Другими словами, десятичные разряды числа  $\pi$  образуют совершенно неопределенную последовательность.

Теперь, вернувшись к двоичной арифметике, можно сказать, что мы способны представить все числа между 0 и 1 посредством бесконечных рядов единиц и нулей (после запятой). И наоборот, *любой* ряд из единиц и нулей, в любом выбранном нами сочетании, соответствует точке, расположенной где-то на отрезке.

Сейчас мы подошли к ключевому вопросу, касающемуся произвольности. Представьте монету с 0, написанным на одной стороне, и 1 на другой. Если несколько раз подбросить эту монету, то появится последовательность цифр, например 010011010110... Если бы у нас имелось бесконечное число таких монет, то мы могли бы генерировать все бесконечные последовательности цифр, а потому – *все* числа между 0 и 1. Другими словами, можно рассмотреть числа между 0 и 1 как представляющие все возможные значения бесконечных последовательностей бросков монеты. Но поскольку мы готовы допустить, что монета подбрасывается произвольно, то последовательное появление единиц и нулей при любом двоичном разложении так же произвольно, как и подбрасывание монеты. Если перевести это в движение скачущей частицы, можно сказать, что ее прыжки между  $L$  и  $R$  так же произвольны, как и последовательные броски монеты.

Изучение теории чисел открывает еще одно важное свойство этого процесса. Предположим, что мы взяли конечный ряд цифр, например 101101. Все двоичные числа между 0 и 1, начинающиеся с данного ряда, лежат в узком отрезке прямой, ограниченном числами 101101000000... и 10110111111... Если мы выберем более длинный ряд, то границы отрезка сузятся. Чем длиннее ряд, тем уже отрезок. В пределе бесконечного удлинения ряда этот диапазон превратится в ничто и будет указана единственная точка (т.е. число).

Теперь давайте вернемся к поведению прыгающей частицы. Если указанный в примере ряд цифр 101 101 обнаружится где-либо в двоичном разложении его первоначальной позиции, тогда дело может обернуться так, что на каком-то этапе своего маршрута частица в конце концов выпрыгнет в отрезок, находящийся выше прямой. Подобный же результат верен, естественно, и в отношении любого конечного ряда цифр.

Сейчас можно доказать, что *любой* конечный ряд цифр в какой-то момент вырастает в бесконечное двоичное разложение *любого* иррационального числа (строго говоря, за некоторыми отдельными исключениями). Отсюда следует, что если частица начинает движение в точке, обозначенной любым иррациональным числом (а большинство точек на отрезке прямой обозначены иррациональными числами), то рано или поздно она должна запрыгнуть в узкую область, обозначенную любым случайным рядом цифр. Таким образом, частица наверняка посетит все отрезки на линии, как бы узки они ни были, на одном из этапов своего пути.

Можно пойти дальше. Оказывается, что любая заданная последовательность цифр не только возникает в каком-то месте двоичного разложения (почти) каждого иррационального числа, но и делает это бесконечное число раз. В отношении прыжков частицы это означает, что когда частица выпрыгивает из определенного отрезка прямой, мы знаем, что в конечном итоге она вернется – и будет делать это снова и снова. Поскольку это остается верным независимо от того, насколько мала рассматриваемая область, и поскольку это применимо к *любой* подобной области везде на отрезке прямой, то, должно быть, частица посещает каждую часть прямой снова и снова, не пропуская ничего. На специальном языке это свойство обозначается как эргодичность, это ключевое допущение, которое необходимо ввести в статистическую механику, чтобы обеспечить по-настоящему произвольное поведение. Там оно оправданно, поскольку задействует огромное количество рассматриваемых частиц. Здесь, невероятным образом, оно проявляется автоматически как свойство движения *одиночной* частицы.

Утверждение о том, что движение частицы действительно произвольно, можно подкрепить при помощи раздела математики, известного как теория сложности алгоритмов. Эта теория представляет собой средство для измерения сложности бесконечных

рядов цифр в виде количества информации, требующейся вычислительной машине для их создания. Некоторые числа, даже если они задействуют бесконечные двоичные разложения, можно получить с помощью конечных компьютерных алгоритмов. В действительности число  $\pi$  принадлежит к этому классу, несмотря на кажущуюся бесконечную сложность ее десятичного разложения. Однако для создания большинства чисел необходима *бесконечная* информация о компьютерном программировании, а потому они могут рассматриваться как бесконечно сложные. Следовательно, большинство чисел в действительности нельзя определить! Они полностью непредсказуемы и не поддаются никаким вычислениям. Их двоичное разложение произвольно в глубочайшем смысле этого слова. Очевидно, что если движение частицы описывается подобным числом, то оно тоже действительно произвольно.

Игрушечный пример прыгающей частицы служит очень полезной цели: выяснить, как соотносятся сложность, произвольность, предсказуемость и детерминизм. Но применимо ли это к реальному миру? Удивительно, но ответ – да, как мы увидим в следующей главе.

# 4 Хаос

## Сон фараона

Фараон сказал Иосифу: «Мне снился сон, и нет никого, кто бы истолковал его, а о тебе я слышал, что ты умеешь толковать сны... Мне снилось: вот, стою я на берегу реки; и вот вышли из реки семь коров тучных плотью и хороших видом и паслись в тростнике; но вот, после них вышли семь коров других, худых, очень дурных видом и тощих плотью: я не выдывал во всей земле Египетской таких худых, как они»<sup>1</sup>.

Истолкование сна фараона, предложенное Иосифом, широко известно: Египет переживет семь изобильных лет, за которыми последуют семь лет голода. Это предсказание принесло ему должность великого визиря при фараоне. Но можно ли доверять этой истории ?

Исследование колебаний численности вредителей урожая, рыб, птиц и других видов с четко выраженными периодами размножения открывает широкое разнообразие типов изменений, от быстрого роста или исчезновения, затем цикличности, и, наконец, явно случайные изменения. Причина столь разнообразного поведения представляет большую ценность для понимания одного из видов сложного, который, согласно новейшим взглядам, имеет универсальное значение.

Простейший пример изменений численности – это неограниченный рост, например, в небольшой популяции насекомых на большом удаленном острове, либо у рыб в большом пруду, или у бактерий, размножающихся в благоприятной среде. В таких обстоятельствах, число  $N$  отдельных особей удвоится за определенный промежуток времени – средний период цикла размножения. Такой вид ускоренного увеличения популяции известен как экспонен-

---

<sup>1</sup> Быт 41:15.

циальный рост. Есть также обратный случай экспоненциального сокращения, он происходит, если в окружающей среде недостаточно ресурсов для поддержания жизни всей популяции. Оба случая показаны на рис. 7. Промежуточные сценарии действуют, когда популяция растет или уменьшается, приближаясь к определенному оптимальному значению, при котором ее численность стабилизируется. В ином случае она может циклично колебаться.

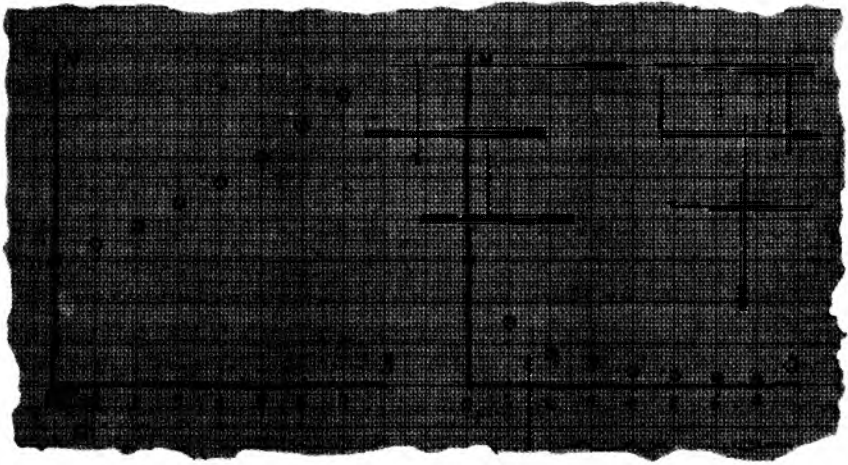


Рис. 7. (а) Популяция  $N$  растет экспоненциально со временем.  
(б) Популяция экспоненциально сокращается со временем.

Чтобы понять, как появляются колебания, предположим, что в первый год популяция островного насекомого мала. Имеется множество пищи, доступной для всех, происходят многочисленные спаривания, и популяция резко увеличивается. Во второй год остров кишит насекомыми, а ограниченных пищевых ресурсов меньше, чем требуется. Результат: высокий уровень смертности от голода, а отсюда – низкий уровень рождаемости. На третий год популяция насекомых снова невелика. И так далее.

Вызывает интерес такой вопрос: можно ли эти и другие, более сложные типы колебаний численности смоделировать математически таким образом, чтобы экологи были в состоянии предсказать,

уподобившись Иосифу, семь неурожайных лет? Одно из простых решений – предположить, что в каждый год численность популяции полностью определяется ее размерами в предыдущем году, а затем попытаться провести численный эксперимент с использованием определенных неизменных уровней рождаемости и смертности.

Представим, что определенный сезон размножения случается у таких видов один раз в год. Давайте обозначим численность популяции в год  $y$  при помощи  $N_y$ . Если бы размножение было неограниченным, то в следующем году,  $y + 1$ , популяция была бы пропорциональна ее численности в году  $y$ , поэтому мы можем записать:  $N_{y+1} = aN_y$ , где  $a$  – постоянная величина, зависящая от эффективности размножения видов. Решение этого уравнения получить легко: как и ожидалось, оно состоит в экспоненциальном росте.

В действительности рост популяции ограничен пищевыми ресурсами и другими конкурентными факторами, поэтому нам нужно добавить еще один элемент в приведенное выше уравнение, чтобы учесть смертность, которая сократит уровень размножения. С высокой степенью аппроксимации можно предполагать, что вероятность смерти для каждой особи пропорциональна всей популяции,  $N_y$ . Таким образом, уровень смертности для популяции в целом пропорционален  $N_y^2$ , назовем его  $bN_y^2$ , где  $b$  – еще одна постоянная величина. В итоге мы приходим к уравнению

$$N_{y+1} = N_y(a - bN_y), \text{ известному как логистическое уравнение.}$$

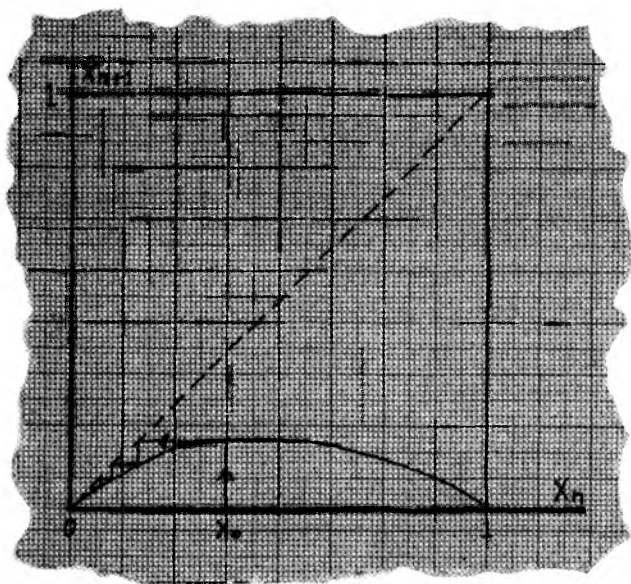
Логистическое уравнение можно рассматривать как детерминированный алгоритм для движения точки по прямой, подобного тому, которое было представлено в главе 3. Объясняется это тем, что если мы возьмем за начальную величину  $N_0$  для года 0 и используем правую сторону логистического уравнения для расчета  $N_1$ , тогда мы сможем поместить *эту* величину в правую часть для расчета  $N_2$ , и так далее. Ряд чисел, полученный за счет этой итерации, образует детерминированную последовательность, которую можно представить как обозначение последовательных положений точки на прямой. С этими расчетами легко справится карманный калькулятор. Их результаты, однако, далеко не так просты.

Чтобы рассмотреть их, прежде всего, удобно будет ввести величину  $x = aN/b$  и исследовать  $x$  вместо  $N$ . Уравнение превращается в

$x_{y+1} = ax(1-x_y)$ , а  $x$  ограничивается промежутком между величинами 0 и 1, как и в примере, рассмотренном в главе 3. Можно начертить диаграмму, похожую на рис. 5, получив на этот раз перевернутую параболу вместо двух линий, пересекающихся под косым углом.

Если  $a$  меньше 1, то пунктирная линия полностью находится выше кривой, как показано на рис. 8. Чтобы узнать судьбу популяции, выберите начальную величину  $x_0$  и выполняйте те же действия, которые были описаны в связи с рис. 5; то есть двигайтесь вертикально по направлению к кривой, затем – горизонтально к пунктирной линии и выведите величину следующего года  $x_1$ . Затем повторите это для  $x_2$  и так далее. Из диаграммы должно быть ясно, что независимо от значения начальной величины  $x_0$ , популяция неуклонно сокращается и стремится к нулю. Ресурсы острова или пруда слишком скудны, и популяция вымирает.

Если выбрано значение параметра  $a$  выше 1, что соответствует несколько более крупному острову или пруду с большими



**Рис. 8.** Последовательность чисел, образованная указанным перемещением, приближается к 0 при любом начальном значении  $x_0$ . Это соответствует популяции, которой не избежать вымирания из-за нехватки ресурсов. Сокращение, продолжающееся из года в год, подобно тому, что изображено на рис. 7 б.



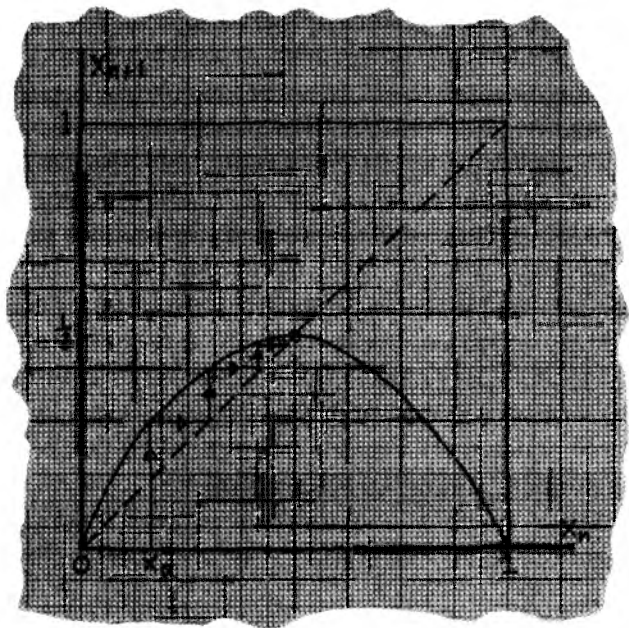
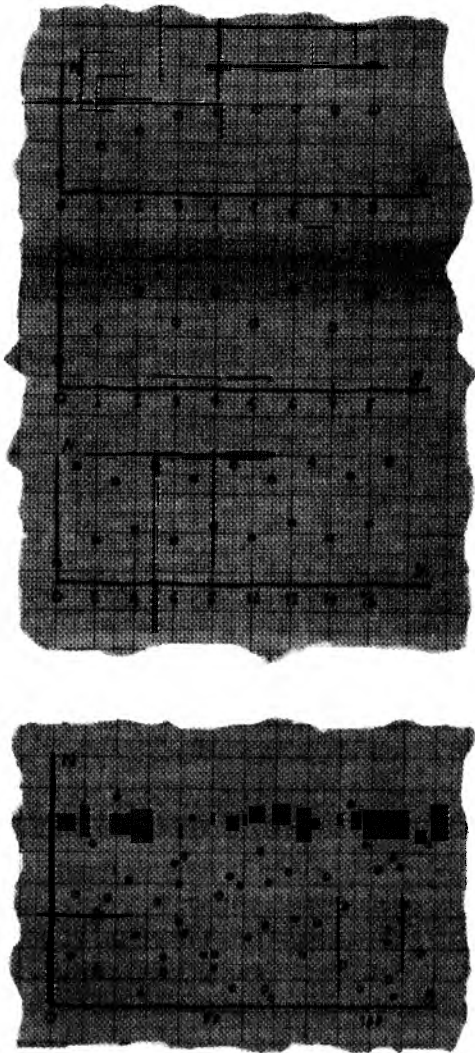


Рис. 9. Если значение параметра равно  $1/2$ , то детерминированная последовательность приближается к неизменному значению  $1/2$ . Оно соответствует популяции, неуклонно растущей, а затем достигающей стабильности, как это показано на рис. 10 а.

ресурсами, пунктирная линия пересекается с кривой в двух местах (рис. 9). Если выполнять те же действия, что и раньше, то популяция может повести себя совершенно по-новому. В действительности, когда значение  $a$  меняется, решения представляют собой набор очень сложных типов поведения.

При  $a$ , лежащем между 1 и 3, популяция продолжает меняться, пока не остановится на равновесном значении  $1-1/a$ . Частный случай показан на рис. 9. Посмотрите, как значение  $x$  постепенно приближается к равновесному значению. Полученные в результате изменения популяции изображены на рис. 10 а.

При значении  $a$  выше 3 (еще больше ресурсов), парабола становится выше (рис. 11). Небольшая исходная численность популяции сначала неуклонно растет, однако затем принимается метаться между двумя неизменными величинами с периодичностью в два года (рис. 10 б). Это эффект Иосифа. Теперь взглянем, как на рис. 11



**(а)** Рис. 10. Возможные изменения популяции, согласно логистическому уравнению. (а) Постоянный рост до устойчивого равновесного уровня. Изменение популяции по сравнению с предыдущим годом можно определить по диаграмме, подобной той, что изображена на рис. 9. **(б)** При более высоких темпах роста численность популяции поднимается с исходно низкого значения, а затем проходит через двухлетние колебания – эффект Иосифа. **(в)** При еще более высоких темпах роста происходит четырехлетний цикл. **(г)** Когда параметр темпов роста  $a$  приобретает значение 4, популяция начинает меняться хаотически, и в целом ее состояние в следующем году становится непредсказуемым.

дорожка ряда величин стремится к квадрату, охватывающему пересечение под косым углом между кривой и прямой.

Когда остров или пруд увеличивают, т.е. когда  $a$  становится еще больше (выше  $1 + \sqrt{6} = 3,4495$ , на самом деле), колебания происходят между четырьмя неизменными величинами, с периодичностью в четыре года (рис. 10 в). При еще более высоких значениях  $a$

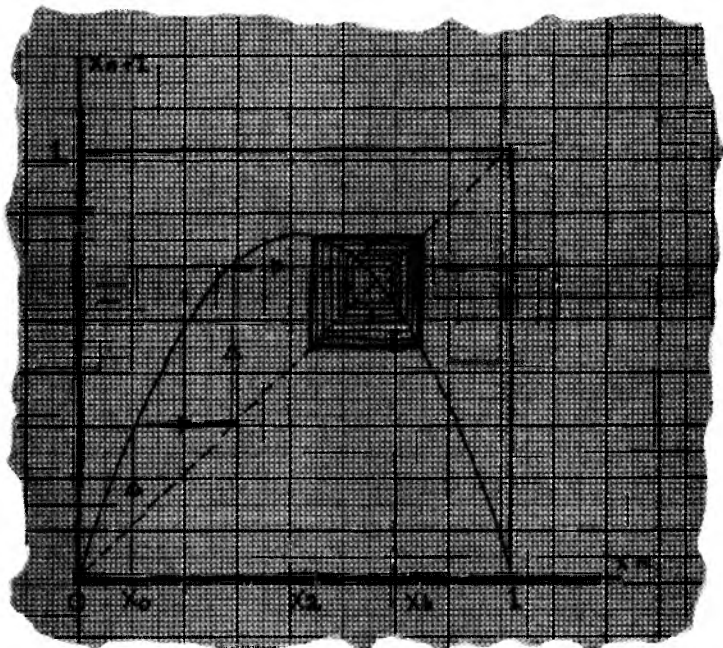


Рис. 11. Если  $a$  лежит между  $3$  и  $1 + \sqrt{6}$ , то появляется детерминированная последовательность, которая затем переходит в «предельный цикл», представленный квадратом, нарисованным жирно. Значение  $x$ , таким образом, начинает колебаться между  $x_0$  и  $x_1$ , соответствующих колебаниям популяции, представленным на рис. 10б.

период удваивается снова и снова, все быстрее и быстрее, пока, при критическом значении около  $3,6$ , популяция не начнет меняться сложным и в высшей степени произвольным образом.

Если перейти в область выше критического значения, то  $x$  (а отсюда и  $N$ ) ведет себя очень любопытно. Оно скачет, согласно строгой последовательности, между рядом диапазонов допустимых значений, однако точные позиции, посещенные переменной внутри каждого диапазона, выглядят полностью произвольными. Если  $a$  увеличить еще больше, то диапазоны сливаются друг с другом попарно, так что область значений, где  $N$  прыгает произвольно, растет до тех пор, пока не образуется континуум. По мере роста значения  $a$  континуум разрастается. При значении  $a = 4$  этот континуум охватывает все значения  $x$ .

Поэтому ситуация, когда  $a = 4$ , вызывает особый интерес. Изменения  $x$  выглядят совершенно хаотичными, т.е. кажется, что

численность популяции колеблется полностью произвольным образом (рис. 10 г). Примечательно, что подобное произвольное поведение может произойти от простого детерминированного алгоритма. Также озадачивает, что численность некоторых птиц и насекомых действительно колеблется от года к году, казалось бы, произвольным образом.

Интересен вопрос о том, правда ли поведение при  $a = 4$  произвольное или просто очень сложное. В действительности оно оказывается поистине произвольным, что легко можно подтвердить, поскольку в этом случае можно найти точное решение для уравнения. Изменение переменных  $x_y = (1 - \cos 2\pi\theta_y)/2$  дает простое решение, согласно которому  $\theta$  удваивается каждый год (т. е.  $\theta_y = 2_y \theta_0$ , где  $\theta_0$  – начальное значение  $\theta$ ). Из рассмотрения «часового удвоения», приведенного в главе 3, мы помним, что последовательное удвоение угла равнозначно переносу двоичных цифр по очереди вправо и что это означает настоящее произвольное поведение с бесконечной восприимчивостью к начальным условиям.

Этим не исчерпывается необычайно богатое разнообразие типов поведения, охватываемых логистическим уравнением. Оказывается, что область сливающихся диапазонов между  $a = 3,6$  и 4 прерывается короткими «вставками» периодического или почти периодического поведения. Есть, например, узкая область (между 3,8284 и 3,8415), где явно выражен трехлетний цикл развития популяции. Настоятельно рекомендуем читателю исследовать эту структуру при помощи домашнего компьютера.

## Магические числа

Обсуждаемый здесь высокоизменчивый и непредсказуемый вид поведения известен как *детерминированный хаос*. Ученые продолжают упорно исследовать его. Было открыто, что хаос возникает во многих динамических системах, от биения сердца до протекающих труб и пульсирующих звезд. Однако серьезное внимание теоретиков хаос привлек после выдающегося открытия, сделанного американским физиком Митчеллом Фейгенбаумом. Многие системы подходят к хаотическому поведению посредством удвоения периода. В этих случаях для перехода к хаосу характерны определенные всеобщие свойства, не зависящие от точных деталей исследуемых систем.

Упомянутые свойства относятся к скорости, с которой хаотическое поведение надвигается, минуя ускоряющуюся смену удвоений периода, которое обсуждалось выше. Полезно будет представить это на рис., установив  $x$  (или  $N$ ) относительно  $a$ , как показано на рис.12. При малом значении  $a$  имеется единственное значение  $x$ , подходящее для решения уравнения, однако в критической точке, где  $a = 3$ , кривая, представляющая решение, разделяется на две. Это называется *бифуркацией* (иногда вилочной бифуркацией из-за ее формы), которая указывает на начало первого удвоения периода:  $x$  (или  $N$ ) может теперь принять два значения, и она колеблется между ними. В дальнейшем происходят новые бифуркации, образующие «бифуркационное дерево» и показывающие, что  $x$  может блуждать между растущим числом значений. Скорость бифуркации становится все выше и выше, пока при новом критическом значении  $a$  не появится бесконечное число ветвей. Это начало хаоса.

Критическое значение, при котором начинается хаотическое поведение, 3,5699... Когда достигается эта отметка, ответвления все ближе и ближе сходятся друг с другом. Если сравнить промежутки между ближайшими ответвлениями, обнаруживается, что каждый промежуток немного меньше  $1/4$  части предыдущего. Если быть более точным, этот коэффициент стремится к постоянной величине в  $1/4,669201...$  когда достигается критическая точка. Заметьте, что здесь подразумевается «автомодельная» форма, при этом скорость сходимости не зависит от масштаба, что, как мы увидим дальше, не лишено определенного значения.

Также существует простое численное соотношение, управляющее скоростью сокращения вертикальных промежутков между «зубьями вилок» на бифуркационном дереве. Фейгенбаум обнаружил, что в момент приближения к критической области хаоса, каждый промежуток составляет примерно  $2/5$  от предыдущего. (Более точно коэффициент составляет  $1/2,5029...$ )

Фейгенбаум столкнулся с любопытными «магическими» числами 4,669201... и 2,5029... случайно, когда забавлялся с маленьким программируемым калькулятором. Важность этих чисел состоит в том, что они снова и снова возникают в совершенно разных контекстах. Очевидно, они представляют основополагающее свойство некоторых хаотических систем.

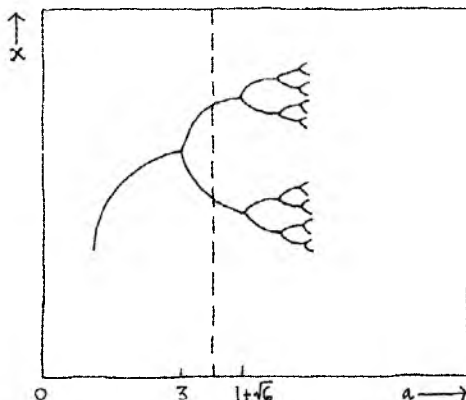


Рис. 12. Дорога к хаосу. Выберите значение  $a$ ; проведите вертикальную прямую. Там, где она пересекает «бифуркационное дерево», она дает значения  $x$  (т.е. популяции), при которых рост «кривой» популяции останавливается. В данном случае выделены два значения, соответствующие устойчивому двухтактовому циклу, подобному тому, который показан на рис. 10 б. По мере увеличения  $a$  на дереве снова и снова появляются ветви, указывающие на ускоряющуюся смену удвоений периода. Умножение сходящихся ветвей происходит точным математическим образом, в соответствии с числами Фейгенбаума. За дорожками бифуркаций лежит хаос: популяция меняется произвольно и непредсказуемо.

## Свести маятник с ума

Произвольное и непредсказуемое поведение ни в коей мере не ограничивается экологией. Многие физические системы демонстрируют явно хаотическое поведение. Хороший пример – это так называемый конический маятник, представляющий собой обычный маятник, закрепленный таким образом, чтобы свободно двигаться в любом направлении, а не только в одной плоскости. Этот маятник – воплощение динамического постоянства в миниатюре – он так же постоянен, как часовой механизм, как гласит пословица. Тем не менее оказывается, что даже маятник может вести себя хаотично. Если он движется за счет периодического приложения силы к точке подвешивания, то поведение балансира (шарика) претерпевает примечательные и небезынтересные перемены.

Прежде чем приступить к ним, следует уделить некоторое внимание тому, почему эта система нелинейна. При обычном обращении с маятником предполагается, что амплитуда колебаний невелика; тогда данная система приближенно линейна и обращаться с

ней очень просто. Однако если амплитуде позволяют увеличиться, то в дело вмешиваются нелинейные эффекты. (В математическом плане это происходит потому, что аппроксимации  $\sin \theta \sim \theta$  становится непригодной.) Более того, нельзя пренебречь и затуханием из-за трения, если нам важно долговременное поведение, а здесь его воздействие на самом деле имеет значение.

Хотя маятник перемещают в одной плоскости, нелинейность может заставить балансир двигаться и в перпендикулярном направлении, т.е. эта система обладает двумя степенями свободы. Балансир, таким образом, передвигается по сферической поверхности с двумя измерениями. Принципиальное свойство этой системы состоит в том, что балансир будет демонстрировать упорядоченное либо крайне беспорядочное поведение в зависимости от частоты движущей силы. Модель для практических опытов изготовил мой коллега Дэвид Триттон. Он рассказал о своих наблюдениях следующее<sup>2</sup>:

Маятник выходит из состояния покоя при рабочей частоте в 1,015 раза от естественной частоты. Сначала это заставляет шарик двигаться параллельно точке подвешивания. Амплитуда этого движения растет... до тех пор, пока, по прошествии обычно тридцати секунд, движение не начинает происходить в двух измерениях.

Траектория, которой следует балансир, в конечном итоге сводится к устойчивому движению по эллипсу, в некоторых опытах по часовой стрелке, в других – против нее. На этом этапе рабочая частота снижается до 0,985 раза от естественной частоты.

Вызванное изменение в движении шарика быстро становится заметным; оно лишается регулярности. Любые несколько последовательных колебаний достаточно похожи друг на друга, чтобы можно было утверждать, что он движется по прямой, по эллипсу или по кругу; однако ни один из этих типов движения не сохраняется дольше, чем на примерно пять колебаний, и нельзя выявить какой-либо определенной последовательности их смены. В любой момент можно обнаружить, что маятник движется по прямой, эллиптической или круговой траектории с амплитудой, равной любому значению внутри широкого диапазона; прямая или ведущая ось эллипса могут располагаться как угодно в зависимости от направляющего движения. Любая попытка предсказать, что откроется при взгляде на это устройство... едва ли увенчается успехом.

Преыдущий пример показывает, как у простой системы могут обнаружиться крайне разнообразные типы поведения в

<sup>2</sup> D. J. Tritton, 'Ordered and chaotic motion of a forced spherical pendulum', *European Journal of Physics*, 7, 1986, p. 162.

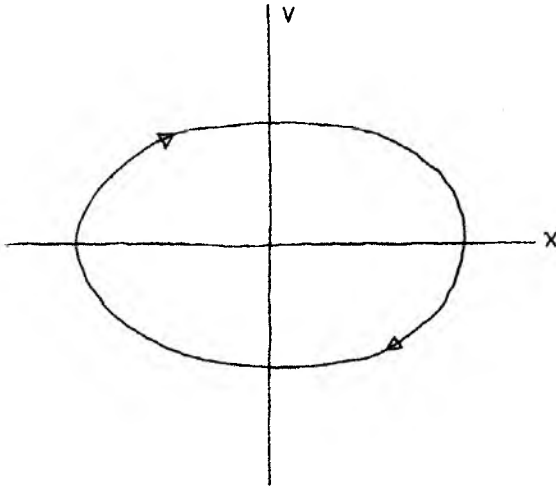


Рис. 13. Если положение  $x$  балансира свободно раскачивающегося маятника отобразить на графике относительно его скорости  $v$ , появляется кривая, называемая «фазовой картиной». В отсутствии трения кривая образует замкнутую петлю (на самом деле, эллипс).

зависимости от значения контрольного параметра, в данном случае – рабочей частоты. Очень незначительное изменение частоты может привести к резкому переходу от простого, упорядоченного и в целом предсказуемого типа движения к другому, которое, по видимому, хаотично и непредсказуемо. В случае с популяциями насекомых мы также обнаружили, что от скорости размножения  $a$  зависело, будет ли численность популяции устойчиво расти, колебаться или меняться произвольно.

Чтобы исследовать данный вопрос более подробно, потребуется прибегнуть к наглядному вспомогательному средству, известному как фазовая диаграмма или картина. Она позволяет отразить главные характеристики сложного движения в виде простой диаграммы. В качестве примера использования фазовой диаграммы мы рассмотрим простой маятник. (Такой маятник раскачивается в одной плоскости, и его не следует путать с только что описанным коническим маятником.)

Фазовая диаграмма состоит из графика смещения балансира, назовем его  $x$ , выстроенного относительно скорости балансира, обозначенной  $v$ . В любой момент времени состояние балансира можно представить на фазовой диаграмме точкой, обозначающей положение и скорость балансира в тот момент. За некоторый

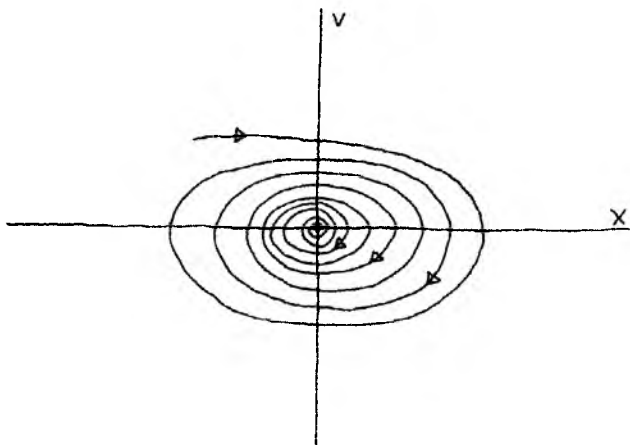


отрезок времени представляющая точка движется по кривой. Если пренебречь затуханием из-за трения, эта кривая будет состоять из простой замкнутой петли (рис. 13). Один проход вдоль петли соответствует одному циклу колебания маятника.

По мере того, как маятник продолжает раскачиваться, его движения в точности повторяют друг друга, поэтому представляющая точка просто движется все время вдоль петли по направлению стрелки. Теперь, если ввести трение, маятник будет неуклонно терять энергию. В результате амплитуда его колебаний упадет, и в конечном итоге он остановится в положении равновесия, т.е. с балансиrom, находящимся в вертикальной плоскости под точкой опоры. В этом случае представляющая точка движется по закрученной внутрь спирали, приближаясь к неизменной точке, обозначенной на фазовой диаграмме как «аттрактор» (рис. 14).

Предположим теперь, что движение маятника периодически задается некоей внешней силой (тем не менее она держит его в одной плоскости – это все еще одна степень свободы).

Если частота ведущей силы отличается от естественной частоты маятника, то начальное поведение системы будет довольно слож-



**Рис. 14.** Когда вводится трение, фазовая картина раскачивающегося маятника преобразуется в спираль, стремящуюся к «аттрактору». Спираль отображает угасание колебаний маятника, по мере того, как он теряет энергию посредством трения и в конечном итоге останавливается в состоянии покоя.

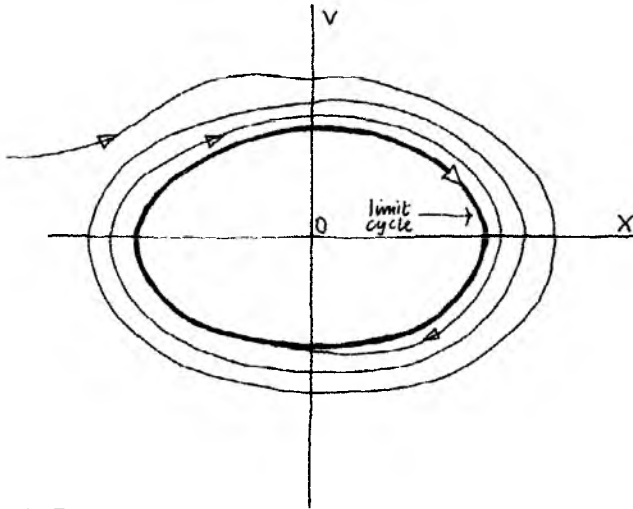


Рис. 15. Если затухающий маятник приводится в движение внешней периодической силой, то независимо от начальных условий его фазовая траектория будет постоянно двигаться по кругу и в конечном итоге придет к «предельному циклу» (жирная линия). По достижении предельного цикла память о начальных условиях теряется полностью и независимость маятника целиком подчиняется внешней силе.

ным, поскольку ведущая сила пытается навязать свое движение маятнику, обладающему собственной естественной частотой колебаний. Траектория представляющей точки теперь будет сложной кривой, чья форма зависит от того, каковы в точности свойства ведущей силы.

Однако из-за наличия затухания по причине трения борьба между двумя видами движения будет недолгой. Усилия маятника утвердить свой вид движения будут подавляться все сильнее и сильнее, и система перейдет к рабской зависимости от частоты возбуждения. Поэтому фазовая диаграмма будет выглядеть так, как это показано на рис. 15. Представляющая точка после нескольких сложных переходных извивов будет пододвигаться кругами все ближе к замкнутой петле, представляющей порабощенные колебания. Там она и остается, двигаясь все время по кругу, до тех пор пока продолжается действие движущей силы. Эта замкнутая петля называется *предельным циклом*.

Свойство, необходимое нам в конечном итоге, – это некая нелинейность. Вместо того, чтобы позволять маятнику

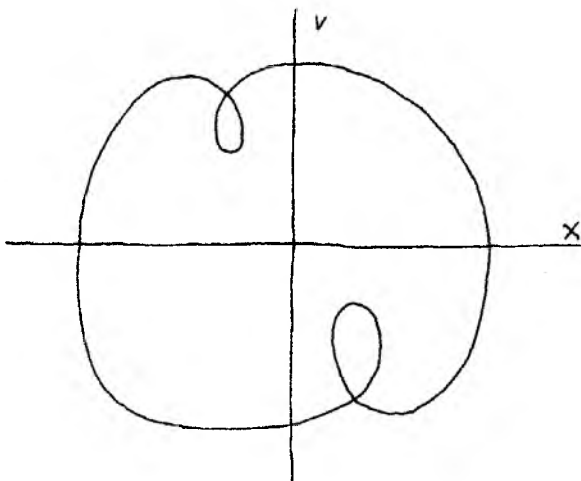


Рис. 16. Если нелинейность включить в ведущую силу, то движение маятника усложняется. В данном случае показан предельный цикл с добавлением малой кубической силы, заставляющей маятник ненадолго отскакивать назад, что представлено небольшими петлями.

посредством колебаний выходить за пределы плоскости, рассмотрим простой прием, с помощью которого силу восстановления маятника делают нелинейной (в действительности – пропорциональной  $x^3$ ). Нам не следует беспокоиться о том, за счет чего возникает эта нелинейная сила, но, как мы увидим далее, ее воздействие сыграет решающую роль.

При наличии умеренного трения поведение маятника по качеству идентично предыдущему случаю. Представляющая точка появляется где-то на фазовой диаграмме, выполняет некое сложное переходное движение, а затем приближается к предельному циклу. Основное различие состоит в том, что замкнутая кривая предельного цикла теперь включает в себя пару петель (рис. 16). В физическом отношении это вызвано тем, что ведущая сила стала временно превосходить силу восстановления и заставляет маятник немного дергаться назад каждый раз, когда он приближается к вертикальной оси.

Предположим теперь, что трение сокращается со временем. При критической отметке параметра затухания фазовая диаграмма внезапно приобретает вид, отображенный на рис. 17.

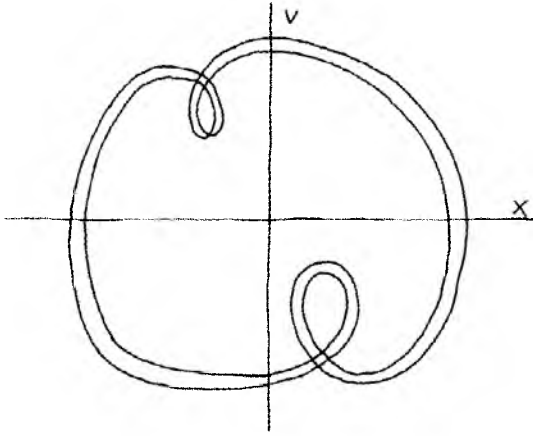


Рис. 17. Когда степень затухания маятника превосходит некую критическую отметку, внезапно происходит удвоение периода. Предельный цикл образует теперь замкнутую двойную петлю.

Предельный цикл по-прежнему представлен замкнутой петлей, однако сейчас эта петля «двойная», означающая, что маятник всего лишь повторяет собственное движение через два взмаха, а не через один. Другими словами, сейчас маятник делает двойной взмах, при этом каждый из них немного отличается от другого, а совокупный период в два раза превосходит предыдущее значение. Это явление называется «удвоением периода», и оно что-то напоминает. Такое же в точности явление мы обнаружили при исследовании популяций насекомых.

При дальнейшем уменьшении трения происходит второе внезапное удвоения периода, так что маятник в точности повторяет свое движение после четырех взмахов. Если трение снижается все больше и больше, то все больше и больше случается удвоений периода (рис. 18). И снова это в точности повторяет итоги рассмотрения вопроса популяции насекомых.

Исследовать то, как удвоения периода быстро сменяют друг друга, можно, если обратить пристальное внимание на одну из частей цикла, изображенного на рис. 18. Представим, что мы смотрим в маленькое окно на фазовой диаграмме и видим, как представляющая точка проносится мимо, оставляя след (рис. 19). После нескольких перемещений многопетлевой предельный цикл

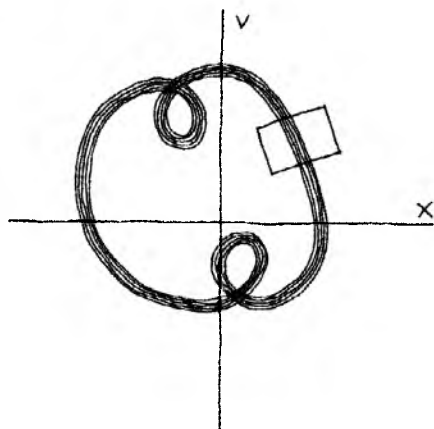


Рис. 18. При дальнейшем уменьшении затухания предельный цикл вновь и вновь распадается на множество петель, или диапазонов. Это показывает, что движение маятника более не раскладывается на четкие периоды, а его предсказуемость дает сбой. Его движение все ближе к хаосу.

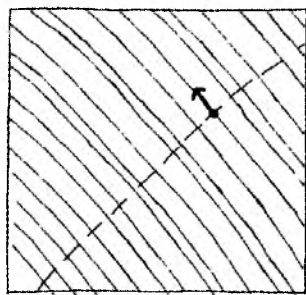


Рис. 19. На увеличенном изображении части диапазона, обозначенного на рис. 18, показано множество траекторий, прочерченных представляющей точкой по мере того, как она снова и снова проходит мимо, выполняя один полный круг предельного цикла. Порядок прохождения через ряд дорожек произволен. «Линия старта», прочерченная по дорожкам, аналогична пунктирной линии на рис. 12.

будет завершен, и траектории линий будут прорисовываться заново. Если «линия старта» пройдет через «окно», мы сможем проследить, где фазовая траектория пересекает ее на каждом круге. На рис. 19 (обозначенном техническим термином «карта Пуанкаре» в память о французском математике и физике Анри Пуанкаре) представлена последовательность областей пересечения. В простейшем случае сильного трения на нем была бы обозначена только одна точка пересечения, но с каждым удвоением периода их число будет расти.

Положения точек пересечения можно обозначить на графике относительно величины сокращающегося трения, чтобы показать, как удвоения периода встречаются все чаще по мере того, как затухание проявляется все слабее и слабее. Далее мы получаем диаграмму «бифуркационного дерева», в точности повторяющую рис. 12. (Заметьте, что величина трения обозначена как убывающая слева направо.) Слева от этого рисунка находится только одна точка пересечения; это соответствует случаю, изображенному на рис. 16. При критическом значении трения одиночная линия на

рис.12 внезапно претерпевает *бифуркацию*. Это первое удвоение периода, соответствующее рис. 17; точек пересечений теперь две. Далее, каждая ветвь снова раздваивается, затем снова, с нарастающей быстротой. В конечном итоге достигается значение трения, при котором это дерево порождает *бесконечное* число ветвей. Движения маятника теперь совершенно лишено периодичности; чтобы фазовая точка повторила его траекторию, ему необходимо исполнить бесконечное число различных взмахов. Сейчас маятник движется крайне неупорядоченно и, по-видимому, произвольно. Снова возникает хаос.

Сейчас стоит вспомнить, что в логистическом уравнении наступление хаоса описывалось любопытными числами 4,669201... и 2,5029... Хотя здесь мы имеем дело с совершенно другой системой, тем не менее появляются те же самые числа. И это не совпадение. Кажется, хаос обладает универсальными свойствами, а числа Фейгенбаума – это основополагающие константы природы. Таким образом, насколько бы хаос, как следует из его определения, ни обескураживал при попытке смоделировать его поведение, тем не менее в его проявлениях сохраняется некоторый порядок и мы можем получить широкое представление о принципах, управляющих этой частной формой сложного.

## Погода, ветренная как бабочка

Специалисты по прогнозу погоды часто становятся мишенью для шуток. Хотя погода не имеет прямого отношения к повседневной жизни большинства из нас, тем не менее мы относимся к ней с пристрастным вниманием и любим повеселиться, когда авторы прогнозов ошибаются. В самом деле, обычно считается (по крайней мере, в Великобритании, где озабоченность погодой – а она в любом случае едва ли сурова – носит характер всенародной мании), что, несмотря на наличие огромных вычислительных ресурсов в их распоряжении, метеорологи чаще ошибаются, чем говорят правду, или, по крайней мере, предсказывают ничуть не лучше, чем их предшественники несколько десятилетий назад. (Что, на самом деле, не так.) В действительности многие больше доверяют нетрадиционным методам, например наблюдению за состоянием водорослей или повадками барсуков и воробьев.

Хотя погоду, казалось бы, предсказать трудно, широко распространено мнение, что, исходя из того, как атмосфера подчиняется физическим законам, создать точную математическую модель можно при условии наличия достаточного объема исходных данных. Однако сейчас это предположение поставлено под сомнение. Может статься и так, что погода по своей природе не поддается долгосрочному прогнозированию.

Атмосфера ведет себя так же, как жидкость, подогреваемая снизу, поскольку солнечные лучи проникают в нее по пути вниз и нагревают земную поверхность, которая затем нагревает выше лежащий воздух посредством теплопроводности и конвекции. Таким образом, мы обнаруживаем, что основное движение циркуляции вертикально. Попытки смоделировать атмосферную циркуляцию математическим образом имеют долгую историю, однако поворотным событием на пути этих исследований стала работа Эдварда Лоренца в 1963 году. Лоренц создал систему уравнений, описывающих упрощенную картину движения атмосферы, и приступил к их решению.

Оказалось, что находка Лоренца вызывала серьезное беспокойство у прогнозистов. Его уравнения, ключевая черта которых – нелинейность, содержат решения, кажущиеся хаотичными. Из главы 3 мы помним, что хаотическим системам присуще свойство полной непредсказуемости. Именно поэтому решения, которые в начале очень близки друг к другу, быстро расходятся, увеличивая область незнания. Если исходное состояние системы неизвестно нам с бесконечной точностью, то наша способность строить прогнозы быстро улетучивается. Столь чрезмерная чувствительность к исходным данным означает, что тип циркуляции атмосферы в конечном итоге может зависеть от малейшего воздействия. Это явление иногда называют эффектом бабочки, поскольку будущий тип погоды может определяться всего-навсего взмахом крыла бабочки.

Если уравнениям Лоренца удалось ухватить общее свойство атмосферной циркуляции, тогда следующий вывод представляется неизбежным: долгосрочное прогнозирование погоды – будь то при помощи компьютера или же гадания по водорослям – никогда не станет возможным, сколько бы вычислительных ресурсов ни было задействовано при этом.

## Неведомое будущее

Вселенские часы Ньютона – детерминированные и механические – всегда было трудно привести в соответствие с явно произвольной природой многих физических процессов. Как мы видели ранее, Максвелл и Больцман ввели элемент статистики в физику, но всегда парадоксом оставалось то, что теория, основанная на Ньютоновой механике, может создать хаос только за счет введения большого числа частиц и субъективного утверждения о том, что их поведение не поддается наблюдению со стороны человека. Недавнее исследование хаоса проложило мост между случайностью и необходимостью – между вероятностным миром подбрасывания монетки и рулетки и вселенским часовым механизмом Ньютона и Лапласа.

Во-первых, мы обнаружили, что сложные и замысловатые структуры и поведение необязательно основываются на усложненных законах. Мы видели, как очень простые уравнения, подвластные и карманному калькулятору, могут давать решения с чрезвычайно богатым разнообразием сложности. Более того, вполне обычные системы в реальном мире (популяции насекомых, маятники, атмосфера), оказывается, с высокой точностью соответствуют этим уравнениям и демонстрируют связанную с ними сложность. Во-вторых, становится все очевиднее то, что динамические системы, как правило, в некоторых режимах ведут себя хаотично. В действительности, кажется, что «обычное», т.е. нехаотическое поведение – это в большой степени исключение: *почти все* динамические системы подвержены хаосу. Развиваясь, эти системы чрезвычайно чувствительны к начальным условиям, вследствие чего они ведут себя в целом непредсказуемым и, по практическим причинам, произвольным образом.

Хотя лишь относительно недавно такие слова, как «научная революция», были применены к исследованию хаоса, важнейшее открытие в этой области было сделано в начале века. В 1908 году Анри Пуанкаре заметил<sup>3</sup>:

Крайне малой причиной, избегающей нашего внимания, определяется значительное следствие, которое мы не можем не заметить, и тогда мы говорим, что это

<sup>3</sup> Henri Poincaré, *Science and Method*, перевод Francis Maitland (London, Thomas Nelson, 1914), p. 68.



следствие вызвано случайностью. Если бы нам в точности были известны законы природы и состояние вселенной в исходный момент, то мы могли бы с точностью предсказать состояние той самой вселенной в следующий момент. Но даже если бы произошло так, что законы природы более не представляли для нас какой-либо тайны, то и тогда мы могли бы узнать об исходном состоянии лишь *приблизительно*. Если бы это позволило нам предсказать следующее состояние *в том же приближении*, это все, что нам нужно, и мы должны сказать, что явление было предсказано, то есть управляется законами. Но это не всегда так; может случиться, что небольшие различия в исходных условиях произведут очень большие изменения в конечном явлении. Небольшая ошибка в первом вызовет чудовищные изменения в последнем. Предсказание делается невозможным, а нам достается неожиданное явление.

Важно подчеркнуть, что поведение хаотических систем неопределенно не *по своей сути*. На самом деле, математическим способом можно доказать, что исходных условий достаточно для определения будущего поведения системы с однозначной точностью. Трудности появляются, когда мы пытаемся обозначить эти исходные условия. Вероятно, на практике мы никогда не сможем узнать точное состояние системы в начале. Как бы совершенны ни были наши наблюдения, всегда в деле окажется замешана *некая* ошибка. Вопрос в том, как повлияет эта ошибка на наши предсказания. Именно здесь возникает решающее различие между хаотическим и обычным динамическим развитием.

Классический пример Ньютоновой механистической науки – определение планетарных орбит. Астрономы могут указать положения и скорости планет лишь с определенной степенью точности. При решении уравнений движения (путем интегрирования) накапливаются ошибки, и с годами изначальное предсказание становится все менее и менее надежным. Конечно, это редко имеет какое-либо значение, поскольку астрономы могут постоянно обновлять данные и делать новые расчеты. Другими словами, эти расчеты всегда намного опережают события. Например, солнечные затмения надежно предсказаны на многие столетия вперед.

Как правило, число ошибок в таких обычных динамических системах растет пропорционально времени (т.е. линейно). В отличие от них в хаотической системе число ошибок растет с увеличивающейся скоростью; в действительности они растут экспоненциально с ходом времени. Поэтому произвольность хаотического движения носит *фундаментальный* характер и не объясняется исключительно нашим неведением. Она не исчезнет, даже если мы соберем больше

информации о системе. Тогда как в обычной системе, подобной солнечной системе, вычисления надолго опережают действие, в хаотической системе требуется обрабатывать все больше и больше информации, чтобы поддерживать тот же уровень точности, а вычисления едва успевают за действительными событиями. Другими словами, полностью теряется предсказательная сила. Вывод состоит в том, что система – наилучший компьютер для самой себя.

Джозеф Форд предпочитает думать о различиях между обычными и хаотическими системами в плане обработки информации. Он отмечает, что если мы посмотрим на начальные условия как на «исходные данные» для компьютерной симуляции будущего поведения, то в обычной системе за усилия мы будем вознаграждены тем, что эта исходная информация преобразуется в очень большой объем данных на выходе, которые выражаются в виде поведения, предсказуемого с разумной точностью на внушительный срок вперед. Но для хаотической системы симуляция бессмысленна, поскольку в итоге мы получаем столько же данных, сколько вложили в начале. Все больший и больший вычислительный ресурс требуется для того, чтобы сообщить нам все меньше и меньше. Другими словами, мы ничего не предсказываем, а лишь описываем систему с определенной ограниченной степенью точности, по мере того как она развивается в реальном времени. Если прибегнуть к аналогии Форда, то при расчете хаотического движения наши компьютеры низводятся до уровня устройств ксерокопирования. Мы не можем определить хаотическую траекторию, если ранее мы не ознакомились с ней.

Для более подробного описания представьте, что компьютер определенного размера тратит час на расчет хаотической орбиты некоей движущейся частицы с определенной степенью точности на одну минуту вперед. Тогда для расчета с той же степенью точности на две минуты вперед, возможно, потребуется в десять раз больше исходных данных и десять часов вычислений. Для трех минут тогда понадобится в 100 (т.е.  $10^2$ ) раз больше данных, а вычисления займут 100 часов; для четырех минут будет нужно 1000 часов и так далее.

