



Стивен Строгац

РИТМ ВСЕЛЕННОЙ

КАК ИЗ ХАОСА
возникает
ПОРЯДОК

От автора бестселлера «Удовольствие от x »

Annotation

В книге Стива Строгаца представлен увлекательный обзор того, как происходит спонтанное упорядочение ритмов в природе. Автор затрагивает широкий спектр научных и математических вопросов, но основное внимание уделяет феномену синхронизации, который наблюдается в свечении светлячков, ритмичном биении сердец, движении планет и астероидов. Используя для иллюстрации своих глубоких идей интересные метафоры и жизненные ситуации, Строгац создал настоящий шедевр, который погружает читателя в восхитительный мир научных открытий.

Книга будет полезна всем, кто интересуется естественными науками и хочет лучше разобраться в устройстве окружающего мира.

На русском языке публикуется впервые.

-
- [Стивен Строгац](#)
 -
 -
 - [Предисловие](#)
 - [Часть I. Жизнь в синхронизме](#)
 - [Глава 1. Светлячки и неизбежность синхронизма](#)
 - [Глава 2. Мозговые волны и условия синхронизма](#)
 - [Глава 3. Сон и ежедневная борьба за синхронизм](#)
 - [Часть II. Открытие синхронизма](#)
 - [Глава 4. Благожелательная Вселенная](#)
 - [Глава 5. Квантовый хор](#)
 - [Глава 6. Мосты](#)
 - [Часть III. Исследование синхронизма](#)
 - [Глава 7. Синхронизированный хаос](#)
 - [Глава 8. Синхронизм в трех измерениях](#)
 - [Глава 9. Сети тесного мира](#)
 - [Глава 10. Гуманитарный аспект синхронизма](#)
 - [Эпилог](#)
 - [Эту книгу хорошо дополняют:](#)
 - [notes](#)
 - [1](#)

- [2](#)
- [3](#)
- [4](#)
- [5](#)
- [6](#)
- [7](#)
- [8](#)
- [9](#)
- [10](#)
- [11](#)
- [12](#)
- [13](#)
- [14](#)
- [15](#)
- [16](#)
- [17](#)
- [18](#)
- [19](#)
- [20](#)
- [21](#)
- [22](#)
- [23](#)
- [24](#)
- [25](#)
- [26](#)
- [27](#)
- [28](#)
- [29](#)
- [30](#)
- [31](#)
- [32](#)
- [33](#)
- [34](#)
- [35](#)
- [36](#)
- [37](#)
- [38](#)

- [39](#)
- [40](#)
- [41](#)
- [42](#)
- [43](#)
- [44](#)
- [45](#)
- [46](#)
- [47](#)
- [48](#)
- [49](#)
- [50](#)
- [51](#)
- [52](#)
- [53](#)
- [54](#)
- [55](#)
- [56](#)
- [57](#)
- [58](#)
- [59](#)
- [60](#)
- [61](#)
- [62](#)
- [63](#)
- [64](#)
- [65](#)
- [66](#)
- [67](#)
- [68](#)
- [69](#)
- [70](#)
- [71](#)
- [72](#)
- [73](#)
- [74](#)
- [75](#)

- [76](#)
- [77](#)
- [78](#)
- [79](#)
- [80](#)
- [81](#)
- [82](#)
- [83](#)
- [84](#)
- [85](#)
- [86](#)
- [87](#)
- [88](#)
- [89](#)
- [90](#)
- [91](#)
- [92](#)
- [93](#)
- [94](#)
- [95](#)
- [96](#)
- [97](#)
- [98](#)
- [99](#)
- [100](#)
- [101](#)
- [102](#)
- [103](#)
- [104](#)
- [105](#)
- [106](#)
- [107](#)
- [108](#)
- [109](#)
- [110](#)
- [111](#)
- [112](#)

- [113](#)
- [114](#)
- [115](#)
- [116](#)
- [117](#)
- [118](#)
- [119](#)
- [120](#)
- [121](#)
- [122](#)
- [123](#)
- [124](#)
- [125](#)
- [126](#)
- [127](#)
- [128](#)
- [129](#)
- [130](#)
- [131](#)
- [132](#)
- [133](#)
- [134](#)
- [135](#)
- [136](#)
- [137](#)
- [138](#)
- [139](#)
- [140](#)
- [141](#)
- [142](#)
- [143](#)
- [144](#)
- [145](#)
- [146](#)
- [147](#)
- [148](#)
- [149](#)