Хотя слово «хаос» обозначает нечто отрицательное и разрушительное, ему присуще и нечто созидательное. Элемент произвольного наделяет хаотическую систему некоторой свободой

для того, чтобы испытать на себе обширный набор поведенческих типов. В самом деле, хаос можно с пользой применить для решения определенных математических и физических задач. Его, по-видимому, использует и сама природа, например пытаясь выяснить, как иммунная система тела опознает болезнетворные микроорганизмы.

Далее, возникновению хаоса сопутствует спонтанное появление пространственных форм и структур. Красивый пример этого связан со знаменитым красным пятном на поверхности планеты Юпитер, вызванным к жизни газовыми вихрями в атмосфере этой планеты. Согласно компьютерным моделям, любая частица жидкости вблизи от пятна ведет себя хаотично, а потому – непредсказуемо, тогда как газы в целом собираются в единую устойчивую структуру, обладающую четкой индивидуальностью и некоторой степенью постоянства. Другой пример, который мы обсудим в главе 6, касается завихрений и других свойств, наблюдаемых в потоке турбулентной жидкости.

Эти рассуждения показывают, что природа может быть *и*, в принципе, детерминированной, *и* произвольной. На практике, однако, детерминизм – это миф. Таков сокрушительный вывод. Прочитируем Пригожина<sup>4</sup>:

Взгляды, присущие классической физике, основывались на убеждении в том, что будущее определяется настоящим, а потому тщательное изучение настоящего позволяет открыть будущее. Однако ни в какую эпоху это было не более, чем теоретическая возможность. Тем не менее в некотором смысле эта неограниченная предсказуемость составляла существенную часть научной картины физического мира. Возможно, мы могли бы даже назвать ее основополагающим мифом классической науки. Сегодня положение совершенно изменилось.

Джозеф Форд отстаивает ту же точку зрения более красочно<sup>5</sup>:

К сожалению, нехаотические системы встречаются так же редко, как зубы у курицы, несмотря на то, что наши физические представления о природе во многом основаны на изучении таких систем. На протяжении столетий произвольности отводилась роль полезного, но подчиненного гражданина в детерминированной вселенной. Теория алгоритмической сложности и нелинейная динамика совместно утверждают, что детерминизм на самом деле господствует лишь в довольно ограниченных владениях; за пределом этого небольшого пристанища порядка

<sup>4</sup> Иlya Prigogine, *From Being to Becoming: Time and Complexity in the Physical Sciences* (San Francisco, Freeman, 1980), p. 214.

<sup>5</sup> Ford, *op. cit.*

лежит огромная и по большей части не нанесенная на карту пустыня хаоса, где детерминизм блекнет до мимолетного воспоминания о теоремах существования и выживает только произвольность.

Можно сделать вывод, что, даже если вселенная ведет себя как машина в строго математическом смысле этого слова, все же может произойти так, что возникнут поистине новые и в принципе непредсказуемые явления. Если бы вселенная была линейной механической системой Ньютона, то будущее, в самом истинном смысле, содержалось бы в настоящем и ничто по-настоящему новое не могло бы произойти. Но в действительности наша вселенная – это не линейная механическая система Ньютона; это хаотическая система. Если законы механики – единственные организующие принципы, которые придают форму материи и энергии, тогда ее будущее неизвестно и в принципе не может быть узно. Никакой конечный разум, как бы мощен он ни был, не способен предсказать, какие новые формы и системы могут получить существование в будущем. Вселенная в некотором смысле открыта; невозможно узнать, какие еще уровни разнообразия и сложности могут скрываться у нее в запасе.

# Картография неправильного

## Фракталы

«О облака не сферы, а горы не конусы». Так начинается книга «Фрактальная геометрия природы», производящая один из самых значительных прорывов последнего времени в понимании формы и сложности в физической вселенной. Ее автор – Бенуа Мандельброт, специалист компании IBM по вычислительной технике. Его увлекла задача представления иррегулярного, фрагментированного и сложного в систематизированном и математическом виде.

Классическая геометрия озабочена правильными формами: прямыми линиями, плавными кривыми, полностью симметричными очертаниями. В школе мы узнаем о квадратах, треугольниках, кругах, эллипсах. Тем не менее в природе такие простые структуры попадаются редко. Чаще мы сталкиваемся с рваными краями, неровными поверхностями и запутанными переплетениями. Мандельброт взялся за создание геометрии *иррегулярного*, призванной дополнить геометрию правильного, которую мы изучаем в школе. Ее называют *фрактальной геометрией*.

Начать исследование фракталов будет полезно с самой что ни на есть практической задачи – измерения длины береговой линии или границы между двумя государствами, часть которой пролегает по рекам. Очевидно, что длина береговой линии, скажем, между Плимутом и Портсмутом должна быть больше, чем протяженность прямой линии между этими двумя портами, поскольку берег изгибается в разные стороны. Заглянув в атлас, мы получим одну оценку длины этой неправильной кривой. Но если посмотреть более подробную карту, подготовленную картографическим управлением, то нам откроется буйство маленьких

изгибов, слишком мелких, чтобы их отметили в атласе. Береговая линия кажется длиннее, чем мы полагали сначала. «Полевое» исследование покажет, что изгибов еще больше, а их размеры даже меньше прежнего, и предполагаемая длина снова вырастет. В действительности скоро становится ясно, что длина береговой линии как понятие крайне плохо определена, и ее в некотором смысле можно рассматривать как бесконечную.

Это простое обстоятельство постоянно приводит в замешательство географов и правительства. Зачастую они дают невообразимо далекие друг от друга цифры, когда им приходится определять протяженность береговой линии или общих наземных границ – по причине разных масштабов, в которых измерялись эти расстояния. Беда в том, что если длина всех береговых линий действительно бесконечна, то как же сравнить длины двух разных береговых линий? Без сомнения, в некотором смысле побережье Америки должно быть длиннее берега Великобритании?

Один из способов проверить это – провести исследование кривых, обладающих высокой степенью иррегулярности и поддающихся точному геометрическому определению. Важно здесь то, что, увидев некую карту, изображающую часть неизвестного побережья, обычно нет никакой возможности понять, какой у нее масштаб. На самом деле, степень кривизны, по-видимому, обычно зависит от масштаба. Например, небольшая часть береговой линии Великобритании в увеличенном масштабе выглядит более-менее так же, как и более обширная часть побережья в более крупном масштабе. Если небольшие отрезки кривой походят на нее в целом, то она называется автомодельной, что указывает на присущее кривой основополагающее свойство *масштабирования*. (Мы уже встречались с автомодельностью, когда рассматривали переход от каскада удвоений периода к хаосу.)

Характерный пример неправильной автомодельной геометрической формы был изобретен математиком фон Кохом в 1904 году. Она создается путем бесконечного ряда одинаковых шагов, начинающихся с равностороннего треугольника (рис. 20). При первом шаге на сторонах исходного треугольника строятся новые равносторонние треугольники, образуя звезду Давида. Затем это действие повторяется, и в результате получается нечто, напоминающее

снежинку. Эти действия повторяются *ad infinitum*\*. Конечным итогом является непрерывная «кривая», содержащая бесконечное число бесконечно малых изгибов или отклонений: так называемая кривая Коха. Ее почти невозможно представить наглядно; это нечто чудовищное. Например, у нее нет тангенса, поскольку кривая резко меняет направление в каждой точке! Поэтому она, в некотором смысле, бесконечно неправильна. На самом деле кривая Коха настолько отличается от кривых классической геометрии, что сперва математики отшатнулись от нее в ужасе.

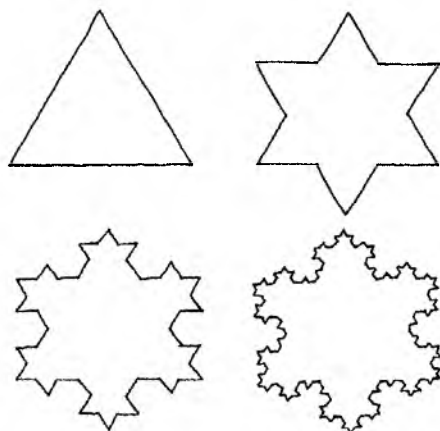


Рис. 20. «Снежинка» Коха строится путем последовательного возведения треугольников на сторонах более крупных треугольников. В пределе бесконечного числа шагов ее периметр становится фракталом, обладающим странным свойством порождать изгиб при каждом шаге.

В обычном смысле слова длина кривой Коха бесконечна; все эти маленькие треугольные отклонения прирастают бесконечно по мере того, как масштаб приближается к нулю. Однако она обладает важным свойством точной автомодельности. Если увеличить любую часть кривой Коха, она окажется полностью идентичной целому; это свойство действует даже при наименьшем масштабе рассмотрения. Именно оно позволяет нам вплотную приблизиться к понятию длины кривой с высокой степенью иррегулярности.

Поскольку кривая Коха строится пошагово, мы можем с точностью проследить за тем, как длина кривой растет с каждым шагом. Представим, что длина каждой стороны равна  $l$ , тогда об-

\* До бесконечности (лат.).

щую длину на протяжении всей кривой на любом заданном шаге можно получить путем умножения  $l$  на число сторон. Результат красив и прост:  $l^{1-D}$ . Здесь символ  $D$  – сокращенное обозначение числа  $\log 4 / \log 3$ , равного примерно 1,2618. Таким образом, длина кривой Коха приблизительно равна  $l^{-0.2618}$ . Это означает (из-за знака минус в степени), что длина растет до бесконечности, тогда как  $l$  стремится к нулю.

Кривая Коха имеет бесконечную длину, поскольку ее отклонения и изгибы расположены с такой большой плотностью относительно друг друга. Неким образом она «посещает» бесконечно большее число точек, чем плавная кривая. Значит, у *поверхности*, по-видимому, больше точек, чем у линии, поскольку поверхность имеет два измерения, тогда как прямая обладает лишь одним. Если мы попытаемся покрыть некую поверхность непрерывной линией,двигающейся зигзагами из стороны в сторону, то нам, несомненно, понадобится делать это бесконечно долго, поскольку у линии нулевая толщина. (На самом деле, сделать это невозможно.) При всех этих отклонениях и изгибах кривая Коха неким образом пытается уподобиться поверхности, хотя это ей не вполне удастся, так как ее периметр, несомненно, обладает нулевой площадью. Значит, кривую Коха лучше всего рассматривать как объект, каким-то образом располагающийся между линией и поверхностью. В действительности о ней можно сказать, что число ее измерений лежит *между* 1 и 2.

Идея фрактальной размерности не столь безумна, как кажется на первый взгляд. В 1919 году устойчивое математическое основание ей придал Ф. Хаусдорф. Ее строгое математическое обоснование нас не должно волновать. Суть в том, что если принять определение размерности Хаусдорфа, то некоторые математические объекты (подобные кривой Коха) получают право на дробную степень размерности, в то время как «нормальные» кривые, поверхности и объемы по-прежнему обладают ожидаемыми измерениями 1, 2, 3.

Размерность Хаусдорфа представляет собой важное средство для измерения длины кривой Коха. Процедура проста: обозначим длину кривой как  $l^D$  раз от числа долей длины  $l$ , где  $D$  – измерение Хаусдорфа. В случае кривой Коха  $D = \log 4 / \log 3 = 1,2818\dots$  и теперь можно допустить, что кривая обладает бесконечной длиной



$I^D \times I^D = 1$ , что гораздо более разумно. Таким образом, при использовании определения размерности Хаусдорфа кривая Коха обладает размерностью 1,2818.

Мандельброт закрепил название *фрактала* за формами, подобными кривой Коха и обладающими большим числом измерений (обычно дробным), чем можно было ожидать исходя из наивных предположений. Математики составили обширный перечень фракталов, а Мандельброт создал множество новых. Вопрос в том, представляют ли они интерес только для математиков или же фрактальные структуры встречаются в реальном мире? Кривая Коха задумывалась лишь как грубая модель береговой линии, для получения реалистичных очертаний побережья требуется дальнейшая обработка и совершенствование.

Тем не менее можно утверждать, что береговая линия больше приближена к фракталу, чем к плавной кривой, а потому будет более естественным принять фракталы за исходную точку для моделирования таких форм.

На самом деле Мандельброт не первый ввел формулу  $I^{1-D}$  для береговых линий. Ее первооткрывателем был Льюис Фрай Ричардсон, дядя актера Сэра Ральфа Ричардсона, отличавшийся эксцентричным нравом. За свою жизнь он успел побывать метеорологом, физиком, психологом, его влекло изучение необычного в малоизвестных областях. Исследовав береговые линии, он открыл вышеупомянутый закон автомодельности, а также сумел обнаружить различные значения константы  $D$  для различных известных ему прибрежных областей, в том числе для Великобритании, Австралии и Южной Африки.

Создав при помощи компьютера фрактальные кривые и поверхности (число измерений последних располагается между 2 и 3), Мандельброт опубликовал красивые изображения, напоминающие многие знакомые нам формы и структуры. В его книгах и статьях можно найти острова, озера, реки, пейзажи, деревья, цветы, леса, снежинки, звездные скопления, пену, драконов, вуали и многое другое. Особенно впечатляют результаты, полученные им с использованием цветового кодирования, в этом случае некоторые абстрактные формы обладают большой художественной силой.

Фракталы находят многообразное применение в физической науке. Особое значение они имеют в системах, где случаются ста-

тистические или произвольные эффекты: например, знаменитое броуновское движение, когда маленькая частица, подвешенная в жидкости, движется зигзагообразно вследствие обстрела ее поверхности соседними молекулами. Но фракталы применялись и в других сферах, например в биологии и даже экономике.

## Ближайшее к тому, что неведомо человеку

Особый интерес вызывает фрактал, известный как Канторово множество, названный так в честь математика Георга Кантора, который также изобрел дисциплину, именуемую теорией множеств. Примечательно, помимо прочего, и следующее: математические исследования Кантора завели его в такие странные пределы, что появились серьезные основания медицинского характера для сомнения в здравости его рассудка, тогда как современники ученого принижали результаты его труда.

Как и кривая Коха, Канторово множество автомодельно и строится путем последовательных шагов. Они отображены на рис. 21. Вначале, посередине прямой, чья длина принята за единицу, вырезается третья часть. Затем сходным образом удаляются трети из середины оставшихся частей линии, затем – их срединные трети и так далее, *ad infinitum*. (Тонкость состоит в том, что конечные точки удаляемых отрезков, т.е.  $1/3$ ,  $2/3$ , должны остаться на месте).

Теперь можно предположить, что данное бесконечное расхищение сегментов прямой в конечном итоге лишит ее всех со-

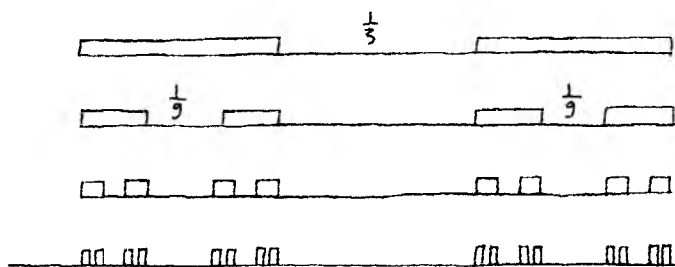


Рис. 21. Формирование фрактала Канторовой «пыли». Здесь показаны первые шаги в бесконечной последовательности удалений, превращающих непрерывный отрезок прямой в множество, содержащее промежутки на каждом уровне.

ставляющих частей, за исключением, вероятно, отдельных точек. Конечно, получившийся объект будет иметь нулевую длину, что, по-видимому, предполагает наличие у Канторова множества нулевого измерения, состоящего из набора отдельных точек. Удивительно, но это не так. Можно показать, что Канторово множество – фрактал с размерностью  $\log 2 / \log 3 = 0,6309\dots$  Другими словами, это не просто бесконечный набор непротяженных точек, однако его недостаточно, чтобы достичь действительной протяженности непрерывной линии. В начале исследований эти свойства создали множество трудностей.

Если изменить ту часть линии, которую каждый раз удаляют из  $1/3$ , становится возможным создавать множества с любой размерностью от 0 до 1. При размерности, близкой к 1, заполнение точками довольно плотное, тогда как при размерности близкой к 0 точки относительно редки.

В течение десятилетий Канторово множество считали не более чем математической диковинкой – или следует сказать уродством?

Однако Мандельброт утверждает, что с высокой степенью аппроксимации оно соответствует вещам из реального мира. Впервые он заинтересовался множеством, когда изучал периодические помехи в цифровых системах связи, где каждая вспышка помех может быть разложена на периодические субвспышки, содержащие периодические субсубвспышки и так далее, по принципу автомобильного масштабирования.

Более наглядный пример можно найти в системе колец Сатурна. Хотя на фотографиях кольца издавна выглядят твердыми, на самом деле они состоят из небольших частиц, распределенных с довольно малой частотой. И действительно, астрономы без труда наблюдают звезды *сквозь* кольца. Уже в 1675 году астроном Джованни Кассини открыл разрыв в кольцах Сатурна, и с годами обнаруживалось все больше разрывов, по мере того как эту планету изучали все более подробно. Недавно американский космический аппарат пролетел мимо Сатурна, и на фотографиях открылись тысячи все более тонких перегородок. В действительности Сатурн окружен не непрерывной полосой, а сложной системой колец внутри других колец – или разрывов внутри разрывов, – напоминающих Канторово множество.

## Самое сложное, известное человеку

Последний фрактал, который мы рассмотрим, был назван в честь Мандельброта – множество Мандельброта. Оно существует в виде кривой, ограничивающей область двумерной полосы, известной как комплексная плоскость и названной самым сложным математическим объектом. Как очень часто бывает в этой области, реальные действия, необходимые для создания множества Мандельброта, обезоруживают своей простотой. Нужно лишь повторять простейшую процедуру отображения: точки на полосе, лежащие за пределами области, выносятся при отображении в бесконечность, тогда как точки внутри нее совершают невероятно замысловатые скачки.

Местоположение точек на поверхности можно определить посредством двух чисел, или координат (например, широты и долготы). Обозначим их  $x$  и  $y$ . Тогда требуемые действия по отображению будут состоять всего лишь в выборе неизменной точки на поверхности, например,  $x_0$ ,  $y_0$ , после чего следует подставить  $x^2 - y^2 + x_0$  вместо  $x$  и  $2yx + y_0$  вместо  $y$ . То есть точка с координатами  $x$  и  $y$  «отображается» в точке с этими новыми координатами. (Для читателей, знакомых с комплексными числами, действия еще более просты: при отображении перенос происходит из  $z$  в  $z^2+c$ , где  $z$  – это исходное комплексное число, а  $c$  – это число  $x_0+iy_0$ .) Таким образом, множество Мандельброта можно создать, если начать с координат  $x=0$ ,  $y=0$  и многократно применять отображение, задействовав конечные координаты каждой итерации в качестве начальных значений  $x$  и  $y$  для следующего захода. При большинстве значений  $x_0$  и  $y_0$  при повторном отображении рассматриваемая точка отправляется в бесконечность (и, в частности, за пределы рисунка). Однако в некоторых вариантах этого не происходит, и именно эти точки образуют множество Мандельброта.

Для исследования структуры множества Мандельброта необходимо использовать компьютер с цветной графикой. Разнообразие, сложность и красота возникающих форм захватывает дух. Взгляду предстает удивительно искусное переплетение завитков, языков пламени, колец и скани. По мере все нового и нового увеличения каждой детали появляются новые структуры внутри исходной, с новыми формами, прорывающимися наружу на каждом уровне.

Чрезвычайно простая математическая операция, задающая множество Мандельброта, по-видимому, представляет собой источник бесконечного набора форм.

Такие примеры, как множество Мандельброта и повторное отображение точек на прямой, рассмотренное в главе 3, подтверждают, что простые процедуры могут порождать почти неограниченное разнообразие и сложность. Хотелось бы предположить, что многие сложные формы и процессы, встречающиеся в природе, возникают таким образом. То, что вселенная полна сложного, не означает, что управляющие ими законы тоже сложны.

## Странные аттракторы

Одним из самых волнующих прорывов, сделанных наукой в последнее время, стало открытие связи между хаосом и фракталами. В самом деле, вполне вероятно, что именно в царстве хаотических систем фракталы оставят наиболее заметный научный след.

Чтобы понять эту связь, нам следует вернуться к маятнику, обсуждавшемуся в главе 4, и использованию фазовых диаграмм в качестве картины динамической эволюции. Там важным было понятие *аттрактора* – область диаграммы, к которой притягивается точка, представляющая движение системы. Приводились примеры аттракторов в виде точек или замкнутых петель. Можно подумать, что аттрактор бывает только точкой или прямой, но это не так. Также возможен *фрактальный* аттрактор.

Фрактальные аттракторы привлекают множества точек на фазовой диаграмме, обладающие размерностью между 0 и 1. Когда представляющая точка проникает во фрактальный аттрактор, она начинает перемещаться очень сложным и полностью непредсказуемым образом. Это означает, что система ведет себя хаотично и непредсказуемо. Таким образом, существование фрактальных аттракторов предвещает хаос. Например, первый открытый аттрактор относится к системе уравнений Лоренца, упоминавшейся в конце главы 4.

В 1971 году два французских физика, Д. Рюэль и Ф. Тэйкенс, схватились за эти идеи и применили их к давно исследовавшемуся вопросу турбулентности в жидкости. В своей новаторской работе они утверждали, что начало турбулентности можно объ-

яснить как результат перехода к хаотическому поведению, хотя и другим путем, несколько отличающимся от удвоения периода, описанного в главе 4. Это смелое заявление довольно серьезно расходится с традиционным пониманием турбулентности. Очевидно, что связи хаоса и турбулентности будут привлекать все большее внимание.

Другой пример связан с маятником, управляемым нелинейно, рассмотренным в главе 4. Эта система отлична тем, что приближается к хаосу через бесконечный каскад удвоений периода. Траектория на фазовой диаграмме все время движется по кругу с постоянно возрастающей частотой, прежде чем становится замкнутой. По достижении хаоса имеется бесконечное число петель, образующих конечный диапазон (рис. 18). Это аналогично рассмотренной выше попытке заполнить двумерную поверхность бесконечным числом линий, не имеющих ширины. В действительности этот диапазон представляет собой фрактал (сравните его с кольцами Сатурна), а его поперечное сечение было бы пронизано бесконечным множеством точек, образующих Канторово множество.

Когда системы с фрактальными аттракторами впервые подверглись изучению, их особенности казались трудными для понимания, и аттракторы стали называть «странными». Сейчас, когда их свойства представлены в рамках теории фракталов, они, возможно, уже не такие странные.

## Автоматы

В одной забавной детской игре нужно сложить листок бумаги несколько раз и разрезать его согнутую сторону в виде клина или дуги. Когда листок развертывают, появляется восхитительный симметричный узор. Помню, так я вырезал самодельные бумажные салфетки для вечеринок с чаем.

То, что крупномасштабный порядок возникает за счет нескольких надрезов, в полной мере объясняется очень простым законом, связанным со складыванием бумаги. Самодельная салфетка – простейший пример того, как простые правила и действия могут создать нечто сложное. Поможет ли нам это в изучении природной сложности?

П. С. Стивенс в своей книге «Типичное в природе»<sup>1</sup> отмечает, что рост биологических организмов часто следует, по всей видимости, простым правилам. В классическом тексте «О росте и форме»<sup>2</sup> Д`Арси Томпсон показывает, как многие организмы соответствуют простым геометрическим принципам. Например, соотношение форм скелета у различных видов рыб можно выявить путем нехитрых геометрических преобразований. Следовательно, из этого можно заключить, что *общие* сложные типы в природе могут быть созданы за счет многократного применения простых *локальных* процедур.

Систематическое изучение простых правил и процедур составляет раздел математики, известный как теория игр. С этим связана тема так называемых клеточных автоматов. Впервые они были использованы математиками Джоном фон Нейманом и Станиславом Уламом в качестве модели самовоспроизведения биологических систем, после чего различные прикладные аспекты клеточных автоматов изучались математиками, физиками, биологами и специалистами по вычислительной технике.

Клеточный автомат состоит из регулярной совокупности участков или клеток, сходных, например, с доской для шашек, но обычно бесконечных по протяженности. Эта совокупность может быть одно- или многомерной. Каждой клетке можно приписать значение некоторой переменной. В простейшем случае у переменной бывает только два значения, что лучше всего представить в виде пустой либо занятой (например, шашкой) клетки. Тогда состояние системы в любое время определяется путем перечисления того, какие клетки заняты, а какие пусты.

Сущность клеточного автомата состоит в том, чтобы назначить правило, по которому система детерминированно развивается во времени синхронным образом. Если пустому участку присвоено значение 0, а занятому 1, тогда правила можно представить в виде двоичной арифметики. В качестве правила одномерной совокупности (ряда клеток) предположим, что каждой клетке присваивается новое значение 0 (т.е. она обозначена как пустая), если две ближайшие к ней клетки обе пусты либо обе заняты. Значение 1 (т.е. полной клетки) ей присваивается, если занята только одна из

<sup>1</sup> P. S. Stevens, *Patterns in Nature* (Boston, Little, Brown, 1974).

<sup>2</sup> D'Arcy W. Thompson, *On Growth and Form* (Cambridge University Press, 1942).

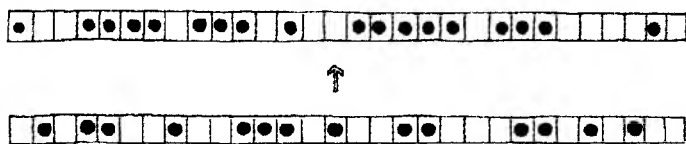


Рис. 22. Шашки распределены произвольно по ряду клеток. Затем система развивается на один шаг вперед с использованием правила, описанного в тексте.

соседних клеток (рис. 22). В арифметическом смысле это соответствует правилу, согласно которому новое значение каждой клеточки равно сумме значений ближайших к ней клеток по модулю два. Эту систему можно развивать далее отдельными временными шагами, полностью автоматизированным и механическим образом – отсюда название «автомат». На практике полезно и легко использовать компьютер с графическим дисплеем, но читатель может попробовать выполнить эти действия в качестве игры с использованием шашек или пуговиц.

Только что описанные действия – это пример *локального* правила, поскольку развитие данной клетки зависит только от клеток в непосредственной близости от нее. В целом есть 256 локальных правил, в которых задействованы ближайшие соседние клетки. Клеточные автоматы удивляют и очаровывают тем, что несмотря на локальную ограниченность правил и отсутствие иного внутреннего масштаба длины, отличного от размеров клетки, некоторые автоматы могут спонтанно объединяться в комплексные крупномасштабные образования, отличающиеся крупномасштабным порядком и взаимосвязанностью.

Подробное исследование одномерных клеточных автоматов проделал Стивен Вольфрам из Института передовых исследований в Принстоне. Он выделил четыре типа роста. Начальное образование может выродиться и исчезнуть либо попросту бесконечно расти при неизменной скорости, зачастую порождая автомобильные формы и фракталы и демонстрируя структурированность при любом масштабе длины. В ином случае некое образование может расти и сокращаться иррегулярным образом либо развиваться до конечных размеров и приобрести устойчивость.

На рис. 23 приведены некоторые примеры структур, способных появиться из неупорядоченного или произвольного исходного



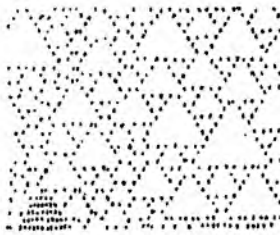


Рис. 23. Порядок из хаоса. В случае этих клеточных автоматов все начинается с произвольно распределенных шашек, которые спонтанным образом организуются в упорядоченные образования с долгосрочными корреляциями.

состояния. В этих случаях системе присуще примечательное свойство самоорганизации, его мы подвергнем тщательному рассмотрению в следующей главе. Иногда состояния высокой сложности вырастают из бескачественной основы. Вольфрам обнаружил состояния, отличающиеся рядами периодических структур, хаотическим и непериодическим поведением, а также сложными локализованными структурами, которые иногда распространяются по всему ряду в качестве единых объектов. Наблюдались и случаи самовоспроизведения. Хотя из-за различия в исходных состояниях возникают мелкие различия в строении последующих образований, согласно данным правилам, одинаковые свойства обычно повторяются для большого числа исходных состояний.

С другой стороны, поведение автомата может существенно отличаться в зависимости от того, какой конкретный набор правил применяется.

Клеточные автоматы можно сделать более реалистичными, если учесть помехи, поскольку все естественные системы подвержены произвольным колебаниям, вносящим возмущения в любую простую деятельность на локальном уровне. Добиться этого можно, если заменить строго детерминированные правила автомата вероятностной процедурой. Тогда привнесенное свойство произвольности можно подвергнуть статистическому анализу. Из-за ключевого свойства обратной связи, заложенного в автомат, путь его развития значительно отличается от классических систем, изучаемых в статистической механике и термодинамике и близких к состоянию равновесия (так называемые Марковские системы). Из неупорядоченного или произвольного исходного состояния могут раз-

виваться определенные структуры, содержащие длительные последовательности взаимосвязанных участков.

Вольфрам открыл следующее<sup>3</sup>:

Начинаясь уже с той совокупности, где каждая возможная конфигурация возникает с равной вероятностью, эволюция клеточного автомата увеличивает вероятности отдельных конфигураций и тем самым снижает энтропию. Это явление делает возможным самоорганизацию, поскольку оно увеличивает вероятность организованных конфигураций и подавляет неорганизованные.

Важное свойство большинства клеточных автоматов состоит в том, что их правила необратимы, т.е. несимметричны во времени. Так они избегают воздействия второго закона термодинамики, основанного на обратимости основных закономерностей микроскопической динамики. По этой причине и в согласии с вышеприведенной цитатой, энтропия состояний автомата может сократиться, а порядок – спонтанно возникнуть из беспорядка. В этом отношении клеточный автомат напоминает диссипативные структуры Пригожина – их мы обсудим в главе 6. В их случае также действуют строго необратимые физические принципы, и порядок в них появляется из хаоса. В самом деле, предельные циклы и странные аттракторы очень похожи на некоторые правила автоматов.

Есть надежда, что изучение простых автоматов откроет новые всеобщие принципы порядка, которые, возможно, действуют и в гораздо более сложных естественных системах. Вольфрам и его коллеги утверждают<sup>4</sup>:

В связи с этим изучение общих свойств, присущих их поведению, может привести к результатам, общим для поведения многих сложных систем, и в конечном итоге предложить обобщенную форму для законов термодинамики, применимую для систем с необратимой динамикой.

Один вид клеточных автоматов, названный аддитивным, особенно легко поддается изучению<sup>5</sup>.

Глобальные свойства аддитивных клеточных автоматов отличаются значительной универсальностью и независимостью свойств их структуры при подробном рассмотрении... В плане образования нового они могут оказаться действенными как

<sup>3</sup> Stephen Wolfram, 'Statistical mechanics of cellular automata', *Reviews of Modern Physics*, 55, 1983, p. 601.

<sup>4</sup> Oliver Martin, Andrew M. Odlyzhko and Stephen Wolfram, 'Algebraic properties of cellular automata', *Communications in Mathematical Physics*, 93, 1984, p. 219.

<sup>5</sup> Ibid., p. 221.

в простых случаях, легких для исследования, так и, вероятно, в сложных случаях, характерных для реальных физических систем.

В случае двумерных совокупностей (бесконечных досок для шашек) возникающая сложность намного более разнообразна и богата. Известный пример тому – «игра» под названием «Жизнь», изобретенная математиком Джоном Конвэем. При углубленном исследовании этого автомата открываются структуры, перемещающиеся взаимосвязанно, воспроизводящие себя, проходящие через жизненные циклы, нападающие на другие структуры и уничтожающие их и вообще скачущие самым занимательным и забавным образом.

Стоит отметить, что клеточные автоматы также можно изучать как формально-логические системы, а их эволюцию во времени рассматривать с точки зрения обработки информации. Тогда их можно представить как компьютеры. Было доказано, что определенный вид клеточных автоматов может моделировать так называемую машину Тьюринга, или универсальный компьютер, а потому способен определить значение любой вычисляемой функции независимо от ее сложности. Эта особенность может иметь огромное практическое значение при разработке столь желанных компьютерных систем с параллельной обработкой данных.

Фон Нейман утверждал, что доказательство Тьюринга, подтверждающее существование универсальной вычислительной машины, можно преобразовать так, чтобы доказать возможность универсального *строителя*, или самовоспроизводящегося автомата. Нам известны созданные человеком машины, которые делают другие машины, но устройства-сборщики обычно сложнее того, что они делают. С другой стороны, живые организмы успешно создают другие организмы, по крайней мере, столь же сложные, как и сами они. Действительно, если взять в расчет эволюцию, то производное иногда должно быть сложнее исходного.

Фон Нейман исследовал вопрос о том, может ли оснащенная программой машина воспроизвести саму себя. Теперь дело не просто в том, чтобы убедить себя в возможности запрограммировать машину на производство копии, сама копия должна суметь воспроизвести себя, а также создать новый набор правил, чтобы другая машина оказалась способна копировать себя. То есть программа должна подробно описывать то, как создать новый механизм, а

также то, как копировать сами правила. Здесь кроется опасность бесконечной регрессии.

Фон Нейману понадобилось 200 страниц собственной книги «Теория самовоспроизводящихся автоматов»<sup>6</sup>, чтобы представить строгое доказательство: в действительности существование универсального строителя *возможно*. Однако он обнаружил, что самовоспроизводиться способна только машина, преодолевшая определенный порог сложности. Это самый значительный вывод, так как из него ясно, что качественно новые свойства появляются у системы только тогда, когда она обладает некоторым уровнем сложности.

## Обратная видеосвязь

В наши дни видеокамера – обычное устройство. Проще говоря, видеокамера воспроизводит на телевизионном экране образ той сцены, на которую она обращена. Однако что происходит, когда видеокамера смотрит на свой собственный экран?

Эта ситуация похожа на парадокс, напоминающий об Эпимениде («Это утверждение – ложь») и других знаменитых парадоксах, ссылающихся на самих себя. Как и следовало ожидать, когда видеокамера смотрит сама на себя, система сходит с ума, как могут легко убедиться читатели, имеющие доступ к подобному оборудованию. Однако в итоге не обязательно получается хаотическая смесь размытых и бесформенных очертаний. Как ни странно, картинка стремится к спонтанной упорядоченности и структурированности и превращаются в колеса на оси, спирали, лабиринты, волны и полоски. Иногда эти формы приобретают устойчивость и сохраняются, иногда они ритмично вибрируют, при этом на экране вспыхивает упорядоченная последовательность цветов, после чего возвращается исходная картинка. Итак, видеосистема, наблюдающая саму себя, – яркий пример самоорганизации.

Как мы увидим из следующей главы, существенная составляющая каждого механизма самоорганизации – это обратная связь. В обычном режиме видеокамера собирает визуальную информацию,

<sup>6</sup> J. von Neuman, *Theory of Self-Reproducing Automata*, A. W. Burks (ed.) (Urbana, University of Illinois Press, 1966).

обрабатывает и передает ее на удаленный экран. В случае, когда камера изучает свой собственный экран, информация все время движется по замкнутому кругу. Получающееся в результате поведение не только представляет самоорганизацию визуально, но и служит предметом серьезного исследования в качестве испытательной модели, позволяющей лучше понять пространственную и динамическую сложность в целом.

Некоторые исследователи уверены, что обратная видеосвязь может содержать ключ к росту биологических форм (морфогенезу), а также пролить свет (в буквальном смысле) на теории клеточных автоматов, хаотических систем и химической самоорганизации. Как поясняет Джеймс Кратчфилд из Центра нелинейной динамики в Лос-Аламосе<sup>7</sup>:

Мир вокруг нас полон сложностью, произрастающей из его взаимосвязанности... Эта взаимосвязанность привносит структуру в хаос микроскопической физической реальности, которая превосходит возможности любых описаний, основанных на классической оценке динамического поведения... Я уверен, что обратная видеосвязь – это промежуточный шаг, требующийся нам, чтобы понять сложную динамику жизни.

На практике обратная видеосвязь может быть получена легко и быстро. Камера устанавливается в нескольких футах напротив экрана в затемненной комнате. Экспериментатор может менять фокусировку, масштаб, яркость, расстояние и направление камеры. Все это отразится на природе картинки. Чтобы приступить к опыту, можно выключить свет и помахать рукой перед камерой. Изображение начнет прыгать по экрану, и после некоторого количества проб и ошибок в нашем распоряжении окажутся согласованные образы.

Кратчфилд тщательно исследовал обратную видеосвязь. Он уверен, что поведение этой системы можно выразить в понятиях, очень близких к другим сложным динамическим системам. Он предлагает описать видеосистему с использованием уравнений, сходных с уравнениями реакции-диффузии, применяемыми для моделирования химической самоорганизации и биологического морфогенеза. Например, обратная видеосвязь – это диссипативная динамическая система (смотри главу 6), а состояние системы (представленное мгновенным изображением на экране) может

<sup>7</sup> James P. Crutchfield, 'Space-time dynamics in video feedback', *Physica*, 10D, 1984, p. 229.

развиваться под влиянием *аттракторов* в точном соответствии, к примеру, с подвергающимся воздействию маятником.

Отыскать точное подобие для нелинейного механического движения возможно. Так, система приходит в состояние покоя в виде устойчивого изображения, соответствующего точечному аттрактору, или претерпевает периодические изменения, подобные предельному циклу. В другом случае ее состояние приближается к хаотическому (фрактальному) аттрактору, за которым следует непредсказуемое и произвольное поведение. Подобно другим системам, постепенно удаляемым от состояния равновесия, видеосистема может потерять устойчивость при определенном критическом значении некоего параметра, например масштаба. В этом случае происходят бифуркации, принуждающие систему внезапно и спонтанно перескакивать к новому типу деятельности, и это состояние может обладать более высоким уровнем организации и сложности.

Благодаря всем этим интересным свойствам обратная видеосвязь становится замечательным средством моделирования сложности и организации большого числа физических, химических и биологических систем. Вполне может случиться так, что видеосистема, спонтанно создающая некую структуру и форму, способна пролить свет на некоторые общие принципы, посредством которых сложные системы появляются в мире природы.

Что же представляет собой исследование фракталов, клеточных автоматов, обратной видеосвязи и тому подобного – всего лишь любопытное развлечение, подражание естественной сложности или же изучение фундаментальных законов природы, задействованных в реальном мире? Поверхностное сходство, конечно, может ввести в заблуждение. В конце концов, мультфильмы могут казаться очень похожими на жизнь, однако они ни в коей мере не связаны с законами, действующими в настоящей жизни. Компьютер может отвечать как разумное существо, даже если он запрограммирован самым простым образом, заведомо не имеющим никакого отношения к тому, как на самом деле работает мозг.

Сторонники клеточных автоматов отмечают, что многие естественные высокосложные системы выстроены из более-менее подобных единиц или составляющих. Биологические организмы сделаны из клеток, снежинки – из кристаллов льда, галактики – из звезд и т.д. Особые структуры, характерные для автоматов, были

выявлены, например, в расположении пигментов на раковинах моллюска, а также – в случае спиральных галактик. Утверждается, что клеточные автоматы предоставляют пригодные для изучения плодотворные методы для моделирования самоорганизации во многих физических, химических и биологических системах. Возможно, еще более важно то, что изучение клеточных автоматов способно привести к открытию общих принципов, касающихся возникновения сложного и его природы в случае, когда совокупность простых сущностей действует совместно по принципу сотрудничества.

Вольфрам полагает<sup>8</sup>:

Конечная цель – выделить, в ходе изучения клеточных автоматов, общие свойства «самоорганизующегося поведения» и, возможно, вывести всеобщие законы, сходные с законами термодинамики.

Несомненно, вычисления и исследования, основанные на подобии, о которых было рассказано в этой главе, не могут остаться без внимания. Они показывают, что появление сложноорганизованных систем в природе, вероятно, вполне соответствует определенным общематематическим принципам. Что уж говорить о том, как происходит спонтанное возникновение организованности и сложности в природе. Здесь нам следует перейти к реальным самоорганизующимся системам.

---

<sup>8</sup> Wolfram, op. cit., p. 601.

## 6

# Самоорганизация

## Творческая материя

**Л**юбой, кто стоял рядом с быстрым ручьем, непременно удивлялся бесконечно меняющемуся узору воронок и водоворотов. При ближайшем рассмотрении беспорядочный поток оказывается водоворотом организованной деятельности: появляются новые водные структуры, они преобразуются, множатся и, возможно, снова растворяются в потоке ниже по течению. Кажется, что река способна дать мимолетное существование едва ли не бесконечному разнообразию форм.

Каков источник творческой способности реки?

Согласно традиционному взгляду на физические явления, в конечном итоге они сводятся к нескольким основным взаимодействиям, охватываемым детерминированными законами. То есть путь развития у любой физической системы только один. Обычно предполагается, что небольшое изменение начальных условий вызывает незначительное изменение в последующем поведении.

Однако сейчас развивается совершенно новый взгляд на природу. Он признает, что многие явления выходят за пределы традиционных представлений. Мы видели, что детерминизм необязательно означает предсказуемость: некоторые очень простые системы бесконечно чувствительны к начальным условиям. Их развитие во времени проходит настолько произвольно и сложно, что совершенно не может быть предугадано. Поэтому понятие единственного эволюционного пути здесь неуместно. Похоже, у таких систем «собственная воля».

Многие физические системы ведут себя классическим образом при наличии ряда условий, однако по достижении некоего порога их предсказуемость внезапно теряется. Единственный путь



остаётся в прошлом, и система может «выбирать» из нескольких вариантов. Обычно это указывает на внезапный переход к новому состоянию, возможно, обладающему совсем другими свойствами. Во многих случаях система совершает внезапный скачок к гораздо более сложному и замысловатому состоянию. Особый интерес представляют случаи спонтанного возникновения пространственных структур или временных ритмов. Таким состояниям, видимо, свойственна определенная степень *глобального взаимодействия*. Системы, претерпевающие переход к таким состояниям, называются *самоорганизующимися*.

Примеры самоорганизации имеются в астрономии, физике, химии и биологии. Знакомое нам явление турбулентного потока, упоминавшееся выше, тысячелетиями озадачивает ученых и философов. Наступление турбулентности зависит от скорости жидкости. При низкой скорости поток ровный и однородный, однако по мере повышения скорости наступает критический порог, когда жидкость разделяется на более сложные образования. Если увеличивать скорость и дальше, могут произойти новые переходы.

В переходе к турбулентному потоку можно выделить несколько этапов, если на пути жидкости встает препятствие, например цилиндр. При низкой скорости жидкость ровно обтекает цилиндр, но при увеличении скорости в потоке после препятствия появляется пара завихрений. При более высоких скоростях завихрения теряют устойчивость, отрываются и сливаются с потоком. Наконец, при еще более высокой скорости жидкость становится крайне неустойчивой. Это полная турбулентность. Как уже вкратце рассказывалось в главе 5, считается, что турбулентность жидкости служит примером «детерминированного хаоса». Если это так, то в распоряжении жидкости оказывается неограниченное разнообразие и сложность, а ее будущее поведение неопределимо. По всей вероятности, мы обнаружили источник творческого дара реки.

## Что такое организованность?

До сих пор я довольно свободно употреблял слова «порядок», «организованность», «сложность» и т.д. Сейчас необходимо более пристально рассмотреть их значение.

Такие выражения, как «упорядоченное общество» или «список имен по порядку», имеют ясное значение. Мы подразумеваем нечто, чьи составляющие части действуют или собраны в единой системе на основе сотрудничества. В мире природы, однако, порядок представлен множеством различных видов. Само существование законов природы – это вид порядка, проявляющий себя в разнообразных природных закономерностях: тиканьи часов, геометрически выверенном движении планет, расположении спектральных линий.

Порядок часто виден и в пространственной структуре. Поистине удивителен пример правильных кристаллических решеток и форм живых организмов. И все же, без сомнения, порядок кристалла очень отличается от того, что мы имеем в виду, говоря об организме. Кристалл упорядочен из-за собственной простоты, а причина упорядоченности организма диаметрально противоположна этому и состоит в его сложности. В обоих случаях порядок носит глобальный характер; упорядоченность относится к системе в целом. Кристаллический порядок состоит в том, что правильная схема расположения атомов повторяется во всем материале. Биологический порядок узнаваем потому, что разнообразные составляющие организма сотрудничают для выполнения общей и объединяющей функции.

Казалось бы, в распознавании порядка неизбежно задействована субъективность. В криптографии закодированное послание один человек воспринимает как беспорядочную и бессмысленную путаницу символов, тогда как другой может истолковать его как документ, составленный самым тщательным образом. Подобным же образом, случайный взгляд на муравейник может оставить впечатление безумного хаоса, но если приглядеться повнимательнее, то откроется картина высокоорганизованной деятельности.

Большей объективности можно добиться, например, если выбрать математическое определение для измерения схожести форм. Для этого подойдет понятие *корреляций*. Например, разные участки кристаллической решетки обладают высокой степенью корреляции, человеческие лица коррелируют умеренным образом, а облака обычно крайне слабо коррелированы друг с другом по форме. Это сравнение можно провести с математической точностью и даже предоставить поиск корреляций компьютерам. Иногда

автоматический поиск может открыть корреляции в областях, где ранее они не наблюдались, например, в астрономии можно доказать, что фотографии, на первый взгляд, представляющие беспорядочное расположение галактик, свидетельствуют об образовании скоплений.

Прибегнув к математике, мы также получим определение произвольности, которую обычно рассматривают как противоположность порядка. Например, произвольной является последовательность цифр, полностью лишенная каких-либо систематических образований. Заметим: это *не* означает, что образований вообще не существует. Если произвольную последовательность просматривать довольно долго, то серия 1, 2, 3, 4, 5 обязательно появится. Суть в том, что ее появление невозможно было предсказать путем исследования предшествовавших ей цифр. Поэтому произвольно меняющиеся физические величины описываются как хаотические, произвольные или неупорядоченные.

Именно здесь мы сталкиваемся с одной тонкостью. В большинстве компьютеров имеется «генератор случайных чисел», который без всяких бросков кости производит числа, по-видимому, обладающие всеми признаками произвольных. В действительности они выводятся согласно прямолинейной и строго детерминированной процедуре (т.е. в принципе десятичное разложение числа  $\pi$  вычислить можно, но это займет очень много времени). Если узнать процедуру, то последовательность становится легко предсказуемой и, таким образом, в некотором смысле упорядоченной. На самом деле, компьютеры обычно выдают ту же самую последовательность чисел каждый раз, когда их просят сделать это заново. Можно назвать это «симулированной произвольностью». (Специальное обозначение для нее – «псевдослучайность».) В связи с этим возникает интересный вопрос: как вообще можно отличить псевдослучайность от истинной случайности, если работать мы можем только с числами? Как можно узнать, действительно ли бросок монеты или кости произволен? Единого мнения по этому вопросу нет. Многие ученые уверены, что истинной произвольностью в природе обладают только процессы квантовой механики.

В действительности, уяснить математический смысл понятия произвольности на удивление трудно. Интуитивно мы понимаем, что в некотором отношении произвольное число – это число без

каких-либо примечательных или особенных признаков. Трудность же в следующем: если удастся определить подобное число, то сам факт его идентификации уже придает ему некую особенность. Один из способов обойти эту трудность – описать числа алгоритмически, то есть в виде конечного результата некоторой компьютерной программы. С этой идеей мы уже встречались в конце главы 3 в связи с рассмотрением прыгающей частицы. Тогда особыми (т.е. произвольными) становятся те числа, которые могут быть произведены программой, содержащей меньше битов информации, чем само число. Отсюда случайное число – это такое число, которое не может быть генерировано подобным образом. Если применить данное определение произвольности, оказывается, что почти все числа произвольны, но случайность большинства из них не может быть *доказана!*

Физики и химики измеряют порядок в связи с энтропией, как отмечалось в главе 2. В этом случае истинный беспорядок соответствует термодинамическому равновесию. Однако важно понимать, что это определение относится к молекулярному уровню. Колба, равномерно наполненная водой постоянной температуры, предстает невооруженному глазу как в целом бескачественная, даже если она достигла максимальной энтропии. Кажется, она не *делает* ничего беспорядочного! Однако все кардинально изменится, если мы сможем наблюдать молекулы, носящиеся хаотическим образом. И наоборот, кипящее содержимое чайника может показаться неупорядоченным, и таким оно и является в *макроскопическом* смысле, однако с термодинамической точки зрения, эта система не находится в состоянии равновесия, а потому ее неупорядоченность не максимальна. На одном уровне может царить порядок, а на другом – беспорядок.

Очень часто порядок и организованность используют как взаимозаменяемые термины, но это может привести к путанице. Естественно называть живой организм организованным, но в случае с кристаллом такое определение не подходит, хотя оба они упорядочены. Организованность – качество, наиболее заметное в применении к процессу, а не к структуре. Амеба обладает организацией, поскольку ее разнообразные составляющие работают совместно, следуя общей стратегии, и каждая составляющая играет особую роль, связывающую ее с другими частями. Ископаемое

может сохранить нечто от формы организма, оно, без сомнения, упорядочено, но не обладает той же организованностью, что и его прототип, поскольку оно «заморожено».

Различие между порядком и организованностью может быть очень важным. Когда бактерии выращиваются в некоторой культуре, общая система становится более организованной. С другой стороны, второй закон термодинамики требует увеличения общей энтропии, поэтому в данном смысле система в целом становится менее упорядоченной. Можно сказать, что порядок относится к *количеству* информации (т.е. отрицательной энтропии) в системе, тогда как организованность относится к *качеству* информации. По мере своего развития живые организмы улучшают качество системы, но в ходе этого создают энтропию.

Вероятно, можно говорить о «воссуществлении» порядка как о примере организованности. Так, ученые часто говорят о том, что солнечная туманность организуется в систему планет, или об облаках, соединяющихся в узоры. Все же эти выражения имеют отчасти метафорический смысл, поскольку под организованностью обычно понимают некоторое намерение или план. Тем не менее, мы смотрим сквозь пальцы на рассуждения о воде, «пытающейся найти собственный уровень», и компьютерах, «вырабатывающих ответ».

Можно ли измерить организованность или сложность? Одно очевидное затруднение состоит в том, что ни организованность, ни сложность, скорее всего, не являются аддитивными величинами. Я имею в виду, что мы не станем полагать, будто две бактерии вдвое сложнее (или вдвое организованнее), чем одна, поскольку при наличии одной бактерии произвести еще две довольно просто: требуется лишь снабдить ее определенным количеством пищи и подождать. И совсем не ясно, как можно соотнести по сложности бактерию с многонациональной компанией.

Джон фон Нейман попытался измерить, насколько сложна система, исходя из описывающих ее уравнений. Интуиция подсказывает: при расчете сложности нужно каким-то образом учитывать число составляющих и богатство взаимосвязей между ними. При ином и, возможно, равнозначном подходе сложность должна как-то быть связана с информационным содержанием системы или с длиной алгоритма, описывающего способ ее создания. Попытки математиков и специалистов по вычислительной технике

создать теорию сложности в таком формате составляют богатую библиотеку.

Шарль Беннет, специалист компании IBM по вычислительным машинам, предложил определение для организованности или сложности, основанное на понятии, названном им «логической глубиной». В качестве примера представим, что А желает послать сообщение Б. Цель может состоять в том, чтобы сообщить об орбите спутника. Теперь А должен перечислить последовательные положения спутника в соответствующее время. Либо А может просто указать положение и скорость спутника в некоторый момент и предоставить Б самому высчитать орбиту. Последний вид сообщения содержит всю информацию первого, но гораздо менее *полезен*. Другими словами, сообщение – это не только его информационное содержание, но и *ценность* или *качество* информации, которые следует учитывать. В этом случае логическая глубина соответствует, грубо говоря, длине вычисления, необходимого для расшифровки сообщения и реконструкции орбиты. В случае с физической системой логическая глубина может измеряться количеством времени, необходимого компьютеру для симуляции поведения системы с определенной степенью разрешения. Беннет показал, как эту идею можно сформулировать машинезависимым способом.

Другим, во многом отличным от предыдущего путем, пошел биолог-теоретик Роберт Розен из Университета Дэлхузи, Новая Шотландия. Он подчеркивает, что ключевая особенность сложных систем состоит в возможности взаимодействовать с ними большим числом способов. Таким образом, он открыто признает неизбежное свойство субъективности. Сложной систему делает не столько то, чем она является, сколько то, как она работает. Поэтому мы вновь сталкиваемся со свойством целеполагания, когда сложность обладает намерением. Конечно, в биологии оно очевидно. Организованная сложность глаза служит цели обеспечения организма зрением. Менее очевидно то, как можно связать цель с неорганическими системами.

Благодаря исследованию сложных систем было сделано одно важное открытие: самоорганизация тесно связана с видом хаоса, подобного тому, который обсуждался в главе 4. С одной стороны, хаос противоположен организованности, а с другой – это схожие

понятия. Для описания состояния обоих из них нужно большое количество информации и, как мы увидим далее, обоим присуща непредсказуемость. Физик Дэвид Бом подчеркивает, что сложное или произвольное поведение не следует рассматривать как беспорядочное. На самом деле, для описания такого поведения нужен большой объем информации, тогда как беспорядок в термодинамическом смысле связан с отсутствием информации. Бом даже настаивает на том, что произвольность представляет собой вид порядка.

Далее мы увидим, что организованности и сложности, несмотря на их мощный интуитивный смысл, недостает общепринятых математически строгих определений. Остается надеяться, что этот недостаток будет устранен, когда будет достигнуто более полное понимание сложных систем.

## Новый вид порядка

В 1984 году работники Национального бюро стандартов США открыли странный материал, которому, казалось, был присущ новый вид порядка. До тех пор отвергавшееся учеными как невозможное, это вещество представляет собой твердое тело с тем же типом порядка, что и у кристалла, за одним важным исключением. Кажется, что его симметрия нарушает основополагающую теорему кристаллографии: его атомы образуют структуру, физически невозможную для любого кристаллического вещества. Поэтому его назвали *квазикристаллом*.

Обычный кристалл – это решетка из атомов, собранных в повторяющуюся структуру с высокой степенью регулярности. Различные формы кристаллов можно классифицировать с помощью математической теории симметрии. Например, если атомы занимают участки, соответствующие углам куба, то решетка обладает четырехкратной осевой симметрией, поскольку она выглядела бы так же, если повернуть ее на четверть оборота. Можно принять куб за исходный строительный блок решетки и представить себе набор кубов, заполняющих пустоты и в точности подходящих друг к другу, в итоге образуя макроскопическую решетку.

Правила геометрии и трехмерность пространства накладывают жесткие ограничения на природу симметрии кристалла. Простой случай, исключаемый из рассмотрения, – это *пятикратная*

осевая симметрия. Никакое кристаллическое вещество не может иметь пятикратную симметрию.

Причина проста. Всем приходилось видеть стену, полностью выложенную квадратной плиткой (четырёхкратная симметрия). Как обнаружили пчелы, то же самое можно проделать и с шестиугольниками (шестикратная симметрия). Но никто не видел стену, сплошь выложенную пятиугольниками, так как сделать этого нельзя. При соединении пятиугольников между ними остаются зазоры (рис. 24).

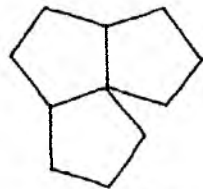


Рис. 24. Составить мозаику из пятиугольников невозможно: они не прилегают вплотную друг к другу.

В трехмерном пространстве роль пятиугольника играет твердое тело с пятикратной симметрией, носящее устрашающее название икосаэдр. Это фигура с 20 треугольными гранями, составленными так, что пять граней сходятся в каждой вершине. Хотя заполнить ящик кубами, не оставив лишнего пространства, можно, пытаться сделать то же самое с икосаэдрами бесполезно. Их попросту нельзя расположить вплотную друг к другу и заполнить все пустоты. Значит, в то время как отдельную группу атомов можно составить в виде икосаэдра, нельзя соорудить периодически повторяющуюся решетку из таких единиц. По этой причине все были в шоке, когда в ходе исследований с использованием электронного микроскопа Национальное бюро стандартов открыло крупномасштабную пятикратную симметрию в сплаве алюминия и марганца.

На этом этапе некоторые вспомнили о любопытном открытии, которое несколькими годами ранее сделал оксфордский математик Роджер Пенроуз, больше известный своими работами о черных дырах и свойствах пространства-времени. Пенроуз показал, как можно вымостить плоскость с пятикратной симметрией при помощи двух фигур – тонкого и толстого ромба. В итоге получается структура, изображенная на рис. 25. Пятиугольная симметрия проявляется во многих существующих десятиугольниках (десятисторонних фигурах). Здесь явно присутствует некоторый крупномасштабный порядок, поскольку стороны десятиугольника параллельны друг другу.

Чтобы понять основное различие между мозаикой Пенроуза и кристаллической структурой, необходимо различать два вида



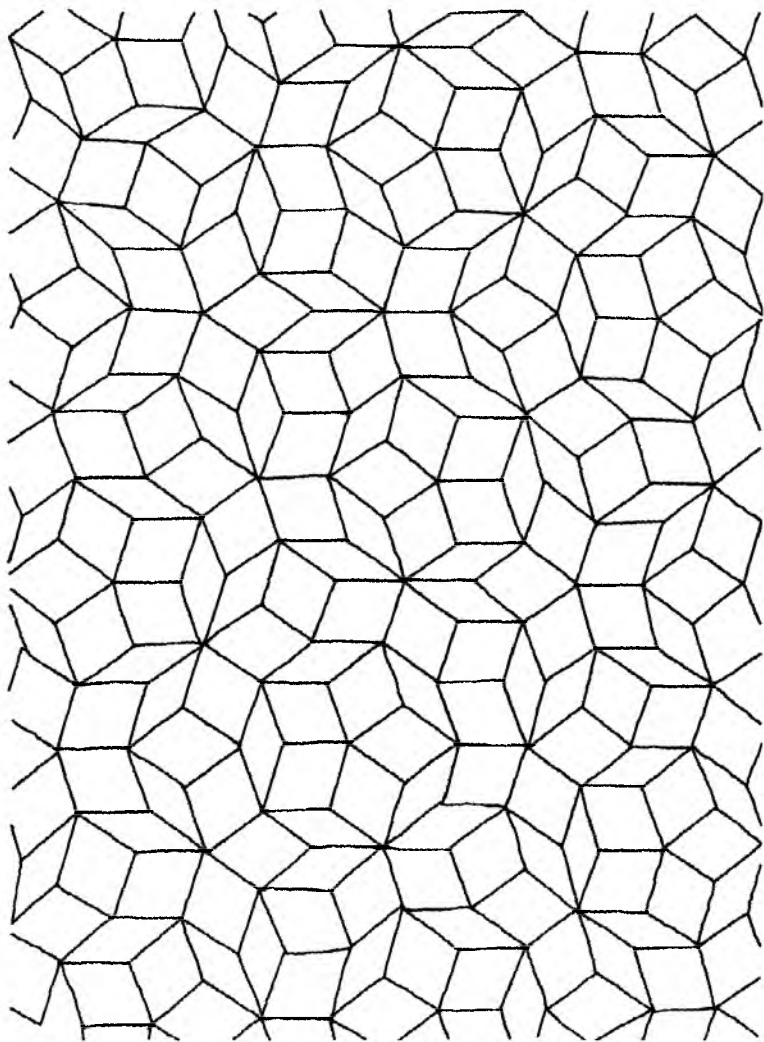


Рис. 25. Мозаика Пенроуза. Используя только две фигуры, можно вымостить всю плоскость целиком без зазоров. В результате появится любопытный узор с пятикратной симметрией и крупномасштабным порядком, но без периодичности.

крупномасштабного порядка, трансляционный и ориентационный. Оба присущи обычным кристаллам с периодической решеткой. Трансляционный порядок состоит в том, что решетка будет выглядеть так же, если ее сместить в сторону на одну строительную единицу

(т.е. на один куб) или на любую величину, в точности кратную ей. Ориентационный порядок – это свойство исходных строительных блоков образовывать геометрические фигуры, чьи края и грани сориентированы параллельно друг другу по всему кристаллу.

Структура мозаики Пенроуза, служащая моделью для квазикристаллов, обладает ориентационным, но не трансляционным порядком. Она не подчиняется теореме, требующей пятиугольной симметрии, поскольку, в отличие от кристаллической решетки, она непериодична: как бы далеко ни распространялась мозаика, никакая локальная структура не будет повторяться циклически.

Как следует описывать такие структуры? Бесспорно, они обладают простым видом целостного порядка, однако также здесь присутствует и большая степень сложности, поскольку структура повсюду немного меняется. В связи с этим требуется прежде всего ответить на каверзный вопрос о том, как растут квазикристаллы. В обычном кристалле порядок, наблюдающийся в элементарной строительной единице, распространяется по всей решетке посредством простого повторения. Физические силы, действующие на соответствующие силы в разных единицах, одинаковы повсюду. В квазикристалле каждый пятикратный блок размещен в немного отличающемся окружении, с другим набором сил. Как атомы из разных частей договариваются о том, чтобы собраться в правильных пропорциях и в верном месте для сохранения ориентационного порядка при столь большом расстоянии, когда каждый атом подвергается воздействию разных сил?

Кажется, что существует некое нелокальное организующее влияние, которое до сих пор скрыто непреодолимой завесой тайны.

## Примеры самоорганизации

Простейший пример самоорганизации в физике – это фазовый переход. Наиболее известный фазовый переход – это преобразование жидкости в твердое тело или газ. Когда водяной пар конденсируется и образует капли или вода замерзает и превращается в лед, исходное однородное состояние резко и спонтанно приобретает структуру и сложность.

Фазовый переход может иметь место в разных системах. Например, для ферромагнетика при высокой температуре не

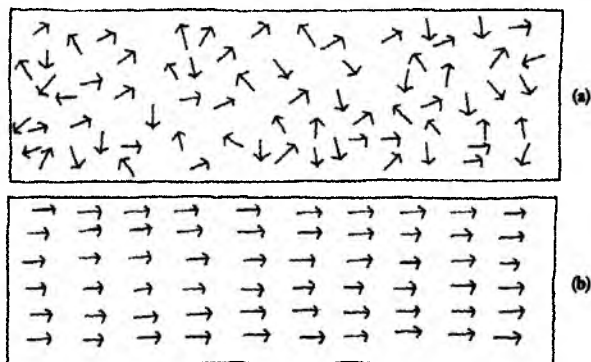


Рис. 26. (а) При высоких температурах из-за теплового возбуждения микромагниты сохраняют произвольную ориентацию: средний уровень их поля равен нулю. (б) Ниже критической температуры происходит фазовый переход, и все микромагниты спонтанным образом образуют единую структуру. Крупномасштабный порядок, вызванный таким сотрудничеством, обеспечивает сложение малых магнитных полей для создания макроскопического поля.

свойственно постоянное намагничивание, но по мере снижения температуры достигается критический порог, когда намагничивание возникает спонтанно. Ферромагнетик состоит из множества микроскопических магнитов, которые частично свободны и вращаются. Когда материал горячий, эти магниты колеблются хаотично, независимо друг от друга, так что на макроскопическом уровне степень их намагниченности в среднем равна нулю. Когда материал остывает, взаимодействия между микромагнитами выстраивают их в одном направлении. При критической температуре разрушающее действие теплового возбуждения неожиданно преодолевается и все микромагниты вступают в сотрудничество, создавая упорядоченную структуру (рис. 26). Теперь намагниченность каждого из них усиливается, и в результате возникает единое крупномасштабное поле.

Другой пример связан с электропроводностью. Когда определенные вещества охлаждаются до температуры, близкой к абсолютному нулю, они внезапно полностью теряют сопротивление электричеству и становятся *сверхпроводящими*. В данной низкотемпературной фазе миллиарды электронов, составляющих ток, ведут себя как единое целое и движутся в соответствии с квантово-волновым принципом, с высокой степенью корреляции и организованности. Для сравне-

ния – в обычном проводнике электроны движутся по большей части независимо, по сложной и произвольной траектории. Подобные крупномасштабные образования случаются и в *сверхтекучих жидкостях*, например в жидком гелии, где жидкость может течь без трения.

Вышеприведенные примеры самоорганизации связаны с постепенным снижением температуры в условиях термодинамического равновесия. Изменения могут быть более внушительными, когда система значительно удаляется от равновесия. Один из примеров – лазер. В состоянии, близком к термодинамическому равновесию, горячее твердое тело или газ ведут себя как обычная лампа: каждый атом испускает свет произвольно и независимо от других. В результате возникает луч, представляющий собой бессвязную путаницу из волновых серий длиной в несколько метров каждая. Вывести систему из равновесия можно при помощи «накачивания», а именно посредством передачи энергии атомам, чтобы привести большую их часть в возбужденное состояние. В итоге достигается критический порог, на котором атомы неожиданно образуют организованную структуру и следуют очень точному совместному поведению. Миллиарды атомов испускают элементарные волны, в точности одинаковые по фазе, создавая когерентную световую волну, которая распространяется на тысячи миль.

Другой пример спонтанной самоорганизации в системе, далеко ушедшей от равновесия, – это так называемая неустойчивость Бенара. Она происходит, когда горизонтальный слой жидкости нагревается снизу. Как уже объяснялось вкратце в главе 4, это происходит в метеорологии: солнечный свет нагревает землю, которая затем нагревает воздух над ней. Также это происходит в любой кухне, где на плиту ставят кастрюлю с водой. Теплая жидкость рядом с дном обладает меньшей плотностью и пытается подняться. Пока разница температур между верхом и низом жидкости мала (близка к равновесию), движению вверх противостоит вязкость. Однако по мере повышения температуры у дна преодолевается определенный порог, и жидкость теряет стабильность; внезапно начинается ее конвекция. При тщательно регулируемых условиях конвекция в жидкости начинает протекать высокоупорядоченным и устойчивым образом, образуя различные завитки или ячейки с шестиугольной структурой. Таким образом, исходное однородное состояние уступает пространственной структуре с различной крупномасштабной

упорядоченностью. При дальнейшем нагревании могут возникнуть новые преобразования, например наступление хаоса.

Важно во всех этих примерах то, что *симметрия*, присутствовавшая в начале, нарушается из-за перехода к более сложной фазе. Возьмем, к примеру, воду, замерзающую и превращающуюся в лед. Однородный объем воды обладает осевой симметрией. Когда образуются кристаллы льда, симметрия теряется, поскольку плоскости кристаллов устанавливают предпочтительную ориентацию в пространстве.

Симметрия нарушается также при переходе к ферромагнетизму. В фазе высокой температуры также имеется осевая симметрия, поскольку средний уровень магнитных полей микромагнитов равен нулю при любой ориентации. Когда температура падает, микромагниты выстраиваются в ряд, снова устанавливают предпочтительное направление в пространстве и нарушают осевую симметрию.

Мы рассмотрели примеры нарушения геометрической симметрии. Современная физика элементарных частиц пользуется более обобщенными концепциями симметрии, такими как абстрактная *калибровочная* симметрия, которая также может спонтанно нарушиться. Поскольку симметрия обычно нарушается при понижении температуры, история вселенной, остывающей после начального, самого горячего этапа, – это последовательность нарушений симметрии. Таким образом, нарушение симметрии служит альтернативой сложности в качестве меры для развивающейся творческой деятельности вселенной.

## Диссипативные структуры: теория формы

Научные революции – это больше, чем новые открытия; они меняют основополагающие понятия науки. Историки выделяют три уровня исследования материи. К первому относится Ньютонова механика – триумф необходимости. Второй – равновесная термодинамика – триумф случайности. Сейчас достигнут третий уровень, появившийся за счет исследования систем, далеких от равновесия.

Как мы уже видели, самоорганизация происходит как в равновесных, так и в неравновесных системах. В обоих случаях новая фаза отличается более сложной пространственной формой. Однако имеется основополагающее различие между тем видом

структуры, который имеется у ферромагнетика, и структурой конвекционной ячейки. Первая представляет собой неподвижную конфигурацию материи, замершую в определенной форме. Последняя же – динамическая сущность, созданная путем непрерывного расходования материи и энергии окружающей среды: для нее предложено название «*процесс-структура*».

Сейчас признано, что в довольно большом числе случаев системы, далеко отошедшие от равновесия, обычно стремятся к внезапной спонтанной смене поведения. Они могут начать вести себя произвольно или собираться в новые и неожиданные формы. Хотя иногда наступление таких внезапных изменений можно объяснить теоретически, точную форму новой фазы предсказать практически невозможно. Наблюдая за ячейками конвекции, физик может объяснить, опираясь на классические понятия, почему исходная однородная жидкость потеряла устойчивость. Однако ему не удастся заранее предсказать точное расположение конвекционных ячеек. Так, экспериментатор не властен над тем, где в конечном итоге окажется данная капля жидкости – в ячейке, вращающейся по часовой стрелке или же против нее.

Решающее свойство далеких от равновесия структур, дающих начало процессуальным структурам, состоит в том, что они *открыты* для окружающей среды. Традиционные методы физики и химии нацелены на закрытые системы, близкие к равновесию, поэтому требуется совершенно новый подход. Одну из ведущих ролей в деле развития этого нового подхода играет химик Илья Пригожин. Он предпочитает описывать формы, подобные конвекционным ячейкам, термином *диссипативные структуры*.

Чтобы понять почему, вспомните о движении маятника. В идеальном случае изолированного маятника при отсутствии трения (закрытая система) груз будет раскачиваться постоянно, бесконечно воспроизводя один и тот же тип движения. Если маятник подтолкнуть, он начнет двигаться по-новому с той же неизменностью. Можно сказать, что маятник все время помнит о возмущении.

Если ввести трение, положение изменится значительно. Теперь движущийся маятник рассеивает энергию в виде тепла. Независимо от вида начального движения, в конечном итоге он неизбежно остановится. (Этот пример описан в главе 4 как представляющая

точка, стремящаяся к предельной точке на фазовой диаграмме). Таким образом, он полностью теряет память о прошлом.

Если на маятник с затуханием воздействовать периодической внешней силой, он перейдет к новому типу движения под диктовку этой силы. (Таково поведение в предельном цикле.) Можно сказать, что упорядоченное движение маятника навязывается новым *организующим фактором*, а именно внешней ведущей силой. В таких условиях упорядоченная деятельность системы устойчива (если допустить, что нелинейных эффектов, ведущих к хаосу, нет). Если неким образом воздействовать на маятник, то вскоре он восстанавливается и возвращается к начальному типу движения, поскольку воздействие теряет силу за счет рассеивания энергии. И снова память о возмущении теряется.

Управляемый маятник с затуханием – это простой пример диссипативной структуры, но те же принципы действуют и в довольно большом числе случаев. Во всех примерах система выводится из равновесия под действием внешнего фактора и достигает устойчивости за счет рассеивания всех возмущений, вносимых в ее структуру. Поскольку энергия постоянно рассеивается, диссипативная структура будет жить до тех пор, пока окружающая среда снабжает ее энергией (а также, возможно, и материей).

Это позволяет нам понять способность к самоорганизации систем, далеких от равновесия. Организованная деятельность в закрытой системе неизбежно терпит крах в соответствии со вторым законом термодинамики. Но диссипативная структура избегает вырождения, требуемого вторым законом, переправляя энтропию в окружающую среду. Таким образом, несмотря на постоянное увеличение общего уровня энтропии во вселенной, диссипативные структуры сохраняют единство и порядок и даже могут увеличивать его.

Итак, исследование диссипативных структур дает необходимые предпосылки для понимания производящей способности природы. Долгое время казалось парадоксальным, что вселенная, по всей видимости умирающая под действием второго закона, тем не менее постоянно увеличивает собственный уровень сложности и организованности. Теперь мы видим, что вселенная неспособна увеличивать организованность и энтропию в одно и то же время. Оптимистическая и пессимистическая стрелы времени не могут

сосуществовать: вселенная способна на творческое однонаправленное движение вперед даже перед лицом второго закона.

## Химические часы

Пригожин вместе со своими коллегами занимался изучением многих физических, химических и биохимических диссипативных процессов, которым свойственна самоорганизация. Один из наиболее удивительных примеров – так называемая реакция Белоусова-Жаботинского. Смесь сульфата церия, малоновой кислоты и бромата калия растворяется в серной кислоте. Результат впечатляет.

В одном эксперименте при помощи насосов поддерживается постоянный расход реагентов (снова отметим принципиальную открытость), и система постоянно и тщательно перемешивается. Чтобы отследить химическое состояние смеси, можно использовать краски, дающие красный цвет при избытке ионов  $\text{Ce}^{3+}$  и синий при избытке ионов  $\text{Ce}^{4+}$ . При низком уровне накачивания (т.е. близком к равновесному) смесь сохраняет бесструктурное устойчивое состояние. Однако, когда расход реагентов возрастает и заставляет систему значительно удалиться от равновесного состояния, происходит нечто удивительное. Вся жидкость внезапно окрашивается в синий цвет. Это длится одну-две минуты. Затем она становится красной, потом синей, потом снова красной и так далее, поддерживая точнейшую регулярную пульсацию. Пригожин говорит об этом замечательном ритмическом поведении как о *химических часах*.

Важно верно оценить ключевое различие между химическими часами и ритмическим раскачиванием простого маятника. Маятник – это система с одной степенью свободы, он выполняет колебания при отсутствии рассеивания. При наличии рассеивания, как уже отмечалось выше, регулярное периодическое движение придается маятнику извне при помощи направляющей силы. В отличие от него химические часы обладают огромным числом ( $10^{23}$ ) степеней свободы, и это диссипативная система. Тем не менее пульсации не навязываются внешним фактором силы (принудительная подача реагентов), а вводятся посредством некоего *внутреннего* ритма, зависящего от динамики химической реакции.

Действие химических часов можно объяснить через определенные химические изменения, циклично происходящие в смеси, при



этом естественная частота изменений определяется концентрацией различных участвующих в реакции химических веществ. Существенную роль в данном циклическом поведении играет явление «автокатализа». Катализатор – это вещество, ускоряющее химическую реакцию. Автокатализ происходит при наличии вещества, способствующего производству самого данного вещества. Инженеры называют подобное обратной связью. Говоря математическим языком, автокатализ внедряет в систему *нелинейность*. В итоге, как всегда, нарушается симметрия. В данном случае исходное состояние симметрично относительно смещения времени (оно выглядит одинаковым от одного момента к другому), но эта симметрия спонтанно нарушается из-за колебаний.

Настоящее удивление в реакции Белоусова-Жаботинского вызывает степень взаимосвязанности химических пульсаций. В конце концов, химические реакции происходят на молекулярном уровне. Силы, действующие между отдельными молекулами, обладают масштабом всего лишь около одной десятиллионной доли сантиметра. Тем не менее химическим часам присуще упорядоченное поведение на уровне *сантиметров*. Бессчетные триллионы атомов объединяются в совместном и совершенно синхронном поведении, словно подчиняясь некоему всеобщему плану.

В предисловии к одной из книг Пригожина Элвин Тофлер описывает это причудливое явление следующим образом<sup>1</sup>:

Представим себе миллион белых шариков для игры в настольный теннис, перемешанных случайным образом с миллионом таких же черных шариков, хаотически прыгающих в огромном ящике, снабженном окном из стекла. Глядя в него, наблюдатель будет в основном видеть серую массу, но время от времени, в зависимости от распределения шариков вблизи окна в момент наблюдения, масса за стеклом будет казаться ему то черной, то белой, без какой-либо последовательности.

Представьте себе теперь, что внезапно окно начинает то белеть, то чернеть, то снова белеть, и так снова и снова, полностью меняясь в цвете через равные промежутки времени – как по часам.

Почему все черные и все белые шарики внезапно выстраиваются так, чтобы попеременно уступать место у окна шарикам другого цвета? По всем правилам классической науки такого происходить не должно.

Классическая химия, несомненно, работает с системами, близкими к равновесию. Тем не менее равновесные условия – это высокая степень идеализации, они редко встречаются в природе.

<sup>1</sup> Prigogine and Stengers, op. cit., Foreword by Alvin Tofler, p. xvi.

Почти каждая природная химическая система далека от равновесия, и ее состояние по-прежнему мало изучено. Но очевидно, так же как в случае с простыми физическими системами, далекие от равновесного состояния химические системы, скорее всего, будут отличаться удивительным и непредсказуемым поведением.

Реакция Белоусова-Жаботинского во многом напоминает простую динамическую систему, где концентрация химических элементов играет роль динамических переменных. Можно рассмотреть эту реакцию наглядно, применив знакомые нам фазовые диаграммы, траектории, предельные циклы и т.п. В этих терминах данную реакцию можно назвать предельным циклом, похожим на управляемый маятник. Как и в его случае, если увеличить химическое давление, то простое ритмическое поведение химической смеси сменится колебательными процессами, которые будут постоянно усложняться и достигнут кульминации с наступлением хаоса – крупномасштабного химического, а не молекулярного хаоса, связываемого с термодинамическим равновесием.

Наряду с крупномасштабной упорядоченностью во времени реакция Белоусова-Жаботинского может обладать и крупномасштабным пространственным порядком. Он наступает, если собрать реагенты в тонком слое и не перемешивать их. Тогда внутри смеси возникают и растут разные геометрические волновые фигуры. Они могут принимать форму кольцевых волн, испускаемых из центральной точки и распространяющихся с неизменной скоростью, либо спиралей, закрученных наружу по часовой стрелке или против нее. Эти фигуры составляют классический пример спонтанного появления сложных форм из исходного бескачественного состояния, т.е. нарушения пространственной симметрии. Это пространственный аналог нарушения временной симметрии, происходящего в химических часах.

## Материя, обладающая «собственной волей»

Трудно переоценить важность различий между материей и энергией, пребывающими в равновесии или в близком к нему состоянии, – классическим объектом научного исследования – и далекими от равновесия диссипативными системами. Пригожин называл последние *активной материей*, из-за их способности

спонтанно и непредсказуемо образовывать новые структуры. Кажется, что у нее есть «собственная воля». Отсутствие равновесия, утверждает Пригожин, – это «источник порядка» во вселенной; он приносит «порядок из хаоса».

Все складывается так, будто по мере постепенного развертывания вселенной из бескачественного начального состояния на выбор материи и энергии постоянно предлагаются два пути развития: пассивный, ведущий к простому, неподвижному, инертному веществу, хорошо описанному в Ньютоновой или термодинамической парадигме, и активный, превосходящий эти парадигмы и ведущий к непредсказуемой, развивающейся сложности и разнообразию. «В современном мире», – пишет Чарльз Беннет<sup>2</sup>, – «диссипация берет на себя одну из функций, ранее выполнявшихся Богом: она заставляет материю превзойти свою сходную с комком глины природу, проявляющуюся в равновесном состоянии, и вместо этого действовать поразительным и непредвиденным образом и создавать, к примеру, грозы, людей и зонты».

В действительности появление расходящихся путей эволюции – это одно из самых общих свойств динамических систем. Математически эту ситуацию можно описать при помощи так называемых дифференциальных уравнений с частными производными. Эти уравнения можно решить, только если указать граничные условия для системы. В случае с открытыми системами внешний мир постоянно оказывает воздействие через границы системы в виде непредсказуемых *флуктуаций*. Если рассмотреть решения этих уравнений, открывается общая черта: в системах, близких к равновесию, флуктуации подавляются. По мере того как систему принуждают удаляться все дальше и дальше от равновесия, она, однако, достигает критической точки, обозначенной специальным термином «точка бифуркации». Здесь первоначальное решение уравнений теряет устойчивость, указывая на то, что система вскоре внезапно изменится.

Эти события схематически изображены на рис. 27. Одиночная линия представляет исходное равновесное решение, которое затем дает ответвления или претерпевает бифуркацию при некоем критическом значении физического параметра (например, разницы тем-

<sup>2</sup> Charles Bennett, 'On the nature and origin of complexity in discrete, homogenous, locally-acting systems', *Foundations of Physics*, 16, 1986, p. 585.



Рис. 27. Природа обладает «свободной волей». График показывает, как при неуклонном удалении физической системы от равновесия, ее единственное состояние может потерять устойчивость, после чего перед ней встанут два альтернативных пути развития. В математическом смысле одиночная линия представляет собой одно из решений для уравнений развития. Оно разветвляется в точке сингулярности уравнений, вступающей в действие, когда параметр внешней силы достигает некоторого критического значения.

пературы в верхней и нижней части слоя жидкости). На этом этапе системе предстоит выбрать между двумя путями. В зависимости от контекста это может быть моментом скачка системы к новому состоянию улучшенной организации и новой, более сложной структуры. Или же, наоборот, она может потерять устойчивость и низвергнуться в хаос. В точке бифуркации неизбежные флуктуации, автоматически подавляемые в обычной равновесной термодинамике, вырастают до макроскопических масштабов и увлекают систему в новую фазу развития, которая затем приобретает устойчивость.

Поскольку система открыта, тип этих бесконечных микроскопических флуктуаций не может быть предугадан. Таким образом, результат преобразования отличается неопределенностью. По этой причине в самой природе новообразованных структур заложена непредсказуемость их конечной формы. Пригожин называет данное явление *порядком через флуктуации* и предполагает, что это один из основополагающих организующих принципов в природе<sup>3</sup>: «Кажется, что флуктуации окружающей среды могут как вызывать бифуркации, так и – что более зрелищно – создавать новые неравновесные переходы, которые не были предсказаны феноменологическими законами эволюции».

<sup>3</sup> Prigogine, 1980, op. cit., p. 147.

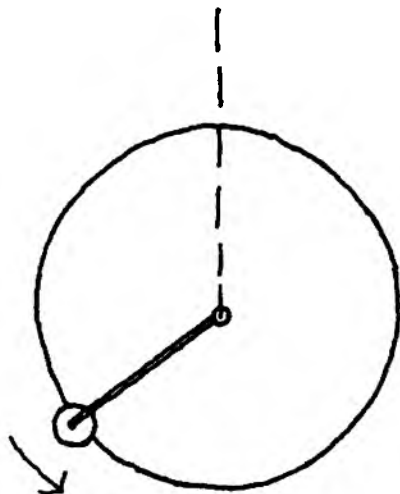


Рис. 28. Когда под шариком поднимается бугорок, симметричное состояние становится неустойчивым. Шарик скатывается в одно из двух углублений, спонтанно нарушая симметрию. Его перемещение представляет бифуркацию, при которой шарик может «выбирать» между двумя соперничающими конфигурациями.

Крайне простым примером бифуркации служит шарик, покоящийся в равновесии на дне одномерного углубления (рис. 28). Предположим, что на систему воздействует симметричный подъем углубления, который переносит шарик вертикально. Сначала трение не дает шарика скатиться, однако по мере удаления шарика от состояния равновесия его положение становится все более шатким, пока, в некий критический момент, он не скатывается с бугорка в углубление. Теперь решение механических уравнений распадается на две ветви, представляющие два новых стабильных состояния с минимальной энергией.

И вновь мы встречаемся с нарушением симметрии. Изначальная конфигурация, обладавшая симметрией, уступает однобокой форме: симметрию поменяли на устойчивость. Шарик может выбрать правое или левое углубление. Его выбор, конечно, будет зависеть от микроскопических флуктуаций, которые могут сдвинуть его на крохотное расстояние в том или ином направлении. Эта микроскопическая дрожь затем усиливается, и шарик скатывается в одно из углублений с растущей скоростью. По своей при-

роде микроскопические флуктуации непредсказуемы, и все же в конечном итоге именно они переводят систему в совершенно новое макроскопическое состояние.

Приведенный выше простой пример – это случай *статического* равновесия, но похожие соображения позволяют перейти к динамическим процессам, таким как предельные циклы и диссипативные структуры. Пример бифуркации в динамическом процессе показан на рис. 29. Здесь жесткий стержень с грузом, прикрепленным к его концу, образует маятник и может свободно вращаться в одной плоскости. При низких значениях энергии маятник раскачивается вперед и назад классическим образом. По мере увеличения энергии он раскачивается все выше и выше, пока не достигнет критического значения, при котором движение попросту поднимет груз маятника в верхнюю точку круга. При этом значении природа движения меняется внезапно радикальным образом. Вместо того, чтобы колебаться, стержень минует вертикаль и падает на другую сторону. Колебание сменяется вращением. Маятник внезапно стал работать совершенно по-другому.

В чем заключается математический смысл этих внезапных изменений поведения? Многие примеры химической самоорганизации можно успешно смоделировать, если применить нечто, известное как уравнение реакции-диффузии. Это уравнение выражает скорость изменения концентрации некоего химического вещества в виде суммы двух факторов. Первый представляет рост или сокращение количества химического вещества в результате химических реакций между другими веществами, участвующими в данной схеме. Второй нужен потому, что в реальной системе химические вещества диффундируют в окружающую среду, а это меняет концентрацию веществ в других областях. Оказывается, что этим простым уравнением описывается впечатляющее число типов поведения, в том числе основные свойства неустойчивости и бифуркации. Из него можно получить такие изменения во времени, как химические часы, и такие пространственные формы, как спиральные волны в реакции Белоусова-Жаботинского.

Одно из первых исследований в этом направлении осуществил математик Алан Тьюринг в 1952 году. Возможно, больше всего Тьюринг прославился своими эпохальными работами по основам математики, особенно это относится к понятию универсальной

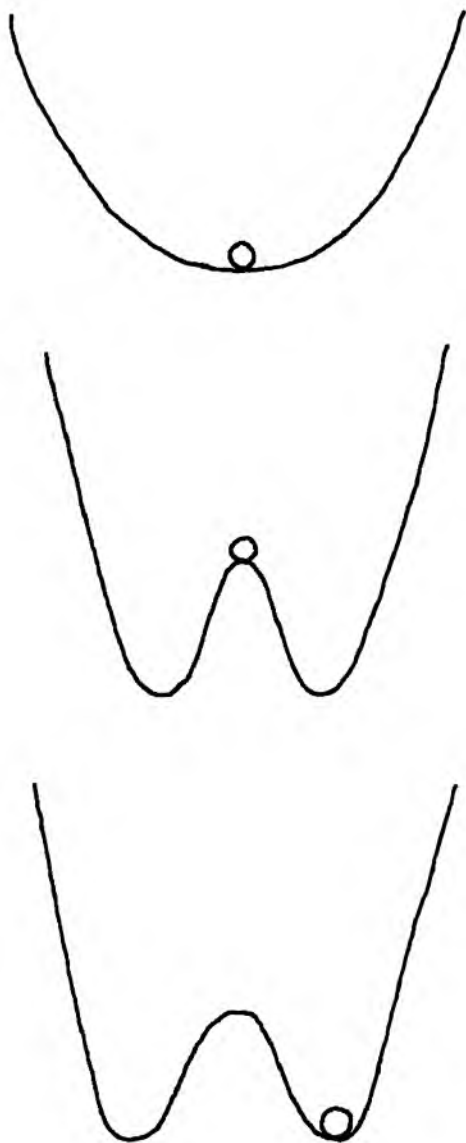


Рис. 29. При низких значениях энергии маятник раскачивается вперед и назад. Когда энергия возрастает (т.е. система оказывается дальше от равновесия), раскачивания постепенно усиливаются, пока, по достижении критического значения, рычаг не пересечет вертикальную линию, а колебания не превратятся во вращение. Система неожиданно перескочила к новому типу поведения.

вычислительной машины, которая уже бегло упоминалась нами в главе 5. Во время войны Тьюринг работал в Блетчли-Парке над взломом кода немецкой шифровальной машины «Энигма». Его труд спас жизнь многим союзникам, способствовал созданию первого настоящего компьютера и превратил Тьюринга в человека-легенду. После самоубийства ученого в 1953 году наука лишилась одного из лучших умов.

Тьюринг сочетал в себе любовь к основаниям математики с живым интересом к биологии, в частности к внешнему виду некоторых форм растений и животных, наводящих на мысль о геометрических узорах. Какой механизм, вопрошал себя Тьюринг, позволяет образовываться таким формам?

В качестве простого примера одного из процессов, которые могли участвовать в этом, Тьюринг рассматривал вопрос о том, что случится, скажем, с двумя химическими веществами, способными ускорить или замедлить выработку друг друга, а также диффундировать в окружающее пространство. Тьюринг сумел доказать математически, что при определенном значении скорости диффузии и реакции может возникнуть волна химической концентрации. Если предположить, что концентрация химических элементов каким-то образом запускает рост, то можно представить, как устанавливается некая химическая структура, способная снабдить организм пространственной информацией, которая подскажет ему, куда и как расти. В этом смысле химические образования, подобные тем, что возникают в реакции Белоусова-Жаботинского, возможно, играют некую роль в биологическом морфогенезе.

Помимо прочего, в работах Пригожина и других авторов, изучающих диссипативные структуры, восхищает то, что для описания как живых, так и неживых – на самом деле вполне обычных – систем вырабатывается общий язык. Такие понятия, как взаимосвязанность, синхронизация, макроскопический порядок, сложность, спонтанная организация, адаптация, рост структуры и прочие, традиционно закреплены за биологическими системами, которые, несомненно, обладают «собственной волей». Тем не менее мы применяем эти термины к лазерам, жидкостям, химическим смесям и механическим системам. Третий уровень исследования материи состоит в том, чтобы по-новому понять наиболее заметное проявление самоорганизации природы – феномен жизни.



## 7

# Жизнь: ее природа

*Успехи молекулярной биологии столь притягательны, что заставляют нас забыть об организме и его физиологии. Ученики Шредингера, основавшего церковь молекулярной биологии, превратили его мудрость в догму, согласно которой жизнь воспроизводит саму себя и исправляет собственные ошибки путем естественного отбора. Жизнь гораздо разнообразнее, чем эта наивная истина, так же как вселенная - это не только атомы, ведь недаром бабушки живут и испытывают наслаждение от тени пирамидальных тополей, не ведая о том, что и они сами, и эти деревья приговорены данной догмой к смерти.*

Джеймс Лавлок<sup>11</sup>

### Что такое жизнь?

**В** 1944 году, когда Эрвин Шредингер, один из создателей квантовой физики, опубликовал небольшую книгу «Что такое жизнь?», ее название свидетельствовало о том, что происхождение жизни, так же как и ее природа, скрывалось от него за непроницаемой завесой тайны. Направление мысли Шредингера оказало огромное влияние на начавшееся вскоре развитие молекулярной биологии. Тем не менее несмотря на выдающиеся достижения, совершенные за несколько десятилетий при работе над молекулярной основой жизни, вопрос Шредингера остается

---

<sup>1</sup> J. Lovelock, *Nature*, 320, 1986, p. 646.

без ответа. Биологические организмы все еще приводят ученых в крайнее замешательство.

Проблемы, возникающие при попытке понять жизнь, очевидны уже по тому, насколько трудно дать ей определение. Обычно мы признаем организм живым, когда сталкиваемся с ним, однако печально известны затруднения, которые возникают, стоит нам попытаться с точностью сказать, откуда у нас взялась такая уверенность в наличии жизни. Простого определения будет недостаточно. Любое свойство живых систем можно обнаружить и у неживых систем: кристаллы могут размножаться, облака способны расти и т.д. Очевидно, жизнь сочетает в себе необычные качества.

К наиболее важным свойствам живого относятся следующие.

### *Сложность*

Степень сложности у живых организмов намного выше, чем у любой другой известной физической системы. Сложность иерархична и охватывает как замысловатую структуру и деятельность макромолекул, таких как белки и нуклеиновая кислота, так и изящно выстроенное сложное поведение животных. На каждом уровне, а также между ними, находится удивительная сеть механизмов обратной связи и контроля.

### *Организация*

Биологическая сложность – это не простая усложненность. Она организована и гармонично выстроена таким образом, что организм действует как единое *целое*.

### *Уникальность*

Каждый живой организм уникален, как по своей форме, так и по процессу развития. В отличие от физики, изучающей, как правило, *классы* одинаковых объектов (например, электронов), организмы индивидуальны. Более того, уникальны как скопления организмов, так и различные их виды, и история эволюции живого на Земле, и вся биосфера. С другой стороны, мы узнаем в коте кота, в клетке клетку и т.д.

Существуют определенные закономерности и отличительные черты, позволяющие классифицировать организмы. Кажется, что живое можно довольно точно описать как одновременно и уникальное, и неспецифичное.

### *Новизна*

Живые организмы лучше всего воплощают утверждение о том, что «целое превосходит сумму его составляющих». В биологии на каждом новом уровне сложности появляются новые неожиданные качества, которые, по всей видимости, нельзя свести к свойствам составляющих.

### *Целостность*

Живой организм состоит из большого числа частей, структура и функции которых могут существенно различаться (например, глаза, волосы, печень). Тем не менее расположение составных частей и их взаимосвязанные и слаженные действия как будто следуют общему плану. Так организм приобретает явную индивидуальность, червь становится червем, собака – собакой и т. д.

### *Непредсказуемость*

Хотя многие биологические процессы по своей сути происходят автоматически и механически, дать точный прогноз относительно состояния некоей биологической системы в будущем невозможно. Организмы – особенно высшие – обладают, по-видимому, той самой «собственной волей». Более того, вся биосфера в целом непредсказуема, а эволюция между тем подкидывает нам новые и неожиданные организмы. Коровы, муравьи и кусты герани ни в коем случае не были неизбежными производными эволюции.

### *Открытость, взаимосвязанность и неравновесность*

Живое не может существовать в изоляции. Все организмы накрепко связаны с собственной неживой средой и нуждаются в постоянной материальной и энергетической подпитке, а также в воз-

можности выводить энтропию. Поэтому с физической и химической точек зрения равновесие между любым организмом и окружающей его средой серьезно нарушено. Понятие жизни приобретает полное значение только в рамках всей биосферы.

### Эволюция

Жизни, известной нам, не существовало бы вовсе, если бы она не смогла развиться из простого начального состояния до современного сложного. И снова в дело вступает явное движение вперед или *стрела времени*. Способность живого эволюционировать и приспособливаться к меняющимся условиям, приобретать все более сложную структуру и функции зависит от его умения передавать генетическую информацию своим потомкам (воспроизводство) и восприимчивости этой информации к отдельным изменениям (мутация).

### Телеология (телеономия)

Как отмечал Аристотель, развитие и поведение организмов упорядоченно и целенаправленно, как будто его ведут к конечной цели в соответствии с predetermined планом или проектом. Живший в девятнадцатом веке физиолог Клод Бернар выразил это таким образом<sup>2</sup>:

Существует, если можно так выразиться, предустановленный план для каждого существа и каждого органа. Его свойства таковы, что само по себе каждое явление зависит от общих сил природы, но когда оно рассматривается в связи с другими, то кажется, что некий невидимый проводник направляет его по пути, которому он следует, и ведет его к месту, которое он занимает.

Жак Моно, наш современник, лауреат Нобелевской премии по биологии и директор Института Пастера, хотя и сохраняет верность редуccionизму, тем не менее, делает похожее наблюдение<sup>3</sup>:

Одна из основополагающих черт, общая для всех живых существ без исключения, состоит в том, что они представляют собой *объекты, наделенные целью или проектом*, который они в то же время проявляют в собственной структуре и осуществляют за счет собственной деятельности... Вместо того, чтобы отвергать эту идею

<sup>2</sup> C. Bernard, *Leçons sur les phénomènes de la vie*, 2nd edn (Paris, J.L. Baillière, 1885), vol. 1.

<sup>3</sup> Jacques Monod, *Chance and Necessity* (London, Collins, 1972), p. 20.

(как пытались сделать некоторые биологи), ее следует признать как важнейшую составляющую определения живых существ в целом. Мы утверждаем, что последние отличаются от любых других структур или систем, имеющихся во вселенной, этим характерным качеством, которое мы будем называть *телеономией*.

Живые организмы – это высшее проявление активной материи. Они представляют собой наиболее развитую форму организованной материи и энергии, известную нам. Они служат примером для всех свойств – роста, приспособления, увеличивающейся сложности, разворачивания формы, разнообразия, непредсказуемости, – рассмотренных нами в предыдущих главах. Поскольку эти свойства столь ярко представлены живыми организмами, неудивительно, что простой вопрос «Что такое жизнь?» вызвал огромные противоречия и подготовил появление таких ответов, которые ставят под сомнение само основание науки.

## Витализм

Возможно, наибольшее удивление вызывает *телеологичность* биологических организмов (или теленомичность, этот термин более распространен в наше время). Как отмечалось в главе 1, Аристотель ввел идею о том, что окончательные причины направляют их деятельность к цели. Хотя обусловленность конечными причинами отталкивает позитивистов, некоторую телеологичность биологических систем отрицать невозможно. Из-за этого ученый попадает в затруднительное положение. Приведем пример мучений Моно<sup>4</sup>:

Тем не менее объективность заставляет нас признать теленомичность живых организмов и допустить, что своей структурой и деятельностью они выбирают и преследуют некую цель. Следовательно, здесь, по крайней мере, исходя из внешних признаков, кроется глубокое эпистемологическое противоречие.

Загадочные свойства живых организмов столь явно бросаются в глаза, что часто живые системы рассматривают как отдельно стоящий класс, как форму материи и энергии *настолько* странную, что на нее не действуют законы, поработившие обычную материю и энергию.

Убеждение, согласно которому жизнь нельзя объяснить обычными физическими законами, вследствие чего необходима некая

<sup>4</sup> Ibid., p. 31.

«дополнительная составляющая», известно как витализм. Последователи витализма убеждены в существовании «жизненной силы» или *élan vital*<sup>\*</sup>, пронизывающей биологические системы и отвечающей за их чрезвычайные силы и способности.

Витализм был разработан с большой тщательностью в начале двадцатого века силами эмбриолога Ганса Дриша, возродившего древние анимистические представления Аристотеля. Дриш утверждал существование причинного фактора, действующего в живой материи и называемого *энтелехия*, от греческого «телос», от которого происходит слово «телеология». Энтелехия подразумевает, что совершенная и цельная идея организма существует заранее. Это означает, что системы, обладающие энтелехией, имеют некую цель, то есть содержат внутри себя план или схему действий. Следовательно, энтелехия действует как некая организующая сила, управляющая физическими и химическими процессами организма в соответствии с этой целью. Например, развитие эмбриона из яйца направляется энтелехией, в которой каким-то образом содержится схема готовой особи. Дриш также надеялся, что с помощью энтелехии можно будет объяснить высшие формы биологической деятельности, такие как поведение и целенаправленное действие.

Дриш опубликовал свою работу в те времена, когда в физике господствовал строгий детерминизм. Его идеи об энтелехии напрямую противоречили законам механики.

Энтелехия должна каким-то образом побудить молекулы живой системы следовать общему плану, так как, согласно гипотезе, они неспособны сделать это самостоятельно. В предельном выражении это означает, что молекуле, которая в отсутствие энтелехии переместилась бы в точку А, вместо этого приходится двигаться в точку Б. Тогда возникает вопрос о природе дополнительной силы, действующей на нее, а также о происхождении энергии, передаваемой молекуле в данном случае. Если говорить более серьезно, то было не совсем понятно, как информация, содержащаяся в схеме, которая не содержится где-либо в пространстве, тем не менее, может вызвать воздействие силы на точку в пространстве.

---

\* Жизненный порыв (фр.)

Дриш попытался объяснить данное молекулярное действие, допустив, что энтелехия неким образом может приостанавливать на время микрофизические процессы, а следовательно, способна воздействовать на порядок событий *во времени* в крайне малом масштабе. Тогда суммарный эффект от множества подобных микроскопических остановок приведет к желаемым общим изменениям.

Несмотря на обезоруживающую простоту идей витализма, эту теорию всегда рассматривали как нечто сомнительное и несуразное в интеллектуальном отношении. Сегодня с ней совершенно не считаются.

## Механицизм

Полной противоположностью витализма предстает *механистическая* теория жизни. Она предполагает, что живые организмы – это сложные машины, функционирующие согласно обычным законам физики и подчиняющиеся обычным физическим силам. Различия между живой и неживой материей объясняются исключительно за счет разницы в уровне сложности. Строительные единицы «органических машин» – это биохимические молекулы (а следовательно, в конечном счете, атомы, из которых они состоят), а жизнь объяснима путем редукции функций живых организмов до деятельности молекул, их образующих.

Почти все современные биологи придерживаются механицизма, и именно этой парадигме мы обязаны удивительными достижениями в понимании природы живого. Главным образом, это объясняется впечатляющими успехами в сфере определения частностей молекулярной основы жизни, например открытием форм многих биохимических молекул и «взломом генетического кода». Так укрепилась уверенность в том, что все биологические процессы можно понять исходя из их базовой молекулярной структуры, а следовательно, исходя из законов физики. Это утверждение можно понять так, что биология – это всего лишь ветвь химии, которая, в свою очередь, представляет собой лишь ответвление физики.

В механистической теории жизни свободно используется машинный жаргон. Живые клетки называют «заводами», находящимися под абсолютным «контролем» молекул ДНК, которые ор-

ганизируют «сборку» элементарных молекулярных «единиц» в более крупные структуры, согласно «программе», закодированной в молекулярном механизме. Часто обсуждаются «модули», «переключение» и «коррекция ошибок». Основные процессы жизни приравниваются исключительно к деятельности на молекулярном уровне, наподобие микроскопических конструкторов «Мекано» или «Лего».

Жизнь на Земле оказывается изящно организованным совместным предприятием двух разных классов очень крупных молекул: нуклеиновых кислот и протеинов. Нуклеиновые кислоты обычно известны по двум аббревиатурам: РНК и ДНК. В большинстве организмов генетическую информацию содержит ДНК. Молекулы ДНК, в состав которых могут входить миллионы атомов, вытянутых в виде двойной спирали, едва ли способны на что-либо большее. Это «главные файлы», содержащие схемы, необходимые для репликации. Фрэнсис Крик, один из тех, кто открыл геометрическую форму ДНК, привел более красочное описание. По его словам, молекулы ДНК – это «тупые блондинки» молекулярной биологии, хорошо подходящие для воспроизводства, но едва ли годные на что-либо иное.

Большую часть работы на молекулярном уровне выполняют белки. Они идут на образование большей части структуры организма, а также несут основное бремя домашнего хозяйства. Белки, которые могут содержать тысячи атомов, образованы в виде длинных цепочек более мелких единиц, именуемых аминокислотами, с прикрепленными к ним разнообразными боковыми цепочками. Далее все скопление должно сложиться в замысловатую и довольно специфическую трехмерную структуру, чтобы функционировать исправно. Одно из характерных свойств белков состоит в том, что все они образованы из полностью одинаковых наборов 20 аминокислот. Будь то медведь, бегония или бактерия, в них задействованы все те же 20 аминокислот.

Структура ДНК также основана на длинных цепочках одинаковых единиц с сопутствующими боковыми группами. Костяк молекулы образован чередующимися структурами из молекул фосфата и сахара, при этом имеется всего четыре типа боковых групп, называемых основаниями, подвешенных к сахарам. Эти четыре основания образуют буквы «генетического кода» и известны под



аббревиатурами А, Г, Т и Ц. Размер и форма оснований таковы, что А вплотную совмещается с Т, а Г с Ц. Нормальная форма молекулы ДНК состоит из двух таких цепочек, склеенных в каждом «звене» посредством комплементарных пар. При этом все образование свернуто по спирали – в знаменитую двойную спираль. Важное свойство этого образования заключается в том, что молекулярные связи внутри каждой цепочки довольно крепки, тогда как перекрестные связи между цепочками довольно слабые. Поэтому, когда двойная цепочка распадается, ключевая последовательность оснований А, Г, Т, Ц в каждой цепочке не нарушается. На этом основывается способность системы безошибочно воспроизводить себя.

Сотрудничество между ДНК и белками делает необходимым механизм для перевода четырехбуквенного кода ДНК в 20-буквенный белковый код. Словарь данного перевода был открыт в шестидесятые годы. Базовая последовательность считывается с ДНК по три единицы за один раз, при этом каждая тройка соответствует определенной аминокислоте. Способ сборки белков при помощи информации, хранящейся в ДНК, сложен. Участки базовых последовательностей ДНК копируются на отдельные цепочки соответствующей молекулы РНК, исполняющей роль посланника. Инструкции по строительству белков передаются посланником-РНК на белковые заводы, называемые рибосомами – очень сложные молекулы, использующие еще один вид нуклеиновых кислот под названием тРНК.

Работа по расшифровке инструкций для сборки белков, включающая их перевод с четырехбуквенного языка нуклеиновых кислот на 20-буквенный язык белков, и в конечном итоге – синтез белков из доступных компонентов в виде аминокислот, очень напоминает линию по производству автомобилей с компьютерным управлением.

Сложная последовательность операций делает необходимой сильную обратную связь. Ничего бы не получилось, если бы не ключевое свойство белков: они могут действовать как ферменты – химические катализаторы, – вызывающие необходимые химические изменения путем разрушения или укрепления молекулярных связей. Ферменты очень похожи на техников с линии сборки (или на манипуляторы, управляемые компьютером), которые проникают внутрь сложного механизма, чтобы просверлить отверстие или приварить соединение на ключевом участке.

## Можно ли свести жизнь к физике?

Из вышеизложенного ясно, что микроскопические части организма состоят из сообщества молекул, каждая из которых, судя по всему, слепо реагирует на физические силы, действующие на них в данной точке времени и пространства. При этом каким-то образом им удастся сотрудничать и подчинять индивидуальное поведение общему порядку. Благодаря замечательным достижениям современной молекулярной биологии мы можем наблюдать столкновение идей, порожденное древним противостоянием между атомизмом Демокрита и холистической телеологией Аристотеля. Как отдельные атомы, двигающиеся в строгом соответствии с причинно-следственными законами физики и реагирующие только на локальные силы, производимые соседними атомами, могут, тем не менее, действовать сообща целенаправленным, организованным и слаженным образом в масштабе расстояний, намного превосходящих протяженность межмолекулярного пространства? Это и есть «глубокое эпистемологическое противоречие» Моно, описанное выше.

Несмотря на непреклонные механистические симпатии современных биологов, данное противоречие рано или поздно возникает всякий раз, когда предпринимается попытка свести все биологические явления к молекулярной физике. Так, генетик Джузеппе Монталенти пишет<sup>5</sup>:

Структурная и функциональная сложность организмов, и прежде всего финализм биологических явлений, представляют собой непреодолимую трудность, неразрешимую апорию, которая делает невозможным принятие механистического объяснения жизни. Именно поэтому в соперничестве объяснений, предложенных Аристотелем и Демокритом, победа оставалась за первым, с самого начала и до наших дней.

Любые попытки утвердить механистическое объяснение наталкивались на следующие факты: а) законы физики не подходят для объяснения биологического финализма; б) физические схемы слишком грубы для столь тонких и сложных биологических явлений; в) «редукционизм» не смог воспринять то, что на каждом уровне интеграции биологических систем появляются новые свойства, нуждающиеся в новых объяснительных принципах, неизвестных (и ненужных) физике.

Однако большая часть споров между сторонниками биологического редукционизма и их противниками ведется из-за взаимного

<sup>5</sup> G. Montalenti, 'From Aristotle to Democritus via Darwin', в: Fransisco Jose Ayala and Theodosius Dobzhansky (eds.), *Studies in the Philosophy of Biology* (London, Macmillan, 1974), p. 3.

непонимания. По мнению биологов-редукционистов, поскольку основные физические механизмы, действующие в биологическом организме, определены, жизнь получила объяснение как «всего лишь» процессы обычной физики. Они полагают: так как ни в одной части живого организма не обнаружено каких-либо признаков действия особых сил, то жизнь успешно сводится к обычной физике и химии. Поскольку на живую и неживую материю воздействуют совершенно одинаковые силы, и многие процессы, свойственные живому, можно воспроизвести в пробирке, любые чрезмерные пробелы в знании объясняются исключительно техническими ограничениями. Как утверждается, с течением времени мы будем узнавать все новые подробности о функционировании организмов, оставаясь в рамках основной механистической парадигмы.

Следует заметить: утверждение о том, что живая и неживая материя подвергаются воздействию одинаковых физических сил, едва ли было исследовано на практике. Биолог имеет в виду, что он не видит причины, почему изучаемый им вид молекулярной активности не должен объясняться действием обычных физических сил, и, если кто-нибудь соберется более тщательно исследовать данный вопрос, биолог не ожидает, что вскроется какое-либо противоречие с традиционной физикой и химией.

И все же давайте предположим, что биолог, возможно, прав в этом отношении. Тем не менее мы вряд ли сможем сказать: жизнь «объяснена» посредством физики. Скорее, от нее отмахнулись при помощи определения. Ведь если по реакции на действие физических законов живую материю нельзя отличить от неживой, то в чем же главное различие между живыми и неживыми системами? Особое внимание на данный аспект обратил физик Говард Патти, давно интересовавшийся природой жизни. Он пишет<sup>6</sup>: «Физическое сходство живой и неживой материи не кажется нам столь же удивительным, как наблюдаемые различия». Ставить их под сомнение значит «упустить всю проблему».

Таким образом, загадка жизни лежит не столько в природе сил, действующих на отдельные молекулы, составляющие организм, сколько в коллективных, взаимосвязанных и слаженных действи-

<sup>6</sup> H. H. Pattee, 'The physical bias of coding', в: C. H. Waddington (ed.), *Towards a Theoretical Biology* (4 vols, Edinburgh University Press, 1968), vol. 1, p. 67.

ях всего образования. Биология никогда не примирится с физикой, пока не будет признано, что каждый новый уровень иерархической организации материи порождает новые свойства, которые попросту нерелевантны на уровне атомов.

Ученые все чаще признают, что физика не содержит никаких оснований для подобного редукционизма. В главе 4 было рассмотрено хаотическое и непредсказуемое поведение системы, которое не может быть сведено к деятельности образующих ее подсистем. В одном из номеров «Сайентифик Америкен» группа физиков отметила следующее<sup>7</sup>:

Хаос бросает новый вызов редукционистскому подходу, согласно которому систему можно понять, если разбить ее на части и изучить каждую в отдельности. Это мнение господствовало в науке отчасти потому, что существует множество систем, для которых поведение целого действительно складывается из суммы его частей. Однако хаос показывает, что система может обладать сложным поведением, возникающим как следствие простого, нелинейного взаимодействия всего лишь нескольких компонентов. Этот вопрос становится все острее во многих научных дисциплинах, от микрофизических описаний до моделирования макроскопического поведения биологических организмов... К примеру, даже при наличии полной карты нервной системы простого организма...нельзя определить его поведение. Также надежда на достижение полноты физической наукой за счет постоянного уточнения знаний об основополагающих физических силах и составляющих безосновательна. Взаимодействие частей на одном уровне может вызвать сложное глобальное поведение на более крупном уровне, не поддающееся определению на основе знаний об отдельных составляющих.

## Морфогенез: тайна образования форм

Возможно, самая сложная загадка, связанная с живыми организмами, относится к происхождению формы. Говоря попросту, проблема в следующем. Как неорганизованное скопление молекул собирается в единое целое, составляющее живой организм, где все части находятся на своем месте? Создание биологических форм называется морфогенезом, и несмотря на десятки лет, потраченных на его изучение, эта тема до сих пор окутана тайной.

Самое удивительное в этой загадке – чудесное развитие эмбриона из одной оплодотворенной клетки в более-менее независимую живую особь, обладающую фантастической сложностью,

<sup>7</sup> James P. Crutchfield, J. Doyne Farmer, Norman H. Packard and Robert Shaw, 'Chaos', *Scientific American*, December 1986, p. 38.

в которой многие клетки специализируются на образовании частей нервов, печени, кости и т.д. Каким-то образом этот процесс происходит под удивительно точным и тщательным контролем во времени и пространстве.

Исследуя развитие эмбриона, трудно избавиться от впечатления, что существует некая схема или план сборки, содержащий инструкции, необходимые для достижения законченной формы. Неким, до сих пор малопонятным, способом рост организма строго сдерживается, чтобы соответствовать этому плану. То есть значительную роль здесь играет телеология. Кажется, будто растущий организм направляют к конечному состоянию посредством некоего глобального управляющего фактора. Данное ощущение предопределенности заставило биологов использовать термин *карта судьбы\**, чтобы обозначить развертывание растущего эмбриона, которое, по всей видимости, происходит в соответствии с планом.

Надежность делает морфогенез еще более примечательным. Развивающиеся эмбрионы некоторых видов могут подвергнуться увечьям на ранних стадиях, при этом конечный продукт никак не пострадает. Способность эмбрионов перестраивать процесс роста, чтобы компенсировать данные увечья, называется *регуляцией*. В ходе регуляции новые клетки могут замещать удаленные, а клетки, изменившие местоположение, могут вернуться на «правильный» участок. Эксперименты в этом направлении заставили Дриша отказаться от всех надежд на механистические объяснения и положиться на собственную теорию витализма.

Хотя увечья, нанесенные развивающемуся организму, часто обратимы после определенной стадии специализации клеток, есть организмы, которые могут исправить повреждения даже во взрослом состоянии. Например, из разрезанного на несколько частей плоского червя вырастает несколько полноценных особей. Саламандры могут полностью восстанавливать удаленную часть тела. Самая удивительная – это гидра, простое создание, состоящее из туловища и щупалец. Если полностью развитую губку разрубить на мелкие части и оставить, она полностью восстановит себя!

Если существует схема, то информацию нужно где-то хранить, и самое очевидное место – это ДНК исходной оплодотворенной яйцеклетки, в которой, как известно, содержится генетическая

\* Также используется термин «карта зачатков».

информация. Это означает, что «план» молекулярен по своей природе. Тогда трудность состоит в том, чтобы понять, как пространственная структура некоего образования, занимающего многие сантиметры, может быть организована с молекулярного уровня. Рассмотрим, к примеру, явление клеточной дифференцировки. Откуда некоторые клетки «знают», что им следует стать клетками крови, тогда как другие должны сделаться частью кишки или позвоночника? Далее, существует проблема пространственного расположения. Откуда данной клетке известно, где она располагается относительно других частей организма таким образом, чтобы «превратиться» в подходящий тип клеток конечного продукта?

В число этих трудностей входит и то, что несмотря на независимое развитие различных частей организма, все они содержат одну и ту же ДНК. Если все молекулы ДНК хранят одинаковый общий план всего организма, как получается, что разные клетки выполняют различные части этого плана? Может быть, существует «метаплан», который говорит каждой клетке, какую часть плана выполнять? Если так, то где располагается этот метаплан? В ДНК? Но так мы, несомненно, попадемся в ловушку бесконечного повторения.

В настоящее время, чтобы разрешить эти загадки, ученые сосредоточили свое внимание на теории переключения генов. Смысл в том, что некоторые гены в цепочке ДНК отвечают за определенные задачи по развитию. Обычно эти гены спят, но в нужный момент они каким-то образом «включаются» и начинают выполнять регуляторные функции. Поэтому последовательность включения генов имеет наибольшее значение. Когда она нарушается, организм может превратиться в монстра с искаженной анатомией. Эксперименты с плодовыми мушками породили множество таких уродств. В результате этих исследований было установлено наличие специальных последовательностей нуклеотидов, названных термином «гомеобокс», которые имеются у всех организмов, в том числе у человека. Судя по их всеобщности, они играют ключевую роль в управлении другими генами, которые регулируют дифференциацию клеток.

Несмотря на впечатляющий характер перечисленных достижений, в действительности они относятся лишь к механизму морфогенеза. Они не касаются еще более загадочной тайны происхождения механизма, поддерживающего соответствие общему

плану. Истинная трудность заключается в том, чтобы показать, как *локальные* взаимодействия могут осуществлять *глобальный* контроль. Очень трудно понять, как вообще это объяснимо в механистических терминах на молекулярном уровне.

Полезны ли будут другие примеры развития формы в природе?

В предыдущих разделах мы рассмотрели, как многие физические и химические системы с локальными взаимодействиями все же проявляют спонтанную самоорганизацию и производят новые и более сложные формы и виды деятельности. Хотелось бы верить, что эти процессы служат основой для биологического морфогенеза. Нет никакого сомнения в том, что в целом нелинейные системы с обратной связью, открытые для окружающей среды и далеко отстоящие от равновесия, потеряют устойчивость и спонтанно перейдут к состояниям с крупномасштабной упорядоченностью, т.е. продемонстрируют глобальную организованность.

В случае с эмбрионом исходный набор клеток образует однородную массу, однако по мере его развития данная пространственная симметрия снова и снова нарушается, образуя удивительно замысловатую структуру. Можно представить себе, что каждое последовательное нарушение симметрии – это процесс *бифуркации*, происходящий из-за некоей химической неустойчивости, подобной той, что обсуждалась в главе 6. Данный подход был подробно развит французским математиком Рене Томом, прибегнувшим к известной теории катастроф. (Теория катастроф представляет собой ветвь топологии, занимающуюся скачкообразными изменениями природных явлений и классифицирующую их по разным типам).

Здесь, однако, существует глубокая и принципиальная проблема, касающаяся сравнения между биологическим морфогенезом и ростом структур в простых химических системах. Глобальная организация, скажем, ячеек конвекции по своей глубинной сути отличается от биологической структуры, поскольку она спонтанна. Она происходит несмотря на *отсутствие* у данных систем «общего плана» или «карты судеб». Образование конвекционных ячеек происходит не по схеме, зашифрованной в молекулах жидкости. На самом деле конвективная неустойчивость непредсказуема и неуправляема в своей частной форме. Более того, управлять ею если и можно, то посредством манипуляции *граничными условиями*, т.е. такое управление обязательно носит *глобальный и целостный* характер.

В отличие от них основное свойство биологической организации состоит в том, что крупномасштабный порядок организма отнюдь не спонтанный и непредсказуемый. Учитывая структуру ДНК, конечная форма предопределена с удивительной степенью упорядоченности и точности. А поскольку такие явления, как конвективная неустойчивость, со временем становятся все более чувствительными к произвольным микроскопическим флуктуациям, биологический морфогенез, как мы видели, отличается удивительной надежностью.

Каким-то образом одномерная микроскопическая цепочка генетической информации должна координировать, в пространстве и времени, коллективную деятельность миллиардов клеток, распределенных по пространству, которое согласно их масштабу, представляет собой огромную трехмерную область. Изучая физические процессы, такие как бифуркационная неустойчивость, позволяющие физическим структурам резко и значительно менять свою форму, мы, несомненно, находим соответствие для механизмов морфогенеза. Но открытым остается вопрос о том, как этими изменениями управляет объединение микроскопических частиц, особенно если учесть, что данное управление носит *нелокальный* характер и задействует граничные условия. Чтобы произвести соответствующие образования, лежащие в основании «чуда» морфогенеза, необходима связь между локально хранящейся информацией и *глобальным и целостным* контролем.

Перед лицом этих трудностей некоторые биологи задались вопросом: может ли вообще традиционная механистическая редукция привести к успеху, будучи основана на заимствованном из физики понятии частицы. Как отмечалось выше, физики в любом случае больше не рассматривают частицы как первичные объекты. Их роль отдана полям. До сих пор понятие поля оказывало небольшое влияние на биологию. Тем не менее мысль о том, что некоторые виды полей могут быть задействованы в морфогенезе, воспринимается серьезно. Эти «морфогенетические поля» определялись по-разному: как поля химической концентрации, электрические поля или даже поля, неизвестные современной физике.

Воздействие полей можно привлечь для объяснения биологических форм, поскольку поля, в отличие от частиц, имеют протяженность. Поэтому они лучше подходят для объяснения



крупномасштабных или глобальных свойств. Однако остается главный вопрос: как генетическая информация о глобальном плане, предположительно находящаяся в ДНК, сообщает о себе полям и определяет для них необходимую конфигурацию? В физике конфигурация поля определяется граничными условиями, т.е. глобальным и целостным контролем.

С понятием поля в морфогенезе связана еще одна проблема. Поскольку каждая клетка данного организма содержит одинаковую ДНК, трудно понять, как связь между полем и молекулой ДНК отличается от одной молекулы к другой, а они должны отличаться, если молекулам предстоит развиваться по-разному. Если поля сообщают молекулам ДНК, где в данной конфигурации они расположены, а молекулы ДНК сообщают полям, какую конфигурацию принять, то объяснить ничего невозможно, поскольку все доводы здесь соединяются в порочный круг.

Найти выход можно в следующем предположении: глобальный план неким образом хранится в самих полях, а ДНК действует скорее как *получатель*, а не источник генетической информации. Этот вариант, способный внести коренные изменения, был исследован биологом Рупертом Шелдрейком. Его противоречивые идеи будут вкратце рассмотрены в конце главы 11.

Итак, обзор морфогенеза открывает неудовлетворительную картину. По всей видимости, объяснение биологических форм в терминах физической редукции сопряжено с принципиальными и фундаментальными трудностями. Ученый может легко разглядеть действие организующих факторов, например, на развитие эмбриона, но едва ли представляет себе, как эти организующие факторы связаны с известной нам физикой.

Во многих отношениях развитие эмбриона воплощает главную тайну всей биологии, состоящую в том, как при переходе от неживого к живому появляются совершенно новые структуры и свойства. Проблема заключается в значении коллективного для биосферы в целом. И здесь мы подходим к вопросам эволюции и происхождения жизни.

## 8

# Жизнь: ее происхождение и эволюция

## Теория Дарвина

**О**сновополагающая тайна биологии состоит в том, как возникло столь богатое разнообразие организмов, каждый из которых так хорошо приспособлен к собственной экологической нише. Библия утверждает, что Бог попросту создал различные виды живых существ такими, какие они есть.

Благодаря открытию временного измерения в биологии концептуальное основание этой тайны резко изменилось. Геологические и палеонтологические данные, свидетельствующие об изменениях, которые происходили с живыми организмами на протяжении миллиардов лет, открыли процесс эволюции – постепенного изменения, дифференциации и приспособления биологических видов за мириады лет. Сегодня мы знаем, что первые живые организмы появились на Земле более трех с половиной миллиардов лет назад и были, по нынешним меркам, чрезвычайно простыми. И только путем постепенных изменений, занявших гигантское количество времени, из простых предшественников развились более сложные организмы.

Публикация «Происхождения видов» Чарльза Дарвина в 1859 году стала ключевым событием в истории науки, ее можно сравнить с публикацией «Принципов» Ньютона 172 года до этого. Теория Дарвина, согласно которой эволюция происходит за счет случайных мутаций и естественного отбора, имела столь громкий успех, что благодаря ей ускорился крах того, что еще оставалось от телеологии Аристотеля. Телеологические объяснения с

привлечением конечных причин, которые до того уже были изгнаны из физики, теперь должны были покинуть и биологические науки.

В современную эпоху грандиозные достижения генетики и молекулярной биологии лишь укрепили положение основополагающих идей теории Дарвина. В частности, в настоящее время нам отчасти понятен механизм эволюционных изменений на молекулярном уровне. Мутации происходят, когда гены, входящие в ДНК организма, испытывают изменения. Согласно преобладающему мнению, эти изменения, в основном, возникают спонтанно за счет внешних воздействий (радиация, химические мутагены), а также перемещения генетических элементов и случайных ошибок при копировании во время репликации.

Несмотря на очевидные успехи, у теории Дарвина и ее современного воплощения, известного как неodarвинизм, всегда были противники. Даже сегодня некоторые выдающиеся ученые считают обоснование неodarвинизма неправдоподобным. Эти ученые не сомневаются в существовании эволюции – поскольку история ископаемых не оставляет места для сомнений, – однако они сомневаются в приемлемости дарвинистского механизма, т.е. случайных мутаций и естественного отбора.

Естественный отбор – это процесс, посредством которого в непрестанной борьбе за ресурсы плохо приспособленные мутанты слабо конкурируют с другими и обычно умирают. Таким образом, организмы, лучше приспособленные к окружающей среде, имеют больше шансов выжить и произвести потомство, чем их конкуренты с менее эффективной адаптацией. С этим утверждением трудно спорить. В действительности, по своей сути, оно тавтологично («Те организмы, что лучше приспособлены к выживанию, будут выживать успешнее»).

Больше трудностей вызывает утверждение о том, что эволюционные изменения обусловлены произвольными мутациями. Поместить чистую случайность в сердце устрашающего здания биологии для многих ученых значит перейти черту дозволенного. (Даже Дарвин делился собственными опасениями по этому поводу.) Вот несколько возражений.

Как невероятно сложный организм, столь гармонично организованный в виде единой функционирующей единицы и, возмож-

но, наделенный чрезвычайно сложными и эффективными органами, такими как глаза и уши, может появиться в результате серии чистых случайностей?

Как произвольным событиям на протяжении миллионов лет удавалось успешно поддерживать приспособленность биологических организмов в меняющихся условиях?

Почему появление *совершенно новых и успешных* структур, таких как нервная система, мозг, глаз и т. д., в ответ на изменения окружающей среды может объясняться исключительно случайностью?

Эти опасения основываются на природе случайных процессов и законах вероятности. Не нужно быть математиком, чтобы понять: чем тоньше и сложнее организация системы, тем сильнее она подвержена деградации из-за произвольных изменений. К примеру, небольшая ошибка при копировании схемы велосипеда, скорее всего, почти никак не скажется на работе данного механизма в собранном виде. Однако даже малейшая ошибка в схеме воздушного судна или космического корабля может легко привести к катастрофе. То же самое можно доказать при помощи аналогии с тасованием карт, к которой мы прибегли в главе 2. Высокоупорядоченная последовательность карт почти наверняка станет *менее* упорядоченной в результате тасования.

Сходным образом можно предположить, что произвольные мутации в биологии вызовут скорее деградацию, чем упрочение замысловатой приспособленности организмов. Так оно и есть на самом деле, как показали непосредственные эксперименты: большинство мутаций наносят вред. Тем не менее до сих пор считается, что произвольное «тасование генов» отвечает за появление глаз, ушей, мозга и всех прочих атрибутов живых существ. Почему так? Интуиция подсказывает, что тасование может привести только к хаосу, а не к порядку.

Иногда этот вопрос рассматривается в терминах теории информации. Информация, необходимая для того, чтобы выстроить организм, содержится в генах. Чем сложнее и более развит организм, тем большее количество информации требуется для его описания. Очевидно, в связи с тем, что с течением времени эволюция производит все более совершенные и сложные организмы, объем информации ДНК постоянно увеличивается. Откуда появляется эта информация?

Специалисты по теории информации продемонстрировали, что «шум», т.е. случайные помехи, вызывает сокращение информации. (Представьте себе телефонный разговор на шумной линии.) На самом деле это еще один пример второго закона термодинамики: информация – это форма «отрицательной энтропии», и когда энтропия возрастает в соответствии со вторым законом, информация уменьшается. И снова напрашивается вывод о том, что случайность не подходит на роль источника порядка.

## Раскол

Для некоторых биологов и философов приведенные выше соображения означают, что попытка объяснить богатство биосферы одной только случайностью безнадежна. Они утверждают существование неких дополнительных организующих сил или руководящих принципов, которые направляют эволюционные изменения к лучшей приспособленности и более развитой организации. Конечно, на этом основывается анимизм Аристотеля, в соответствии с которым эволюция направляется в сторону определенной цели посредством конечных причин. Также это утверждение продолжает идеи витализма. Так, французский сторонник витализма философ Анри Бергсон утверждал, что этот так называемый *élan vital*, якобы наделяющий живую материю особыми организационными способностями, кроме того, ведет эволюционные изменения в подходящем и творческом направлении.

Похожие понятия лежат в основе многих религиозных представлений об эволюции. Например, ранее в двадцатом столетии Леконт дю Нуи утверждал, что эволюция не происходит случайно, но направляется к цели, предустановленной трансцендентным божеством.

Палеонтолог-иезуит Тейяр де Шарден придерживался иного мнения. По его предположению, не эволюцию направляют со всевозможной точностью согласно уже существующему плану, но сам этот план создается полностью таким образом, чтобы привести к еще не достигнутому высшему конечному этапу, названному им «Точкой Омега» и представляющему единение с Богом.

В более поздние времена космолог и астрофизик Фред Хойл и его соавтор Чандра Викрамасингх пошли по своего рода средин-

ному пути. Они отвергли случайность как творческую силу в процессе эволюции. Вместо этого они предположили, что эволюционные изменения происходят за счет постоянного поступления внеземного генетического материала в виде микроорганизмов, способных выжить в межзвездном пространстве. В своей обширной книге «Разумная Вселенная» Хойл пишет об «эволюции под контролем космоса»<sup>1</sup>:

Присутствие микроорганизмов в космосе и на других планетах, а также то, что они могут пережить путешествие сквозь атмосферу Земли, – все это ведет к одному выводу. Из-за них высока вероятность того, что генетический материал наших клеток, двойная спираль ДНК, представляет собой скопление генов, прибывших на Землю извне.

Далее, обсуждая роль рассудка и разумности в данном контексте, Хойл сделал вывод, что наиболее важные генетические бомбардировки проводятся под полным контролем сверхинтеллекта, работающего *внутри* физической вселенной и манипулирующего нашим физическим, а также биологическим и космическим окружением.

Несомненно, выше приведены примеры крайнего расхождения с дарвинистской парадигмой. Есть множество других случаев, когда представители научного сообщества проявляют менее заметное, но все же искреннее недовольство неodarвинистской теорией. Некоторые ученые по-прежнему скептически относятся к мнению, что случайной мутации и естественного отбора достаточно, и утверждают, что для биологической эволюции необходимы дополнительные организующие принципы, если мы собираемся дать удовлетворительное объяснение изобилию сложных организмов на Земле.

Чем можно оградиться от сомнений в способности случайных мутаций создавать биологические чудеса? Стандартный ответ на эти предположения следующий: произвольные изменения, несомненно, *от случая к случаю* будут совершенствовать работу организма, и эти усовершенствования будут выборочно сохраняться, очищаться и усиливаться за счет естественного отбора, пока не станут доминантными.

Придумать пример легко. Представим себе, что группу животных держат на острове, где климат меняется в сторону более

<sup>1</sup> Fred Hoyle, *The Intelligent Universe* (London, Michael Joseph, 1983).

засушливого. Предположим, происходит так, что в результате случайной мутации появляется животное, способное более долгое время обходиться без воды. Несомненно, высока вероятность того, что данное животное проживет дольше и произведет больше потомства. Многочисленное потомство наследует это полезное свойство и само займется ее распространением. Так, постепенно менее влаголюбивое поколение станет доминантным.

Хотя селективная фильтрация и усиление полезных генов, очевидно, могли в отдельных случаях произойти в соответствии с описанной картиной, это объяснение похоже на выдумку. Гораздо труднее доказать, что мириады подобных изменений будут накапливаться *систематическим образом*, приводя к прогрессу видов в соответствии с законченной моделью. Но можно ли объяснить этим появление «большой стратегии», в соответствии с которой жизнь на нашей планете, по всей видимости, добивается все больших успехов в использовании возможностей окружающей среды?

Рассмотрим, например, такие замысловатые органы, как глаз и ухо. Образующие их части состоят в такой специфической взаимосвязи, что с трудом верится в их отдельное и постепенное появление в результате последовательных независимых случайностей. В конце концов, полглаза – это сомнительное селективное преимущество; на самом деле, от него нет никакой пользы. Но какова вероятность того, что за ограниченное время произойдет верная последовательность совершенно случайных мутаций, конечным итогом которых станет появление успешно функционирующего глаза?

К несчастью, именно в этом ключевом вопросе неodarвинизм всегда теряет ясность. Лабораторные исследования дают некоторое представление о скорости мутирования некоторых видов, например дрожофилы. Также можно вычислить отношение полезных мутаций к вредным, исходя из человеческих представлений о полезном. Трудность в том, что вычислить селективное преимущество мутаций в целом невозможно. Как можно узнать, *сколько* преимущества дает удлинённый хвост или большее количество зубов в такой-то окружающей среде? *Столько*, насколько за счет данных различий увеличивается число потомства? Даже если ответ был бы известен, мы не сможем узнать, каковы были точные условия окружающей среды и какие изменения произошли за

миллиарды лет, как не сможем узнать о состоянии организмов, существовавших в то время.

Еще одна трудность состоит в том, что отбор определяется не только окружающей средой. Также нужно учесть поведение и повадки самих организмов, т.е. их телеономическую природу, на протяжении многих веков. Но об этом «качестве жизни» нам как раз почти ничего не известно. Короче говоря, не имея возможности вычислить качество жизни, трудно определить, как вообще возможно полноценно исследовать вопрос о пригодности произвольных мутаций.

## Вопрос стрелы времени

Вышеизложенные трудности только усугубятся, если рассматривать эволюцию биосферы в целом. Историю жизни часто описывали как прогрессирующее движение от «низших организмов» к «высшим», при этом человеку досталась вершина биологического «успеха», завоеванного им лишь спустя миллиарды лет восхождения по эволюционной лестнице. Хотя многие биологи отвергают понятие «лестницы» как антропоцентрическое, гораздо труднее отрицать, что в некоем объективном смысле жизнь на Земле, хотя и постепенно, но все же становится все более и более сложной. Действительно, стремление жизни эволюционировать от простого к сложному являет наиболее яркий пример общего закона, согласно которому организационная сложность обычно возрастает со временем.

Совершенно не ясно, как это стремление к уровням все более высокой организации следует из теории Дарвина. Например, одноклеточные организмы чрезвычайно успешны. Они живут уже миллиарды лет. В конкуренции с более высокими организмами, в том числе с человеком, они часто берут верх, как хорошо известно медикам. Какой механизм побудил эволюцию к производству многоклеточных организмов, постоянно наращивающих собственную сложность? Слоны, возможно, и вызывают больший интерес, нежели бактерии, но в строгом биологическом смысле действительно ли они более успешны? В теории неodarвинизма успех измеряется исключительно количеством потомства, тогда, по-видимому, бактерии гораздо успешнее, чем слоны. Но почему



вообще развились столь сложные животные, как слоны? Действительно, биологи иногда могут доказать репродуктивное преимущество отдельного сложного органа, но явная и систематическая тенденция здесь не просматривается.

Эволюционист Джон Мэйнард-Смит допускает, что постоянное накопление сложности в биосфере представляет главную трудность для неodarвинизма<sup>2</sup>:

Так, в неodarвинизме нет ничего, что позволило бы нам предсказать долгосрочный рост сложности. Утверждать можно только то, что поскольку первые живые организмы предположительно были очень простыми, то если в эволюционной родословной и произошли какие-либо изменения, они были связаны с ростом сложности. Как сказал бы Томас Худ, «двигаться можно только вверх»... Но это голос интуиции, а не доводы интеллекта.

На самом деле, на пути неodarвинистского объяснения прогрессивной природы эволюционных изменений существует препятствие принципиального характера. Суть роста биологической сложности состоит в том, что он ассиметричен во времени; он устанавливает стрелу времени из прошлого в будущее. Любая успешная теория эволюции должна объяснить происхождение этой стрелы.

В главе 2 мы узнали, что со времен работы Больцмана физики полагали, что стрела времени связана с ростом энтропии, но было неясно, как это можно совместить с обратимостью времени в механике, которой подчиняются движения отдельных частиц. Само по себе произвольное тасование их положений лишь производит так называемое стохастическое смещение без определенной направленности. (Недавно биологическое значение этого явления было признано японским биологом Кимурой<sup>3</sup>, который закрепил фразу «нейтральная эволюция» за подобным ненаправленным смещением.)

Если стрела времени существует, то возникает она не в самой системе, а *вовне*. Это может произойти двумя способами. При первом из них система создается окружающей средой в состоянии, которое первоначально обладает уровнем энтропии ниже максимального, после чего система изолируется в виде независимой ветви. При таких условиях далее происходит непреклонное нисхождение в

<sup>2</sup> J. Maynard-Smith, 'The status of neo-Darwinism', в: C. H. Waddington (ed.), *Towards a Theoretical Biology* (4 vols, Edinburgh University Press, 1969), vol. 2, 82.

<sup>3</sup> Motoo Kimura, *The Neutral Theory of Molecular Evolution* (Cambridge University Press, 1983).

хаос, так как энтропия растет в соответствии со вторым законом термодинамики.

Очевидно, этот случай противоположен тому, что происходит в биологии. Конечно, это не означает, что биологические организмы нарушают второй закон. Биосистемы – это не закрытые системы. Их отличает открытость, позволяющая им выводить энтропию в окружающую среду, чтобы предотвратить дегенерацию. Однако сама их способность избегать дегенеративной (пессимистической) стрелы времени не объясняет, каким образом они соответствуют прогрессивной стреле (оптимистической). Если система свободна от строгих ограничений одного закона, это еще не доказывает, что она следует другому.

Многие биологи совершают эту ошибку. Они допускают, что раз они нашли вышеупомянутую брешь во втором законе, то прогрессивная природа биологической эволюции уже объяснена. А это попросту неправильно. Они также путают порядок с организацией и сложностью. Предотвращение потери упорядоченности может быть необходимым, но отнюдь не достаточным условием для роста организации и сложности. Нам еще только предстоит найти эту неуловимую стрелу времени.

Поэтому давайте перейдем ко второму способу внедрения стрелы времени в физическую систему. Это происходит, когда открытые системы значительно удаляются от состояния равновесия. Как мы видели на многочисленных примерах из физики и химии, подобные системы могут достигать критических «точек бифуркации», в которых они совершают внезапный скачок к новым состояниям с большей организационной сложностью. Кажется очевидным, что именно данная тенденция, а не произвольная мутация или естественный отбор, представляют собой основную форму прогрессивной биологической эволюции. Понятие случайности уместно только тогда, когда применимы обычные статистические допущения, такие как «закон больших чисел». Этот закон не срабатывает в точках бифуркации, где единственная флуктуация может усилиться и обрести устойчивость, вследствие чего система изменится внезапным и радикальным образом.

Тогда сила эволюционного изменения лежит в постоянном воздействии на биосферу с целью вывести ее из обычного состояния динамического равновесия посредством внешних либо внутренних

изменений. Они могут происходить постепенно, как, например, медленное накопление кислорода в атмосфере и рост яркости солнечного излучения, или же внезапно, из-за падения астероида или другого катастрофического события. Независимо от причины, если самоорганизация в биологической эволюции следует тем же общим принципам, что и небиологическая самоорганизация, можно ожидать, что эволюционные изменения будут происходить в виде внезапных скачков, подобно резким изменениям на определенных критических этапах в физических и химических системах. На самом деле, есть некоторые свидетельства, подтверждающие, что эволюция происходила таким образом<sup>4</sup>.

Какие выводы мы можем сделать из этого? Сложные структуры в биологии вряд ли возникли за счет совершенно случайных событий. Такой механизм никак не подходит для объяснения эволюционной стрелы времени. По всей видимости, гораздо более вероятно то, что сложность в биологии появилась как часть того же общего принципа, согласно которому она возникает в физике и химии, а именно: вследствие того самого внезапного *непроизвольного* перехода к более сложной организации, происходящего в системе, удаленной от равновесного состояния и приблизившейся к «критическим точкам».

Не следует привлекать какие-либо мистические или трансцендентные влияния. Нет никакой причины полагать, что принципы, по которым в биологии создаются новые уровни организации, более мистичны, чем те, что производят спиральные формы в реакции Белоусова-Жаботинского. Однако очень важно понимать, что по своей сути это глобальные или холистические принципы и их нельзя свести к поведению отдельных молекул, хотя они и согласуются с поведением этих молекул. В связи с этим я убежден: объяснения эволюции, основанные *исключительно* на молекулярных механизмах, окажутся непригодными. Если небиологическая самоорганизация имеет хоть какое-либо значение, нам придется искать целостные принципы, управляющие коллективной деятельностью всех частей организма.

Примечательно, что некоторые биологи-теоретики пришли к тем же выводам в ходе работы над теорией автоматов. Стюарт

<sup>4</sup> S. J. Gould and N. Eldridge, *Paleobiology*, 3, 1977, p. 115.

Кауфман из отделения биохимии и биофизики Университета Пенсильвании изучил поведение случайно собранных скоплений клеточных автоматов. Он открыл, что им присуще множество новых свойств, которые, как надеется ученый, помогут объяснить биологическую эволюцию и даже «указывают на возможность обнаружения до сих пор неизвестных принципов порядка». Правила поведения таких скоплений автоматов обычно необратимы во времени, они способны на такую же прогрессивную самоорганизацию, что и эволюционирующие биологические организмы. В заключение Кауфман утверждает, что эволюция объясняется самоорганизующимся поведением, а не отбором<sup>5</sup>:

Для самой биологической эволюции основополагающее значение может иметь то, что отбор не обладает достаточной силой, чтобы избежать типичных свойств самоорганизации, отличающих сложные регулятивные системы, постоянно «перемешиваемые» посредством мутаций. Эти типичные свойства играют роль биологических универсалий, присущих многим организмам не благодаря отбору или сходному происхождению, а вследствие их принадлежности к одному скоплению регулятивных систем.

## Истоки

Проблемы, связанные с возникновением сложности в процессе эволюции, меркнут на фоне ужасных затруднений при обсуждении происхождения жизни. Появление живой материи из неживой – это, вероятно, самый важный пример способностей физических систем к самоорганизации. Если у нас есть некий живой организм, то можно представить доступные ему способы размножения. Но откуда появился первый организм? Живое порождает живое, но как неживое порождает живое?

Следует с самого начала отметить, что происхождение жизни – это по-прежнему тайна за семью печатями. Конечно, недостатка в теориях нет, но мнения ученых в этом вопросе расходятся, вероятно, больше, чем относительно любой другой темы в биологии.

Объяснить, как появилась жизнь, трудно прежде всего потому, что даже простейшим организмам присуща грандиозная сложность. Механизм воспроизводства жизни основан на молекуле ДНК, а ее структура чрезвычайно сложна и искусно организована

<sup>5</sup> Stuart A. Kaufmann, 'Emergent properties in random complex automata', *Physica*, 10D, 1984, p. 145.

наподобие линии сборки автомобилей. Если в репликации важнейшее положение занимает столь высокий порог сложности, то как могла соответствующая система возникнуть спонтанно?

На самом деле, при подобном изложении сложность вопроса занижается. Как мы видели ранее, все формы жизни требуют сотрудничества между нуклеиновыми кислотами и белками. Нуклеиновые кислоты переносят генетическую информацию, но не могут осуществлять самостоятельных действий. Они не подготовлены для этого в химическом отношении. Реальная работа выполняется белками с их замечательными каталитическими свойствами. Но и сами белки подлежат сборке в соответствии с инструкциями, которые переносят нуклеиновые кислоты. Мы столкнулись с извечным вопросом о курице и яйце. Даже если будет открыт физический механизм, неким образом собирающий молекулу ДНК, от него не будет пользы, если другой механизм в то же самое время не окружит ее соответствующими белками. Все же трудно представить себе, чтобы вся система этих взаимных связей была создана спонтанно всего лишь за один шаг.

Ученые, пытающиеся раскрыть эту загадку, разделились на два лагеря. К первому принадлежат те, кто верит, что жизнь произошла в тот момент, когда появилась химическая структура, способная сыграть роль гена, т. е. способная к репликации и хранению генетической информации. Это не обязательно должна быть ДНК; на самом деле, некоторые ученые отдают первенство РНК. ДНК могла появиться гораздо позже в истории эволюции. Как бы то ни было, этот доисторический химически активный генетический носитель должен был возникнуть и приобрести способность к репликации без каталитического содействия ферментов. Во втором лагере пребывают те ученые, кто верит, что гораздо более простые по химическому составу белки появились первыми, а генетические свойства возникали постепенно, во время долгой химической эволюции, достигшей пика в образовании ДНК.

Те, кто считает, что нуклеиновые кислоты возникли в первую очередь, например Лесли Оргел из Института Сэлк в Ла Жолле, Калифорния, попытались вызвать репликацию РНК в пробирке без помощи белка. Манфред Эйген, лауреат Нобелевской премии, работающий в Институте Макса Планка в Геттингене, Германия, разработал подробный сценарий происхождения жизни на основе

экспериментов с РНК вирусов (вирусы – простейшие из известных живых объектов), с использованием сложных математических моделей. Он предполагает, что РНК может спонтанно образовываться из других сложных органических соединений посредством иерархической последовательности взаимосвязанных и усиливающих друг друга химических циклов, которые он называет «гиперциклами». В этих циклах участвуют и некоторые белки.

Мнения о первенстве белков придерживается Сидни Фокс из Университета Майами. Он провел эксперименты, в которых из наборов аминокислот (важных строительных блоков органических молекул) при нагревании образовывались «протеиноиды» – молекулы, напоминающие белки. Хотя протеиноиды не были обнаружены в живых организмах, они отличаются некоторыми свойствами, удивительно напоминающими живое. Самое поразительное то, что они могут образовывать крохотные сферы, чем-то напоминающие клетки. Возможно, это говорит нам о том, что клеточная структура организмов появилась первой, после чего начало эволюционировать управление посредством нуклеиновых кислот.

Совершенно иной путь к пониманию происхождения жизни предложил Грэхем Кернс-Смит из Университета Глазго. По его мнению, первые формы жизни, возможно, пользовались отнюдь не органическими соединениями на основе углерода, а глиной. Некоторые кристаллы глины способны выполнять рудиментарный вид репликации и, возможно, обладали достаточным уровнем сложности для хранения и передачи генов неким образом. В любом случае, согласно данной теории, примитивные глиняные организмы постепенно развили способность к более сложной деятельности, в том числе к проведению опытов с органическими веществами. В свое время органические молекулы захватили генетическую функцию и глиняные истоки жизни были утеряны.

Все эти рассуждения не годятся в качестве настоящего доказательства того, что жизнь может возникнуть спонтанно посредством обычных химических процессов, подобных тем, что могли происходить естественным образом на Земле миллиарды лет назад. Следует признать: хотя популярные в настоящее время сценарии *могли* создать жизнь, ни один из них не заставит нас поверить, что это *должно* было произойти именно так.

Здесь следует упомянуть о знаменитом эксперименте, проведенном Стэнли Миллером и Гарольдом Юри в Чикагском университете в 1952 году. Это была грубая попытка смоделировать вероятные условия, существовавшие на Земле три-четыре миллиарда лет назад, когда появились первые живые организмы. В те времена свободного кислорода на Земле не было. В химическом смысле атмосфера обладала восстанавливающими свойствами. Даже сегодня уверенности в ее точном составе нет ни у кого. Миллер и Юри использовали смесь из газов водорода, метана и аммиака (все эти вещества распространены в Солнечной системе) вместе с кипящей водой и пропустили через эту смесь электрический разряд, заменявший молнию. В конце недели скопилась красно-коричневая жидкость. Электричество было отключено, а жидкость подвергли анализу. В ее составе был обнаружен ряд хорошо известных органических соединений, важных для жизни, в том числе несколько аминокислот.

Хотя по сравнению с удивительно сложными молекулами ДНК продукты этой реакции не представляли ничего особенного, результаты эксперимента оказали глубокое психологическое воздействие. Теперь мы можем представить себе, как огромный естественный эксперимент Миллера-Юри происходит на доисторической поверхности Земли в течение миллионов лет, а органические вещества образуют все более густой бульон в океанах и озерах теплой воды на материке. Был сделан вывод, что при таком запасе времени за счет постоянной вторичной переработки разнообразных составляющих бульона будет образовываться все большее количество молекул, пока в конце концов не появится единственная достаточно сложная молекула-репликатор. Как только это случится, репликатор быстро размножится, используя сырые материалы богатого химическими веществами бульона, в который он погружен.

Можно сделать приблизительный расчет вероятности того, что бесконечное измельчение и преобразование сложных молекул бульона приведет к образованию небольшого вируса через один миллиард лет. Количество возможных химических комбинаций столь огромно, что вероятность равна более  $10^{2000000}$  против одного.

Это умопомрачительное число больше, чем шансы против падения монеты лицевой стороной вверх шесть миллионов раз

поряд. В случае замены вируса на некий гипотетический более простой репликатор шансы заметно вырастут, однако с подобными числами общий вывод остается неизменным: спонтанное возникновение жизни посредством произвольного тасования молекул – это событие до смешного невероятное.

## Рецепт чуда

Ученые по-разному отреагировали на расчеты вероятности спонтанного возникновения жизни в результате случайности. Некоторые попросту пожалы плечами и заявили, что происхождение жизни, без сомнения, – уникальное событие. Конечно, эту позицию не признаешь полностью удовлетворительной, ведь когда речь идет об уникальном событии, теряется различие между естественным и чудесным. Наука никогда не сможет объяснить подобное событие.

Однако не следует забывать, что происхождение жизни существенно отличается от других событий: его нельзя отделить от нашего собственного существования. Мы пребываем здесь. Некий набор событий, пусть даже самый неправдоподобный, вероятно, привел к этому. Если бы эти события не произошли, мы не смогли бы рассуждать здесь по этому поводу. Естественно, если когда-нибудь мы получим доказательства того, что жизнь образовалась независимым образом в любом другом месте вселенной, тогда этот довод окажется неприемлемым.

Совсем по-иному отреагировали те, кто сделал вывод, что жизнь возникла не на Земле, а пришла сюда из другой части вселенной, возможно, в виде микроорганизмов, перенесенных через космическое пространство. Много лет назад эту гипотезу развивал Сванте Аррениус, лауреат Нобелевской премии из Швеции, но недавно она вернулась к жизни благодаря Фрэнсису Крику и, в несколько ином виде, – усилиями Фрэда Хойла и Чандры Викрамасингха. Беда в том, что она лишь отодвигает загадку на один шаг назад. По-прежнему необходимо объяснить, как жизнь образовалась в другом месте и предположительно в других условиях.

Третий вид реакции заключается в том, что обоснование, подтверждающее сценарий «случайной перетасовки», а именно предположение о том, что химические процессы, приведшие к



появлению жизни, носили случайный характер, отвергается полностью. Если те химические комбинации, которые сыграли важную роль в образовании жизни, оказались в более предпочтительном положении, чем другие, тогда составляющие доисторического бульона (или любой другой среды, в зависимости от допущений исследователя), вероятно, были незамедлительно направлены по пути увеличения сложности и в конечном итоге пришли к примитивным самовоспроизводящимся молекулам.

Мы видим, что понятие произвольного тасования относится к равновесной термодинамике. Но предполагаемые условия, при которых образовалась жизнь, были далеки от равновесия, а в таких условиях ожидается поведение с высокой степенью случайности. В большинстве случаев материя и энергия в далеких от равновесия открытых системах стремятся достичь все более высоких уровней организованности и сложности.

Огромную разницу в действенности равновесного и неравновесного механизмов образования живого из неживого подчеркнул Янч<sup>6</sup>. С одной стороны, существует возможность «скучных и крайне маловероятных случайностей... в медленном ритме геофизических колебаний и химико-каталитических процессов». С другой стороны:

На каждый различимый медленно работающий произвольный механизм равновесного мира существует механизм высокоскоростных и интенсивных процессов в неравновесном мире, которые способствуют образованию диссипативных структур, а следовательно, и самоорганизации в микромире.

Работа Пригожина о диссипативных структурах и математический анализ гиперциклов Эйгена указывают на то, что первичный бульон, вероятно, прошел через несколько последовательных скачков самоорганизации на очень узком пути химического развития. Даже сегодня наше понимание химической самоорганизации слишком фрагментарно. Вполне вероятно, что существуют до сих пор неизвестные организующие принципы добиологической химии, которые значительно способствуют образованию сложных органических молекул, подобных живым.

Примечателен следующий исторический факт: коммунистическая доктрина диалектического материализма утверждает, что

<sup>6</sup> Jantsch, op. cit., p. 101.

новые законы организации вступают в действие, когда материя достигает более высоких уровней развития. Так, есть биологические, социальные законы и т.д. Они содействуют прогрессивному развитию материи к состояниям все большей организованности. Русский химик Александр Опарин сделал важнейший вклад в развитие современной парадигмы происхождения жизни. Он горячо поддерживает теорию, по которой жизнь становится неизбежным итогом химических процессов самоорганизации, хотя можно спорить о том, чем объясняется его позиция – научными убеждениями или политической выгодой. К сожалению, эта политически ангажированная доктрина была нелепо истолкована печально известным Трофимом Лысенко, который попытался дискредитировать современную генетику и молекулярную биологию. Несомненно, этот случай настроил некоторых ученых против *научной* идеи о происхождении жизни как кульминации прогрессивного химического развития.

Таким образом, обзор современных представлений о происхождении жизни открывает крайне безрадостную картину. Слишком большого доверия требует гипотеза о том, что уникальная по сложности и специфичности система нуклеиновых кислот и протеинов образовалась спонтанно за один шаг. Тем не менее единственный общепризнанный организующий принцип в биологии – естественный отбор – не может действовать до тех пор, пока не начнет функционировать какая-либо форма жизни. Следовательно, нам нужно либо найти некую более примитивную химическую систему, способную к прогрессивной эволюции за счет естественного отбора, либо признать существование произвольных организующих принципов химического развития.

## 9

# Разворачивающаяся вселенная

## Космическая организация

**Л**юбопытно, что даже на уровне максимальных расстояний материя и энергия организованы в высшей степени непроизвольно. Однако если случайно взглянуть на ночное небо, то порядок вряд ли будет заметен. Кажется, что звезды рассеяны более или менее случайно.

Небольшой телескоп позволяет обнаружить некоторую структурированность. То здесь, то там звезды собираются в группы и иногда образуют компактные скопления, насчитывающие до миллиона единиц. Наблюдения при помощи более мощных инструментов показывают, что звезды в нашей «локальной» области космоса организованы в огромную колесовидную систему, именуемую Галактикой. Она охватывает примерно сто миллиардов звезд, а ее диаметр равен ста тысячам световых лет. Галактика обладает отличительной структурой: центральное густонаселенное ядро окружено спиральными ответвлениями, содержащими газ и пыль, а также медленно вращающимися по орбите звездами. Все это заключено в крупное, более-менее сферическое гало, содержащее материю, по большей части невидимую и обладающую неизвестным составом.

Организация Галактики, на первый взгляд, не очевидна, поскольку мы рассматриваем ее изнутри, но по форме она похожа на многие другие галактики, открытые при помощи больших телескопов. Астрономы классифицировали галактики по нескольким типам: спиральные, эллиптические и т.д. До сих пор не ясно, как у них появилась такая форма. На самом деле астрономы имеют лишь самые туманные представления о том, как образовались галактики.

Общий принцип, заставляющий галактический материал объединяться в скопления, вполне нам понятен. Если в первобытных газах существовала некая неоднородность, то каждая более плотная область приобрела бы роль центра гравитационного притяжения и стала бы затягивать в себя окружающий материал. По мере накопления все большей массы материала появились бы дискретные образования, разделенные пустым пространством. Дальнейшее гравитационное сжатие, за которым последовало бы дробление, привело бы к образованию звезд и их скоплений. Остается неизвестным лишь то, как в самом начале появилась неоднородность.

Удивительно, но галактики – это не самые крупные структуры во вселенной, несмотря на их необъятные размеры. Большинство галактик собраны в скопления и даже в скопления скоплений. Также существуют огромные галактические лакуны, струны и пласты. И снова, происхождение этой крупномасштабной структуры недостаточно нами понято. Вселенная – это гораздо больше, чем галактики. Космос полон невидимой материи, возможно, имеющей форму экзотических субатомных частиц, которые крайне слабо взаимодействуют с обычной материей, а потому остаются незамеченными. Никто не знает, что это такое. Хотя таинственная материя невидима, она имеет важные гравитационные свойства. Например, она может влиять на скорость, с которой образуется гравитационное скопление, и, следовательно, воздействует на макроскопическую структуру вселенной.

При более значительных расстояниях обнаруживается, что материя постепенно утрачивает свойство к образованию скоплений, а скопления галактик распределяются в пространстве равномерно. Лучшее всего самая крупная структура вселенной выявляется при помощи фонового теплового излучения, возникшего при Большом взрыве. Оно пронизывает вселенную целиком и распространяется более-менее свободно почти с самого времени создания. Следовательно, оно должно нести на себе отпечаток любого значительного отклонения от единообразия, произошедшего за время его космического путешествия, которое заняло многие миллиарды лет. Точные измерения однородности фонового излучения, поступающего с разных направлений, позволили астрономам установить пределы макроскопической однородности вселенной с точностью до одной десятичной.

Долгое время космологи предполагали, что вселенная в целом однородна – это предположение известно как космологический принцип. Однако причина однородности совершенно непонятна. Для дальнейшего ее изучения мы обратимся к Большому взрыву.

## Первая секунда

Сейчас общепризнано, что вселенная появилась внезапно в результате гигантского взрыва. Этот Большой взрыв подтверждается тем, что вселенная продолжает расширяться; все скопления галактик удаляются друг от друга. Если перенести это расширение в прошлое, становится ясно, что около 10–20 миллиардов лет назад все содержимое космоса, наблюдаемое нами сегодня, было спрессовано в крошечном объеме пространства. Космологи считают, что результатом Большого взрыва стало не только появление материи и энергии в существовавшем ранее вакууме, но и создание пространства и времени. Вселенная не была создана в пространстве и времени, пространство и время – *часть* созданной вселенной.

В соответствии с общими представлениями следует предположить, что ранние этапы взрыва отличались очень быстрым расширением и чрезвычайно высокой температурой. Это предположение подтвердилось в 1965 году, когда было открыто, что вселенная повсюду наполнена однородной тепловой радиацией. Температура космического фона примерно на три градуса выше абсолютного нуля – все, что осталось от бушевавшего некогда первобытного огня.

Если снова произвести экстраполяцию в прошлое, становится ясно, что состояние вселенной в первые несколько секунд, вероятно, было чрезвычайно простым, поскольку температура была слишком высока, чтобы могли существовать какие-либо сложные структуры, в том числе атомные ядра. Космологи предполагают, что космологический материал на заре времен состоял из однородной смеси не связанных друг с другом субатомных частиц, находившихся в термодинамическом равновесии.

Чтобы проверить это предположение, необходимо смоделировать судьбу «бульона», состоящего из частиц, во время сниже-

ния температуры. Упавшей на миллиард градусов температуры оказалось недостаточно, чтобы и далее поддерживать слияние нейтронов и протонов в сложные ядра. Согласно подсчетам, за первые несколько минут примерно 25 процентов ядерного материала могло преобразоваться в ядра элемента гелия с небольшим количеством дейтерия и лития, а также с незначительными примесями других элементов. Оставшиеся 75 процентов сохранились в необработанном виде и были представлены отдельными протонами, которым суждено было стать атомами водорода. Итак, по мнению астрономов, химический состав вселенной на 25 процентов представлен гелием и на 75 – водородом, а это позволяет нам доказать, что исходная идея о происхождении вселенной в результате горячего большого взрыва верна.

Согласно исходному варианту теории Большого взрыва, обретшей популярность в 1960-е, в самом начале вселенная обладала практически бесконечной температурой, плотностью и скоростью расширения, после чего она постоянно охлаждалась и замедлялась. Сам взрыв был вынесен за пределы науки, так же как и состав «бульона», появившегося в результате взрыва и его распространения в пространстве. Все это необходимо было допустить как нечто данное – либо дарованное Богом, либо обусловленное крайне специфическими начальными условиями, объяснение которых, по мнению ученых, не входит в их задачу.

Затем, в 1970-е, космология молодой вселенной получила существенный стимул к развитию из совершенно неожиданной области. В то время новые радикальные идеи настоящим потоком хлынули из физики высоких энергий, которая нашла естественное применение самым ранним эпохам Большого взрыва. Стали использоваться ускорители частиц, которые способны напрямую моделировать иссушающий жар первозданной вселенной, существовавший через одну триллионную долю секунды после исходного события – в эпоху, когда температура равнялась многим триллионам градусов. Кроме того, теоретики начали свободно рассуждать о физике значительно более высоких энергий, соответствующих космическим эпохам  $10^{-36}$  доли секунды – на самом пороге творения.

Удачное слияние физики очень большого (космологии) и очень малого (физики частиц) открыло возможность для объяснения

многих отличительных свойств большого взрыва исходя из физических процессов в самые ранние моменты, а не как следствие особых начальных условий. Например, согласно некоторым признакам, изначальная неравномерность в распределении материи, необходимая для роста галактик и галактических скоплений, возможно, объясняется квантовыми флуктуациями, которые произошли примерно через  $10^{-32}$  секунд.

Я не хотел бы подробно рассказывать здесь об этих увлекательных переменах, поскольку я уже обсуждал их в книге «Сверхсила». Однако хотелось бы осветить главный аспект, касающийся настоящей темы. В физике частиц ключевой параметр – это энергия, а история физики частиц строится, главным образом, на поиске все больших и больших энергий для организации столкновения субатомных частиц. Поскольку с годами энергия, задействованная в экспериментах, становится все выше, обнаружилась определенная тенденция. В общем, чем выше энергия, тем менее структурированы и дифференцированы как сама субатомная материя, так и силы, действующие на нее.

Возьмем, к примеру, разные силы природы. При низком уровне энергии, по-видимому, существуют четыре различные фундаментальные силы: гравитация и электромагнетизм, знакомые по повседневной жизни, и два типа ядерных взаимодействий – слабое и сильное. Для наглядности представим, что в некоем объеме пространства мы можем увеличивать температуру безгранично и таким образом моделировать все более и более ранние эпохи первозданной вселенной. Согласно современным теориям, при температуре около  $10^{15}$  градусов (это приблизительно равно предельным возможностям современного прямого эксперимента) электромагнитная сила и слабое ядерное взаимодействие становятся неразличимы. При более высокой температуре сил становится не четыре, а три.

Как предполагает теория, при дальнейшем повышении температуры будут происходить новые слияния. При  $10^{27}$  градусах сильное взаимодействие сольется со слабой электромагнитной силой. При  $10^{32}$  градусах к ним присоединится гравитация и образуется одна объединенная сверхсила.

Материя также постепенно теряет собственную идентичность по мере увеличения температуры. Мы знакомы с этим по обыден-

ному опыту. Наиболее структурированная и характерная форма материи – это твердые тела. При повышении температуры твердые тела превращаются в жидкость, затем – в газы, при этом каждая фаза представляет движение к бескачественности. При дальнейшем нагревании газ превратится в плазму, в которой даже атомы лишатся структуры и распадутся на электроны и ионы.

При дальнейшем нагревании ядра атомов разрушатся. Таково было состояние космологического материала по истечении примерно одной секунды. Он состоял из однородной смеси протонов, нейтронов и электронов. Ранее этого, до  $10^{-6}$  секунды, температура и плотность ядерных частиц (протонов и нейтронов) была столь высока, что их индивидуальные свойства были потеряны, а космологический материал редуцировался до бульона кварков – элементарных строительных единиц всей субъядерной материи.

Поэтому в те времена вселенная была заполнена простой смесью различных субатомных частиц, в том числе рядом разнообразных кварков, электронов, мюонов, нейтрино и фотонов.

При более высокой температуре, соответствующей еще более ранним эпохам вселенной, отличительные свойства этих частиц начинают изменяться. Например, некоторые частицы теряют массу и вместе с фотонами движутся со скоростью света. При сверхвысоких температурах даже различие между кварками и лептонами (частицами, вступавшими в относительно слабое взаимодействие, такими как электроны и нейтрино) начинает стираться.

Если принять на веру некоторые новейшие идеи, то как только температура достигает так называемой величины Планка, равной  $10^{32}$  градусам, вся материя распадается на простейшие составляющие, которые, возможно, представляют собой всего лишь море из одинаковых струн, существующих в десятимерном пространстве-времени. Более того, в таких экстремальных условиях расплывчатым становится даже различие между пространством-временем и материей.

Независимо от технических частных любой теории, общая тенденция состоит в том, что по мере повышения температуры частицы и силы все меньше отличаются друг от друга по структуре и форме. По достижении последнего предела высоких энергий вся физика, по-видимому, превратится в некий примитивный и абстрактный субстрат. Некоторые теоретики пошли еще дальше и



предположили, что сами законы природы также растворяются при сверхвысоких энергиях, и на смену правлению законов приходит чистый хаос. Эти удивительные изменения, которые, как предполагается, произойдут при наличии высоких энергий, открыли замечательные новые перспективы в видении природы. Сейчас физический мир, доступный в повседневном опыте, рассматривается как некий застывший след некоей основополагающей физической природы, которая объединяет все силы и частицы в лишенную свойств амальгаму.

## Симметрия, и как ее уменьшить

В своей недавней книге «Левая сторона творения» астрофизики Джон Бэрроу и Джозеф Силк пишут<sup>1</sup>: «Если рай – это состояние законченной и совершенной симметрии, то история “большого взрыва” напоминает “потерянный рай” ... В результате появилась разнообразная вселенная с нарушенной симметрией, окружающая нас в настоящий момент».

Чтобы оценить это довольно загадочное утверждение, необходимо понимать место симметрии в современной физике. Мы уже видели, почему нарушение симметрии является характерной чертой процессов самоорганизации в биологии, химии и лабораторной физике. Теперь мы увидим, почему она играет ключевую роль и в космологии.

Явная симметрия в изобилии встречается в природе – в сферической форме Солнца, в узоре снежинки, в геометрической форме планетарных орбит – и в изделиях человека. Скрытая симметрия, однако, играет еще более важную роль в физике. Действительно, наше современное понимание основополагающих сил природы очень серьезно зависит от понятия абстрактной симметрии, которая неразличима при поверхностном наблюдении.

Как уже отмечалось ранее, между симметрией и структурой наблюдается обратная зависимость. Появление структуры и формы обычно указывает на нарушение существовавшей ранее симметрии. Объясняется это тем, что симметрия связана с отсутствием свойств. Один из примеров объекта, обладающего симметри-

<sup>1</sup> John D. Barrow and Joseph Silk, *The Left Hand of Creation* (New York, Basic Books, 1983), p. ix.

ей, – это сфера. Ее можно повернуть под любым углом вокруг центра, при этом ее внешний вид не изменится. Однако если на ее поверхности нарисовать точку, то осевая симметрия будет нарушена, поскольку мы заметим перемещение сферы, глядя на точку.

Тем не менее сфера с выделенной точкой сохраняет некую симметрию. Ее можно вращать без изменений по оси, проходящей через точку и центр сферы. Однако если на поверхность нанести множество точек, то эти типы симметрии также будут утеряны.

Мы уже упоминали несколько примеров спонтанного нарушения симметрии, сопровождающего появление новых форм порядка; например, в реакции Белоусова-Жаботинского, или в явлении автоволн в активной среде, когда в исходном бескачественном растворе образуются пространственные узоры; в морфогенезе, когда однородный клеточный шар вырастает в дифференцированный эмбрион; в ферромагнетизме, когда хаотически распределенные микромагниты выстраиваются в макроскопическом порядке.

В физике частиц есть симметрии, которые не имеют простого геометрического выражения. Тем не менее они имеют решающее значение для нашего понимания законов физики на субатомном уровне. Лучший пример этому – так называемая калибровочная симметрия, открывающая возможность для унификации сил природы. Калибровочная симметрия имеет отношение к наличию свободы постоянно переустанавливать («калибровать») различные потенциалы в математическом описании сил, не меняя при этом значения сил на каждом этапе в пространстве и времени. Что касается геометрической симметрии, то она, при наличии калибровочной симметрии, обычно спонтанно нарушается при низких температурах и восстанавливается при высоких.

Именно это происходит с электромагнитными и слабыми взаимодействиями. Эти две силы явно отличаются по своим свойствам при обычном уровне энергии. Электромагнитная сила гораздо мощнее и бесконечна по диапазону, тогда как относительно слабое взаимодействие ограничивается субъядерной областью. Но как мы уже видели, при температуре, превышающей  $10^{15}$  градусов, две силы становятся одинаковыми. Теперь они сравнимы по интенсивности и диапазону и указывают на появление новой симметрии (на самом деле калибровочной симметрии), которая была скрыта или нарушена при низких энергиях.

Как мы уже знаем, теория предсказывает, что все виды других абстрактных симметрий восстанавливаются, если температура продолжает повышаться. К ним относится и глубинная симметрия законов природы между материей и антиматерией. Материя, которая представляет собой форму энергии, может быть создана в лаборатории, но ей всегда сопутствует эквивалентное количество антиматерии. Из-за того, что в лаборатории материя и антиматерия всегда образуются симметрично, возникает интригующий вопрос: почему вселенная состоит почти на 100% из материи? Что же случилось с антиматерией? По-видимому, некий процесс на ранних этапах большого взрыва нарушил симметрию между материей и антиматерией и позволил образоваться избыточной материи.

Следовательно, историю вселенной можно рассматривать как последовательность нарушений симметрии по мере падения температуры. Начиная с лишенной свойств амальгамы, шаг за шагом возрастают структурированность и дифференциация. С каждым шагом «вымерзает» новое отличительное свойство. Нужно предположить, что в первые мгновения (около  $10^{-32}$  секунды после начального взрыва) существовал избыток кварков по сравнению с антикварками. Затем кварки объединились в ядерные частицы по истечении примерно одной микросекунды. К концу первой секунды большая часть антиматерии была уничтожена из-за контакта с материей.

Теперь все готово для нового этапа. По истечении примерно одной минуты ядра гелия образовались в результате слияния нейтронов с некоторыми протонами. Гораздо позже, по прошествии почти одного миллиона лет, из ядер вместе с электронами образовались атомы.

По мере того как вселенная остывала, примитивный космический материал продолжал собираться и образовывать звезды, звездные скопления, галактики и другие астрономические структуры.

Затем звезды произвели сложные ядра, после чего извергли их в космос, дав возможность образоваться планетарным системам. По мере охлаждения составляющего их материала он сгущался в кристаллы и молекулы, обладающие все большей сложностью. Дифференциация и переработка создали все разнообразные формы материи, встречающиеся на Земле, – от алмазов до ДНК. В биосфере нашей планеты, куда бы мы ни бросили взгляд, материя и энергия вовлечены в дальнейшее совершенствование, усложнение и дифференциацию материи.

## Исходный источник вселенной

Любой рассказ о творении вселенной будет неполным без упоминания о ее исходном источнике. В момент написания данной книги популярна теория так называемого *инфляционного сценария*. Согласно этой теории, в момент возникновения вселенная была полностью лишена какой-либо материи и энергии. Согласно одному варианту теории, пространство-время появилось спонтанно из ничего в результате квантовой флуктуации. По другой версии, следует рассматривать не возникновение трехмерного пространства в некий момент времени, а возникновение замкнутого четырехмерного пространства. Если допустить, что это пространство не имеет особых точек, то никакого реального источника вообще не существует – то, что мы принимаем за начало вселенной, является физическим источником так же, как Северный полюс – началом поверхности Земли.

Как бы то ни было, следующим шагом для этой неподвижной «капли» новорожденного пространства станет расширение с фантастической, постоянно возрастающей скоростью, пока она не достигнет космических масштабов. Этот процесс занял всего лишь  $10^{-32}$  секунды или около того. Эта «инфляция» и дала название самому сценарию. Она превратила «малый взрыв» в знакомый нам большой.

Во время инфляционной фазы было произведено огромное количество энергии, но она была невидима – заперта в пустом пространстве в квантовой форме. Когда инфляция завершилась, эта гигантская энергия была выпущена в виде материи и радиации. Далее вселенная эволюционировала так, как было описано ранее.

Во время инфляционной фазы вселенная пребывала в состоянии совершенной симметрии. Она состояла из полностью однородного и изотропного пространства. Более того, поскольку скорость расширения была абсолютно равномерной, один момент времени был неотличим от другого. Другими словами, вселенная была симметрична при обращении и трансляции времени. Она обладала «бытийностью», но не «становлением». Конец инфляции был первым великим нарушением симметрии: бескачественное пустое пространство внезапно населили мириады частиц, что привело к колоссальному увеличению энтропии. Этому шагу присуща

высокая степень необратимости, он наложил на вселенную печать стрелы времени, которая сохранилась до сегодняшнего дня.

Если придерживаться теории инфляции или чего-то подобного, то кажется, что вселенная началась практически на пустом месте, а сложная вселенная, наблюдаемая нами сегодня, эволюционировала шаг за шагом, через последовательность нарушений симметрии. Каждый шаг практически необратим и создает большое количество энтропии, но каждый шаг также созидателен, в том смысле, что он предоставляет новые возможности для дальнейшей организации и усложнения материи. Творение более не рассматривается как раз и навсегда завершённое, этот процесс продолжается и до сих пор не закончен.

## Саморегулирующийся космос

Неуклонное развёртывание космического порядка привело к образованию сложных структур по всей шкале размеров. В астрономическом отношении мельчайшие структуры во вселенной находятся в Солнечной системе. Любопытно, что хотя движение планет долгое время было одним из лучших примеров удачного применения законов физики, до сих пор не достигнуто правильного понимания того, как возникла Солнечная система.

Представляется вероятным, что планеты образовались из газопылевой туманности, окружавшей Солнце вскоре после его появления около пяти миллиардов лет назад. До сих пор ученые лишь очень приблизительно представляют себе, какие физические процессы участвовали в этом. Помимо гравитации, должны были происходить сложные гидродинамические и электромагнитные явления. Примечательно, что из бескачественного облака вращающегося материала появилось существующее сейчас упорядоченное расположение планет. Не менее замечательно и то, что жестко регламентированное движение планет сохраняло стабильность на протяжении миллиардов лет, несмотря на сложный рисунок гравитационных взаимодействий между планетами.

Планетарным орбитам присуща необычная и даже загадочная степень порядка. Возьмем, к примеру, знаменитый закон Бодде (на самом деле своим происхождением он обязан астроному Тициусу), касающийся расстояния между планетами и Солнцем. Оказыва-

ется, что простая формула  $r_n = 0,4 + 0,3 \times 2^n$ , где  $r_n$  – радиус орбиты планеты номер  $n$  по отношению к Солнцу в единицах орбиты Земли, помещает все планеты в диапазон нескольких процентов, за исключением Нептуна и Плутона. Закон Тициуса-Бодде верно предсказал существование планеты Уран, а также предсказывает существование «недостающей» планеты там, где располагается пояс астероидов. Несмотря на все эти успехи, закон не имеет под собой общепринятого теоретического основания. Либо упорядоченное расположение планет – это совпадение, либо действует некий до сих пор неизвестный физический механизм, организовавший Солнечную систему подобным образом.

У нескольких внешних планет есть собственные миниатюрные «солнечные системы», содержащие «луны», или более впечатляющие кольца. Кольца Сатурна, известные лучше всего, начали поражать и удивлять астрономов уже в 1610 году, когда их открыл Галилей. Огромный плоский пояс, протянувшийся на тысячи километров, создает впечатление непрерывного твердого тела, но, как отмечалось в главе 5, на самом деле эти кольца состоят из великого множества маленьких частиц, движущихся по орбите.

При фотосъемке крупным планом, ведшейся с космических зондов, был обнаружен поразительный набор свойств и структур, о существовании которых никто даже и не подозревал. То, что представлялось системой замкнутых колец, оказалось замысловатым сочетанием тысяч колец или колечек, разделенными лакунами. Были обнаружены и менее распространенные образования, например «спицы», петли и изгибы. Кроме того, было открыто множество новых малых и кольцевых лун, внедренных в систему колец.

Выстраивая теоретическое понимание колец Сатурна, следует учитывать гравитационные силы, действующие на частицы, образующие кольца, на больших и малых лунах Сатурна, а также на самой планете. Электромагнитные воздействия также играют определенную роль. Все вместе это складывается в очень сложную нелинейную систему, где многие структуры, по-видимому, возникли спонтанно, за счет самоорганизации и слаженного поведения триллионов частиц.

Немаловажно то, что гравитационные поля спутников Сатурна стремятся выстраивать «резонансы» по мере периодического движения по орбите, тем самым прокладывая кольца, свободные

от частиц на определенных радиусах. Другое явление вызвано гравитационными возмущениями, создаваемыми малыми лунами, движущимися по орбите внутри колец. Из-за этих так называемых лун-пастухов меняется структура краев колец, что приводит к образованию изгибов или тесьмы.

Полного теоретического объяснения колец Сатурна не существует. В действительности, неоднократно проводившиеся расчеты показывают, что кольца должны быть лишены устойчивости и через короткий по астрономическим меркам срок их ждет разрушение. Например, оценка передачи импульса между ведущими спутниками и кольцами показывает, что система колец и кольцевых лун должна разрушиться по истечении менее чем ста миллионов лет. Несмотря на это почти наверняка известно, что возраст колец насчитывает *миллиарды* лет.

Случай с кольцами Сатурна – частное проявление общего правила. Сложные физические системы обычно открывают состояния с высокой степенью организованности и совместной деятельности, отличающиеся удивительной устойчивостью. Изучение термодинамики может создать уверенность в том, что система, подобная кольцам Сатурна, с огромным количеством взаимодействующих частиц, быстро низвергнется в хаос и вся макроскопическая структура будет уничтожена. Однако сложным структурам удастся сохранять устойчивость на протяжении времени, значительно превышающего продолжительность обычных процессов разрушения. Об этих кольцах невозможно рассуждать без таких терминов, как «регуляция» и «контроль».

Еще более поразительный пример сложной системы, осуществляющей невероятную по своей степени саморегуляцию, – это планета Земля. Несколько лет назад Джеймс Лавлок ввел любопытное понятие «Гея». Названная по имени греческой богини Земли, Гея – это способ осмысления нашей планеты как целостной саморегулирующейся системы, в которой деятельность биосферы неотделима от сложных физических процессов геологического, климатологического и атмосферного порядка.

На протяжении геологических периодов существование жизни на Земле существенно изменило окружающую среду, в которой эта самая жизнь процветает. Например, наличие кислорода в нашей атмосфере – прямой результат деятельности сине-зеленых

водорослей, а позже – высших растений. Земля также претерпела изменения неорганического происхождения, например, вызванные смещением континентов, падением крупных метеоритов и постепенным увеличением яркости солнечного излучения. Заинтриговало же Лавлока то, что эти два вида изменений, казалось бы, не зависящих друг от друга, все же, по-видимому, связаны.

Возьмем, например, вопрос о яркости Солнца. По мере того, как Солнце сжигает собственное водородное топливо, его внутренняя структура постепенно меняется, что в свою очередь влияет на яркость его излучения. За всю историю Земли яркость Солнца увеличилась примерно на 30 процентов. С другой стороны, температура поверхности Земли оставалась на удивление постоянной в течение всего этого времени – об этом известно благодаря повсеместному наличию жидкой воды; океаны никогда не замерзли полностью и не достигали точки кипения. То, что жизнь сохранила существование на протяжении большей части истории Земли, само по себе свидетельствует о наличии уравновешенных условий.

Каким-то образом температура Земли регулировалась. Можно отыскать некий механизм, связанный с уровнем двуокиси углерода в атмосфере. Двуокись углерода захватывает тепло и производит «парниковый эффект». Первозданная атмосфера содержала большое количество двуокиси углерода, которая действовала как одеяло и сохраняла Землю теплой при относительно слабом солнечном излучении в ту эпоху. Но с появлением жизни содержание двуокиси углерода в атмосфере начало снижаться, поскольку углерод усваивался живыми существами. Вместо него выделялся кислород.

Преобразование химического состава атмосферы Земли пришлось вовремя, поскольку оно прекрасно сочеталось с увеличением объема тепла, поступающего от Солнца. По мере того как Солнце становилось все горячее, одеяло из двуокиси углерода постепенно съедалось живыми организмами. Далее, в верхней части атмосферы кислород произвел озоновый слой, который преграждал путь опасному ультрафиолетовому излучению. До тех пор жизнь встречалась только в океанах. Под защитой озонового слоя она добилась процветания в открытых условиях на суше.

То, что жизнь таким образом поддерживала условия, необходимые ей для выживания и развития, – прекрасный пример



саморегуляции. В ней заложено притягательное свойство телеологичности. Конечно, следует противиться искушению, призывающему нас предположить, что конечные причины подталкивали биологические процессы в особом направлении. Тем не менее Гея – это прекрасное наглядное свидетельство того, что сложнейшая система обратной связи способна следовать устойчивым моделям деятельности перед лицом резких внешних изменений. И здесь мы снова видим, как частные элементы и субпроцессы объединяются системой в некое целое в направлении, соответствующем общему плану.

Стабильные условия на поверхности нашей планеты наглядно представляют общий вывод: сложные системы обладают необычной способностью выстраивать устойчивые типы деятельности в то время, когда априори следовало ожидать распада и разрушения. Большинство компьютерных моделей атмосферы Земли предсказывают какую-либо неконтролируемую катастрофу, например глобальное оледенение, вскипание океанов или сгорание всего и вся по причине чрезмерного количества кислорода, из-за которого начинается всемирный пожар. Создается впечатление, что атмосфера обладает минимальной устойчивостью. Тем не менее каким-то образом объединяющий эффект, созданный многими взаимозависимыми процессами, поддерживал устойчивость атмосферы перед лицом крупномасштабных изменений даже во времена катаклизмов и разрушений.

## Гравитация: источник космического порядка

Из четырех фундаментальных сил природы лишь гравитация распространяет свое воздействие на расстояния космического порядка. В этом смысле гравитация наделяет космос силой. Она отвечает за образование крупномасштабной структуры вселенной, и именно в рамках этой структуры другие силы исполняют свои роли.

Долгое время физики и астрономы считали гравитацию особенной в том смысле, что она организует материю. Под действием гравитации однородный газ теряет устойчивость. Вследствие незначительных изменений плотности некоторые области газа будут оказывать большее давление, чем другие, что заставит окружающий материал собраться воедино. Из-за данного объедине-

ния изменится плотность газа и возрастет его неоднородность, в результате чего газ может распасться на отдельные образования. По мере того как материал собирается в определенных областях, их гравитационная сила растет. Как мы уже видели, этот нарастающий процесс в конечном итоге может привести к образованию галактик и звезд. Более того, из-за него может произойти полный коллапс материи и ее превращение в черные дыры.

Данная особенность гравитации, из-за которой материя становится все более массивной, резко отличается от поведения газа на малой площади, где гравитационные силы незначительны. В последнем случае неравномерно распределенный газ быстро обретет однородность, поскольку хаотическое возбуждение молекул очень скоро «перетасует» его в единообразное состояние. Обычно законы термодинамики разрушают структуры, однако в гравитирующих системах происходит обратное: по всей видимости, со временем структуры растут.

«Антитермодинамическое» поведение гравитации связано с некоторыми странностями. Например, большинство горячих объектов становятся холоднее, когда теряют энергию. Но гравитирующие системы поступают иначе: они становятся горячее. Представьте, к примеру, что благодаря магическим умениям мы внезапно лишили Солнце всей тепловой энергии. В этом случае Солнце уменьшится в размере, поскольку его гравитация более не будет уравновешена внутренним давлением.

В конце концов, когда из-за собственного давления газов на Солнце их температура, а следовательно, и давление вырастет, установится новое равновесие. Им потребуется значительно превзойти сегодняшний уровень, чтобы противодействовать возросшей гравитации, вызванной более компактным состоянием материи. В конечном итоге Солнце достигнет нового устойчивого состояния с меньшим радиусом и более высокой температурой. Увеличение энергии тела за счет гравитации можно видеть и при падении тел, в частности искусственных спутников. Входя в атмосферу Земли, спутник в конечном итоге сгорит или упадет на землю. Однако любопытно, что полная энергия спутника растет, поскольку гравитационная (потенциальная) энергия превращается в кинетическую, в результате чего полная скорость увеличивается по мере движения из-за радиальной составляющей. Тангенциальная

же составляющая скорости, заставляющая его двигаться по круговой орбите, при этом уменьшается из-за сопротивления воздуха.

Ключ к уникальным структурообразующим свойствам гравитации кроется в ее универсальной притягивающей природе и большом диапазоне воздействия. Гравитация влияет на все частицы материи во вселенной, и от нее невозможно отгородиться. Поэтому ее воздействие носит кумулятивный характер, усиливаясь с ходом времени. По мере того как гравитация притягивает и собирает материю по частям, ее роль растет по двум причинам. Во-первых, накопление материи усиливает источник тяготения. Во-вторых, сила гравитации растет, когда материя сжимается, согласно закону обратных квадратов.

Гравитацию можно противопоставить электромагнитной силе, которая отвечает за поведение самых обыденных систем. Эта сила также действует на большие расстояния, но из-за того, что существуют и положительный, и отрицательный заряды, электромагнитные силы обычно в природе уравновешены. Поле электрического диполя (когда положительный и отрицательный заряды расположены рядом) уменьшается с расстоянием гораздо быстрее, чем поле одиночного заряда. В итоге электромагнитные силы действуют на малых расстояниях; например, так называемые ван-дер-ваальсовы межмолекулярные взаимодействия убывают в соответствии с седьмой степенью от радиуса. Именно по этой причине существование макроскопического порядка в химических системах, подобных реакции Белоусова-Жаботинского, столь удивительно. Но поскольку гравитационное влияние простирается на астрономические расстояния, оно способно устанавливать макроскопический порядок напрямую.

Если бы гравитация была единственной силой природы, всю материю поглотили бы области скопления материи, чьи гравитационные поля подвергли бы ее неограниченному сжатию. В результате материя исчезла бы. Такие объекты, как галактики и звездные скопления, существуют потому, что их вращательное движение уравновешивает гравитацию с центробежными силами. Большинство звезд и планет производят внутреннее давление электромагнитного происхождения. Некоторые звезды, претерпевшие коллапс, нуждаются в квантовом давлении экзотического происхождения, чтобы выжить.

Однако такое подвешенное состояние уязвимо. Когда крупные звезды выгорают, они проигрывают битву с собственной гравитацией, полностью разрушаются и превращаются в черные дыры. В черной дыре материя вдавливаются в так называемую сингулярность, где ее ждет разрушение. Черные дыры могут также возникать в центре галактик или звездных скоплений, где центробежная сила недостаточна, чтобы не дать прирастающей материи достичь критического уровня плотности. Новорожденные черные дыры способны поглотить другие объекты, которые в ином случае могли противостоять собственной гравитации.

Таким образом, космологи видят в истории вселенной исключительно длительную борьбу материи с гравитацией. Начавшись с относительно равномерного распределения материи, космос постепенно становится все более неоднородным и структурированным, так как материя перетекает сначала в скопления, затем в скопления скоплений и так далее, вплоть до черных дыр в конечном итоге. Без гравитации вселенная являла бы собой распространившийся повсюду бескачественный газ.

Решающую роль в образовании галактик и звезд сыграло притяжение друг к другу первозданных газов. После их образования открылся путь к созданию тяжелых элементов, планет, огромного разнообразия химических элементов, биологических существ и в конечном итоге человека. В этом смысле гравитацию можно считать источником всей космической организации. Давным-давно, в древнейшую эпоху существования вселенной, гравитация запустила каскад самоорганизующихся процессов – организация порождает организацию, – которые шаг за шагом привели к появлению сознательных индивидов, рассматривающих в настоящий момент историю космоса и гадающим, что же все это значит.

## Гравитация и загадка термодинамики

Способность гравитации вызывать появление структуры и организации во вселенной, по всей видимости, противоречит духу второго закона термодинамики. На самом деле, отношения между гравитацией и термодинамикой до сих пор до конца не выяснены. Конечно, можно распространить такие понятия термодинамики, как температура и энтропия, на системы с собственной

гравитацией, но термодинамические свойства этих систем остаются неясными.

Некоторое время считалось, что черные дыры в действительности не подпадают под действие второго закона, поскольку они способны поглощать энтропию. Но в начале 1970-х Джэкоб Бекенстайн и Стивен Хокинг доказали, что понятие энтропии можно распространить и на черные дыры (энтропия черной дыры пропорциональна площади ее поверхности). Решающий шаг в этом направлении сделал Хокинг. Он доказал, что черные дыры в конечном итоге не обязательно черные и имеют определенную температуру. Во многих отношениях обмен энергией и энтропией между черной дырой и окружающей средой соответствует тем термодинамическим правилам, которые инженеры применяют к тепловым двигателям. Но, как и следовало ожидать, черные дыры подчиняются общему правилу для всех систем с собственной гравитацией: излучая энергию, они становятся горячее. Несмотря на это неизбывный второй закон термодинамики сохраняет неприкосновенность, если учесть собственную энтропию черной дыры.

Хотя присущее гравитирующим системам свойство наращивания массы со временем, в конечном счете, не противоречит второму закону термодинамики, оно им не объясняется. И снова мы сталкиваемся с искомой стрелой времени. Однонаправленный рост массы космических тел во вселенной столь важен для ее структуры и эволюции, что, по-видимому, является фундаментальным принципом.

Один из тех, кто уверен в том, что здесь задействован некий базовый принцип, – Роджер Пенроуз; его работу о мощности плоскости мы упоминали в главе 6. По мнению Пенроуза, существует космический закон или принцип, согласно которому вселенная начинается, грубо говоря, с однородного состояния. Он предложил математическую величину в явной форме (тензор Вейля) в качестве меры гравитационной неравномерности и попытался доказать, что под действием гравитационной эволюции она может только расти. Он надеется, что этой величиной можно измерить *энтропию* самого гравитационного поля, тогда рост массы можно рассматривать как еще один пример повсеместного роста энтропии со временем, т.е. второго закона термодинамики. Конечно, необходимо, чтобы это выражение гравитационной энтропии распространялось и на

упоминавшуюся выше формулу площади Хокинга в ее предельном случае, когда крайним выражением растущей массы становятся черные дыры. Хотя Пенроуз, по-видимому, нащупал реальное и важное свойство природы, его попытки представить собственные идеи в более строгом виде пока неубедительны, да и сам Пенроуз сдержанно отзывается о них.

Как и Пенроуз, я убежден: в стремлении систем с собственной гравитацией к большей структурированности проявляется основополагающий принцип природы. На самом деле это лишь один аспект общего принципа, рассматриваемого в настоящей книге, – прогрессивной самоорганизации природы. Думаю, здесь требуется ясно представлять себе, чем отличается *порядок* от *организованности*. Я допускаю, что неравномерное распределение материи с собственной гравитацией *не обладает* большей степенью порядка, чем равномерное, однако ему действительно *присущ* более высокий уровень организации – достаточно сравнить галактику с ее спиральными рукавами и сложенным движением и бескачественное облако первозданного газа. Поэтому я думаю, что свойство гравитирующих систем создавать собственную структуру нельзя объяснить одной только концепцией гравитационной энтропии – необходима некая количественная мера для *качества* распределения гравитации.

# Источник творения

## Третья революция

**М**ногие физики предчувствуют, что в их науке вот-вот произойдет серьезная революция. Как уже упоминалось ранее, настоящие революции в науке случаются не за счет быстрых успехов в частных технических областях, а путем преобразования концепций, дающих основание этой науке. В физике революции такого масштаба происходили дважды. Первая заключалась в систематической разработке механики Галилеем и Ньютоном. Вторую произвели теория относительности и квантовая теория в начале двадцатого века.

На одном из научных рубежей большой энтузиазм вызывают честолюбивые попытки теоретиков объединить силы природы и представить полное описание всех субатомных частиц. Эту схему прозвали «Теорией всего» или ТВ. Данный проект, возникший как часть физики высоких энергий и нашедший в недавнее время точки соприкосновения с космологией, представляет собой поиск абсолютных законов, действующих на низшем и простейшем уровне физической природы, доступной для описания. Если он увенчается успехом, будут открыты элементарные объекты, из которых построен весь физический мир.

В то время как продолжается эта бодрая редукционистская кампания, наблюдается прогресс на противоположном рубеже – в области слияния физики и биологии, где стоит цель не понять, из чего сделаны вещи, а уяснить себе, как они сводятся вместе и функционируют в качестве единого целого. Здесь главные понятия – сложность, а не простота, и организация, а не оборудование. Так предпринимается попытка создать Теорию организации или ТО.

Разнообразные ТВ и ТО, без сомнения, внесут серьезные коррективы в современную физику. ТВ выступают с новыми странными предположениями, например о существовании дополнительных измерений пространства и струнах, из которых построен наш мир. Для их воплощения необходимы новые области математики. ТО также обещают открыть совершенно новые принципы, не сравнимые по масштабам с известной физикой.

Главный вопрос, на который должны ответить исследователи, работающие над ТО, следующий: можно ли объяснить удивительную – можно даже сказать необоснованную – склонность материи и энергии к самоорганизации «вопреки прогнозам» при помощи известных законов физики или же для этого необходимы новые фундаментальные физические законы?

На практике попытки объяснить сложность и самоорганизацию с использованием базовых законов физики потерпели неудачу. Несмотря на то, что стремление вселенной к постоянному увеличению организационной сложности не может остаться незамеченным, появление новых уровней организации часто оценивается как загадка, поскольку с термодинамической точки зрения оно будто бы идет «по неверному пути». Поэтому новые формы самоорганизации воспринимаются как нечто неожиданное и диковинное.

Столкнувшись с организованными системами, ученые иногда могут создать их *специальную* модель, по завершении процесса. Но если попытаться понять, с чего началось их существование, или предсказать, какую форму примут абсолютно новые сложноорганизованные системы, придется столкнуться с серьезными трудностями. Особенно это касается биологии. Происхождение жизни, эволюция сложно устроенных биологических организмов и развитие эмбриона из одной яйцеклетки – все это, на первый взгляд, кажется чудом и по-прежнему нуждается в объяснении.

## Таинственная организующая сила природы

Из-за явных затруднений при попытке понять сложность и самоорганизацию вселенной, не существует единого мнения об источнике организующей способности природы. Можно выделить три разных мнения.



## Абсолютный редукционизм

Некоторые ученые утверждают, что новые явления не возникают и что в конечном итоге все физические процессы можно свести к поведению взаимодействующих между собой элементарных частиц (или полей). Они допускают, что более высокие уровни описания выделять можно, но делается это исключительно для удобства, исходя из полностью субъективных критериев. Несомненно, изучать собаку намного проще именно как собаку, а не как набор клеток или атомов, находящихся в сложном взаимодействии. Однако из-за этого нам не следует ошибочно полагать, что «собака» обладает неким фундаментальным значением, которое не было присуще атомам, составляющим это животное.

Приверженец крайней редукции убежден: все уровни сложности, в принципе, можно объяснить базовыми законами механики, которые управляют поведением основных физических полей и частиц. Тогда, в принципе, даже существование собак можно обосновать таким образом. А наша неспособность объяснить на практике, скажем, происхождение жизни относится исключительно на счет нашего сегодняшнего неведения о точных характеристиках участвующих в этом сложных процессов. Кроме того, редукционисты предупреждают: пробелы в знании не следует устранять за счет таинственных новых сил, законов и принципов.

Свое собственное мнение я изложил в предыдущих главах. Полная редукция – это не более чем туманное обещание, основанное на устаревшей и уже опровергнутой концепции детерминизма. Абсолютный редукционизм, отрицающий важность иерархичности природы, попросту уклоняется от решения многих вопросов, представляющих для нас интерес. Например, он не признает реальности существования стрелы времени. Назвать вопрос некорректным еще не значит решить его.

## Беспричинная созидательность

Другая позиция состоит в том, чтобы избегать редукционизма в его крайнем проявлении и допускать, что существование сложноорганизованных форм, процессов и систем необязательно следует из законов, действующих на более низких уровнях. В этом

случае существование некоторых или всех уровней попросту принимается как данность природы. Согласно такой точке зрения, эти новые уровни организации (т.е. живая материя) никоим образом не обусловлены ни более низкими уровнями, ни чем-либо другим. Им свойственна истинная новизна.

Этой позиции придерживался философ Анри Бергсон. Будучи сторонником телеологии, Бергсон, тем не менее, отвергал идею финализма, считая ее лишь иной формой детерминизма, хотя и инвертированного во времени<sup>1</sup>:

Доктрина телеологии в ее крайнем выражении, которую мы обнаруживаем, например у Лейбница, подразумевает, что вещи и существа лишь выполняют созданную ранее программу. Итак, не существует ничего непредсказуемого; время снова оказывается бесполезным. Как и в механистических гипотезах, здесь снова предполагается, что *все дано заранее*. Понятый таким образом финализм представляет собой лишь инверсию механицизма.

Бергсон находит выход в концепции непрерывного творчества вселенной, где совершенно новые вещи возникают вне какой-либо связи с тем, что происходило ранее, а также вне каких-либо ограничений со стороны predetermined цели.

Понятие неограниченной творческой способности и новизны предлагает и современный философ Карл Поппер<sup>2</sup>:

Сегодня некоторые из нас научились по-новому использовать слово «эволюция». Ибо мы полагаем, что эволюция – эволюция вселенной и в особенности эволюция жизни на Земле – произвела нечто новое; реальную новизну... Как подсказывает история эволюции, вселенная никогда не теряла творческой способности или «изобретательности».

Некоторые физики согласились с этими идеями. Например, Кеннет Денбай пишет в книге «Изобретательная вселенная»<sup>3</sup>:

Давайте зададимся вопросом: могут ли совершенно новые вещи появляться с течением времени; вещи, которые, так сказать, не вызваны свойствами других вещей, существовавших ранее?

Примерно описав, как это может произойти в действительности, Денбай обращается к следующему вопросу: если появление нового уровня реальности всегда неопределенно, то чем оно «вызвано»,

<sup>1</sup> Bergson, op. cit., p. 41.

<sup>2</sup> Popper and Eccles, op. cit., p. 14.

<sup>3</sup> Kenneth Denbigh, *An Inventive Universe* (London, Hutchinson, 1975), p. 145.

как принято говорить? Как утверждает ученый, за этим не стоит совершенно никакой причины<sup>4</sup>:

Сама неизбежность, с которой напрашивается подобный вопрос, указывает на глубокую укорененность детерминистических форм мышления.

Денбай предпочитает рассматривать появление новых уровней как «процесс изобретения», который создает нечто отличное от предыдущего и необусловленное: «ведь суть истинной новизны в том, что *так не должно было случиться*».

Принять эту позицию мне мешает то, что она оставляет без какого-либо объяснения систематический характер организации. Если новые уровни организации попросту возникают на ровном месте без какой-либо причины, то почему вселенная явно прогрессирует столь упорядоченным образом – от бескачественных истоков и вплоть до богатого разнообразия? Как объяснить равномерное продвижение вперед биологической эволюции? Почему набор вещей, не имеющих причины, совместными усилиями производит последовательность, асимметричную во времени?

Сказать, что подобное однонаправленное движение не имеет причины и происходит случайным образом, равноценно, как мне кажется, утверждению о том, что предметы не падают под действием силы гравитации, а просто случайно движутся в этом направлении. Подобную точку зрения нельзя назвать научной, поскольку цель науки – найти рациональные универсальные принципы, объясняющие *все* закономерности природы.

Так я пришел к третьему варианту.

## Организующие принципы

Допустим, что в природе существует некое свойство, побуждающее материю и энергию спонтанно переходить на новый этап с более сложной организацией, что существование этих состояний нельзя полностью объяснить или предсказать за счет уровней и единиц более низкого уровня, и что они не возникают «случайно» без какой-либо причины. Тогда для его объяснения нужно отыскать некие физические принципы, дополняющие законы более низких уровней.

---

<sup>4</sup> Ibid., p. 147.

Я приложил множество усилий, чтобы доказать: неуклонное развертывание организованной сложности во вселенной – это фундаментальное свойство природы. Я рассмотрел некоторые важные попытки, предпринятые для моделирования сложных структур и процессов в физике, химике, биологии, астрономии и экологии. Мы узнали, что спонтанная самоорганизация обычно происходит в далеких от равновесия, открытых, нелинейных системах с высоким уровнем обратной связи. Подобные системы отнюдь не редки и представляют норму в природе. В отличие от них закрытые линейные системы, изучаемые в традиционной механике, или равновесные системы классической термодинамики – это очень специфические идеализированные случаи.

Поскольку все большее внимание уделяется изучению самоорганизации и сложности в природе, становится ясно, что должны существовать новые общие принципы – организующие принципы, стоящие за пределами и превосходящие известные законы физики, – которые пока не открыты. Очевидно, мы находимся на пороге открытия не только совершенно новых законов физики, но и способов рассмотрения природы, значительно отличающихся от традиционной науки.

## Законы программных средств

Что можно сказать об этих новых «законах сложности» и «организующих принципах», из которых, по-видимому, и проистекает способность природы создавать новое? Рассуждения об «организующих принципах» в природе часто считают какой-то постыдной мистикой или витализмом и, следовательно, антинаучными по определению. Однако я считаю это вопиющим предубеждением. Нет никакой причины, по которой фундаментальные законы природы должны непременно касаться только объектов низшего уровня, т.е. полей и частиц, простейшего строительного материала вселенной. Нет никакой логической причины, запрещающей новым законам вступать в действие при появлении каждого нового уровня в природной иерархии организации и сложности.

Верную позицию восхитительно сформулировал Артур Пикок<sup>5</sup>:

<sup>5</sup> Arthur Peacocke, *God and the New Biology* (London, J. M. Dent, 1986).

Концепции и теории, касающиеся более высоких уровней, часто ссылаются на истинные аспекты реальности, существующие на их уровне описания, и нам следует избегать предположений, согласно которым только так называемые элементарные частицы современной физики «на самом деле реальны».

Позвольте мне предотвратить возможное недопонимание. Нет необходимости считать, что эти организационные принципы более высокого уровня руководят составными частями системы, используя специально для этой цели новые загадочные силы, – такое утверждение будет равноценно витализму. Хотя вполне вероятно, что физики обнаружат новые силы, тем не менее коллективную опеку частиц можно рассматривать исходя только из действия знакомого нам взаимодействия между частицами, в частности электромагнетизма. Другими словами, я имею в виду, что организующие силы *используют* существующие взаимодействия между частицами, а не дополняют их, и тем самым меняют коллективное поведение целостным образом. Поэтому такие организующие силы никоим образом не противоречат базовым законам физики, поскольку они применимы к составляющим сложной системы.

Некоторые считают, что организующие принципы, дополняющие основополагающие (базового уровня) законы физики и не противоречащие им, существовать не могут. Утверждается, что в классической физике нет места для дополнительных принципов, которые действуют на коллективном уровне. Без сомнения, верно, что законы разных уровней могут сосуществовать только в том случае, если рассматриваемая система не является переопределенной. Важно, что законы нижних уровней сами по себе строги не до такой степени, чтобы определить все. Во избежание этого следует отказаться от строгого детерминизма. Но из всего вышеизложенного должно быть ясно, что строгому детерминизму больше нет места в науке.

Следует сделать замечание по поводу использования слова «закон». В целом закон – это утверждение о любой природной закономерности. Но физик придает большое значение тем законам, которые действуют с математической точностью. Истинный сторонник строгого редукционизма попросту будет отрицать существование каких-либо других законов и будет утверждать при этом, что все закономерности в природе в конечном итоге восходят к основному набору таких математических законов. Сегодня его надо понимать как нечто, подобное фундаментальной функции

Лагранжа, из которой можно вывести набор дифференциальных уравнений.

При таких ограничениях проверить закон можно, только если применить его к набору одинаковых систем. Когда же мы начинаем рассматривать все более сложные системы, понятие класса одинаковых систем становится все менее релевантным, поскольку одно из важных свойств очень сложной системы – ее уникальность. Тогда возникает сомнение в том, возможно ли описывать классы очень сложных систем при помощи математически точных утверждений. Например, теоретическая биология не может основываться на столь же точных математических утверждениях, как теоретическая физика.

С другой стороны, при рассмотрении сложного нас интересуют качественные, а не количественные характеристики. Несомненно, общее стремление к увеличению богатства и разнообразия форм в эволюционной биологии – элементарная данность природы, однако подсчитать его можно лишь приблизительно, если вообще возможно. Нет даже отдаленных свидетельств того, что это свойство можно вывести из фундаментальных законов механики, поэтому оно по праву заслуживает названия отдельного фундаментального закона. В этом случае нам следует принять несколько более широкое определение закона, чем то, которое до сих пор использовалось в физике.

Мир живого полон таких обших, в чем-то неточных закономерностей. Например, насколько я знаю, все члены царства животных обладают четным количеством ног. Будет глупо говорить, что существование трехногих животных *невозможно*, однако вероятность, по крайней мере, очень низка. Ни в коем случае я не считаю этот «закон конечностей» фундаментальным. Но может быть, что эти явления следуют из основополагающего закона, касающегося природы организованной сложности в биологии.

Многие авторы использовали компьютер в качестве примера того, как набор событий может обладать двумя дополняющими друг друга и непротиворечивыми описаниями на разных концептуальных уровнях – аппаратного оборудования и программных средств. Каждый пользователь ЭВМ знает, что есть «законы программных средств», прекрасно сосуществующие с «законами оборудования», которые управляют схемами компьютера. Никто не станет утверждать, будто из законов электромагнетизма можно

вывести законы налогообложения только потому, что последние хранятся в компьютере Управления налоговых сборов!

Следовательно, мы должны учесть вероятность существования «законов программного обеспечения» в природе, законов, управляющих организацией, информацией и сложностью. Эти законы носят фундаментальный характер в том смысле, что их нельзя вывести из базовых «законов оборудования», классического предмета изучения фундаментальной физики. Все же они сочетаются с этими базовыми законами так же, как налоговое законодательство может сочетаться с законами электромагнетизма. Законы программных средств действуют в отношении *возникающих* явлений: они вызывают их появление и управляют их формой и поведением.

В данных идеях нет ничего нового. Многие ученые и философы утверждают, что законы физики в современном виде не подходят для сложноорганизованных систем – особенно для живых систем. Более того, с критикой выступали не только виталисты, например Дриш. Даже противники витализма отмечают, что сведение всех явлений к неизвестным законам физики неспособно принести полный успех, поскольку при этом не учитывается, что в сложных явлениях задействованы различные *концептуальные уровни*.

К примеру, рассуждая о биологических организмах, хочется использовать понятия вроде телеономии и естественного отбора, которые совершенно теряют смысл на уровне физики отдельных атомов. Биологические системы обладают организационной иерархией. На каждом следующем уровне иерархии возникают новые понятия, свойства и связи, требующие нового объяснения.

Эту проблему прекрасно описал зоолог из Кембриджа У. Г. Торп<sup>6</sup>:

Оказывается, поведение больших и сложных скоплений элементарных частиц нельзя понять, если попросту экстраполировать свойства нескольких частиц. Вместо этого на каждом уровне сложности появляются совершенно новые свойства, и, чтобы понять эти новые формы поведения, нужно провести работу, равную или даже превышающую по своей фундаментальности любые исследования, когда-либо предпринимавшиеся в физике элементарных частиц.

Это высказывание не просто еще один камень, брошенный в огород физического сообщества. Ему вторит П. У. Андерсон, он пишет<sup>7</sup>:

<sup>6</sup> William H. Thorpe, 'Reductionism in biology', в: Francisco Jose Ayala and Theodosius Dobzhansky (eds.), *Studies in the Philosophy of Biology* (London, Macmillan, 1974), p. 109.

<sup>7</sup> P. W. Anderson, *Science*, 177, 1972, p. 393.

Уверен, с каждым новым уровнем организации или масштаба открываются такие типы поведения, которые совершенно новы и принципиально непредсказуемы, если сосредоточиться исключительно на все более тщательном изучении сущностей, образующих объект этих исследований, занимающихся высшими уровнями.

Биолог Бернард Ренш занимает сходную позицию<sup>8</sup>:

Нам следует учитывать, что химическим и биологическим процессам, приводящим к более сложным состояниям интеграции, также свойственны системные связи, которые часто производят совершенно новые характеристики. Например, при смешении углерода, водорода и кислорода, может образоваться бесчисленное количество структур с новыми характеристиками, как-то: спирты, сахара, жирные кислоты и так далее. Большая часть их свойств не может быть выведена из характеристик трех основных типов атомов, хотя, без сомнения, они обусловлены случайными обстоятельствами... Теперь следует спросить, есть ли биологические процессы, которые обусловлены не только причинными, но и другими законами. По моему мнению, нам следует согласиться с тем, что это так.

Как упоминалось в главе 8, диалектический материализм выступает с похожими идеями. Как мы узнали выше, Энгельс полагал, что в конце концов мы переживем второй закон термодинамики. Опарин явно опирался на коммунистическую философию, чтобы подкрепить свои взгляды относительно происхождения жизни<sup>9</sup>:

Согласно диалектическому материализму, материя находится в постоянном движении и проходит через ряд этапов развития. В ходе такого прогресса появляются новые, более сложные и высокоразвитые формы с новыми свойствами, ранее не существовавшими.

Биолог, лауреат Нобелевской премии Сэр Питер Медавар<sup>10</sup> недавно провел интересную параллель между возникающими концептуальными уровнями в физике и биологии и уровнями структуры и детализации в математике. Например, при создании геометрических концепций элементарной точкой отсчета будет топологическое пространство. Оно представляет собой набор точек, обладающих простейшими свойствами, такими как связность и размерность. На этом скудном основании можно сначала создать проективные свойства, что позволит развить понятие прямых линий.

<sup>8</sup> Bernard Rensch, 'Polynomistic determination of biological processes', в: Francisco Jose Ayala and Theodosius Dobzhansky (eds.), *Studies in the Philosophy of Biology* (London, Macmillan, 1974), p. 241.

<sup>9</sup> A. I. Oparin, *Life, Its Nature, Origin and development*, перевод А. Synge (New York, Academic Press, 1964).

<sup>10</sup> Peter Medawar, 'A geometric model of reduction and emergence', в: Francisco Jose Ayala and Theodosius Dobzhansky (eds.), *Studies in the Philosophy of Biology* (London, Macmillan, 1974), p. 57.



Затем можно построить так называемые свойства аффинности, которые наделяют пространство простейшей характеристикой направленности, и, наконец, можно ввести метрику, которая придаст полноценное значение понятиям расстояния и угла. Далее можно выстроить весь аппарат геометрических теорем.

Как отмечает Медавар, абсурдно говорить о «редуцировании» метрической геометрии до топологии. Метрическая геометрия представляет *усовершенствование* топологии более высокого уровня, содержащее топологические свойства пространства и развивающее их далее. Он считает, что такое отношение между математическими уровнями в иерархии усовершенствований имеется и в биологии. Начиная с атомов, молекул, клеток и до живых организмов, сознательных индивидов и общества, каждый уровень содержит и совершенствует предыдущий, но никогда к нему не сводится.

## Законы биотонии

Тогда какую форму принимает это совершенствование в случае биологических систем? Как я уже подчеркивал, одно из отличительных свойств любой высокосложной системы, как живой, так и неживой, – это ее уникальность. Ни одно живое существо не похоже на другое, как не похожа на другую ни одна конвекционная ячейка. Поэтому нам следует заняться вопросом *индивидуальности*. Его особо выделяют ряд авторов. Джузеппе Монталенти, например, отмечает<sup>11</sup>:

Как только появляется индивидуальность, возникает уникальное явление и законы физики становятся бесполезны для объяснения всех явлений. Конечно, они все еще действуют в отношении определенного числа биологических фактов и чрезвычайно полезны для объяснения определенного числа элементарных явлений; однако они не могут объяснить все. Что-то от них ускользает, и появляется необходимость во введении новых принципов, неизвестных в неорганическом мире: прежде всего это естественный отбор, который порождает органическую эволюцию, а следовательно, и жизнь.

Монталенти, однако, спешит развеять складывающееся впечатление, будто он предлагает новые загадочные витальные силы:

Это ни в коем случае не означает введения витальных сил или других метафизических сущностей, как не означает и отказа от научного метода. Объяснения,

<sup>11</sup> Montalenti, op. cit., p. 13.

которые мы ищем, всегда имеют форму причинно-следственных связей, строго соответствующих научным критериям; однако имеются в виду не только те «причины» и «силы», что знакомы физикам. И снова очень уместен пример естественного отбора, неизвестного в физическом мире. Другие примеры можно легко найти среди физиологических, эмбриологических и социальных явлений.

Четкое различие между, с одной стороны, симпатиями к витализму и отрицанием возможности свести природу к базовым законам физики, с другой, проводит Пикок<sup>12</sup>:

Концепции и теории высших уровней могут ...не сводиться к концепциям и теориям низших уровней, то есть способны сохранять автономность. В то же время следует признать, что концепции и теории низших уровней (например, физические и химические) применимы к составным частям более сложных объектов, чья истинность часто проверяется за счет этих более низких уровней. То есть применительно к биологии можно отрицать редукционизм, не будучи сторонником витализма.

Похожих взглядов придерживается физик Вальтер Эльзассер, который особенно подчеркивает то, что живые организмы – это отдельные уникальные особи, а потому не помещаются в рамки однородного класса, который можно исследовать обычными статистическими методами физики. Благодаря этому, утверждает ученый, становятся возможны новые законы, называемые им «биотоническими», которые действуют на уровне организма как целого и при этом никоим образом не противоречат базовым законам физики, управляющим состоянием частиц, из которых состоит организм<sup>13</sup>:

Скажу сразу: я считаю основы физики полностью применимыми к динамике организмов... Тем не менее следует быть готовым к тому, что у общих законов биологии, не являющихся следствием физических законов, обнаружится логическая структура, значительно отличающаяся от того, к чему мы привыкли в физической науке.

Если быть более точным, то я полагаю, что в царстве организмов есть закономерности, которые невозможно вывести логико-математическими способами из законов физики. При этом невозможно обнаружить какие-либо логико-математические противоречия между ними и физическими законами.

Специалист по квантовой физике Юджин Вигнер (тоже лауреат Нобелевской премии) вслед за ними заявляет о «твердой уверенности в существовании биотонических законов». Он задается

<sup>12</sup> Peacocke, op. cit.

<sup>13</sup> Walter M. Elsasser, *Atom and Organism* (Princeton University Press, 1966), pp. 4 and 45.

вопросом<sup>14</sup>: «Отходит ли человеческое тело от законов физики, выявленных в ходе изучения неживой материи?», и приводит два аргумента, связанных с природой самосознания, чтобы объяснить, почему его ответ «да». Один из них касается роли наблюдателя в квантовой механике, что мы обсудим в главе 12. Второй заключается в простом факте: в физике действие обычно вызывает реакцию. Для Вигнера это значит, что поскольку материя может воздействовать на разум (например, производя ощущения), тогда и разум должен быть способен реагировать на материю. Он предупреждает, что биотонические законы легко упустить из виду, если использовать классические методы научного исследования<sup>15</sup>:

Вероятность того, что мы не заметим влияние биотонических явлений, подобно тем, кто погружен в изучение законов макроскопической механики и не замечает влияние света на его макроскопические тела, реальна.

Другая отличительная черта жизни, несомненно, состоит в телеологическом свойстве организмов. Трудно понять, как можно свести их к фундаментальным законам механики. Такую же точку зрения высказали в своем недавнем обзоре, посвященном телеологии в современной физике, астрофизике Джон Барроу и Фрэнк Типлер<sup>16</sup>: «Мы не думаем, что законы телеологии в биологии и физике можно полностью свести к нетелеологическим законам».

## Нисходящая каузальность

Другое важное отличительное свойство всех живых организмов, которое выделяет физик Говард Патти, заключается в *иерархической* организации и контроле живых организмов. Когда меньшие единицы объединяются в более крупные, они порождают новые правила, которые, в свою очередь, ограничивают и регулируют входящие в их состав подсистемы таким образом, чтобы они соответствовали коллективному поведению системы в целом. Присущее высшим уровням в организационной иерархии свойство

<sup>14</sup> E. P. Wigner, 'The probability of the existence of a self-reproducing unit', в: *The logic of personal Knowledge*, редактор не указан (London, Routledge & Kegan Paul, 1961), p. 231.

<sup>15</sup> Ibid.

<sup>16</sup> John D. Barrow and Frank Tipler, *The Cosmological Anthropic Principle* (Oxford University Press, 1986), p. 237.

ограничивать более низкие уровни той же системы наблюдается не только в биологии. Патти отмечает, что компьютер подчиняется всем законам механики и электричества, однако ни один физик не посчитает это утверждение удовлетворительным ответом на вопрос: в чем тайна вычислительной машины? Патти пишет<sup>17</sup>:

Если и есть какая-то проблема с организацией компьютера, то она состоит в неправдоподобных ограничениях, так сказать, правящих этими законами и выполняющих высокоспецифичные контролирующие функции.

Воздействие высших уровней на более низкие было названо «нисходящей каузальностью» физиком Дональдом Кемпбеллом. Он отмечает<sup>18</sup>: «все процессы на низших уровнях иерархии ограничены законами более высоких уровней и действуют в соответствии с ними».

В других областях науки есть много примеров нисходящей каузальности. Карл Поппер отмечает, что многие современные оптические приборы – лазеры, дифракционные решетки, голограммы – это сложные макроскопические структуры, приводящие движение отдельных фотонов в соответствие с единым типом деятельности. В технике простые системы с обратной связью участвуют в нисходящей каузальности, например когда регулятор пара управляет потоком молекул воды. Даже использование таких инструментов, как клинья, можно рассматривать в терминах макроскопической структуры как некоего целого, которое направляет движение своих атомных частей, чтобы совместно достичь определенного результата.

Похожие идеи обсуждали Норберт Винер и Е. М. Деван<sup>19</sup> в связи с проектированием систем контроля. В этой области полезно понятие *захвата*, который происходит, когда некий осциллятор «замыкается» на сигнале и дает синхронный ответ. Простой пример захвата

<sup>17</sup> H. H. Pattee, 'The problem of biological hierarchy', в: C. H. Waddington (ed.), *Towards a Theoretical Biology* (4 vols, Ediburgh University Press, 1970), vol. 3, p. 117.

<sup>18</sup> Donald T. Campbell, "Downward Causation" in hierarchically organized biological systems', в: Francisco Jose Ayala and Theodosius Dobzhansky (eds.), *Studies in the Philosophy of Biology* (London, Macmillan, 1974), p. 179.

<sup>19</sup> N. Wiener, *Cybernetics* (Cambridge, Mass., MIT Press, 1961); E.M. Dewan, 'Consciousness as an emergent causal agent in the context of control system theory', в: Gordon G. Globus, Grover Maxwell and Irwin Savodnik (eds.), *Consciousness and the Brain* (New York and London, Plenum, 1976), p. 181.

в действии связан с телевизором. В ненастроенном приемнике картинка будет «прокручиваться», но если настроиться на определенную частоту, картинка «захватит ее» и станет устойчивой.

Триста лет тому назад физик Гюйгенс, изобретатель маятниковых часов, открыл, что, если двое часов водрузить на одну подставку, они будут тикать в унисон. Подобные «резонансные колебания» сейчас хорошо известны в физике сдвоенных осцилляторов, которые настраиваются на «нормальный тип» вибраций, когда все осцилляторы включены в синхронное коллективное движение. Слаженный тип вибраций наблюдается, например, в кристаллических решетках, где каждый атом играет роль мелкого осциллятора. Распространение световых волн сквозь кристаллы определяется этим организованным коллективным движением.

Захват также происходит и в электрических осцилляторах. Если электрическая сеть обеспечена одним генератором, частота тока, скорее всего, будет меняться в соответствии с колебаниями мощности генератора. Но если в сеть подключено множество генераторов, взаимный захват придает устойчивость частоте колебаний, нивелируя отклонение любого генератора. Свойство соединенных генераторов «двигаться как один» – красивый пример того, как целостное поведение системы ограничивает ее составляющие части и направляет их поведение в рамки единой коллективной деятельности. Способность таких систем следовать коллективному типу поведения служит одним из лучших примеров самоорганизации и, без сомнения, на нем основывается замечательная способность лазера к самоорганизации.

## Законы сложности и самоорганизации

Вышеизложенное показывает, что можно выделить существенно различающиеся виды организующих принципов. Их будет удобно назвать *слабыми*, *логическими* и *сильными*. Слабые организующие силы – это утверждения относительно общего способа самоорганизации систем. К ним относится информация о внешних ограничениях, граничных условиях, исходных условиях, степени нелинейности, степени обратной связи, удаленности от равновесия и так далее. Все эти случаи хорошо вписываются в рассмотренные выше примеры самоорганизации, однако они не

входят в состав *самых* базовых законов (если только не встать на сторону крайнего редукционизма). В настоящее время подобные утверждения – всего лишь набор *специальных* условий и свойств, поскольку наше понимание самоорганизующихся явлений столь примитивно. Однако не будет чересчур самонадеянным ожидать, что по мере углубления нашего понимания появятся общие мощные принципы.

Можно предположить, что логические принципы, управляющие организацией, будут найдены в ходе исследования фракталов, клеточных автоматов, теории игр, теории сетей, теории сложного, теории катастроф и других вычислительных моделей сложности и информации. Эти принципы будут сформулированы в виде логических правил и теорем, в соответствии с требованиями математики. Они не будут нуждаться в подтверждении на примере особых физических механизмов. Следовательно, они дополняют физические законы и помогут нам описать организационную сложность.

Хороший пример логического организующего принципа представлен универсальным действием чисел Фейгенбаума при приближении к хаосу. Появление этих чисел обусловлено математически, они не зависят от конечных физических механизмов, задействованных в образовании хаоса. Другой пример – «биологические универсалии», рассмотренные Кауфманом. По его мнению, некоторые распространенные возникающие биологические свойства объясняются не общим происхождением и естественным отбором, а логическими и математическими связями между определенными правилами автоматов, управляющими многими видами органических процессов. Еще один пример – предполагаемые универсальные принципы порядка, связываемые Вольфрамом с клеточными автоматами.

К сильным организующим принципам обращаются те, кто считает, что существующие физические законы не подходят для объяснения мощной организующей способности природы, и видят в этом подтверждение того, что дополнительные созидательные воздействия неким образом направляют или побуждают материю и энергию ко все более сложной организации. Появлению этих принципов, вероятно, способствует ощущение, что природа крайне успешно покоряет собственный второй закон термодинамики и производит сложную организацию. Происхождение жизни

и сознания часто приводят как пример действия случайности, «слишком удачный, чтобы быть правдой», и намекают на некую «закулисную» творческую деятельность.

Сильные организующие принципы можно внедрить в физику двумя путями. Во-первых, можно дополнить существующие законы новыми принципами. Таков подход Эльзассера. Более радикальный метод состоит в изменении законов физики. В следующей главе мы рассмотрим некоторые из этих идей.

# Организующие принципы

## Космические принципы

**Н**и один ученый не станет утверждать, что существующая формулировка физических законов полная и окончательная. Поэтому правомерно рассчитывать на обнаружение дополнений или модификаций данных законов, воплощающих на фундаментальном уровне способность материи и энергии к самоорганизации. Многие видные ученые предлагали подобные модификации – от новых космологических законов до новых формулировок законов элементарных частиц.

Очевидно, наиболее известный пример дополнительного организующего принципа природы – это так называемый *космологический принцип*, согласно которому материя и радиация распределены равномерно в пространстве на макроскопическом уровне. Как рассказывалось в главе 9, многое свидетельствует о том, что это так. Материя и энергия, извергнутые Большим взрывом, не только позаботились о том, чтобы распределить себя невероятно однородным образом, но и так выстроили свое движение, что темпы их расширения были одинаковыми на всех направлениях. Этот сверхъестественный заговор с целью создать глобальный порядок долгое время приводил космологов в замешательство.

На самом деле космологический принцип – это лишь утверждение о существовании однородности. Он не отвечает на вопрос, как вселенная достигла упорядоченного состояния. Некоторые космологи довольствовались тем, что объяснили однородность, указав на особые начальные условия (т.е. прибегнув к слабым организующим принципам), однако это едва ли приемлемо. В этом случае ответственность за однородность в ходе метафизического акта творения выносится за пределы науки.



Другой подход заключался в поиске физических процессов, происходивших на самых ранних этапах существования вселенной, которые могли выровнять исходное состояние хаоса. Эта идея очень популярна в настоящий момент, особенно в виде сценария инфляционной вселенной, вкратце описанного в главе 9. Тем не менее, хотя инфляция действительно обладает сильным выравнивающим воздействием, все же она происходит в особых условиях. Итак, мы снова возвращаемся либо к богоданным исходным условиям, либо к некоему космологическому организующему принципу, дополняющему обычные законы физики.

Что можно сказать о таком законе? Во-первых, по своей природе он должен быть некаузальным, или нелокальным. То есть для настройки гармоничного поведения областей вселенной, значительно удаленных друг от друга в пространстве, требуется *синхронизированное* глобальное соответствие. Следовательно, на распространение физических воздействий от одной области к другой посредством причинных механизмов может не быть времени. (Вспомним, что теория относительности запрещает распространение физических явлений быстрее света.)

Во-вторых, этот принцип может касаться только *крупномасштабной* организации, поскольку в масштабах меньше галактических однородность нарушается. Здесь следует вспомнить, что происхождение относительно небольших *иррегулярностей*, вызвавших появление галактик и галактических скоплений, так же загадочно, как крупномасштабная упорядоченность космоса. Возможно, один и тот же космологический организующий принцип определяет и однородность, и неоднородность во вселенной.

Роджер Пенроуз предложил новый организующий принцип. Он уверен, что исходная однородность вселенной обязана своим происхождением некоему основному закону, асимметричному во времени. Здесь полезно вспомнить, что второй закон термодинамики основывается на необратимости во времени базового поведения системы. Если оно нарушается, открывается путь для снижения энтропии и спонтанного возникновения порядка.

Мы уже видели, как это происходит в клеточных автоматах, проходящих через самоорганизацию и сокращение энтропии. Пенроуз предлагает нечто подобное для космологии. Можно возразить, что физика всегда строилась вокруг фундаментальных законов,

симметричных во времени, но это не совсем верно. Пенроуз указывает на существование определенных экзотических процессов в физике частиц, которые немного нарушают симметрию при обращении во времени. Этим он дает понять, что на глубоком уровне законы физики обратимы не полностью.

Идею Пенроуза мы уже рассматривали подробно в конце главы 9. Он описывает однородность молодой вселенной в терминах кривизны Вейля, измеряющей отклонение космической геометрии от гомогенности и изотропии; грубо говоря, тензор Вейля определяет степень сгущенности вселенной. Тогда из нового принципа следует, что кривизна Вейля равна нулю в исходном состоянии вселенной. Его можно описать как состояние с очень низкой гравитационной энтропией. Как мы подчеркивали в главе 9, вселенная приобретает все большую сгущенность (кривизну Вейля) по мере своего развития, что может привести к образованию черных дыр с присущей им большой гравитационной энтропией.

Более мощный принцип космической организации – это так называемый *совершенный космологический принцип*, лежащий в основе знаменитой теории стационарной вселенной Германа Бонди, Томаса Голда и Фреда Хойла. Согласно совершенному космологическому принципу, вселенная в большом масштабе выглядит одинаково не только во всех местах, но и во все эпохи. Проще говоря, вселенная остается более-менее неизменной во времени, несмотря на ее расширение.

Чтобы довести до конца совершенный космологический принцип, его авторы предположили, что вселенная, расширяясь, постоянно пополняет саму себя путем непрерывного создания материи. Благодаря этому удастся избежать тепловой смерти вселенной, поскольку новая материя поставляет бесконечное количество отрицательной энтропии. Непрерывное снабжение вселенной отрицательной энтропией Хойл объяснил посредством так называемого созидательного поля, обладающего собственной динамикой, которое положило начало созданию новых частиц, при этом скорость данного процесса контролировалась автоматически в зависимости от темпов космологического расширения. Таким образом, вселенная стала огромным саморегулирующимся и самодостаточным механизмом, способным к бесконечной самоорганизации. Однонаправленность развития во времени организации

космоса в сторону усложнения объясняется в данной теории расширением вселенной, управляющим созидательным полем и тем самым задающим внешнюю стрелу времени. Несмотря на всю философскую привлекательность совершенного космологического принципа, астрономические наблюдения опровергают его.

Другой известный космический организующий принцип называется правилом Маха по имени австрийского философа Эрнста Маха, хотя изначально своим происхождением оно обязано Ньютону. Оно основано на наблюдении, согласно которому, несмотря на то, что почти каждый космический объект вращается, вселенная в целом не демонстрирует каких-либо видимых признаков вращения. Мах верил, что он нашел причину. Он утверждал, что материальное содержимое вселенной в целом служит для определения локального «диапазона инерции», относительно которого измеряется механическое ускорение, поэтому вселенная не может обладать глобальным вращением по определению.

Обычно предполагается, что такое сочетание локальной физики с глобальным распределением космической материи имеет гравитационную природу. Однако динамические законы нашей лучшей теории гравитации – общей теории относительности Эйнштейна – не воплощают в себе принцип Маха (который на самом деле принимает вид одного из вариантов граничных условий). Следовательно, этот принцип нельзя свести к уравнениям гравитационного поля.

Это нередуцируемый нелокальный принцип, дополняющий законы физики, он организует материю на основе сотрудничества на глобальном уровне.

Принцип Маха не единственный пример такого рода. Пенроуз предложил «гипотезу космической цензуры», который утверждает, что пространственно-временные сингулярности, образующиеся за счет гравитационного коллапса, должны происходить внутри черных дыр; они не могут быть «обнаженными». Другой пример – «запрет на путешествия во времени»: гравитационные поля не позволяют объекту отправляться в собственное прошлое.

Попытки вывести данные ограничения из общей теории относительности не увенчались успехом, хотя оба из них – очень здравые предположения. На самом деле, если бы обнаженные сингулярности или путешествие в прошлое были разрешены во вселенной,

трудно понять, как вообще возможно разобраться в физике. В обоих случаях ограничение имеет глобальную, а не локальную структуру (черные дыры можно правильно определить только на глобальном уровне). Поэтому кажется вероятным, что требуется некий дополнительный глобальный организующий принцип.

## Микроскопические организующие принципы

Илья Пригожин внес предложение изменить вместо всего этого *микроскопические* законы физики. Он отмечает, что присущая законам механики симметрия во времени означает, что они никогда, как утверждается, не смогут объяснить рост сложности, асимметричный во времени<sup>1</sup>:

Если бы мир был устроен по образу, созданному Галилео Галилеем и Исааком Ньютоном для обратимых, вечных систем, то не осталось бы места для необратимых явлений, таких как химические реакции или биологические процессы.

Он предлагает изменить законы динамики путем введения внутренней неопределенности, напоминающей квантовую механику, но идущей дальше, используя асимметрию во времени в явной форме. В этом случае

базовый уровень физики будет образован неравновесными множествами, которые менее обусловлены, чем траектории или [квантовые] волновые функции, и которые и впредь развиваются таким образом, чтобы увеличивать свою недостаточную обусловленность.

Пригожин создал математическую теорию с обширным аппаратом, в которой он помещает данную модификацию среди законов динамики, что делает их необратимыми на нижнем, микроскопическом уровне. В этом отношении его предположение похоже на обсуждавшуюся выше гипотезу Пенроуза. (Для тех, кто интересуется технической стороной вопроса: Пригожин вводит неэрмитовы операторы, следствием которых является неунитарная эволюция во времени. На матрицу плотности действует супероператор, который устраняет различия между чистыми и смешанными состояниями, что делает возможным рост энтропии в системе на микроскопическом уровне по мере ее развития). Он

<sup>1</sup> Prigogine, op. cit., p. 23.

утверждает, что теперь мы сможем понять сложность в целом и объяснить постепенное появление порядка из хаоса<sup>2</sup>:

Большинство систем, представляющих для нас интерес, в том числе все химические системы, а следовательно и все биологические, ориентированы во времени на макроскопическом уровне. Это отнюдь не «иллюзия» [как заявил бы законченный редукционист], так нарушение временной симметрии выражено на микроскопическом уровне. Необратимость истинна либо на *всех* уровнях, либо ни на одном. Она не может чудесным образом перелетать с одного уровня на другой.

Мы подходим к одному из основных выводов: на всех уровнях, будь то уровень макроскопической физики, уровень флуктуаций или микроскопический уровень, неравновесность – это источник порядка. Неравновесность приносит «порядок из хаоса».

Физик Дэвид Бом, долгое время выступающий с критикой традиционной интерпретации квантовой механики, предложил совсем по-другому изменить законы физики, чтобы объяснить сложную организацию. Как полагает Бом, квантовая механика предполагает совершенно новый способ осмысления *порядка*; особенно он возражает против привычного уравнивания случайности и беспорядка. Бом утверждает, что на самом деле случайность в квантовой механике подтвердилась лишь в нескольких случаях и никоим образом не может считаться окончательно доказанной. Но если квантовые процессы не случайны, тогда неodarвинизм полностью лишается основы<sup>3</sup>:

Таким образом, мы видим, что даже в физике квантовые процессы не всегда происходят в совершенно произвольном порядке, особенно в случае с короткими интервалами времени. Но в конечном итоге молекулы, подобные ДНК, находятся в постоянном процессе быстрого обмена квантами энергии с окружающей средой, поэтому вполне вероятно, что современные законы квантовой теории (основанные на предположении о произвольности *всех* квантовых процессов, как быстрых, так и медленных) приведут к серьезным ошибкам в выводах, если применять их без каких-либо ограничений в сфере биологии... Очевидно, можно пойти дальше и предположить, что при преобладании особых условий во время развития живой материи порядок может претерпеть дальнейшие изменения, из-за чего некоторые из этих произвольных свойств будут сохраняться бесконечно. Так появится *новый процессуальный порядок*. Изменения в рамках этого нового порядка будут стремиться к упорядоченности еще более высокого уровня. Это приведет не только к бесконечной продолжительности жизни, но и к ее бесконечной эволюции в виде постоянно развивающейся иерархии структур и функций, достигающих все более высокого уровня.

Бом готов предложить особые методы для подтверждения проявленности произвольного в биологии:

<sup>2</sup> Prigogine and Stengers, op. cit., pp. 285-286.

<sup>3</sup> David Bohm, 'Some remarks on the notion of order', в: С. Н. Waddington (ed.), *Towards a Theoretical Biology* (4 vols, Ediburgh University Press, 1970), vol. 2, p. 18.

Один из возможных способов – отследить ряд последовательных мутаций, чтобы понять, действительно ли порядок изменений полностью произволен. В свете вышесказанного вероятно, что, хотя отдельное изменение (или отличие) может обладать произвольной природой по отношению к предыдущему состоянию данного организма, может существовать тенденция к установлению серий сходных изменений (или отличий), которые образуют *упорядоченный изнутри* процесс эволюции.

Он полагает, что большую часть времени эволюция более-менее произвольна, а потому не «прогрессирует», а лишь следует стохастическому смещению, однако эти фазы перемежаются с переходными периодами быстрых, непроизвольных изменений, «когда мутации обычно происходят очень быстро и строго следуют определенному направлению в соответствии с неким порядком». Как утверждает Бом, подобное непроизвольное поведение может иметь очень серьезные последствия:

поскольку это будет означать, что, если произошел данный тип изменений, то у последующих поколений возникнет заметная тенденция к сериям сходных изменений. Таким образом, эволюция будет стремиться «хранить верность» определенной генеральной линии развития.

В следующей главе мы узнаем, что многие из отцов-основателей квантовой механики верили: их новая теория сделает важный вклад в раскрытие тайны живых организмов, и многие из них рассуждали о том, следует ли модифицировать теорию применительно к биологическим явлениям. Многие физики разделяют сегодня уверенность в том, что теория, применяемая к акту наблюдения, должна быть модифицирована тем или иным образом.

## Новое понятие причинности

Специалист по теории биологии Роберт Розен предложил еще более радикально пересмотреть современную формулировку физических законов. Как полагает Розен, само понятие физического закона налагает слишком много ограничений без всякой на то необходимости и в действительности не подходит для сложных систем, подобных биологическим организмам<sup>4</sup>:

Основание, на котором теоретическая физика развивалась последние три столетия, слишком узко в нескольких важных отношениях и далеко не универсально;

<sup>4</sup> Robert Rosen, 'Some epistemological issues in physics and biology', в: B. J. Hiley and F. D. Peat (eds.), *Quantum Implications: Essays in Honour of David Bohm* (London, Routledge & Kegan Paul, 1987).

концептуальный фундамент того, что мы называем в настоящее время теоретической физикой, все еще очень специфичен; на самом деле, он чересчур специфичен, чтобы объяснять органические явления (и многое другое).

Розен отмечает, что среди физиков распространено традиционное допущение, согласно которому сложные системы – это всего лишь особые случаи, т.е. усложненные варианты простых систем. Тем не менее, как мы видели, все больше находится свидетельств того, что в действительности природа устроена по-другому: что сложность – это норма, а простота – особый случай. Например, мы узнали, что почти все динамические системы принадлежат к классу хаотических, непредсказуемых систем. Простые динамические системы, описываемые в большинстве учебников физики и составлявшие главный объект механики на протяжении 300 лет, на самом деле принадлежат к очень узкому классу. И в термодинамике близкие к равновесию закрытые системы, которые представлены в учебниках, – это крайне специфическая идеализация. Гораздо чаще встречаются далекие от равновесия открытые системы.

Конечно, нет ничего удивительного в том, что наука развивалась с подобным уклоном. Естественно, ученые предпочитают работать над теми вопросами, в которых они могут рассчитывать на некий успех, а с вышеприведенными примерами из учебников справиться легче всего. Сложные системы гораздо труднее понять, и еще труднее делать это систематически. Таким образом, впечатляющие успехи в области простых систем скрывают от нас то, что на самом деле они представляют собой лишь очень специфические случаи.

Основываясь на такой любопытной инверсии традиционных взглядов, Розен предвидит, что «отнюдь не современная физика поглотит биологию, как полагают редуccionисты, но биология заставит физику преобразоваться, в результате чего она вообще потеряет признание». Он уверен, что физику следует значительно расширить, только при этом условии она сможет справиться со сложными состояниями материи и энергии.

В качестве примера чрезмерной ограниченности концептуального основания физики Розен приводит следующее допущение: все динамические системы можно охарактеризовать, приписав им состояния, которые затем развиваются в соответствии с динамическими законами. Как было разъяснено в главе 2, это совершенно непоколебимое допущение лежит в основании динамики Ньютона

и было перенесено в релятивистскую и квантовую механику, а также в теорию полей и термодинамику. В этой формулировке воплощено само понятие причинности, как оно понималось в последние 300 лет, в его тесной связи с классическими представлениями о детерминизме и обратимости.

Однако это ключевое предположение требует чрезвычайно специфического математического описания. (Технически речь идет о полных дифференциалах, чье существование в конечном итоге обусловлено существованием функции Лагранжа.) В целом, при наличии набора качеств, описывающих скорость изменений разных свойств сложной системы, будет невозможно соединить эти величины таким образом, чтобы восстановить вышеупомянутое очень специфическое описание. Розен утверждает, что теория динамических систем должна быть расширена за счет тех случаев, когда особое описание не работает. В действительности, считает Розен, этими случаями представлено подавляющее большинство систем, существующих в природе. Ограниченный набор динамических систем, изучаемый в настоящее время физиками, на самом деле окажется очень специфическим видом.

Предлагаемые Розеном изменения, которые он сопровождал неплохо разработанным математическим аппаратом, – это далеко не попытка смастерить нечто на скорую руку.

Они требуют введения абсолютно нового словаря. Например, важно то, что меняющиеся величины в основном будут *информационными*. Таким образом, Розен вводит в открытой форме идею того, что я называл законами программных средств. Он отделяет *простые системы*, подобные тем, что традиционно изучаются в физике (где состояния и динамические законы в виде дифференциальных уравнений образуют схему с высокой степенью идеализации), от *сложных систем*, «описываемых посредством сети информационных взаимодействий». Как считает Розен, о первых «можно даже спросить, действительно ли это простые системы; если это не так, то наши классические универсалии полностью исчезнут».

Радикальная переформулировка в соответствии с этими принципами восстанавливает старые Аристотелевы классы причин и даже оставляет место для понятия финальных причин<sup>5</sup>:

<sup>5</sup> Ibid.



Сложные системы допускают существование категории конечной причинности, обладающей значением и научно обоснованной, тогда как внутри класса простых систем это полностью запрещено. В частности, сложные системы могут включать в себя подсистемы, действующие как предсказательные модели их самих и/или окружающей их среды, чьи прогнозы относительно будущего можно использовать для настройки текущих изменений состояния. Системы такого типа действуют поистине опережающим образом и обладают новыми свойствами.

Хотя фундаментальные изменения физических законов, предлагаемые Пригожиным и Розеном, пока следует рассматривать как по большей части умозрительные, мы видим, что некоторые ученые считают: существование сложного в природе бросает вызов самому основанию, на котором были выведены законы науки.

## Более вольные идеи

Одним из основателей квантовой механики был Вольфганг Паули, прославившийся принципом исключения Паули. Он вступил в любопытное сотрудничество с психоаналитиком Карлом Юнгом и помог ему создать провокационную концепцию, бросающую вызов традиционным представлениям о причинности.

Юнг был убежден, что, объясняя физические события, научное мышление находится под неоправданным гнетом представлений о причинности. Его впечатлило то, что квантовая механика подрывает основы строгой причинности и низводит ее до уровня статистического принципа, поскольку в квантовой физике события связаны исключительно вероятностным образом. Поэтому Юнг считал возможным, что наряду с каузальностью существует другой физический принцип, в соответствии с которым находится статистическая связь между теми событиями, которые иначе рассматривались бы как независимые<sup>6</sup>:

В целом события связаны друг с другом, с одной стороны, как причинные цепочки, а с другой стороны, – посредством *значимой перекрестной связи*.

Он назвал этот дополнительный принцип *синхронией*.

Чтобы установить, существует ли синхрония, Юнг был вынужден исследовать природу *случайных* событий, дабы обнаружить,

<sup>6</sup> C. G. Jung, 'Synchronicity: an acausal connecting principle', в: *The Structure and Dynamics of the Psyche*, перевод R. F. C. Hull (London, Routledge & Kegan Paul, 1960), p. 423.

«кажется ли случайное событие не связанным причинно с событием, происходящим в одно время с ним»<sup>7</sup>. Он собрал огромное количество сообщений о крайне невероятных совпадениях, многие из которых были взяты из его собственной медицинской практики. Типичный пример этого известен каждому. Вы встречаете старого приятеля в тот самый день, когда говорили о нем. Номер на вашем автобусном билете в точности совпадает с телефонным номером, по которому вы только что звонили.

Юнг полагал, что некоторые из этих историй совершенно не вписываются в рамки совпадений и не могут подтверждать действие акаузального принципа связи<sup>8</sup>:

Все естественные явления подобного рода уникальны и представляют собой чрезвычайно любопытные случайные совпадения, объединенные общим значением их составляющих и образующие очевидное целое. Хотя значимые совпадения проявляются бесконечно разнообразно, тем не менее как акаузальные события они образуют составную часть научной картины мира. Причинность – это метод, при помощи которого мы объясняем связь между двумя последовательными событиями. Синхрония обозначает параллельность времени и значения между психическими и психофизическими событиями, которые научное знание до сих пор не могло свести к общему принципу.

Несмотря на популяризацию идей Юнга Артуром Кестлером в его книге «Корни совпадений»<sup>9</sup>, ученые не воспринимают всерьез синхронию. Возможно, это объясняется тем, что большая часть представленных Юнгом доказательств относилась к таким дискредитированным областям, как астрология и экстрасенсорное восприятие. Большинство ученых предпочитают рассматривать истории о замечательных совпадениях как результат отбора: мы помним о случайном неожиданном стечении обстоятельств, но забываем о множестве непримечательных событий, случающихся постоянно. Ведь на каждый сбывшийся сон приходится миллионы несбывшихся. Время от времени странный сон обязательно сбывается, и именно о нем будут помнить.

Тем не менее любопытно рассмотреть, что, с точки зрения физиков, будет задействовано в принципе синхронии. Лучше всего для этого подходит диаграмма пространства-времени. На рис. 30 время отмечено по вертикали, а одномерное пространство – по го-

<sup>7</sup> Ibid.

<sup>8</sup> Ibid., p. 530.

<sup>9</sup> Arthur Koestler, *The Roots of Coincidence* (London, Hutchinson, 1972).

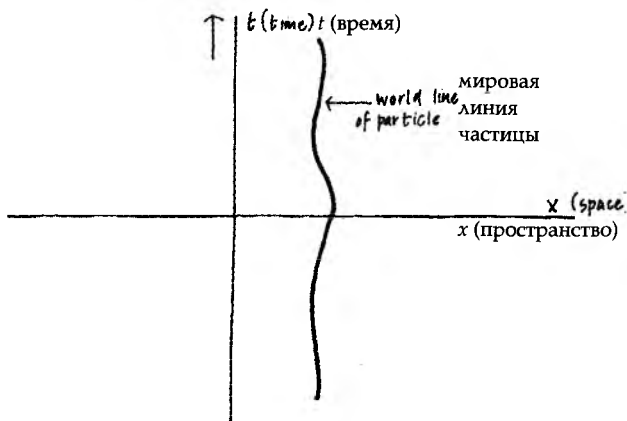


Рис. 30. Диаграмма пространства-времени. Точки на диаграмме представляют события; волнистая линия представляет продвижение частицы сквозь пространство и время.

ризонтали. Точка на диаграмме называется *событием*, поскольку ей придано как место, так и момент времени. Горизонтальное сечение диаграммы представляет все пространство за один момент времени, также обычно считается, что время течет вверх по диаграмме, так что будущее направлено к верху диаграммы, а прошлое – к низу.

То, что природный мир не хаотическое сочетание независимых событий, а нечто упорядоченное в соответствии с законами природы, приводит диаграмму пространства-времени в некоторый порядок. Например, то, что объект, подобный атому, сохраняет идентичность как некая сущность на протяжении некоторого времени, означает, что она следует непрерывному пути или *мировой линии* в пространстве-времени. Если объект перемещается в пространстве, тогда мировая линия будет извилистой.

Рисунок 31 представляет ряд мировых линий. В целом форма этих линий не будет независимой, поскольку между частицами будут происходить взаимодействия. Воздействие на одну из частиц окажет *каузальное влияние* на другие частицы, что проявится в виде *корреляций* между событиями, лежащими на соседних мировых линиях. Законы, управляющие причиной и следствием в пространстве-времени, ограничены теорией относительности, которая запрещает распространение любых воздействий со скоростью, превышающей скорость света. Мировая линия свето-

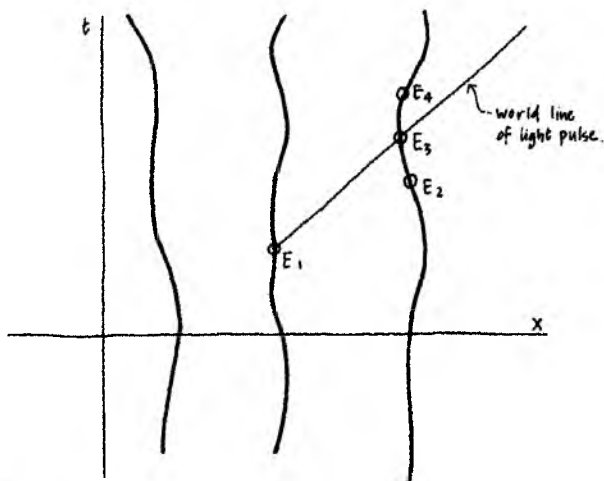


Рис. 31.

вого импульса – наклонная прямая, которая обычно проводится под углом в  $45^\circ$ . Таким образом, пары событий, такие как  $E_1$  и  $E_2$ , не могут быть причинно связанными, поскольку они лежат в пространстве-времени за пределами области, ограниченной линией света, идущей через точку  $E_1$ . Считается, что такие пары событий разделены пространственно-подобным интервалом. С другой стороны,  $E_1$  может обуславливать  $E_3$  или  $E_4$ . Эти события не отделены пространственно-подобно от  $E_1$ .

Хотя причина и следствие не могут действовать между пространственно-подобно разделенными событиями, это не означает, что события, подобные  $E_1$  и  $E_2$ , должны быть совершенно несвязанными друг с другом. Может быть так, что оба события вызваны общим причинным событием, лежащим между ними в пространстве. Это происходит, например, если два световых импульса были отправлены в противоположных направлениях и вызвали одновременную детонацию двух зарядов взрывчатки, значительно удаленных друг от друга. Однако Юнг не это понимал под синхронией.

В следующей главе мы увидим, что квантовая механика разрешает корреляции между одновременными событиями, разделенными в пространстве, что было бы невозможно в любой

классической картине реальности. Эти *нелокальные* квантовые эффекты в действительности представляют разновидность синхронии в том смысле, что они устанавливают связь – точнее, корреляцию – между событиями, для которых любой вид причинной взаимосвязи находится под запретом.

Для устранения причинной связи достаточно, но не необходимо, чтобы события были разделены пространственно-подобным интервалом. Может случиться, что причинная связь разрешена относительностью, однако обратный случай неправдоподобен. Относительность не запрещает того, что разговор о друге вызовет его скорое появление, однако такая обусловленность кажется маловероятной.

В более общем смысле можно представить себе *констелляции* событий в пространстве-времени, связанные неким значимым, но не причинно-следственным образом. Эти события может разделять или не разделять пространственно-подобный интервал, но их совпадения или взаимосвязанность не объясняется каузальным действием. Они будут образовывать паттерны или группы в пространстве-времени, представляющие тип порядка, который не следует из обычных законов физики. В действительности организующие принципы, подобные рассмотренным в предыдущих разделах, можно описать в этих терминах и рассматривать как форму синхронии. Однако, хотя некаузальные связи, например в биосистемах, имеют смысл, распространять эту идею на события в повседневной жизни людей, что составляло главный интерес Юнга, совсем другое дело.

Другой набор «значимых совпадений» недавно привлек внимание ученых. На этот раз совпадения относятся не к событиям, а к так называемым константам природы. Имеются в виду числа, появляющиеся в разных законах физики; в число примеров входит масса электронов, электрический заряд протона и гравитационная константа Ньютона (обозначающая величину силы гравитации). До сих пор значения этих разных констант не нашли теоретического объяснения, поэтому встает вопрос, почему их значения таковы. Далее, любопытно то, что существование многих сложных структур во вселенной, и особенно биологических организмов, на удивление чувствительно к значениям констант. Оказывается, что даже незначительного отклонения от наблюдаемых величин

достаточно, чтобы произвести радикальные перемены внутри структур. В случае с организмами при малейшем колебании природных констант жизнь полностью исчезнет, по крайней мере, в ее земной форме.

Таким образом, природа, по всей видимости, находится во власти неких примечательных численных совпадений. Константы природы, очевидно, приобрели именно те значения, которые необходимы, чтобы сложная организация могла происходить вплоть до уровня сознательных индивидов. Некоторых ученых так поразила этот затейливый механизм, что они стали поддерживать некий *сильный антропный принцип*. Согласно этому принципу, законы природы должны допускать существование сознания во вселенной на некоем этапе. Другими словами, природа организует себя таким образом, чтобы сделать вселенную самосознающей. Поэтому сильный антропный принцип можно рассматривать как своего рода организующий метапринцип, поскольку он организует *сами законы* таким образом, чтобы они допускали возникновение сложной организации.

Автором другой, крайне умозрительной теории, выходящей за причинно-следственные рамки пространства и времени, стал биолог Руперт Шелдрейк<sup>10</sup>. С главной темой его книги – происхождением сложных форм и структур – Шелдрейк расправился без лишних колебаний. В главе 7 упоминалось, что в биологии развития сейчас в моде *морфогенетическое поле*. Эти поля привлекаются, чтобы объяснить, как яйцеклетка развивается в сложную трехмерную структуру. Природа и свойства морфогенетических полей по-прежнему несколько неопределенны, если вообще существуют.

Шелдрейк призывает воспринимать морфогенетические поля всерьез. Он рассматривает их как физическое явление совершенно нового типа. Как он считает, неким образом это поле хранит информацию о конечной форме эмбриона и затем направляет его развитие по мере роста. Таким образом, все это похоже на возрождение старомодной телеологии. Шелдрейк вводит новый элемент – гипотезу *морфического резонанса*. Суть состоит в том, что с появлением новой формы она приобретает собственное

<sup>10</sup> Rupert Sheldrake, *A New Science of Life* (London, Blond & Briggs, 1981).

морфогенетическое поле, которое затем способствует появлению той же формы в другом месте. То есть, как только природа «научилась» выращивать некий организм, она может направлять развитие других организмов по тому же пути при помощи «резонанса».

По мнению Шелдрейка, морфогенетические поля не ограничиваются живыми организмами. Кристаллы также обладают ими. Поэтому, считает он, отмечались случаи, когда вещества, ранее не наблюдавшиеся в кристаллической форме, начали кристаллизоваться в различных местах примерно в одно и то же время. Поля Шелдрейка также связаны с памятью. Как только животное научится решать новую задачу, другим будет легче справиться с ней.

Поля, о которых рассуждает Шелдрейк, не действуют в пространстве и времени обычным причинно-следственным образом. На самом деле, следует отметить, что природа этих полей совершенно непонятна, по мнению физиков. Тем не менее эта теория обладает хотя бы тем достоинством, что ее можно опровергнуть, и Шелдрейк предложил ряд экспериментальных тестов, связанных с человеческой обучаемостью. До сих пор их результаты были убедительны.

Экстравагантные идеи, рассмотренные мной в этом разделе, не относятся к общепринятой физической науке и их, возможно, не следует воспринимать чересчур серьезно. Тем не менее они указывают на то, что среди ученых и обычных людей по-прежнему распространено мнение, что способ организации вселенной трудно объяснить механическим образом и что, несмотря на грандиозные успехи фундаментальной науки, все еще велико искушение вернуться к неким высшим принципам.

# Квантовый фактор

## Квантовые чудеса и здравый смысл

**Ч**асто говорят, что физики придумали философию механистического редукционизма, научили ей биологов, а потом сами от нее отказались. Невозможно отрицать, что современная физика обладает сильным холистическим, даже телеологическим привкусом, и что по большей части это обусловлено влиянием квантовой теории.

В 1920-х годах, когда квантовая механика получила надлежащее развитие, наука перевернулась с ног на голову. Это было вызвано не только ее ошеломительными успехами на поприще объяснения большого числа физических явлений. Как и теория относительности, предшествовавшая ей, квантовая механика развенчала многие глубоко укоренившиеся представления о природе реальности и потребовала более абстрактного видения мира.

Здравый смысл и интуиция стали ее первыми жертвами. Если старая физика повсеместно задействовала обыденные представления о пространстве, времени и материи, отличавшиеся от привычного опыта только по своей степени, то новая физика была сформулирована в терминах абстрактных математических объектов и уравнений. Попытки отразить то, что «происходит», на языке обыденного опыта часто предстают как нечто мистическое, нелепое и иногда совершенно парадоксальное. В повседневной жизни от квантового сумасшествия нас спасает только то, что квантовые явления по большей части ограничены субмикроскопическим царством атомов, молекул и субатомных частиц.

В классической механике состояние системы легко представить наглядно. Оно описывается путем указания позиций и скоростей (или импульса) всех участвующих частиц. Система развивается



по мере того, как частицы движутся под влиянием собственных взаимодействий и каких-либо сил, прилагаемых извне. Физик сможет предсказать ее развитие, по крайней мере, в принципе, если использует Ньютоновы законы движения для расчета пространственных траекторий каждой частицы.

Квантовая механика заменяет данную конкретную картину, описывающую состояние механической системы, абстрактным математическим объектом, называемым *волновой функцией* или *вектором состояния*. У него нет какого-либо физического эквивалента – он не является объектом, доступным для наблюдения. Но существует строго установленная математическая процедура для извлечения информации из волновой функции о том, что поддается наблюдению (например, о положении частицы).

Фундаментальное отличие квантовой механики от классической заключается не столько в этой «отстоящей на один шаг» процедуре, сколько в том, что волновая функция поставляет лишь *вероятности* для наблюдаемых величин. Например, далеко не всегда возможно *точно* предсказать, где расположена частица или как она движется, имея волновую функцию. Вместо этого можно лишь с относительной вероятностью заключить, что частица находится в такой-то области пространства и обладает такой-то скоростью.

Следовательно, квантовая механика – это *статистическая* теория. Но, в отличие от других статистических теорий (например, о поведении фондовых бирж и колеса рулетки), ее вероятностный характер обусловлен не только нашим незнанием о частностях; он – неотъемлемая часть ее природы. Дело не в том, что квантовая механика не способна предсказывать точное положение, движение и т.д. частиц; дело в том, что квантовая частица попросту *не обладает* полным набором физических атрибутов с точно установленным значением. Бессмысленно даже предполагать, что электрон обладает точным местоположением и движением в одно и то же время.

Неотъемлемая неопределенность, свойственная квантовой физике, напрямую приводит нас к знаменитому принципу неопределенности или индетерминизма Вернера Гейзенберга, согласно которому пары сопряженных величин (например, положение и импульс частиц) не сочетаются друг с другом и не могут иметь точ-

ного значения в одно и то же время. Физик может сделать выбор в пользу измерения одной величины из двух и получить результат любой степени точности, но чем точнее он измерит одну величину, тем менее точной станет другая.

В классической механике следует знать *и* координаты, *и* импульсы всех частиц в один и тот же момент, чтобы суметь предсказать последующее развитие системы. В квантовой механике это запрещено. Следовательно, развитие системы в будущем неразрывно связано с неопределенностью или индетерминизмом. Даже если вооружиться самой полной информацией о квантовой системе, предсказать, какое значение примет данная величина (например, положение частицы) позднее, будет невозможно. Можно лишь делать ставки.

Несмотря на индетерминизм, присущий квантовой физике, квантовую систему все же можно рассматривать как детерминированную в ограниченном смысле, так как развитие *волновой функции* детерминировано. Зная о состоянии системы в один момент времени (говоря языком волновой функции), можно вычислить ее состояние в более поздний момент и использовать его, чтобы предсказать относительно-вероятностное значение разных наблюдаемых величин, которое они примут при измерении. В данном более слабом виде детерминизма развитие разных вероятностей детерминировано, в отличие от развития самих наблюдаемых величин.

То, что в квантовой физике невозможно узнать все сразу, приводит к некоторым странностям. Например, электрон иногда может вести себя как волна, а иногда как частица – это знаменитый «корпускулярно-волновой дуализм». Многие из этих необычных явлений возникают потому, что квантовое состояние может представлять собой *взаимное наложение* («*суперпозицию*») других состояний. Предположим, например, что есть определенная волновая функция *А*, которой соответствует электрон, движущийся влево, и другая функция *Б*, которой соответствует электрон, движущийся вправо. Тогда можно собрать квантовое состояние, которое будет описываться волновой функцией, состоящей из наложенных друг на друга *А* и *Б*. В итоге получится состояние, в котором в некотором смысле сосуществуют и электрон, движущийся вправо, и электрон, движущийся влево, или, что впечатляет даже больше,

состояние, в котором присутствуют одновременно два мира – один, содержащий электрон, движущийся вправо, и другой, с электроном, движущимся влево. Ученые спорят о том, считать ли эти два мира одинаково реальными или же только равными соперниками за реальность. При этом никто не спорит с тем, что наложения такого рода часто случаются в квантовых системах.

Способность квантовых объектов обладать явно несовместимыми или противоречащими свойствами – например, быть одновременно и волной, и частицей – побудила Нильса Бора, датского физика, который больше других сделал для прояснения концептуального основания теории, ввести так называемый принцип дополнительности. Бор признал: нет ничего парадоксального в том, что электрон является *и* волной, *и* частицей, поскольку в одном и том же эксперименте волновые и корпускулярные свойства никогда не предстают как противоречащие друг другу. Бор отметил, что можно организовать один эксперимент, в котором проявятся волновые свойства квантового объекта, и второй, чтобы показать его корпускулярные свойства, но обе эти характеристики невозможно продемонстрировать одновременно. Корпускулярный и волновой тип поведения (а также другие несовместимые свойства, например, положение и импульс) не столько *противоречащие*, сколько *комплементарные* аспекты одной реальности. Каким предстанет перед нами квантовый объект, зависит от того, как мы будем изучать его.

## Что происходит с атомом, когда за ним наблюдают?

Принцип дополнительности Бора требует фундаментальной переоценки природы реальности, в частности отношений между частью и целым, а также между наблюдателем и наблюдаемым. Очевидно, что если электрон обладает, скажем, точно установленным местоположением или точно установленным импульсом в зависимости от того, какой аспект его реальности выбран для наблюдения, то свойства электрона неотделимы от качеств измерительной аппаратуры – а следовательно, и экспериментатора, – которая используется, чтобы наблюдать за ним. Другими словами, значимые утверждения о состоянии электрона можно делать толь-

ко в контексте описанных условий эксперимента. Никакое значение не может быть приписано, например, позиции данного электрона в момент, когда мы измеряем его импульс.

Отсюда следует, что состояние квантового микромира приобретает смысл только при его определении относительно классического (неквантового) макромира. Прежде чем такие микроскопические свойства, как положение электрона, приобретут значение, необходимо, чтобы уже существовали такие макроскопические понятия, как измерительный прибор (по крайней мере, в принципе).

Здесь присутствует нечто парадоксальное. Макромир столов, стульев, физических лабораторий и экспериментаторов *сделан* из элементов микромира: измерительные приборы и экспериментатор сами состоят из квантовых частиц. Здесь задействован своеобразный круговорот: макромир нуждается в микромире, который образует его, а микромиру нужен макромир, который определяет его.

Парадоксальная природа этого круговорота особенно заметна, если проанализировать акт измерения. Хотя микромир по своей сути нечеток и по волновым функциям можно прогнозировать только вероятности, а не что-либо определенное, тем не менее, когда производится реальное измерение динамической переменной, получается конкретный результат. Таким образом, акт измерения преобразует вероятность в определенность за счет *проецирования волны или выбора* особого результата из ряда возможностей. Далее эта проекция приносит резкое изменение в виде волновой функции, которое часто называют ее «коллапсом», что существенно влияет на ее последующее развитие.

Коллапс волновой функции вызывает огромное удивление у физиков по следующей причине. Пока за квантовой системой не наблюдают, развитие ее волновой функции детерминировано. На самом деле, оно управляется дифференциальным уравнением, известным как уравнение Шредингера. С другой стороны, когда систему изучает внешний наблюдатель, волновая функция внезапно совершает скачок, вопиющим образом нарушая уравнение Шредингера. Поэтому система может меняться с течением времени двумя полностью различными способами: одним, когда никто не смотрит, и вторым, когда за ней наблюдают.

Вывод вполне мистического свойства, согласно которому наблюдение за квантовой системой влияет на ее поведение, заставил фон

Неймана создать математическую модель для процесса квантовых измерений<sup>1</sup>. Он рассмотрел смоделированную микроскопическую квантовую систему – предположим, это электрон, – соединенную с неким измерительным прибором, который сам рассматривался как квантовая система. Тогда вся система – электрон плюс измерительный прибор – ведет себя как большая, единая и закрытая система, удовлетворяющая сверхуровнению Шредингера. В математическом смысле то, что система в целом удовлетворяет такому уравнению, обеспечивает детерминированное поведение волновой функции, представляющей всю систему, независимо от того, что случится с частью волновой функции, представляющей электрон.

Фон Нейман намеревался установить, как двоякая квантовая динамика всей системы вызывает внезапный коллапс волновой функции электрона. Он обнаружил, что акт правильного соединения электрона с измерительным устройством действительно может вызвать коллапс в части волновой функции, относящейся к нашему описанию электрона, однако волновая функция, представляющая *всю систему в целом*, не претерпевает коллапса.

Вывод, сделанный из данного анализа, известен, как «проблема измерений». Трудности здесь возникают по следующей причине. Если квантовая система находится в наложении состояний, то наблюдать определенную реальность можно, только если волновая функция коллапсирует до одного из возможных наблюдаемых состояний. Если включить самого наблюдателя в описание квантовой системы, коллапс не происходит и теория, по всей видимости, предсказывает, что единой реальности не существует.

Наглядно этот вопрос представлен знаменитым парадоксом кота Шредингера. Шредингер представил кота, запертого в ящике с колбой, содержащей газ цианида. В ящике также имеется источник радиоактивного излучения и счетчик Гейгера, который может вызвать удар молотка по колбе при распаде ядра. Далее можно вообразить такое квантовое состояние ядра, что, скажем, через минуту оно будет находиться в суперпозиции, соответствующей вероятности того, что распад наполовину произошел, а наполовину не завершился. Если рассматривать все содержимое ящика,

<sup>1</sup> J. von Neumann, *Mathematical Foundations of Quantum Mechanics* (Princeton University Press, 1955).

включая кота, как единую квантовую систему, мы вынуждены сделать вывод, что кот также находится в суперпозиции двух состояний: смерти и жизни. Другими словами, кот, по-видимому, завис в смешанном состоянии отсутствия реальности, когда он неким образом одновременно и мертв, и жив!

Было предпринято множество попыток, чтобы разрешить вышеописанный измерительный парадокс. Они простираются от мистических до причудливых. К первой категории относится предложение Вигнера, кратко описанное в главе 10, согласно которому разум экспериментатора (кота?) вызывает коллапс волновой функции<sup>2</sup>: «Само проникновение впечатления в наше сознание меняет волновую функцию... сознание проникает в теорию неизбежно и неизменно». К числу причудливого относится гипотеза множественных вселенных, предполагающей, что все квантовые миры, находящиеся в суперпозиции, реальны. Акт измерения заставляет всю вселенную распасться на все квантовые вероятности (например, на живого кота, мертвого кота). Эти параллельные реальности сосуществуют, и в каждой из них живет отличная от других копия сознательного наблюдателя.

## За пределами кванта

Попытки избежать парадокса квантовых измерений делятся на две категории. Одни, например, только что описанная теория множественных вселенных, принимают универсальность квантовой механики в качестве собственной отправной точки. Далее, существуют более радикальные теории, которые предполагают, что квантовая механика терпит крах где-то между микро- и макромиром. Это может происходить при определенном уровне размеров. В главе 10 уже рассказывалось, как Дэвид Бом усомнился в истинной произвольности квантовых событий применительно к биосистемам.

Из тех, кто предположил, то квантовая механика не действует в отношении сложных систем, вероятно, наибольшей известностью пользуется Юджин Вигнер, один из основателей квантовой

<sup>2</sup> E. Wigner, 'Remarks on the mind-body question', в: I. J. Good (ed.), *The Scientist Speculates* (London, Heinemann, 1961), p. 288-289.

механики. Вигнер подкрепляет собственное утверждение при помощи математического анализа биологического воспроизводства, которое он рассматривает как закрытую систему, содержащую организм вместе с неким питательным веществом<sup>3</sup>. Применив к данной системе законы квантовой механики, он приходит к выводу, что система практически не имеет никакой возможности развиваться таким образом, чтобы позднее на месте одного организма оказалось два. Другими словами, утверждает Вигнер, биологическое воспроизводство не соответствует законам квантовой механики.

По его словам, наиболее ярко данное несоответствие проявляется во время акта квантового измерения, где введение информации о квантовой системе в сознание наблюдателя приводит к коллапсу волновой функции.

Многие идеи Вигнера разделял фон Нейман, также скептически относившийся к идее о действии квантовой механики применительно к органическим явлениям. Однажды фон Нейман вступил в спор с биологом, пытавшимся убедить его в правильности неodarвинистской теории эволюции. Фон Нейман подвел биолога к окну своего кабинета и цинично сказал<sup>4</sup>: «Вы видите красивую белую виллу там на холме? Она появилась совершенно случайно». Нет необходимости говорить, что биолог не впечатлился.

Другой ученый, сомневающийся в универсальности квантовой механики, – Роджер Пенроуз. Его скептицизм основывается на размышлениях о черных дырах и космологии, обсуждавшихся в главе 10. Он пишет<sup>5</sup>:

Есть нечто глубоко неудовлетворительное в современной традиционной формулировке квантовой механики, содержащей два существенно различающихся вида эволюции: один полностью детерминированный, соответствующий уравнению Шредингера, тогда как другой представляет собой вероятностный коллапс. И большая слабость традиционной теории состоит в том, что нам не говорят, когда одна форма эволюции предположительно уступает другой, помимо того, что это должно произойти в некий момент до проведения наблюдений...если я прав, то потребуется каким-то образом изменить уравнение Шредингера.

Пенроуз предлагает изменить его путем введения нового ра-

<sup>3</sup> E. Wigner, 'The probability of the existence of a self-producing unit', op. cit.

<sup>4</sup> Werner Heisenberg, *Physics and Beyond* (London, Allen & Unwin, 1971), p. 113.

<sup>5</sup> Roger Penrose, 'Big bangs, black holes and "time's arrow"', в: Raymond Flood and Michael Lockwood (eds.), *The Nature of Time* (Oxford, Blackwell, 1986).

дикального предположения – согласно ему, *гравитация* неким образом участвует в коллапсе волновой функции. Таким образом, он связывает свои опасения по поводу применимости квантовой механики в макроскопическом мире с собственной попыткой сформулировать закон, асимметричный во времени, чтобы объяснить гравитационную однородность молодой вселенной. (Стоит напомнить, что коллапс волновой функции – процесс, асимметричный во времени.)

Я уверен, читатель придет к выводу, что проблема квантовых измерений остается нерешенной. Однако по крайней мере один вопрос не вызывает споров: акт измерения можно рассматривать как случившийся, только когда создана некая запись или след. Это может быть след в конденсационной камере, щелчок счетчика Гейгера или потемнение фотоэмульсии. Главное свойство состоит в том, что в измерительном приборе, передающем значимую информацию экспериментатору, происходит *необратимое* изменение. Бор говорил о «необратимом росте» микроскопических возмущений, который вызывает действие измерительного устройства, приводя его в конкретное состояние, которое можно «описать простым языком» (например: счетчик щелкнул, индикатор в позиции 3). В общем, понятие измерения должно всегда основываться на классическом мире привычного опыта.

## Квантовое измерение как пример нисходящей причинности

Выше я особо выделил то, что описание состояния квантовой системы при помощи волновой функции – это не описание того, где находятся частицы и как они движутся, а нечто более абстрактное, позволяющее извлечь некую статистическую информацию об этом. Волновая функция представляет не то, какова система *сейчас*, а то, что мы о ней знаем.

Как только этот факт учтен, в коллапсе волновой функции не остается ничего особенно таинственного, поскольку в ходе измерения квантовой системы наше знание о ней меняется. Далее волновая функция меняется (претерпевает коллапс), чтобы позволить это. С другой стороны, эволюция волновой функции определяет относительные вероятности для результатов будущих



измерений, поэтому коллапс не влияет на последующее поведение системы. Развитие квантовой системы идет по-разному в случаях, когда измерение проводится и когда она остается в одиночестве.

Следовательно, само по себе это не так уж и странно. В самом деле, то же самое верно и в отношении классической системы; каждый раз, наблюдая за ней, мы немного нарушаем ее. В квантовой механике это вторжение является фундаментальным, непреодолимым и непредсказуемым свойством. В классической механике это всего лишь случайное свойство: нарушение можно сократить до сколь угодно малого уровня либо точно вычислить его и учесть. В квантовой системе это невозможно.

Акт квантовых измерений – это яркий пример нисходящей причинности, поскольку нечто, значимое на более высоком уровне (представленном, например, счетчиком Гейгера), вызывает фундаментальное изменение в поведении единицы более низкого уровня (скажем, электрона). В действительности квантовое измерение неизбежно задействует нисходящую причинность, поскольку, если попытаться рассматривать измерительный прибор на *той же* уровне, что и электрон – как всего лишь набор квантовых частиц, описываемых единой волновой функцией, – тогда, как мы уже видели, измерения не произойдет. Само значение измерения относится к тому, что мы проводим различие между микроскопическим уровнем элементарных частиц и макроскопическим уровнем сложных частей прибора, в котором происходят необратимые изменения и отмечаются следы.

Задействованную здесь нисходящую каузальность также можно рассматривать в информационных терминах. О волновой функции, содержащей наше знание о квантовой системе, можно сказать, что она представляет информацию; на компьютерном жаргоне – программное обеспечение. Таким образом, волна, связываемая, скажем, с электроном, – это волна *программного обеспечения*. С другой стороны, корпускулярное свойство, присущее электрону, сродни аппаратным средствам. Говоря на этом языке, можно сказать, что квантовый корпускулярно-волновой дуализм – это аппаратно-программный дуализм, подобный тому, что известен в вычислительной технике. Так же как у компьютера есть два дополняющих друг друга описания для одного набора событий, одно в терминах программы (например, когда машина подсчитывает чью-нибудь налоговую ведомость), а другое – в терминах элек-

трических цепей, так же и у электрона есть два комплементарных описания – волновое и корпускулярное.

В обычном режиме работы компьютер, однако, не является примером нисходящей обусловленности. Обычно мы не говорим, что действие умножения *вызывает* включение определенных цепей. Имеется лишь параллелизм между программным и аппаратным описаниями одного и того же набора событий. В случае с квантовыми измерениями, то, что, по-видимому, является закрытой квантовой системой (электрон плюс измерительный прибор плюс экспериментатор), развивается таким образом, что происходит информационное или программное изменение, которое в свою очередь производит изменение в аппаратных средствах (после этого электрон движется по-другому).

Я попытался расширить компьютерную аналогию следующим образом. Рассмотрим компьютер, оборудованный неким механизмом, а именно рукой робота, способной двигаться согласно программе компьютера. Такие устройства применяются на конвейерах по сборке автомобилей. Теперь зададимся вопросом, что произойдет, если компьютер запрограммировать так, чтобы рука начала вносить изменения *в сети самого компьютера* (рис. 32). Это пример обратной связи между аппаратными и программными средствами. Так же как изменения в информации обуславливают по нисходящей изменения в поведении электрона во время квантовых измерений, так и изменения в программных средствах по нисходящей обуславливают изменения в аппаратной составляющей компьютера.

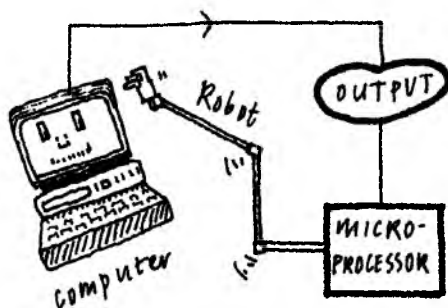


Рис. 32. Компьютер, запрограммированный на изменение собственных сетей, представляет собой пример «смещения уровней». Логические связи между программными и аппаратными средствами запутываются так, что становятся подобны корпускулярно-волновому дуализму квантовой физики.

Физик Джон Уилер еще нагляднее представляет квантовые измерения как нисходящую причинность<sup>6</sup>. «Как это возможно, – спрашивает он, – что сама информация (то есть «программные средства») в некоторых случаях меняет реальное состояние макроскопических вещей (аппаратных средств)?» Чтобы ответить на этот вопрос, Уилер, прежде всего, соглашается с Бором в том, что измерение требует некоторого необратимого усиления, результатом которого предстает запись или след, но, по мнению Уилера, этого недостаточно. Он уверен: считать измерение произошедшим можно только в случае, когда существует *значимая* запись.

Когда запись имеет значение? Уиллер обращается к довольно абстрактному понятию «сообщества исследователей», для которых щелчок счетчика Гейгера или отклонение стрелки что-то *значит*. Он отслеживает цепочку причинности или действия от элементарных частиц через молекулы и макроскопические объекты к сознательным существам, к тем, кто способен к коммуникации, а также к значимым утверждениям, и призывает нас «отказаться от обоснования существования за счет физических аппаратных средств, расположенных «где-то там», и заменить их на значимые программные средства». Другими словами, значение – либо информация, либо программные средства – возводится во главу угла, а частицы материи приобретают вторичное значение. Итак, заявляет Уилер, «физика – это ребенок значения, несмотря на то, что значение – это ребенок физики».

Но теперь Уилер спрашивает о том, как замкнется «цепь значений». Здесь должна участвовать некая *реакция* значения на физический мир элементарных частиц – «часть цепи, отвечающая за возврат». Подобная нисходящая обусловленность рассматривается как столь же фундаментальная, как и «восходящая» часть цепи, хотя и более неясная.

Подробности нисходящей причинности здесь по-прежнему покрыты тайной, за исключением одного вопроса. Обычно восходящая причинность распространяется вперед во времени (атом распадается, возникает частица, счетчик щелкает, экспериментатор считывает показания счетчика...). Следовательно, обратная часть цепи должна идти «назад во времени». Уилер поясняет это посредством нового

<sup>6</sup> J. A. Wheeler, 'Bits, quanta, meaning', в: A. Giovannini, M. Marinaro and A. Rimini (eds.), *Problems in Theoretical Physics* (University of Salerno Press, 1984), p. 121.

эксперимента, названного опытом отложенного выбора, в котором задействован вид ретрокаузации. Недавно этот эксперимент был проведен<sup>7</sup> и полностью оправдал ожидания Уилера. Однако следует понимать, что настоящего взаимодействия с прошлым не происходит.

## Первичны ли высшие уровни?

Принципиальная *необратимость*, участвующая во всех интерпретациях квантовых измерений, напоминает философию Пригожина, согласно которой необратимые явления – явления становления – первичны, тогда как обратимые процессы – явления существования – это аппроксимация или идеализация, вторичная по своей природе. Квантовая физика помещает наблюдение (или, по крайней мере, измерение) в центре реальности, тогда как элементарные частицы рассматриваются в ней как всего лишь абстракция этого первичного опыта (или событий).

Физики часто неформально говорят об электронах, атомах и так далее, как будто им присуще независимое существование во всей его завершенности, с полным набором атрибутов. Однако это выдумка. Квантовая физика учит нас, что электроны попросту не существуют «где-то там» в точном смысле слова, в определенном месте и с неким импульсом, в отсутствии наблюдений.

Когда физик использует слово «электрон», на самом деле он говорит о математическом алгоритме, который позволяет ему систематическим образом связывать между собой результаты определенных очень точных и детально описанных экспериментов. Поскольку эти отношения систематичны, легко поддаются искушению и поверить, что «где-то там» действительно существует нечто крохотное, наподобие уменьшенного в масштабах бильярдного шара, которое и производит результаты измерений. Но эта уверенность не подтверждается при тщательной проверке.

Квантовая физика приводит к заключению, что единицы нижнего уровня во вселенной – элементарные частицы, образующие материю – совсем не элементарны. Они обладают вторичной,

<sup>7</sup> C. O. Alley, O. Yakubovicz, C. A. Steggerda and W. C. Wickes, 'A delayed random choice quantum mechanics experiment with light quanta', в: S. Kamefuchi et al. (eds.), *Proceedings of the International Symposium on the Foundations of Quantum Mechanics, Tokyo, 1983* (Tokyo, Physical Society of Japan, 1984), p. 158.

производной природой. Вместо того, что поставлять конкретный «материал», из которого сделан мир, эти «элементарные» частицы на самом деле представляют, по сути, *абстрактные* конструкции, стоящие на твердом основании необратимых «наблюдаемых событий» или записей об измерениях.

По-видимому, такова личная позиция Пригожина<sup>8</sup>:

Классический порядок был следующим: сначала частицы, затем второй закон [термодинамики] – существование до становления! Возможно, это больше не так, когда мы оказываемся на уровне элементарных частиц, и, возможно, нам следует *сначала* ввести второй закон, прежде чем мы сможем определить единицы... В конце концов, элементарная частица, вопреки своему названию, не объект, который «дан»; нам следует построить ее.

Пригожин вспоминает произведенное Эддингтоном разделение законов на первичные (такие, как Ньютоновы законы движения отдельных частиц) и вторичные (например, второй закон термодинамики). Эддингтон задался вопросом, что если «в реконструированной схеме физики, которую сейчас навязывает нам квантовая теория, вторичные законы станут основанием, а первичные законы будут отвергнуты»<sup>9</sup>. Другими словами, нисходящая причинность берет верх над восходящей.

Эти рассуждения наделяют квантовую физику изрядной долей холизма, почти что аристотелианства. Здесь мы обнаруживаем не только то, что все существо больше суммы собственных частей, но и то, что существование частей определяется целым в гигантском аппаратно-программном смещении уровней.

Физик, который чрезвычайно подробно развивает эту тему, проводя параллели с восточной философией, – это Дэвид Бом. Он видит в квантовой физике краеугольный камень новых представлений о порядке и организации, которые выходят за пределы субатомной физики и охватывают жизнь и даже сознание. Он подчеркивает наличие «имплицитного» порядка, существующего в природе в «свернутом виде» и постепенно развертывающегося по мере эволюции вселенной, позволяя появиться организованности<sup>10</sup>. Одно из ключевых свойств квантовой физики, на ко-

<sup>8</sup> Prigogine, 1980, op. cit., p. 199.

<sup>9</sup> Eddington, op. cit., p. 98.

<sup>10</sup> David Bohm, *Wholeness and the Implicate Order* (London, Routledge & Kegan Paul, 1980).

тором основываются идеи Боба, – это нелокальность, и именно к этой теме мы сейчас обратимся.

## Нелокальность в квантовой механике

Мы уже видели, что результаты наблюдения за электроном – занимающим микроскопическую область в пространстве – зависят от природы того или иного макроскопического измерительного устройства – объекта, сконструированного как нечто единое и организованное на большой области пространства. Таким образом, происходящее в некоей пространственной точке тесно связано с более широким окружением, и в принципе, со всей вселенной. Физики используют термин *локальность* для обозначения таких случаев, когда нечто, происходящее в некоей точке пространства и времени, зависит только от влияний, оказываемых в непосредственной близости от этой точки. Таким образом, о квантовой механике говорят, что она «нелокальна».

Нелокальность в квантовой механике наиболее ярко проявляется в некоторых ситуациях, объединенных под названием ЭПР-экспериментов по имени Эйнштейна, Подольского и Розена, которые впервые привлекли внимание к этой идее в 1930-х. Эйнштейн упорствовал в скептическом отношении к квантовой механике и испытывал особую неприязнь к ее нелокальности, поскольку казалось, что она создает противоречия между квантовой физикой и его собственной теорией относительности.

Он придумал эксперимент, в котором две частицы вступают во взаимодействие, после чего удаляются друг от друга на огромное расстояние. В этих обстоятельствах квантовое состояние комбинированной системы может быть таково, что измерение, проведенное в отношении одной частицы, по всей видимости, влияет на результат измерений, производимых на другой, удаленной частице. Это так встревожило ученого, что он назвал его «жутким действием на расстоянии».

Если быть более точным, было обнаружено, что результаты независимых измерений, проводимых на удаленных друг от друга частицах, коррелируют между собой<sup>11</sup>. Само по себе это не вызывает

<sup>11</sup> A. Aspect et al., *Physical Review Letters*, 49, 1982, p. 1804.

удивления, так как если частицы имеют общее происхождение, то каждая из них сохранит отпечаток столкновения. Интересна *степень* данной корреляции. Ее исследовал Джон Белл из лаборатории Европейского центра ядерных исследований, расположенного недалеко от Женевы<sup>12</sup>.

Белл показал, что квантовая механика предсказывает гораздо большую степень корреляции, чем может объяснить какая-либо теория, рассматривающая частицы как реально независимые и подчиняющиеся принципу локальности. Дело обстоит почти так, будто две части вступают в сговор и сотрудничают во время проведения измерений каждой из них по отдельности, даже когда эти измерения проводятся одновременно. Но теория относительности запрещает любой вид мгновенной передачи сигнала или взаимодействия между двумя частицами. Поэтому, очевидно, непонятно, как устанавливается этот сговор.

Традиционный ответ на вызов со стороны ЭПР дал Нильс Бор. Он утверждал, что на самом деле в конечном итоге ничто не противоречит относительности, если допустить, что две частицы, хотя и разделенные в пространстве, по-прежнему входят в состав единой квантовой системы с единственной волновой функцией. Если это так, то физически разделить две частицы попросту невозможно, так же как считать их *реально независимыми единицами*, несмотря на то, что всеми силами, действующими между ними напрямую, можно пренебречь вследствие огромного расстояния. Независимая реальность частиц появляется только тогда, когда их подвергают измерениям. Сговор между частицами остается непонятным, только если по-прежнему думать, что каждая из них обладает точно установленной позицией и движением, предшествовавшими наблюдениям.

Урок ЭПР заключается в том, что квантовые системы по своей сути нелокальны. В принципе, все частицы, когда-либо вступавшие во взаимодействие, принадлежат к одной волновой функции – глобальной волновой функции, содержащей колоссальное число корреляций. Можно даже попытаться найти (и некоторые физики пытаются) волновую функцию для всей вселенной. В подобной схеме судьба любой данной частицы неотделима от судьбы

<sup>12</sup> J. S. Bell, *Physics*, 1, 1964, p.195.

космоса в целом, не в тривиальном смысле, когда она может подвергнуться воздействию из окружающей среды, а потому, что сама ее реальность переплетена с реальностью остальной вселенной.

## Квантовая физика и жизнь

Многие физики, участвовавшие в развитии квантовой механики, были очарованы следствиями этой новой теории, касающимися биологии. Некоторые из них, например Макс Дельбрюк, сделали карьеру в биологии. Другие, в том числе Бор, Шредингер, Паскуаль Йордан, Вигнер и Эльзассер, много писали о проблемах понимания биологических организмов с точки зрения физика.

На первый взгляд может показаться, что квантовая механика не подходит для биологии, поскольку живые организмы – это макроскопические объекты.

Все же следует помнить, что все важные процессы молекулярной биологии обладают квантовой природой. Шредингер показал, что квантовая механика необходима для понимания устойчивости генетической информации, хранящейся на молекулярном уровне.

Тогда, если принять, что на фундаментальном уровне жизнь представляет собой закодированную квантовую механику, возникает вопрос, как эта квантовая информация проявляется в виде классического макроскопического организма. Если наследственность требует квантового описания, как она связана с чисто классическим понятием биологического фенотипа, находящегося во взаимодействии с окружающей средой? На самом деле, необходимость примирить квантовое и классическое описания биологических явлений – это еще один вариант проблемы квантовых измерений.

Говард Патти уверен: решение проблемы квантовых измерений тесно связано с вопросом понимания жизни. Он отмечает, что одна из основополагающих биологических характеристик, передача наследственной информации, нуждается в понятии *запись*. А как мы уже видели, квантовое измерение происходит только тогда, когда имеется некое необратимое изменение, оставляющее след или запись.

Патти говорит о дуализме уровней, названном мной «аппаратно-программным», как о «материально-символическом» и делает



следующее провокационное утверждение<sup>13</sup>: «Моя главная идея состоит в том, что проблема материя-символ и вопрос измерения или записи должна возникнуть у истоков живой материи». Он называет ферменты «измерительными молекулами» и в заключение говорит о том, что, поскольку ни один классический механизм не может обеспечить должной скорости и надежности для передачи наследственности, «жизнь началась с каталитического процесса кодирования на индивидуальном молекулярном уровне».

Если понимать жизнь как часть вопроса о примирении квантовой физики с классической, тогда нисходящая причинность в биологии предстанет неизбежной. Более того, я уверен, что нам следует серьезно отнестись к свойству нелокальности квантовой физики применительно к биологическим явлениям. Как мы уже видели, эксперимент ЭПР показывает, что нелокальность может проявляться в корреляциях или «заговоре», покрывающем макроскопические расстояния. Две частицы, задействованные в этом эксперименте, принципиально неразделимы, несмотря на их разное местоположение; эту систему следует рассматривать как единое целое. Данный случай очень похож на биологические процессы.

Есть множество примеров, когда в биологических явлениях, казалось бы, действует нелокальность. Один из них – это знаменитый вопрос складывания белков. Как упоминалось в главе 7, белки образуются в виде длинных цепочек, которые затем скручиваются в очень сложную и специфическую трехмерную форму, чтобы обрести способность правильно выполнять свою функцию. Биофизики долго считали процесс складывания белков загадочным. Откуда белок «знает», какую конфигурацию ему принять в конечном итоге?

Было высказано предположение, что требуемое положение – это наиболее устойчивое состояние (энергетический минимум), а потому наиболее вероятное в некоем статистическом смысле. Однако существует множество других конфигураций с примерно таким же уровнем энергии. Если бы белку потребовалось исследовать все возможные варианты, прежде чем найти правильный, на это ушло бы очень много времени. Кажется, что белок каким-то образом чувствует требуемую конечную форму и стремится к ней. Чтобы вы-

<sup>13</sup> Н. Н. Pattee, 'Can life explain quantum mechanics?', в: Ted Bastin (ed.), *Quantum Theory and Beyond* (Cambridge University Press, 1971).

полнить это действие, далеко отстоящие друг от друга части белка должны двигаться синхронно, в соответствии с подходящим общим графиком, иначе молекулы перепутаются, образовав неверную форму. Эта деятельность, происходящая в результате многочисленных квантовых взаимодействий, явно нелокальна по своей природе.

Есть множество других примеров подобного «действия на расстоянии» – от случая, когда белки, привязанные к одному участку гена, по-видимому, воздействуют на другие белки, удаленные на тысячи атомов, до самого явления морфогенеза, организованного глобально. Однако существует фундаментальное различие между применением квантовой механики к живым организмам и ее применением к элементарным частицам. Как отмечал Нильс Бор, невозможно определить квантовое состояние организма, не убив его. Неизбежное вторжение, которое влекут за собой любые квантовые измерения, полностью нарушит молекулярные процессы, столь важные для жизни. Более того, этот недостаток невозможно компенсировать за счет множества частичных экспериментов над большим числом организмов, поскольку все организмы неповторимы.

Здесь мы сталкиваемся с главной особенностью, связанной с применением квантовой механики к любой системе высокой сложности. Как объяснялось выше, квантовая механика – это статистическая теория, и ее прогнозы можно проверить, лишь применив их к набору одинаковых систем. Никаких трудностей не возникает в случае с элементарными частицами, которые по своей сути неотличимы от других членов того же класса (например, все электроны одинаковы). Но когда рассматриваемая система уникальна, статистический прогноз не действует. Несомненно, это относится к живым организмам, а также должно быть верно и для многих сложных неживых систем, таких как конвекционные ячейки и узоры Белоусова-Жаботинского.

Эльзассер утверждал, и по моему мнению, очень убедительно, что уникальность открывает путь для действия дополнительных организующих принципов (его «биотонических законов»), которые не выводятся из законов квантовой механики и в то же время им не противоречат<sup>14</sup>:

<sup>14</sup> W. M. Elsasser, 'Individuality in biological theory', в: C. H. Waddington (ed.), *Towards a Theoretical Biology* (4 vols, Edinburgh University Press, 1970), vol. 3, p. 153.

Первичные законы – это законы физики, которые можно изучать количественно только в смысле их применимости к однородным классам. Следовательно, существует «вторичный» тип порядка или регулярности, который возникает только вследствие (обычно кумулятивного) эффекта индивидуальностей в однородных системах и классах. Отметим, что существование такого порядка необязательно нарушает законы физики.

Эльзассер вспоминает, как фон Нейман доказывал, что квантовая механика не может быть дополнена другими законами, однако отмечает, что при участии в выборке только одного объекта законы механики все равно нельзя ни подтвердить, ни опровергнуть. Доказательство нерелевантно. Квантовая механика касается результатов измерений, проводимых в наборах одинаковых систем, т.е. систем, принадлежащих к однородным классам. Ей нечего сказать, по крайней мере, в ее обычной формулировке, о закономерностях в *неоднородных* классах. Однако в биологии интерес представляют закономерности, действующие в разных, но сходных организмах, т.е. неоднородные классы. Квантовая механика не накладывает никаких ограничений на существование подобных закономерностей. Поэтому мы вольны открывать новые, дополнительные принципы, относящиеся к членам таких классов. Одним из таких принципов наверняка может стать естественный отбор. Трудно представить себе, как описание естественного отбора может следовать из законов квантовой механики.

Совсем иного рода сомнения в отношении применимости квантовой механики в ее современном виде к биологическим системам испытывает Роберт Розен, чью критику узости концептуального основания физики мы рассмотрели в главе 11. Он считает, что некоторые из ключевых допущений, на которых основывается применение квантовой механики в физике, не работают в биологии. Например, когда физик анализирует квантово-механическую систему, в первую очередь он решает, какие динамические величины использовать как «наблюдаемые», и выстраивает математическую формализацию, приспособленную к данному варианту. Обычно наблюдению подвергаются привычные механические величины: энергия, положение частицы, спин и т. д. Когда же дело доходит до биологических систем, где интерес представляют такие понятия, как скорость мутаций, опознавание ферментов, удвоение ДНК и т.д., далеко не ясно, каким динамическим величинам соответствуют эти объекты наблюдения.

Если говорить более серьезно, попытки моделирования биологической деятельности на молекулярном уровне с использо-

ванием механического языка сталкиваются с серьезным концептуальным препятствием. Как уже неоднократно отмечалось, исходная точка традиционной механики – это создание функции Лагранжа для системы. Функция Лагранжа тесно связана с другой величиной, известной как функция Гамильтона (названной так по имени ирландского физика Уильяма Роуэна Гамильтона). В классической механике функция Гамильтона может быть использована для восстановления законов Ньютона. Ее значение, однако, больше связано с ее ролью в квантовой механике, поскольку здесь у нас нет законов Ньютона как альтернативной точки отсчета. Квантование механической системы *начинается* с функции Гамильтона.

Роузен утверждает, что вообще *не существует функции Гамильтона* для биологических систем. (Отчасти потому, что это открытые системы.) Другими словами, эти системы невозможно сделать квантовыми даже посредством традиционных преобразований. В действительности никто не знает, что делать, если у системы нет функции Гамильтона, поэтому, без сомнения, преждевременно делать какие-либо выводы по поводу применения квантовой механики к биологии – или любой другой сложной системы, для которой невозможно установить функцию Гамильтона.

Полезно будет узнать, что думали отцы-основатели квантовой механики о применимости их теории к биологическим явлениям. Шредингер писал<sup>15</sup>: «Судя по всему тому, что мы узнали о структуре живой материи, нам следует быть готовыми к тому, что она работает таким образом, который невозможно свести к обычным законам физики». Однако он торопится пояснить, что речь не идет о «существовании некоей 'новой силы' или чего бы там ни было, управляющего поведением отдельных атомов внутри живого организма». Скорее, это объясняется неповторимо сложной природой живых существ, чье «строение отлично от всего, чтобы когда-либо изучали в физической лаборатории».

В биографии Шредингера физик Уильям Скотт по-своему толкует мнение этого великого человека о новых организующих принципах в науках более высокого уровня, например в биологии<sup>16</sup>:

<sup>15</sup> Erwin, *What is Life?* (Cambridge University Press, 1944), p. 76.

<sup>16</sup> William T. Scott, *Erwin Schrödinger: An Introduction to his Writings* (Amherst, University of Massachusetts Press, 1967).

В свете приведенного выше анализа, представляется, что утверждение Шредингера о новых физических и химических законах, которые могут появиться в биологии, – во многом дело терминологии. Если термины «физика и химия» сохраняют свое настоящее значение, то предсказание Шредингера нужно воспринимать как утверждение о том, что будут обнаружены новые организующие принципы, которые пойдут дальше законов физики и химии, но не будут им противоречить.

Как утверждает Скотт, дополнительную свободу действий подобным новым организующим принципам придает «диапазон возможных исходных или граничных условий. В таких сложных системах, как живые организмы, этот диапазон свободы действительно очень велик».

Нильс Бор глубоко размышлял над природой живых организмов, которые, как он настаивал, представляют собой первичные явления, не сводимые к деятельности на атомном уровне<sup>17</sup>:

В соответствии с такой точкой зрения, существование жизни следует рассматривать как элементарный факт, который нельзя объяснить, но нужно принять как исходную точку для биологии.

Вернер Гейзенберг описывает разговор с Бором во время прогулки на яхте в начале тридцатых годов<sup>18</sup>. Гейзенберг рассказал о своих сомнениях по поводу применимости квантовой механики для объяснения биологии. Он спросил Бора, верит ли он, что будущая объединенная наука, способная объяснить биологические явления, будет состоять всего-навсего из квантовой механики плюс наложенные на них некоторые биологические концепции, или же «эта объединенная наука будет управляться более широкими естественными законами, среди которых квантовая механика будет только предельным случаем».

Бор отверг данное разделение и предпочел вернуться к собственному знаменитому «принципу дополнительности». Биологические и физические описания, утверждал он, – это всего лишь два способа восприятия природы, дополняющих, а не противоречащих друг другу. Но как же насчет эволюции? – настаивал Гейзенберг. «Очень трудно поверить, что столь сложный орган как, например, человеческий глаз, образовался постепенно в результате совершенно случайных изменений». Бор согласился с тем, что идея

<sup>17</sup> N. Bohr, *Nature*, 1 April 1933, p. 458.

<sup>18</sup> Heisenberg, *op. cit.*, ch. 9.

происхождения новых форм за счет чистой случайности «вызывает намного больше вопросов, хотя мы едва ли можем представить что-либо взамен нее». Тем не менее он предпочел «воздержаться от суждений».

В конце Гейзенберг вовлек Бора в обсуждение вопроса сознания. Не говорит ли существование сознания о необходимости расширить квантовую теорию? Бор ответил, что этот довод «на первый взгляд кажется очень убедительным... сознание должно быть частью природы... Это означает, что без какой-либо связи с законами физики и химии, заложенными в квантовой теории, нам следует также поразмышлять над законами совсем иного рода».

Какой вывод можно сделать из всего этого?

Законы квантовой механики сами по себе не способны объяснить жизнь, тем не менее, они действительно открывают возможность для действия нелокальных корреляций, нисходящей причинности и новых организующих принципов. Может оказаться так, что подобные принципы по-прежнему будут соответствовать квантовой механике, либо квантовая механика перестает действовать выше определенного уровня организационной сложности. Как бы то ни было, несомненно, большой ошибкой будет представлять биологические организмы как классические машины, действующие исключительно за счет перемещения молекулярных единиц, которые подвергаются только локальным воздействиям. И эта ошибка становится все очевиднее, если учесть существование сознания.

# Разум и мозг

## Паттерны мысли

**П**ри любом рассмотрении сложности и самоорганизации мозг занимает особое место, поскольку здесь снова преодолевается порог на пути к более высокому концептуальному уровню. Теперь мы вступаем в мир *поведения* и в конечном итоге – сознания, свободной воли, мыслей, снов и так далее. В этом поле субъективное и объективное переплетаются, и неизбежно вторгаются глубоко укоренившиеся чувства и убеждения. Возможно, по этой причине ученые-физики как будто избегают обсуждения этого вопроса. Но рано или поздно придется решать вопрос о том, можно ли в конечном итоге свести *ментальные функции* к физическим процессам в мозге, т. е. к физике и химии, или же существуют дополнительные законы и принципы, относящиеся к ментальному миру, которые невозможно механически вывести из физики неживой природы.

С точки зрения нейрофизиологии мозг можно изучать на двух уровнях. Нижний уровень касается работы отдельных нейронов (клеток мозга) и их взаимосвязей, а также определения того, что вызывает их возбуждение и как электрические импульсы распространяются между нейронами. На более высоком уровне мозг можно рассматривать как фантастически сложную *сеть*, по которой блуждают электрические *паттерны*. Если, что наиболее вероятно, ментальные процессы связаны в первую очередь с паттернами нейронной активности, а не с состоянием какого-либо отдельного нейрона, тогда, скорее всего, именно последний подход прольет свет на высшие функции поведения и сознания.

Было предпринято множество попыток для моделирования нейронных сетей по типу клеточных автоматов, когда использо-

валась система соединений вместе с определенным правилом для выработки электрического состояния системы детерминированным образом во времени, после чего запускалась компьютерная симуляция. Эти исследования отчасти обусловлены практически соображениями. Проектировщики вычислительных машин жаждут понять, как мозг исполняет некоторые интегративные функции, например узнавание, чтобы создать «умные машины». Также присутствует желание найти простые модели, содержащие ключ к некоторым основным ментальным функциям, таким как мечтание, хранение и воспроизведение воспоминаний, а также к таким расстройствам, как эпилептические припадки.

Анатомия нервной системы необычайно сложна. Человеческий мозг содержит около ста миллиардов нейронов, а данный нейрон может напрямую соединяться с огромным числом других нейронов. Представляется вероятным, что некоторые из взаимосвязей структурированы систематическим образом, тогда как другие случайны. Электрический сигнал на выходе из данного нейрона будет находиться в нелинейной зависимости от комбинированного входящего сигнала, который он получает от соединенных с ним партнеров. Входящие сигналы могут оказывать как возбуждающее, так и тормозящее воздействие. Таким образом, характер сигнала, создаваемого определенным нейроном, в частности частота импульсов, находится в сложной зависимости от того, что происходит в остальной части системы.

Неудивительно, что система с такой высокой степенью нелинейности и обратной связи проявляет способность к самоорганизации и осуществляет определенный вид коллективного поведения, приводящего к установлению глобальных паттернов и циклов. Фокус в том, чтобы отобразить некоторые из этих свойств в доступной для изучения компьютерной модели.

Типичная смоделированная сеть может состоять из нескольких сотен элементов («нейронов»), каждый из которых произвольно подсоединен примерно к 20 другим элементам, обладающим разными силами.

Нейронам отводится определенное время на восстановление между последовательными импульсами. Затем система приводится в исходное состояние путем определения конкретного паттерна импульсов, возможно, произвольного, после чего она развивается



детерминированным образом – посредством компьютерной симуляции – чтобы установить, какие паттерны установятся.

Важным усовершенствованием является введение *пластичности* в систему, путем постоянного изменения параметров сети до тех пор, пока не возникнет тип поведения, представляющий интерес. Считается, что мозг использует пластичность для собственного развития. Согласно одной модели, созданной в Вашингтонском университете, Сент-Луис, сеть меняют с течением времени в зависимости от текущей активности нейронов: сила взаимодействий меняется в соответствии с тем, включаются конечные нейроны или нет. Обратная связь между уровнями позволяет сети вырабатывать некоторые примечательные свойства. Согласно одному из алгоритмов, известному как *промывание мозгов*, систематически ослабляются связи между активными нейронами, вследствие чего снижается уровень активности. В результате сеть, вместо того чтобы участвовать в неинтересной активности высокого уровня, проявляет самоорганизующееся поведение и обычно достигает устойчивости в виде циклов с разными периодами и сложностью. Команда из Сент-Луиса верит, что их модель предлагает первый убедительный шаг на пути к сети, способной к самообучению и в конечном итоге – к разумному поведению.

## Память

Существенный вклад в изучение нейронных сетей сделал в 1982 году Дж.Дж. Хопфилд из Калтеха. В модели Хопфилда каждый нейрон может находиться только в одном из двух состояний – возбуждения или покоя. «Состояние, в котором он находится, зависит от того, превзойдет ли его электрический потенциал определенный порог, что определяется уровнем входящих сигналов от соединенных с ним партнеров. Этот уровень, в свою очередь, зависит от силы разных взаимодействий. В модели принято, что сила соединений симметрична, т.е. А соединяется с Б с той же интенсивностью, что и Б с А. Конечно, сила соединений имеет значение только тогда, когда нейроны на концах соединения активны. Можно выбрать как положительные (возбуждающие), так и отрицательные (тормозящие) значения силы».

Привлекательность модели Хопфилда в том, что у нее есть наглядный физический аналог. Различные возможные состояния

сети можно представить в виде ухабистой поверхности в пространстве. При этом текущее состояние соответствует воображаемому мячу, катящемуся по поверхности. Мяч будет скатываться в ложбины или области притяжения, стремясь к локальным минимумам. Отсюда следует, что сеть будет стремиться обрести равновесие в этих паттернах возбуждения, соответствующих состояниям «минимального потенциала». Высоту поверхности в каждой точке можно представить как эквивалент энергии, она определяется общей силой взаимодействий: большие положительные силы дают небольшую энергию. Поэтому именно в предпочтительных «ложбинных» состояниях нейроны с сильными взаимосвязями стремятся генерировать импульсы одновременно. Модель можно изучать путем (метафорического) преобразования энергетического ландшафта и поиска интересного поведения.

Еще больше увеличить реализм можно, если включить в модель аналог тепловых помех. Если бы мяч постоянно толкали из стороны в сторону, он смог бы исследовать ландшафт более тщательно. Например, появилась бы возможность, что он покинет одну ложбину и найдет еще одну, более глубокую, неподалеку. В среднем он проводит все время рядом с самым глубоким минимумом. Чтобы провести это усовершенствование, необходимо всего лишь ввести элемент произвольности в правило об испускании импульса. Во время использования таких вероятностных сетей наблюдались рудиментарные функции обучения и узнавания.

Было высказано предположение, что модель Хопфилда представляет важную форму памяти. Идея в том, что паттерн нейронной активности, соответствующий основанию ложбины, представляет некое понятие или хранящуюся информацию. Чтобы получить к ней доступ, нужно всего лишь поместить мяч где-либо во впадине и подождать, пока он не скатится вниз на дно. То есть паттерн испускания импульсов должен быть всего лишь достаточно похож на тот паттерн, который представляет искомую концепцию активности, чтобы измениться в его направлении. Далее сеть повторяет подходящий паттерн активности и таким образом воспроизводит хранимую информацию. Этот механизм специалисты по вычислительной технике называют ассоциативной памятью, поскольку она позволяет восстановить полностью некое понятие по фрагменту. Она соответствует тому, что происходит,

когда мы «роемся в памяти», пытаюсь найти мысль или воспоминание, основанное на некоем смутном впечатлении или ассоциативном образе.

Модель памяти Хопфилда коренным образом отличается от той, что используется в компьютерах, где каждый бит информации хранится на отдельном элементе и может быть воспроизведен, только если обозначен точный адрес. В случае Хопфилда информация хранится *целостным образом*; информация представлена коллективным паттерном деятельности, охватывающим всю сеть. Если компьютерной памяти может повредить единственный неисправный элемент, то система Хопфилда обладает высокой надежностью, поскольку нейронная активность не определяется каким-то отдельным нейроном. Очевидно, нечто подобное должно происходить и в мозге, где нейроны часто отмирают, не производя значительного замедления работы мозга.

Понятие обучения можно уяснить себе при помощи этой модели, если представить, что воображаемый ландшафт можно преобразовать посредством подключения извне, т. е. создания новых ложбин, представляющих только что собранную информацию. Здесь задействован именно тот вид пластичности, который описывался выше. Хопфилд также обнаружил, что доступ к памяти работает эффективнее, если ввести процесс «разобучения» – подобный алгоритму обучения, только в противоположном направлении, – и даже предположил, что нечто подобное происходит в мозге во время сна со сновидениями<sup>1</sup>.

Эти недавние впечатляющие успехи в моделировании нейронных сетей подчеркивают важность коллективных и холистических свойств мозга. Они показывают, что значение имеет *паттерн* нейронной активности, а не детали функционирования отдельных нейронов. Именно на этом коллективном уровне появляются новые качества самоорганизации. Они, по всей видимости, обладают собственными правилами поведения, которые не следуют из законов физики, управляющих функционированием нервной системы. На самом деле, в компьютерных симуляциях, только

<sup>1</sup> J. J. Hopfield, D. I. Feinstein and R. G. Palmer, "“Unlearning” has a stabilizing effect in collective memories", *Nature*, 304, 1983, p. 158.

что описанных здесь, не задействованы физические факторы, за исключением степени реалистичности, с которой описываются процедуры испускания импульсов.

## Поведение

Независимо от механизмов функционирования мозга, в реальности результат заключается в том, что организмы, наделенные им – или хотя бы рудиментарной нервной системой – проявляют *сложное поведение*. Поведение – это еще один более высокий уровень активности в природе. Если органические функции сложно свести к физике, то поведение – почти невозможно.

Рассмотрим, например, собаку, преследующую добычу по запаху. Организм в целом работает над выполнением особой задачи как нечто единое. Задача включает в себя невероятно сложный набор взаимосвязанных функций, каждую из которых следует подчинить общей стратегии.

Почти невозможно избавиться от впечатления, что собака, идущая на запах, действует *целенаправленно*, используя некую внутреннюю предсказательную модель конечного состояния, которого она пытается достичь; в данном случае – схватить добычу.

Законченному редуccionисту было бы трудно объяснить высокую степень телеологичности поведения собаки. Предполагается, что каждый атом движется в соответствии лишь со слепыми силами, действующими на него со стороны соседних атомов, каждый из которых попросту подчиняется диктату физических законов. И все же, кто станет отрицать, что собака неким образом манипулирует своим телом, чтобы схватить добычу?

Важно не попасться в ловушку предположения, согласно которому любое целенаправленное поведение сознательно. Паук, плетущий паутину, или группа муравьев, строящих муравейник, без сомнения, не осознают того, что делают (по крайней мере, у них нет представления об общей стратегии), и тем не менее, они выполняют задачу. Сфера инстинктивного полностью попадает в эту категорию. Согласно стандартной теории, замечательные инстинктивные способности насекомых и птиц полностью обусловлены генетической программой. Иными словами, никто не учил паука плести паутину; он наследует свое умение через ДНК.

Конечно, никто даже не представляет, как простая перестановка нескольких молекул в определенной последовательности (статической форме) может породить *деятельность* с высокой степенью интеграции. Затруднения здесь гораздо серьезнее, чем в морфогенезе, где конечный продукт – это пространственные структуры. Можно предположить, что генетическая запись напоминает последовательность запрограммированных инструкций, которые следует «прогнать», подобно перфоленте в пианоле, но при более пристальном рассмотрении эта аналогия не выдерживает критики. Выполнение даже инстинктивных поведенческих задач можно прервать без катастрофических последствий. Препятствие на муравьиной дорожке может вызвать минутное замешательство, однако вскоре муравьи используют новую стратегию с поправкой на новые обстоятельства.

Очевидно, существует масса контролирующих и компенсаторных механизмов, действие которых зависит от поступающей сенсорной информации, а не от механического применения неизменного набора инструкций. Другими словами, организм нельзя рассматривать (подобно пианоле) как закрытую систему с раз и навсегда определенным репертуаром функций. Муравья следует считать частью колонии, а колонию – частью окружающей среды. Таким образом, понятие поведения муравьев холистично и лишь отчасти зависит от внутреннего генетического набора отдельного муравья.

Возможно, наиболее поразительные примеры надежности инстинктивного поведения получены в экспериментах с миграцией птиц. Хорошо известно, что птицы могут творить чудеса в навигации, в чем им, вероятно, помогает вид звездного неба и магнитное поле Земли. Некоторые птицы пролетают тысячи миль с высочайшей точностью, несмотря на то, что их никто не обучал маршруту. Наибольшее удивление вызывают случаи, когда птиц увозят на сотни и даже тысячи миль от дома, в ту часть Земли, которая не могла быть им известна, после чего их выпускают и они летят назад практически по прямой.

И снова традиционный ответ на эти ошеломляющие достижения состоит в предположении, согласно которому навигационные навыки запрограммированы генетически, т.е. хранятся в ДНК птиц. Однако ввиду невозможности объяснить, как расположение

молекул преобразуется в поведенческий навык, который может справиться с совершенно непредвиденным сбоем, сделать данное предположение – то же самое, что махнуть рукой.

Если необходимая астронавигационная информация встроена в молекулу ДНК, значит, в принципе, обладая достаточным пониманием природы ДНК, можно «расшифровать» эту информацию и восстановить звездную карту! И более того.

Птице нужно знать о сроках, а также об ориентирах, поэтому астрономическая панорама на самом деле будет представлять собой фильм. Если дать волю своему воображению, трудно не задать себе вопрос, сможет ли сообразительный ученый, никогда не видевший ни птицы, ни неба, посредством тщательного изучения единственной молекулы ДНК определить подробности простейшего звездного спектакля, демонстрируемого в планетарии!

Мне представляется гораздо более вероятным то, что секрет навигационных умений птиц лежит в совсем другом направлении. Как мы уже видели, общее свойство сложных систем заключается в том, что выше определенного порога сложности появляются новые свойства, которые не только отсутствуют, но и просто не имеют смысла на более низком концептуальном уровне. При переходе на более высокий уровень организации и сложности следует обращаться к новым законам организации и сложности, помимо основных законов более низкого уровня, которые могут по-прежнему действовать (или, разумеется, не действовать).

Когда речь заходит о поведении животных, в действие вступают понятия, информационные по природе (птица осуществляет *навигацию согласно положению звезд*), поэтому следует ожидать, что в силу вступят законы и принципы, относящиеся к качеству информации, ее манипуляции и хранению – намеки на нечто подобное содержатся в исследованиях клеточных автоматов и нейронных сетей. Подобные законы и принципы нельзя свести к механической физике, которая попросту не подходит для данного явления.

## Сознание

Телеологичность поведения невозможно отрицать, когда оно осуществляется сознательно, так как из прямого опыта мы знаем, что часто у нас действительно имеется заранее сложившееся

представление о желаемом конечном состоянии, к которому мы стремимся. Вступая в царство сознательного опыта, мы снова минуем порог организационной сложности, которая вводит собственные новые понятия – мысли, чувства, надежды, страхи, воспоминания, планы, желания. Главная трудность в том, чтобы понять, как эти *ментальные события* согласуются с законами и принципами физической вселенной, их производящей.

Здесь редукционист сталкивается с жестоким затруднением. Если процессы нервной системы – это всего лишь движение атомов и электронов, рабски подчиняющееся законам физики, тогда ментальным событиям следует вообще отказать в какой-либо отдельной реальности, поскольку редукционист не видит коренных различий между физикой атомов и электронов в мозге и физикой атомов и электронов где бы то ни было еще. Это, несомненно, решает проблему соответствия между ментальным и физическим миром.

Однако, решая одну проблему, мы создаем другую. Если ментальным событиям отказано в реальности, что низводит людей до простых автоматов, тогда и сами процессы размышления в соответствии с позициями редукциониста также теряют реальность. Следовательно, этот довод терпит крах, будучи замкнутым на самом себе.

С другой стороны, предположение о том, что ментальные события реальны, не является безоговорочным. Если ментальные события каким-то образом производятся *физическими* процессами, такими как нейронная активность, могут ли они обладать собственной независимой динамикой?

Наиболее остро этот вопрос встает в связи с волевым желанием, которое, возможно, представляет самый привычный пример нисходящей причинности. Если я решу поднять руку, и далее моя рука поднимается, естественным для меня будет предположить, что моя *воля* стала *причиной* этого движения. Конечно, мой разум действует на мою руку не напрямую, а при посредничестве моего мозга. Очевидно, акт пожелания двинуть рукой связан с изменением нейронной активности моего мозга – «запускаются» определенные нейроны и так далее – что устанавливает цепочку сигналов, проходящих до мускулов моей руки и производящих требуемое движение.

Несомненно, это явление – часть *проблемы разум-тело* – представляет величайшую трудность для науки. С одной стороны, предполагается, что нейронная активность в мозге определяется законами физики, так же как, например, в случае с любой электрической системой. С другой стороны, непосредственный опыт заставляет нас верить, что, по крайней мере в случае с намеренным действием, это действие обусловлено нашим ментальным состоянием. Как у одного набора событий может быть две причины?

Мнения на этот счет разнятся: от вышеупомянутого отрицания ментальных событий, называемого бихевиоризмом, до идеализма, отрицающего *физический* мир и рассматривающего все события как ментальные построения. Несомненно, с этим вопросом связано то, что мозг – это система с высокой степенью нелинейности, а потому подверженная хаотическому поведению. Принципиальная непредсказуемость хаотических систем и их чрезвычайная чувствительность к начальным условиям делает их открытыми и прихотливыми. Физик Джеймс Кратчфилд и его коллеги уверены, что хаос позволяет существовать свободной воле в явно детерминированной вселенной<sup>2</sup>:

Прирожденное творческое начало может основываться на хаотическом процессе, который селективно усиливает малые флуктуации и переплавляет их в макроскопические взаимосвязанные ментальные состояния, переживаемые на опыте как мысли. В некоторых случаях эти мысли могут быть решениями, или тем, что воспринимается как применение воли. В свете этого хаос предоставляет собой механизм, создающий условия для свободной воли внутри мира, управляемого законами детерминизма.

К числу множества других теорий о связи разума и тела относится картезианский дуализм, согласно которому внешний независимо существующий разум или душа осуществляют мистическое воздействие на мозг, чтобы заставить его подчиняться воле. Далее, существует психофизический параллелизм, допускающий существование ментальных событий, но связывающий их исключительно с физическими событиями в мозге и отказывающий им в какой-либо обуславливающей способности. Есть также некий функционализм, проводящий аналогию между ментальными событиями и компьютерными программами. Еще одна идея – это

<sup>2</sup> Crutchfield et al., op. cit., p. 49.



панпсихизм, приписывающий всему некую форму сознания. Его поддерживал Тейяр де Шарден, а в последнее время – физик Фриман Дайсон, он пишет<sup>3</sup>:

Я думаю, наше сознание – это не только пассивный эпифеномен, вовлеченный в движение химическими событиями в нашем мозге, но и активный фактор, принуждающий молекулярные соединения выбирать между тем или иным квантовым состоянием. Другими словами, разум присущ уже каждому электрону...

Я не желаю рассматривать здесь все эти многочисленные спорные теории. Моя задача состоит в том, чтобы подтвердить реальность ментальных событий и показать, как они согласуются с заглавной темой этой книги – каждый новый уровень организации и сложности в природе требует собственных законов и принципов.

В этом отношении меня очень вдохновила работа нобелевского лауреата Р. У. Сперри, который провел несколько завораживающих экспериментов над больными с «расщепленным мозгом». Это пациенты, у которых правое и левое полушария мозга отделены друг от друга хирургическим путем по медицинским соображениям. В результате этих экспериментов он отказывается от редукционистских методов при объяснении ментальных явлений и вместо этого утверждает о существовании чего-то, подобного нисходящей причинности (в научной терминологии это называется эмерджентным интеракционизмом).

Сперри рассматривает ментальные события как<sup>4</sup> «холистические конфигурационные свойства, которые еще только предстоит открыть», но которые будут «отличаться и превосходить нейронные события, из которых они состоят... Они представляют собой производные этих событий». Он поддерживает идею о том, что единицы более высокого уровня обладают собственными законами и принципами, которые нельзя свести до законов более низкого уровня:

Эти крупные ментальные события представляют собой объекты с собственной динамикой и присущими им свойствами, которые причинно обуславливают их взаимодействия. Свойства этих систем высшего уровня заменяют собой свойства разнообразных подсистем, представляемых ими.

<sup>3</sup> Freeman Dyson, *Disturbing the Universe* (New York, Harper & Row, 1979), p. 249.

<sup>4</sup> R. W. Sperry 'Mental phenomena as causal determinants in brain function', в: *Gordon Globus, Grover Maxwell and Irwin Sabotnik* (eds.), *Consciousness and the Brain* (New York and London), p. 166.

Таким образом, ментальным событиям приписывается способность выступать в качестве причины; они могут заставить нечто произойти.

Тогда как Сперри объясняет мирное сосуществование законов высшего и низшего уровней, когда один набор управляет нейронными паттернами (холистическими конфигурационными свойствами), а другой – атомами, составляющими нейроны? Он открыто заявляет<sup>5</sup>, что «ментальные силы или свойства оказывают регулятивно-контролирующее воздействие на физиологию мозга». Другими словами, разум (или коллективный паттерн нейронной активности) каким-то образом производит силы, действующие на материю (нейроны). Тем не менее Сперри спешит подчеркнуть: данный пример нисходящей причинности ни в коей мере не нарушает законов низшего уровня.

Как это достигается?<sup>6</sup>

Понять то, как устроен контроль ментальных явлений над физиологией мозга, очень просто, если обратиться к управляющей последовательности, относящейся к иерархии причинной обусловленности в мозге. Легко увидеть, что силы, действующие на субатомном и субъядерном уровнях внутри клеток мозга, ограничены рамками молекул и замещаются окружающими их конфигурационными свойствами молекул мозга, в которые встроены субатомные элементы.

Сперри говорит о том, что единицы с низших уровней оказываются «пойманы» холистическим паттерном, так же как капля воды оказывается поймана водоворотом и вынуждена делать собственный вклад в организованную совместную деятельность.

Главное в позиции Сперри – это то, что обуславливающий фактор может быть разным на разных уровнях сложности, и более того, причинность может действовать одновременно на разных уровнях и между уровнями без каких-либо противоречий. Так, одни мысли могут вызвать другие мысли, а движение электронов в мозге может заставить двигаться другие электроны. Но последнее не может полностью объяснить первое, даже если является основным его элементом<sup>7</sup>:

---

<sup>5</sup> Ibid., p. 165.

<sup>6</sup> Ibid., p. 167.

<sup>7</sup> Roger Sperry, *Science and Moral Priority* (New York, Columbia University Press, 1983), p. 92.

Сознательные явления – это эмергентные функциональные свойства мозговой обработки, которые осуществляют функцию активного контроля в качестве причины, обуславливающей формирование режимов протекания возбуждения в мозге. Появившись из нейронных событий, ментальные паттерны и программы более высокого уровня обладают собственными субъективными качествами и развиваются, работают и взаимодействуют по своим собственным причинным законам и принципам, которые отличаются от нейрофизиологических закономерностей и не могут быть сведены к ним... Ментальные силы не нарушают нейронную активность, не производят возмущений и не вмешиваются в ее работу, однако следуют из нее... Многоуровневая и межуровневая обусловленность играет важную роль, наряду с одноуровневой последовательной обусловленностью, с которой мы обычно сталкиваемся.

Хотя физики обычно с ужасом реагируют на такие идеи, все же кажется, что специалисты по вычислительной технике, искусственному интеллекту и нейронным сетям готовы принять их с распростертыми объятиями. Дональд Маккей, профессор коммуникации и нейронных сетей в Университете Киля, тоже согласен с тем, что причинность может работать по-разному на разных уровнях. Он отмечает, что происходит

расширение наших представлений о причинности, вызванное развитием теории информации и управления. В информационной системе мы можем узнать «информационную» обусловленность как нечто качественно отличное от физической причинности, сосуществующее с последней и настолько же эффективное. Грубо говоря, если в классической физике обусловленность одной силы другой требует энергопотока, то с позиций информационной теории обусловленность одной формы другой требует потока информации. Оба столь отличны друг от друга, что для притока информации из А в Б может потребоваться отток энергии из Б в А; тем не менее, они полностью взаимозависимы и комплементарны: один процесс воплощается в другом<sup>8</sup>.

Марвин Мински, американский исследователь, занимающийся искусственным интеллектом, пишет<sup>9</sup>:

Многие ученые рассматривают химию и физику как идеальные модели того, как должна выглядеть психология. В конце концов, атомы в мозге подчиняются тем же комплексным законам, управляющим любой другой формой материи. Тогда можем ли мы объяснить то, что на самом деле делает наш мозг полностью на языке тех самых основных принципов? Ответ «нет», просто потому, что даже если мы поймем, как работает каждая из миллиардов клеток нашего мозга по отдельности, это не объяснит нам работу мозга в качестве отдельного органа. «Законы мышления» зависят не только от свойств тех самых мозговых клеток, но и от того, как они связаны. А эти связи устанавливаются не только посредством основных, «общих»

<sup>8</sup> D. M. MacKey, *Nature*, 232, 1986, p. 679.

<sup>9</sup> Marvin Minsky, *The Society of Mind* (New York, Simon & Schuster, 1987), p. 26.

законов физики, но и за счет особенностей размещения миллионов битов информации в унаследованных нами генах. Конечно, «общие» законы применимы ко всему. Но именно по этой причине они едва ли способны объяснить что-то в частности.

Означает ли это, что психологии следует отвергнуть законы физики и найти свои собственные? Конечно, нет. Дело не в *новых* законах, а в *дополнительных* видах теорий и принципов, которые действуют на более высоком уровне организации.

Мински отстаивает важное положение: мозг, так же как и компьютер, – это система с *ограничениями*. Его разрешенная динамическая активность зависит как от законов физики, *так* и от организации «проводки». Именно наличие ограничений – которые невозможно вывести из законов физики, поскольку они относятся к *особым* системам, – делает возможным осуществление законов и принципов на более высоком уровне. Например, компьютер можно запрограммировать так, чтобы играть на экране в шахматы или другую игру. Правила игры определяются «законами», согласно которым изображения перемещаются по экрану; то есть они устанавливают зачаточную динамику для объектов более высокого уровня («шахматных фигур»). Конечно же, нет никакого противоречия между законами шахмат, которым подчиняются изображения, и основными законами физики, которые в конечном итоге управляют электронами в сетях и их столкновением на экране.

Эти и другие соображения убедили меня в том, что существуют новые процессы, законы и принципы, вступающие в действие на пороге умственной деятельности. Я не верю, что поведение, не говоря уже о психологии, можно в конечном итоге свести к физике частиц. Мне кажется нелепым предположение о том, что миграционные повадки птиц, и тем более мои личные ощущения и эмоции, каким-то образом содержатся в фундаментальной функции Лагранжа для теории суперструн или чего бы там ни было.

Я также полагаю, что нам не удастся полностью понять процессы, происходящие на нижних уровнях, до тех пор, пока мы не поймем законы высших уровней. Такие вопросы, как коллапс волновой функции в квантовой механике, от которых зависит состоятельность физики частиц, по-видимому, требует учета наблюдателя как фундаментального принципа. Я считаю, что наблюдение в квантовой механике в конечном итоге потребует

связать с законами высших уровней, управляющими ментальными событиями, с которыми микроскопические события связываются посредством акта наблюдения.

В конце данного раздела я процитирую специалиста по физической химии Майкла Поланьи, высказывающего похожие мысли<sup>10</sup>:

Подтверждение нередуцируемых принципов, дополняющих закономерности морфологических механизмов, содержится в способности ощущать, переживаемой нами на собственном опыте и косвенно наблюдаемой у высших животных. Большинство биологов оставляет в стороне эти вопросы, считая их невыгодными сообщениями. Но снова, если признать, на других основаниях, что жизнь превосходит физику и химию, то более не остается причины откладывать признание очевидного факта, что сознание – это принцип, который коренным образом превосходит не только физику и химию, но и механистические принципы живых существ.

## За пределами сознания

Ментальные события представляют не только вершину организации и сложного в природе. Существует еще один порог, который нужно преодолеть, в мире культуры социальных институтов, произведений искусства, религии, научных теорий, литературы и тому подобного. Эти абстрактные сущности превосходят ментальный опыт отдельных людей и представляют коллективные достижения человеческого общества в целом. Поппер назвал их сущностями «Мира 3» – в Мире 1 это материальные объекты, а в Мире 2 – ментальные события.

Важно понимать, что существование социальной организации – привносящей вместе с собой нередуцируемые законы и принципы – не зависит от ментальных событий. Многие насекомые организованы в развитые сообщества и, как считается, даже отдаленно не сознают этого. Но человеческое общество, независимо от своего биологического происхождения, эволюционировало до уровня, на котором оно формируется и управляется сознательными решениями, и это создало Мир 3.

Можно ли Мир 3 свести к Миру 2 и даже к Миру 1? Я не вижу, как такое возможно, ведь сущности Мира 3 обладают собственными логическими и структурными взаимосвязями, которые превосходят свойства отдельных человеческих существ. Возьмем, к

<sup>10</sup> Michael Polanyi, 'Life's irreducible structure', Science, 1986, p. 1308.

примеру, математику. Свойства действительных чисел значительно превосходят наш коллективный опыт в области арифметики. Существуют теоремы, касающиеся чисел, неизвестных кому-либо из живущих сегодня, и тем не менее они верны. В музыке концерт обладает собственной внутренней организацией и единством, независимо от того, слушает ли кто-либо, как его исполняют. Более того, некоторые сущности Мира 3, например банк данных о преступниках или сведения о валютных рынках, никоим образом не могут быть усвоены одним человеком, и тем не менее они существуют.

Системы Мира 3 обладают собственным динамическим поведением. Принципы экономики, хотя и довольно грубые в некоторых случаях, невозможно свести к физическим законам. Сущности Мира 3 явно обладают собственной способностью быть причиной чего-либо. Обвал фондового рынка можно вполне объяснить сменой правительства – другим событием Мира 3. Трудно понять, как причинная связь такого рода может быть когда-либо выведена из причинных процессов в атоме.

И снова мы встречаемся с многочисленными примерами нисходящей причинности, когда сущности Мира 3 можно считать ответственными за изменения в Мирах 2 и 1. Так, художественная традиция может вдохновить скульптора на придание камню определенной формы. В данном случае мысли скульптора и расположение атомов в скале определяются абстрактной сущностью Мира 3 под названием «художественная традиция». Сходным образом новая математическая теорема или научная теория могут побудить ученого провести ранее не планировавшийся эксперимент.

В Мире 3 мы также достигаем конца цепочки взаимодействий, рассмотренной в главе 12 в связи с проблемой квантовых измерений, поскольку именно здесь мы достигаем понятия *значение*. Уилер использует определение норвежского философа Д. Фоллесдала: значение – это совокупная производная всех данных, доступных участникам коммуникации. Следовательно, это коллективное и культурное свойство. На самом деле, нам следует рассматривать любой вид научной оценки как часть культурного проекта, поскольку она всегда производится в контексте научной теории или, по крайней мере, в неких концептуальных рамках, взятых у сообщества как целого.

Начав с фундаментальных субатомных единиц, мы изучили, как развивается организованность и сложность при продвижении вверх – через неживые состояния материи, живые организмы, мозг, разум и социальные системы – к Миру 3. Является ли это концом восходящей лестницы? Есть ли что-либо за ее пределами?

Конечно, многие люди верят, что нечто есть и за этим пределом. Приверженцы религиозных убеждений рассматривают человека и его культуру как относительно низкое проявление реальности. Некоторые высказывают догадки о более высоких уровнях организующей силы и даже о нисходящей обусловленности «сверху», формирующей события Миров 1, 2 и 3. В этом контексте можно рассматривать саму природу, в том числе ее законы, как выражение высшего организующего принципа.

Если опуститься ниже этого космического уровня, по-прежнему существует множество взглядов, помещающих разум отдельного человека лишь на пути вверх по организационной лестнице. Теория Юнга о коллективном бессознательном, например, рассматривает разум отдельного человека только как одну из составляющих общего культурного опыта, из которого он может заимствовать. В мистических воззрениях, таких как астрология, сходным образом разум индивида считается подчиненным всеобщей гармонии и организованности, отраженной в астрономических событиях. Тем, кто верит в судьбу или фатум, также необходим высший организующий принцип, придающий форму человеческому опыту в соответствии с некоей телеологической данностью.

Наконец, существует огромное множество людей, оправдывающих собственную веру в так называемое паранормальное идеями, подобными тем, что были изложены мной в этой книге. Такие сомнительные явления, как экстрасенсорное восприятие, телепатия, предвидение и психокинез, они считают подтверждением существования организационных принципов, выходящих за пределы разума отдельного человека и допускают нисходящую обусловленность материи разумом, часто при явном нарушении законов физики.

На этот счет я хотел бы сказать только то, что одно дело – выявлять ограниченность редуccionизма, и совсем другое – использовать эти ограничения по принципу «теперь все можно». Воз-

можно, однажды паранормальные явления станут нормальными или в конце концов будут отвергнуты как безосновательные. Как бы то ни было, решение следует принимать исходя из надежных научных критериев, а не огульно отрицать неудобную парадигму.

Если оставить в стороне подобные религиозные и спекулятивные представления, в некотором смысле человеческий разум и общество все же могут представлять лишь промежуточную ступень на лестнице организационного процесса в космосе. Если говорить словами Луизы Янг, вселенная до сих пор «не завершена». Мы живем в эпоху, отстоящую всего лишь на несколько миллиардов лет от времени творения. Судя по данным, получаемым из исследования астрономических процессов, вселенная будет пригодна для жизни на протяжении триллионов лет, а может быть, и всегда. Тепловая смерть вселенной – концепция, преследующая нас повсюду, ничем не угрожает нам в обозримом будущем, а в масштабе человеческого времени она удалена от нас на целую бесконечность.

По мере того, как продукты Мира 3 становятся все более развитыми и сложными (стоит лишь вспомнить о вычислительных системах), появляется возможность, что будет преодолен новый порог сложности, что высвободит еще более высокий уровень организации, с новыми свойствами и законами, присущими только ему. Может появиться коллективная деятельность абстрактного характера, едва доступная нашему воображению и, возможно, даже превосходящая наши понятийные способности. Может случиться даже так, что где-то этот порог уже был преодолен, а мы не узнаем, чем он является в действительности.



## Существует ли план?

### Оптимисты и пессимисты

**Б**ольшинство ученых, работающих над фундаментальными проблемами, испытывают благоговейный трепет перед тонкостью и красотой природы. Но не все из них следуют одинаковому толкованию природы. В то время как некоторые с энтузиазмом верят в неперенное существование смысла, стоящего за бытием, другие рассматривают Вселенную как нечто совершенно бесцельное.

Сама наука не может установить, есть ли смысл у жизни и вселенной, но научные парадигмы могут оказывать серьезное влияние на господствующие идеи. В этой книге я вкратце представил историю новой, зарождающейся парадигмы, способной радикально преобразовать наш способ осмысления вселенной и собственного места в ней. Я убежден, что новая парадигма воплощает в себе более оптимистичную картину для тех, кто ищет смысл бытия. Несомненно, останутся пессимисты, которые не найдут ничего такого в числе последних изменений, что могло бы поколебать их веру в бесцельность вселенной, но им следует, по крайней мере, признать, что в новом способе осмысления мира больше радости.

Темой моего изложения стала наука, в которой на протяжении нескольких столетий господствовала Ньютонова парадигма, рассматривающая вселенную как механизм, в конечном счете сводимый к поведению отдельных частиц, пребывающих под контролем детерминистических сил. Согласно данному воззрению, время – это всего лишь параметр; настоящих изменений или эволюции не происходит – только перестановка частиц. Законы термодинамики вернули понятие потока или изменений, но примирение Ньютоновой и термодинамической парадигм вызвало лишь появление

второго закона, который настаивает, что всякое изменение – часть неумолимого распада и космического вырождения, достигающего пика в тепловой смерти.

В отличие от нее новая парадигма признает, что за счет коллективных и холистических свойств физических систем могут появляться новые непредсказуемые типы поведения, которые остаются за рамками Ньютонова и термодинамического подходов. Появляется возможность *самоорганизации*, когда системы совершают внезапный и спонтанный скачок к более сложным формам. Эти формы характеризуются большей сложностью, слаженным поведением и взаимосвязанностью, появлением пространственных структур и временных ритмов, а также общей непредсказуемостью их конечной формы.

Новые состояния материи требуют нового словаря, включающего такие термины, как рост и приспособление – понятия, больше подходящие для биологии, чем для физики или химии. Таким образом, здесь возникает нечто, напоминающее унификацию. Кроме того, новая парадигма меняет наше представление о времени. Физические системы могут однонаправленно меняться в сторону *прогресса*, а не распада. Вселенная открывается в новом, более впечатляющем радужном свете, разворачивая собственную сущность от примитивного начала и достигая, путем постепенного прогресса, все более сложных и развитых состояний.

## Возрождение холизма

Многие люди, не имеющие отношения к науке, считают как Ньютонову, так и термодинамическую парадигму чрезвычайно удручающими. Они используют слово «редукционизм» как ругательство. Они рассматривают его успехи как знак обесценивания природы, а применительно к наукам о жизни – как нечто, обесценивающее их самих. В недавних телевизионных дебатах, в которых я принимал участие, аудитории предложили выразить мнение о науке и Боге. Разгневанный мужчина горько посетовал: «Ученые утверждают, что когда я говорю своей жене “Я люблю тебя”, происходит не что иное, как взаимодействие одной бессмысленной кучи атомов с другой». Подобная отчаянная убежденность в очевидной бесплодности редукционистского мышления заставила многих

людей обратиться к холизму. Этому, несомненно, значительно поспособствовало возрождение холистического мышления в последнее время, произошедшее в социологии, медицине и физических науках.

Тем не менее было бы серьезной ошибкой полагать, что редукционизм и холизм находятся в непримиримой вражде друг с другом, борясь за наше одобрение. На самом деле эти парадигмы скорее дополняют друг друга, чем вступают в противоречие. В правильно организованном научном поиске всегда находилось место для них обоих, и будет недопустимым упрощением считать одну из них «истинной» или «ложной».

Сторонники холизма должны видеть различие между двумя утверждениями. Первое состоит в том, что при достижении материей и энергией более высоких и сложных состояний *появляются* новые свойства, к которым невозможно применить описания более низкого уровня. В этом случае часто в качестве примеров приводятся жизнь и сознание, которые попросту бессмысленны на уровне, скажем, атомов.

Проще говоря, подобные примеры представляются непроверяемыми фактами бытия. Холизм такого рода можно опровергнуть, только если отрицать реальность существования свойств более высокого уровня, например, утверждая, что сознания на самом деле не существует, или отрицая значимость понятий более высокого уровня, таких как биологический организм. Поскольку я верю, что задача науки заключается в том, чтобы объяснять мир таким, как он предстает перед нами, и поскольку в состав этого мира входят такие сущности, как бактерии, собаки и люди, обладающие собственными отличительными свойствами, то утверждение о том, что эти свойства можно объяснить лишь посредством вынесения их за пределы рассмотрения, представляется мне в лучшем случае уходом от ответа, а в худшем – обманом.

В то же время более противоречиво утверждение о том, что эти свойства более высокого уровня можно объяснить только законами более высокого уровня. Мы уже встречались с этим утверждением, например, когда рассматривали предположение о том, что существуют определенные *биотонические* законы органических систем, а также в идеях диалектического материализма, согласно которому каждый новый уровень развития материи привносит собственные

законы, не сводимые к законам низших уровней. В более общем смысле мы видели возможность существования трех разных типов организующих принципов: слабых, сильных и логических.

Существование логических организующих принципов, по видимому, уже почти не вызывает сомнений, например в связи с хаотическими числами и числами Фейгенбаума. Слабые организующие принципы, в виде обозначения разных граничных условий и общих ограничений, принимаются, по крайней мере, исходя из методологических соображений.

Сильные организующие принципы – дополнительные физические законы, касающиеся свойств сотрудничества и коллективного поведения в сложных системах, которые нельзя вывести из основных существующих законов физики, – по-прежнему привлекательная, но недоказанная идея. Тайна происхождения жизни и прогрессивной природы эволюции укрепляют ощущение, что действуют дополнительные принципы, неким образом «упрощающие» для систем задачу нахождения сложноорганизованных состояний. Однако редукционистская методология большинства научных исследований создает реальную опасность, что подобные принципы, если они существуют, останутся незамеченными в ходе текущих исследований.

## Предопределение

Новая парадигма коренным образом изменит наше восприятие эволюции вселенной. В Ньютоновой парадигме вселенная – это часовой механизм, рабыня детерминистических сил, навсегда пойманная в ловушку предопределенного пути, ведущего к неизменяемому состоянию. Термодинамическая парадигма дает нам вселенную, которая должна начинаться в необычном состоянии порядка, после чего вырождается. Ее судьба практически неизбежна и неизменно плачевна.

В каждой из вышеописанных картин *творение* – это моментальное действие. После исходного события не рождается ничего фундаментально нового. Во вселенной Ньютона атомы лишь занимают новое положение, тогда как в термодинамической картине история вселенной состоит из *потерь*, приводящих к устрашающей близости.

Новая картина развития космоса совсем не такая мрачная. Творение не происходит в одно мгновение; это продолжающийся процесс. Вселенная обладает биографией. Вместо того, чтобы соскользнуть в бескачественное состояние, она поднимается из него и не умирает, а растет, постоянно образуя новые структуры, процессы и возможности, раскрываясь подобно цветку.

Сравнение с цветком предполагает идею о чертеже – предсуществующем плане или проекте, который реализуется вселенной по мере ее развития. Это древняя телеологическая картина космоса, созданная Аристотелем. Возродится ли она в рамках новой парадигмы современной физики?

Важно понимать, что в соответствии с новой парадигмой детерминизм не работает: вселенная по своей сути непредсказуема. У нее и без того есть определенная «свобода выбора», которая существенно противоречит традиционному взгляду на мир. Постоянно возникают обстоятельства, в которых многие возможные пути развития разрешены базовыми законами физики. Таким образом, появляется элемент новизны и творчества, но также и неопределенности.

Это может показаться похожим на космическую анархию. Некоторые люди рады согласиться с этим и позволить вселенной беспрепятственно исследовать собственные возможности. Более приемлема, однако, такая картина, которая предполагает, что «выбор» делается в критические моменты (математики назвали бы их сингулярностями в эволюционных уравнениях), когда в игру могут свободно вступать новые принципы, способствуя развитию состояний постоянно растущей организованности и сложности. В данной картине, с постоянно увеличивающимся количеством каналов, материи и энергии присуще неотъемлемое стремление к самоорганизации, порождающее новые структуры и системы с необычайной действенностью. Снова и снова мы видим примеры того, как организованное поведение неожиданно и спонтанно появляется из основания, не сулившего ничего особенного.

В физике, химии, астрономии, геологии, биологии, вычислительной технике – на самом деле, во всех ветвях науки – проявляется та же самая способность к самоорганизации.

Такую философию биолог Роберт Шапиро называет «предопределенностью», поскольку она допускает, что форма и органи-

зация вещей в настоящем – это неизбежный итог действия законов природы. Я подозреваю, что он использует этот термин в уничтожительном смысле, и мне не нравится присущий ему мистический ореол. Я предпочитаю слово *предрасположенность*.

Кто такие сторонники философии предопределенности?

Говоря в общем, это те, кто не готов принять, что некоторые ключевые качества мира – это всего лишь «случайность» или каприз природы. Так, существование живых организмов не удивит сторонника предопределенности, который верит, что по законам природы материя неизбежно будет выведена на путь усложнения в направлении жизни. В том же смысле существование разумных и сознающих существ также рассматривается как часть прогрессивного развития природы, которое неким образом включено в законы. У сторонника предопределенности не вызовет удивления и то, что жизнь возникла на Земле по истечении столь короткого времени (в геологическом масштабе) после того, как наша планета стала обитаемой. Амбициозный проект поиска разумной жизни в космосе, так умело популяризованный Карлом Саганом, в значительной мере склоняется в сторону предопределенности.

Предопределенность – или предрасположенность – не следует путать с предзаданностью. Вполне возможно, что материя обладает такими свойствами, которые действительно дают ей способность к самоорганизации вплоть до уровня живого, при условии наличия правильных условий. Это не означает, однако, что какая-либо отдельная форма жизни неизбежна. Другими словами, предзаданность (в стиле Ньютоновой парадигмы) означает, что все до последней детали было предустановлено в незапамятные времена. Философия предопределенности лишь предполагает, что природа обладает предрасположенностью к прогрессивному развитию в соответствии с общими направлениями, присущими ей. Поэтому она допускает принципиальную непредсказуемость будущего, возможность реального творчества и бесконечной новизны. В частности, она оставляет место для свободной человеческой воли.

Уверенность в том, что вселенная предрасположена к выработке определенных форм и структур, пользуется чрезвычайной популярностью среди космологов, которым не нравится идея об особых начальных условиях. Было сделано много попыток, чтобы доказать, что некое подобие современной крупномасштабной

структуры вселенной – это неизбежное следствие физических законов, независимо от начальных условий. Сценарий расширяющейся вселенной – одна из таких попыток. Другая – это предположение Пенроуза о том, что начальное состояние вселенной следует из некоего до сих пор неизвестного физического принципа. Третья – попытка Хокинга и его соавторов создать математическое предписание, которое «естественным» образом определит квантовое состояние вселенной<sup>1</sup>.

Также предопределенность или предрасположенность занимает важное место в последних работах о так называемом антропном принципе. Здесь особое внимание уделяется не дополнительным законам или организующим принципам, а физическим константам. Как нам известно из главы 11, величины, принимаемые этими константами, необычайно подходят для последующего появления сложных структур, в особенности живых организмов. И здесь снова обходится без принуждения. Константы не *определяют* последующие структуры, они *способствуют* их появлению.

Предопределенность – это лишь один из способов осмысления мира. Это не научная теория. Однако ее подтверждают те эксперименты, которые показывают, что сложность и организация спонтанным и естественным образом появляются в широком диапазоне условий. Надеюсь, обзор, предложенный в настоящей книге, убедил читателя в наличии неожиданно богатых возможностей для самоорганизации, которые были открыты в позднейших исследованиях.

Также есть надежда, что по-настоящему впечатляющее открытие подтвердит предположение о предопределенности. Если бы жизнь была открыта в другой части вселенной или создана в лабораторной пробирке, это стало бы мощным свидетельством существования созидательных сил, действующих в материи и побуждающих ее к творению жизни; не витальных сил или метафизических принципов, а свойств самоорганизации, которые не содержатся в существующих законах физики или, по крайней мере, не следуют напрямую из них.

<sup>1</sup> J. B. Hartle and S. W. Hawking, 'Wave function of the universe', *Physical Review*, D 28, 1983, p. 2960.

## Что все это значит?

В завершение моей книги я хотел бы вернуться к замечанию, сделанному в начале этой главы. Если принять существование предрасположенности в природе, что тогда следует сказать о значении и цели вселенной?

Многим людям позиция сторонников предопределенности покажется доводом в пользу убеждений, согласно которым на самом деле никакого космического плана нет, что современная природа вещей, в том числе и существование человеческих существ, а может быть даже каждого из них, – это часть изначального плана, разработанного неким всемогущим божеством. Цель этого плана и природа конечного состояния, очевидно, по-прежнему будут зависеть от личных предпочтений.

Другие находят эту идею столь же малопривлекательной, как и детерминизм. План, строго устанавливающий точную судьбу для человека и всего остального, кажется им бессмысленной шарадой. Если конечное состояние – это часть плана, то, спрашивают они, зачем вообще утруждать себя фазой строительства? Всемогущее божество сможет попросту создать конечный продукт в самом начале.

Согласно третьей точке зрения, существует не подробный план, а только набор законов со встроенным механизмом, который позволяет случаться интересным вещам. Тогда вселенная вольна создавать себя по ходу событий. «Предопределен» общий рисунок развития, но не его частности. Так, существование разумной жизни на некотором этапе неизбежно; оно, если можно так выразиться, вписано в законы природы. Но человек как таковой отнюдь не предусмотрен заранее.

Критики философии предопределенности не любят антропоцентризма, к которому она якобы приводит, но условие, согласно которому вселенная должна лишь стать самосознающей на некотором этапе, видится нам крайне слабой формой антропоцентризма. Тем не менее знание о том, что наше присутствие во вселенной представляет собой *фундаментальное*, а не *случайное* свойство бытия, создает, по моему мнению, значительное и удовлетворительное основание для человеческого достоинства.

В этой книге я придерживаюсь мнения, что вселенную можно понять, применив научный метод. Подчеркивая недостатки чисто



редукционистского взгляда на природу, я имел в виду, что пробелы, возникающие из-за несоответствий редукционистского мышления, можно заполнить посредством дополнительных научных теорий, касающихся коллективных и организационных свойств сложных систем, не прибегая к мистическим или трансцендентным принципам. Без сомнения, это разочарует тех, кто утешается неудачами науки и использует любое разногласие в науке как возможность поощрить собственные антинаучные взгляды.

Я приложил большие усилия, чтобы доказать: организационные принципы, необходимые для дополнения физических законов, вероятно, появятся в результате применения новых подходов в исследованиях и новых способов восприятия сложного в природе. Я уверен, что наука в принципе способна объяснить существование сложности и организованности на всех уровнях, включая человеческое сознание, хотя и исключительно путем принятия законов «более высокого уровня». Такую уверенность можно рассматривать как отрицание бога или цели в чудесной творческой вселенной, в которой мы живем.

Я не разделяю такого мнения. Само то, что вселенная *обладает* творческим началом, а ее законы позволяют сложным структурам возникать и развиваться вплоть до сознательного уровня – другими словами, то, что вселенная организовала собственное самосознание – является для меня мощным подтверждением того, что «нечто происходит» за всем этим. Невозможно избавиться от ощущения, что план есть. Возможно, наука объяснит все процессы исходя из развития вселенной в соответствии с ее судьбой, однако и в этом случае остается место для смысла, стоящего за бытием.

# Указатель именной

- Андронов А. А. *xiii*  
Аристотель *5, 111*  
Аррениус Сванте *xiii, 139*  
Барроу Джон *xxiii, 174*  
Бауэр Э. С. *xii*  
Белл Джон *210*  
Бернар Клод *111*  
Больцман Людвиг *16, 19-21, 35, 59, 132*  
Бом Дэвид *184, 185, 201, 208, 209*  
Бонди, Герман *181*  
Бор Нильс *198, 210, 213, 216*  
Ван дер Ваальс *158*  
Вейль Герман *160, 181*  
Вигнер Юджин *173, 201, 202, 211*  
Викрамасингх Чандра *xiv, 128, 139*  
Винер Норберт *175*  
Вольфрам Стивен *76-78*  
Галилей Галилео *153*  
Галлей Эдмунда *9*  
Гейзенберг Вернер *198, 216, 217*  
Гельмгольц Герман *20*  
Голд Томас *181*  
Гюйгенс Христиан *176*  
Дайсон Фримен *228*  
Дарвин Чарльз *xiii, 7, 132, 184*  
Дельбрюк Макс *211*  
Демокрит *x, 6, 14, 117*  
Денбай Кеннет *165*  
Дриш Ганс *113, 114, 170*  
Йордан Паскуаль *211*  
Кантор Георг *69-70, 73*  
Кассини Джованни *70*  
Кауфман Стюарт *135, 177*  
Кестлер Артур *189*  
Кимура Мотоо *132*  
Конвей Джон *78*  
Кох фон, Коха кривая *65, 66*  
Кратчфилд Джеймс *80, 227*  
Крик Френсис *xiii, 115, 139*  
Крутков Ю. А. *xii*  
Кузнецов П. Г. *xii*  
Кэмпбелл Дональд *175*  
Кэрнс-Смит Грэхем *137*  
Лавлок Джеймс *108, 154-155*  
Лаплас Пьер *10, 59*  
Ледерман Леон *13*  
Лоренц Эдвард *58-59*  
Лысенко Трофим *xiv, 141*  
МакКей Дональд *230*  
Максвелл Джеймс Клерк *16, 20-21, 35, 59*

- Мандельброт Бенуа *ix, 64, 68, 70-72*
- Мах Эрнст 182
- Медавар Питер 171-172
- Миллер Стенли 138
- Минский Марвин 130-131
- Моно Жак 20, 112, 117
- Монталенти Джузеппе 172
- Мэйнард-Смит Джон 132
- Нейман Дж. 199, 200, 202, 214
- Ньютон, сэр Исаак *xi, xxiii, 8-15*
- Опарин Александр *xiv, 141, 171*
- Оргел Лесли 136
- Парменид *xi, 2*
- Патти Говард 118, 174-175, 212
- Паули Вольфганг 188
- Пенроуз Роджер *xxiii, 91-93, 160, 161, 180-183, 202, 242*
- Пикок Артур 167, 173
- Планк Макс 136
- Температура 147
- Поланьи Майкл 232
- Поппер, сэр Карл 4, 165, 175, 232
- Пригожин Илья *xiii, 2, 4, 14, 62, 77, 99-107, 140, 183, 188, 208*
- Пуанкаре Анри *xiii, 56, 59*
- Рассел Бертран, лорд 21
- Ренш Бернард 171
- Рихтер Г. *xiii*
- Ричардсон Льюис Фрай 68
- Ричардсон, Ральф 68
- Розен Роберт 89, 185-188, 210, 214  
*см. также ЭПР 209*
- Руденко А. П. *xiv*
- Рюэль Дэвид 72
- Саган Карл 241
- Силк Джозеф 148
- Скотт Вильям 215-216
- Сперри Р. В. 228-229
- Стенгерс Изабелла 4
- Стивенс П. С. 74
- Тейяр де Шарден Пьер 128
- Тимофеев-Ресовский Н. В. *xiv*
- Типлер Франк *xxiii, 174*
- Тициус Дж. Д. 152, 153
- Том Рене 122
- Томпсон д'Арси В. 74
- Торп В. Г. 171
- Тоффлер Элвин 100
- Триттон Дэвид 50
- Тьюринг Алан 78, 105-107
- Тэйкенс Р. 72
- Уилер Джон 206-207
- Улам Станислав 74
- Ури Гарольд 138
- Фейгенбаум Митчелл, числа *xi, 177, 239*
- Фокс Сидни 137
- Форд Джозеф 36, 61, 63
- Фурье Жан 27
- Хаббл Эдвин *xii, xix*
- Хаусдорф Ф. 67-68
- Хойл Фред *xiii, 128-129, 139, 181-192*
- Хокинг Стефен 13, 160-161, 242
- Хопфилд Дж. Дж. 220-222
- Цвитанович Преград 25

- |   |                            |
|---|----------------------------|
| Шапиро Роберт 240                         | Эльзассер Вальтер 173      |
| Шелдрейк Руперт 124, 193-194              | Энгельс Фридрих 21         |
| Шредингер Эрвин 108-201, 211,<br>215, 216 | Эпименид 79                |
| Эддингтон Артур 21, 208                   | Юнг Карл 188-189, 192, 234 |
| Эйген Манфред 136, 140                    | Янг Луиза 4                |
| Эйнштейн Альберт xi-xxi                   | Янч Эрих 4, 140            |

# Указатель тематический

- Автокатализ 100
- Автоматы 73-82, 86, 134  
клеточные 74-79, 135, 218, 275  
самовоспроизводящиеся 74,  
76-79  
игра «Жизнь»
- Алгоритм 29-39, 42, 88  
«промывания мозгов» алгоритм 220
- Аминокислоты 115-116, 137, 138
- Анимизм 7, 128
- Антропоцентризм 7, 243
- Астрология 189, 234
- Атмосфера 16, 58, 134, 156
- Атомизм 6, 117
- Аттракторы 52, 77, 81  
странные 72-73
- Бабочки эффект 58-59
- Белки 115, 116, 137, 138, 213  
Протеиноиды 137  
Протеины 115, 141  
Ферменты 116, 212, 214
- Белоусова-Жаботинского реакция  
xiii, 99-102, 105, 107, 134, 149,  
158, 213
- Бенара нестабильность 95
- Бесконечность 36, 71, 235
- БИНС – био-инфо-нано-системы  
xvi
- Бихевиоризм 227
- Бифуркации 48, 81, 102-105, 122,  
133
- Биология  
биотонии законы 172-174, 186  
как ветвь физики 114, 117-119  
см. также Механицизм,  
Редукционизм  
квантовая физика и  
биология  
молекулярная 115  
см. также РНК, ДНК, белки  
теоретическая 169, 171
- Биосфера 109-111, 124
- Боденуиуса закон 152-153
- Большой взрыв xv, xxi, 144  
«малый взрыв» 151
- Броуновское движение 69
- Вероятность 52, 67, 108-109, 166,  
185
- Видеосвязь 80, 227
- Витализм 112-114, 120, 128  
жизненная сила 113
- Водород 138, 145, 155, 171
- Время 14, 15, 100  
как параметр и как  
изменение 14  
обращение времени 180-182  
путешествия во времени 182  
стрела времени 131-135, 152,  
164, 182
- Вселенная 1-6, 14, 20  
как часовой механизм 8-13,  
59-62, 181, 193  
место человека во вселенной  
243

- как проект 2, 6, 7, 240  
творческая xxiii, 2, 5, 7, 99  
расширяющаяся xii, xviii-xxi,  
144, 179, 151-152, 181, 242  
открытая 63  
прогрессирующая 22-23, 98  
разумная 129  
саморегулирующаяся 102
- Галактика 142
- Галактики xviii, 81, 82, 86, 143, 146,  
157, 158, 161  
образование 158, 159, 181
- Гамильтона функция 215
- Гелий 95
- Генетика 126, 141  
гены 121  
генетическая информация  
111, 115, 120, 124, 136, 170, 177  
ее устойчивость 211  
с.м. также ДНК, РНК  
генетическая программа 224  
генетический код xii, 115  
мутации генетические 125-127,  
129, 130-131, 135, 185, 214
- Гипотеза  
роль глины в происхожде-  
нии жизни 137  
космической цензуры  
(Пенроуз) 182, 183  
инфляционного космоса 151  
множественных вселенных  
201  
панспермии 139
- Гравитация 156, 158  
как источник порядка 156  
и термодинамика 159  
тяготение/гравитация 9-10,  
121-122, 133-137  
и коллапс волновой функции  
202-203  
супергравитация 13
- Дарвинизм/неодарвинизм 125-128
- Двуокись углерода 155
- Демон Лапласа 10, 35
- Диссипативные системы 80, 99,  
101,
- Диссипативные структуры ix, 77,  
81, 96-99, 107, 140
- ДНК 114-116, 121, 123-129, 135-138,  
150, 184, 214, 223, 225
- Дуализм  
картезианский 228  
корпускулярно-волновой 197,  
204  
аппаратно-программный  
204-205, 211
- Жизнь 108-119, 232, 238  
природа жизни 117, 118, 123,  
с.м. также Механицизм,  
Витализм  
квантовая физика и жизнь  
208, 211, 215-217  
под контролем космоса 129
- происхождение 125-131, 135-138,  
241-242 с.м. также Эволюция
- Законы природы 3, 5, 7, 60, 81,  
84, 85, 148, 150, 163, 168, 179-181,  
189, 214  
автомодельности 68  
биотонические 113, 117, 119,  
171-174, 178, 213, 215, 238  
больших чисел 133  
вероятности 127  
микроскопические 183  
психологии 231  
оборудования и программных  
средств 167-169, 187  
сложности и организации xvi,  
82, 167-169, 222, 225, 232, 233,  
237, 242  
высшего и низшего уровня  
166, 233, 235, 238, 244  
физики 9-15, 35, 59, 63, 77, 149,  
152, 167, 170, 172, 173, 177,  
183, 185, 188, 192-193, 196,  
202, 224-227, 231, 240, 241

- см. также* Механика, Термодинамика эволюции 103, 131
- Звезды *xx*, 1, 20, 47, 71, 142, 150, 157, 159  
 скопления 24, 68, 150, 158, 159
- Игра «Жизнь» 78
- Иерархический порядок 164, 167, 170, 174  
 в биологии 170, 172, 184  
 в мозге 229
- Иммунная система 62
- Информация 34, 39, 61, 78, 80, 113, 128  
 количество и качество 88-90  
 в квантовых системах 202, 204-206, 211, 222, 224, 225  
 пространственная 107  
*см. также* Морфогенез термодинамика и информация 128  
*см. также* Генетическая информация
- Квантовая теория 3, 12, 95, 146, 151, 162, 184, 187, 188, 191, 192, 195-217, 228-232  
 волновая функция, коллапс 183, 202-204, 228-231  
 наблюдатель в квантовой механике 174, 199  
 проблема измерения 199-202, 204-207  
*см. также* Жизнь и квантовая механика
- Кислород 134, 138, 154-156, 171
- Клетки 24, 74, 114  
 клеточная дифференцировка 18-21, 124
- Коллективное бессознательное 234
- Компьютеры 12, 37, 47, 61, 67, 71, 75, 78, 82, 87, 90, 107, 169, 174, 205, 206, 222  
 квантовые *xvi*, *xvii*
- Концепции  
 диалектический материализм 238  
*elan vital* 128, 165  
 холизм 208, 237-238  
 Геи 154-156
- Кристаллы 1, 81, 85-87, 90, 96, 109, 150, 176, 194
- Квазикристаллы 90, 92-93
- Лагранжиан, функция Лагранжа 13-14, 169, 187, 215
- Лазеры 95, 107, 175
- Линейность 26-30, 34, 60, 63
- Логика  
 логическая глубина 90  
 логические принципы организации 176-178, 239, 244
- Логистическое уравнение 42
- Локальность 209, 210, 217, 221  
 процедур и правил 75, 76, 123, 183  
 локальное влияние 122, 182
- Материя 24, 83, 118, 140, 142, 146, 147, 150, 157-159, 165, 179, 181, 212, 241  
 активность 83, 101, 174  
 антиматерия 150  
 темная энергия *xix-xxi*
- Машина Тьюринга 78, 87, 90, 107
- Маятник 49-56  
 конический 49  
 удвоение периода 55-72, 81, 97-105
- Механика ньютоновская 8, 10, 11, 13, 59, 96, 162, 164, 167, 169, 183, 186, 195, 197  
 статистическая 19, 35, 76  
 кинетическая теория газов

- Механизм 6, 8, 10, 59, 78, 107, 118, 127, 212, 243
- Миграция птиц 225
- Мир 1-2-3 232-235  
с.м. также Поппер
- Моделирование  
атмосферы 58-62, 138, 156  
реакции-диффузии 80, 105  
Видеосвязь обратная 79-82  
модели нейронных сетей 219-225  
компьютерное 25, 61, 62, 69, 90
- Мозг 82, 218-235  
механизмы работы 223-224  
мозг как система с ограничениями 231  
расщепленный мозг (опыты Сперри) 228
- Морфогенез 80, 107, 119-125, 149, 213, 224  
механизмы морфогенеза 121, 123  
развитие эмбриона 113, 120, 122, 124, 149, 163, 193  
модель реакции-диффузии 80, 105  
поле морфогенетическое *xiii*, 123-124, 193-194  
с.м. также Морфический резонанс
- Нейроны 218, 219-229
- Нейронные сети *xvii*, 219-225, 230  
алгоритм «промыывания мозгов» 220
- Нелинейность 26, 27, 43, 50, 53, 54, 58, 73, 80, 81, 100, 119, 177, 219
- Нелокальность 93, 180, 183, 124  
и некаузальность 180  
в квантовой физике 192, 209  
в живых системах 212, 213  
кореляции 217
- Необратимость 15, 17, 152, 180, 183, 184, 207
- в клеточных автоматах 77, 135  
при квантовом измерении 203, 204-206, 208, 211  
с.м. также Энтропия, Второй закон термодинамики
- Неравновесность 96, 110, 183  
неравновесная эргодичность 38  
как причина порядка 96, 140, 184  
с.м. также «Устойчивого неравновесия принцип»
- Нисходящая каузальность 175
- Ньютоновская и не ньютоновская физика 20, 24, 59, 63, 125, 163, 183, 192, 196, 236-237, 241
- Обратимость 77, 132, 187
- Обратная связь 220
- Озон 155
- Организмы 1, 5-7, 81, 85, 88, 108-114, 118-139, 155, 163, 170-174, 185, 194, 202  
как машины 78, 107  
микроорганизмы 62, 129  
поведение 223-227  
с точки зрения физики 211-216  
в космосе 129  
с.м. также Рост, Морфогенез
- Осциллятор 175-176  
с.м. также Маятник
- Панпсихизм 228
- Паранормальные явления 234
- Планеты 9-10, 53-4, 128, 129-31  
Земля 154-156  
Юпитер 62  
Сатурн 70, 73, 153-155
- Популяционная динамика 41-49, 55
- Порядок и беспорядок 3-7, 208  
порядок из хаоса 102, 107, 184  
космический 157, 179  
беспорядок с.м. хаос
- Предопределенность 243



- Принцип**  
 антропный сильный 193, 237, 239, 242  
 возрастания энтропии  
*см.* Энтропия  
 дополнительности Бора 198  
 космологический 143, 144, 179  
 неопределенности Гейзенберга 196  
 организационный *xxii*, 77, 81  
 автомодельного масштабирования 70  
 Маха 182  
 Паули 189  
 холистический 134  
 «устойчивого неравновесия»  
 (Э. Бауэра) *xii*
- Причинность** 187, 189, 204, 206-208, 212, 229  
 акаузальные события 189  
 детерминизм 32-39, 59, 62, 75, 83, 164, 187, 220, 227, 237-239, 243  
 детерминированный хаос 42-49, 84  
 информационная причинность 188, 230  
 индетерминизм 3, 113, 168, 196-197  
 нисходящая 174, 175, 204-208, 212  
 на разных уровнях 229, 230  
 опережающая причинность 206  
 эмерджентное взаимодействие 228  
 финализм 165  
*см. также* телеология
- Пространство-время**  
 возникновение 144, 151  
 мировая линия 189-190  
 сингулярность 183  
 10-мерное пространство 147
- Психофизическая проблема**  
*см.* Сознание
- Равновесие** 15-20, 44-45, 52, 76, 81, 87, 104, 105, 140, 157, 221  
 термодинамическое 15-17, 19, 20, 87, 95, 96, 98, 100-103, 167
- Размерность** 68, 70, 72, 171  
 Хаусдорфа 68
- Разум** *xiv*, *xv*, 10, 63, 81, 129, 174, 227, 234, 235, 241, 243  
*см. также* Сознание
- Резонанс** 153, 176  
 в Солнечной системе 153  
 морфический 193, 194  
*см. также* Шелдрейк
- Рибосомы** 116
- РНК** 115, 116, 136, 137
- Редукционизм** 6-7, 12, 25, 100, 138-140, 143-144, 164, 198
- Рост** 74, 75, 80, 132-134, 183, 237  
 организма 112, 120, 122
- Самоорганизация** 76, 79-107, 122, 134-136, 140, 141, 153, 159, 161, 163, 176-181, 218-223, 237, 240, 241  
*см. также* Эволюция, Гравитация, Нейронные сети, Фазовые переходы, Обратная связь
- Саморегуляция космоса** 152, 154, 156, 181
- Сверхпроводимость** 94
- Свобода воли** 4, 10, 103
- Свободная энергия** 20
- Степени свободы** 28, 50, 52, 99
- Синхронность событий** 160-163
- Силы** 1-6, 8-11, 26-28, 35, 49, 52-56, 61, 93, 98, 111, 113, 117-119, 128, 168, 221, 234  
 межмолекулярные 100, 113, 117, 158  
 фундаментальные 146-150, 162-163 *см. также* Гравитация  
 «Сверхсила» *ix*, 146
- Симметрия** 14, 24, 90-93, 96, 101, 148-151  
 калибровочная 149  
 нарушение 14, 101, 104, 122,

- 150, 152, 181, 183, 184  
См. также Кристаллы
- Системы 10-16, 24-26, 47, 59-63, 72-82, 84, 86-90, 95-115, 119, 122, 127, 151-158, 169-176, 184-188, 219-225  
линейные и нелинейные 26-28  
Марковские системы 76  
открытые/закрытые системы 97, 102, 122, 140, 167, 186  
системы с ограничениями 176, 231  
социальные 228  
см. также Диссипативные системы, Жизнь, Квантовая механика, Хаос
- Сложность ix, xiv-xxiii, 1-3, 7, 22-28, 34, 59, 64, 84, 85, 107, 131, 150, 162, 218, 237  
алгоритмов 37, 39, 62, 63, 88, 207  
в динамических системах 71-79  
живых организмов 109, 112, 114, 117, 119, 134  
законы 176-181, 225-228  
возрастание 167, 240
- Случайность  
Законы см. также вероятностный хаос псевдослучайность
- Сновидения  
dreams 186 сновидения
- Сознание 174, 177, 193, 201-202, 208, 217, 218, 225, 228, 232, 238, 244  
взаимодействие тела и сознания 174, 201, 218-235
- Солнце 20, 152, 155, 157
- Струны 27, 143, 147, 163  
суперструны 231
- Творение 1-5, 7, 148, 162, 179, 239  
творение из ничего 2-5  
непрерывное творение 152, 165
- Творчество 165, 240, 244  
в природе 83-84, 128, 165, 177, 189, 227
- творческая вселенная 7, 35, 96, 99, 128
- Телеономия 111-113, 117, 120, 125, 131, 156, 165, 170, 174, 193, 195, 225, 240
- Температура  
черных дыр 136  
Земли 131-132
- Тензор, кривизна 160, 181
- Теория  
сложности алгоритмов 38, 62  
самовоспроизводящихся автоматов 79  
кинетическая теория газов 16  
катастроф 122, 177  
квантов см. Квантовая теория всего 162  
игр 74  
организации 162  
твердого тела  
относительности 163, 180, 196, 210  
формы 96  
хаоса см. Хаос  
эволюции см. Эволюция
- Тепловая смерть вселенной 20-21, 171, 208, 236, 237
- Термодинамика 88, 98, 99, 133, 157  
второй закон термодинамики 15-16, 20-22, 88, 171, 177, 180, 208  
и гравитация 160  
и организмы 20, 95, 113, 133
- Турбулентность xxii, 62, 72-73, 84
- Углерод 137
- Ультрафиолетовое излучение 155
- Универсальный конструктор 115
- Фазовая диаграмма 51-57
- Фазовые переходы 93-94
- Ферромагнетизм 94-97, 99
- Физика ньютоновская и не ньютоновская 20, 24, 59, 63, 125, 163, 183, 192, 196, 236-237, 241

- Финализм 6, 7, 117, 165  
 Фракталы 69, 72, 240  
 Флуктуации 102-105, 133, 146, 151, 184, 227  
 Хаос *xvi*, *xxii*, 4, 40-63, 65, 72, 73, 76, 77, 80, 84, 85, 89, 96, 98, 101, 119, 133, 148, 180  
     *См. также* Порядок из хаоса, детерминированный хаос  
 Цель 7, 12, 82, 89, 90, 111-113, 133, 166, 179, 243  
 Эволюция биологическая 7, 109, 111, 124-138, 165 (новизна), 172, 185, 202, 217, 239  
     механизмы эволюции 126, 132, 134  
     гомеобокс 121  
     гиперциклы 137, 140  
     естественный отбор *xiii*, 108, 125, 126, 129-135, 141, 172, 173, 177, 189, 214  
     дарвинизм 7, 125-126, 129, 131  
     неодарвинизм 126, 129-132, 184  
     точка Омега 128  
     *см. также* Тейяр де Шарден  
 Эйнштейна-Подольского-Розена (ЭПР) эксперимент 209-212  
 Электромагнетизм 146, 168-170  
 Элементарные частицы  
     лептоны 147  
     кварки 147, 150  
     мюоны 147  
     электроны 27, 94, 109, 147, 150, 192, 197-200, 204-209, 213, 226, 228-231  
     протоны 145, 147, 150, 192  
     нейтроны 145, 147, 150  
     нейтрино 147  
     фотоны 147, 175,  
 Эмерджентность 228, 230  
 Энтелехия 113-114  
 Энтропия 15, 16, 77, 128, 133, 151  
     в космических процессах 151, 159-161, 181  
     рост энтропии 16, 133, 152  
     уменьшение энтропии *xii*, 180  
     *см. также* Второе начало термодинамики 133  
 Черные дыры 159-161  
 Числа 30, 35-37, 67, 193, 239  
     комплексные 71  
     иррациональные 36, 38  
     магические 47-49, 57  
     случайные 86-87  
 Шум 128

Формат 60x90/16. Бумага офсетная.  
Печать офсетная. Усл.-печ. л. 18.  
Тираж 1000 экз. Заказ № 5586.

Отпечатано в полном соответствии с качеством  
предоставленных материалов в ОАО «Дом печати — ВЯТКА».  
610033, г. Киров, ул. Московская, 122.  
Факс: (8332) 53-53-80, 62-10-36  
<http://www.gipp.kirov.ru>  
e-mail: [pto@gipp.kirov.ru](mailto:pto@gipp.kirov.ru)

Книга известного физика-теоретика и популяризатора науки Пола Дэвиса адресована читателю, интересующемуся серьезными мировоззренческими вопросами, важнейшим из которых является понимание роли и места человека во вселенной. Область исследований Дэвиса необычайно широка. Он занимается проблемами происхождения и эволюции вселенной, включая происхождение жизни и сознания, черными дырами, природой времени и квантовой теорией поля. В данной книге автором найдено определенное концептуальное решение этих проблем, по крайней мере, на уровне философской гипотезы...



**Пол Дэвис** — директор Центра фундаментальных исследований научных понятий в Университете Аризоны, лауреат многочисленных научных премий, в том числе Темплтоновской премии (1995) и премии Майкла Фарадея (2002).

ISBN 978589647-254-4



9 785896 472544

ИЗДАТЕЛЬСТВО

[www.standrews.ru](http://www.standrews.ru)