- [150](#)
- [151](#)
- [152](#)
- [153](#)
- [154](#)
- [155](#)
- [156](#)
- [157](#)
- [158](#)
- [159](#)
- [160](#)
- [161](#)
- [162](#)
- [163](#)
- [164](#)
- [165](#)
- [166](#)
- [167](#)
- [168](#)
- [169](#)
- [170](#)
- [171](#)
- [172](#)
- [173](#)
- [174](#)
- [175](#)
- [176](#)
- [177](#)
- [178](#)
- [179](#)
- [180](#)
- [181](#)
- [182](#)
- [183](#)
- [184](#)
- [185](#)
- [186](#)

- [187](#)
- [188](#)
- [189](#)
- [190](#)
- [191](#)
- [192](#)
- [193](#)
- [194](#)
- [195](#)
- [196](#)
- [197](#)
- [198](#)
- [199](#)
- [200](#)
- [201](#)
- [202](#)
- [203](#)
- [204](#)
- [205](#)
- [206](#)
- [207](#)
- [208](#)
- [209](#)
- [210](#)
- [211](#)
- [212](#)
- [213](#)
- [214](#)
- [215](#)
- [216](#)
- [217](#)
- [218](#)
- [219](#)
- [220](#)
- [221](#)
- [222](#)
- [223](#)

- [224](#)
- [225](#)
- [226](#)
- [227](#)
- [228](#)
- [229](#)
- [230](#)
- [231](#)
- [232](#)
- [233](#)
- [234](#)
- [235](#)
- [236](#)
- [237](#)
- [238](#)
- [239](#)
- [240](#)
- [241](#)
- [242](#)
- [243](#)
- [244](#)
- [245](#)
- [246](#)
- [247](#)
- [248](#)
- [249](#)
- [250](#)
- [251](#)
- [252](#)
- [253](#)
- [254](#)
- [255](#)
- [256](#)
- [257](#)
- [258](#)
- [259](#)
- [260](#)

- [261](#)
 - [262](#)
 - [263](#)
 - [264](#)
 - [265](#)
 - [266](#)
 - [267](#)
 - [268](#)
 - [269](#)
 - [270](#)
 - [271](#)
 - [272](#)
 - [273](#)
 - [274](#)
 - [275](#)
 - [276](#)
 - [277](#)
 - [278](#)
 - [279](#)
 - [280](#)
 - [281](#)
 - [282](#)
 - [283](#)
 - [284](#)
 - [285](#)
 - [286](#)
 - [287](#)
 - [288](#)
 - [289](#)
 - [290](#)
 - [291](#)
 - [292](#)
 - [293](#)
-

Стивен Строгац

Ритм Вселенной. Как из хаоса возникает порядок

Научный редактор Александр Минько

* * *

*Посвящается Арту Уинфри, наставнику,
источнику вдохновения и другу*

Предисловие

В сердце Вселенной ощущается постоянное, неуклонное биение: звучание синхронизированных циклических процессов. Это биение буквально пропитывает природу на всех уровнях, начиная с атомного ядра и заканчивая космосом. Каждый вечер вдоль приливных рек Малайзии тысячи светлячков собираются в мангровых лесах и мерцают в унисон, причем в их среде нет какого-либо лидера или внешнего источника, который задавал бы ритм этого мерцания. Триллионы электронов маршируют в ногу в сверхпроводнике, обеспечивая совершенно беспрепятственное прохождение тока по нему: сопротивление сверхпроводника оказывается равным нулю. В Солнечной системе гравитационный синхронизм может приводить к выбрасыванию огромных валунов из пояса астероидов в направлении Земли: считается, что катастрофическое столкновение одного такого метеорита с Землей погубило динозавров. Даже человеческое тело представляет собой симфонию, поддерживаемую скоординированным срабатыванием тысяч клеток, задающих ритм сокращений сердца человека. В каждом случае эти «подвиги» синхронизма происходят спонтанно, как если бы сама природа проявляла сверхъестественное, необъяснимое стремление к порядку.

С давних пор это явление представляет для ученых неразрешимую загадку: существование спонтанного порядка во Вселенной ставит их в тупик. На первый взгляд, законы термодинамики диктуют обратное: подчиняясь им, природа должна была бы неуклонно деградировать в сторону все большего беспорядка, все большей энтропии. Однако мы наблюдаем вокруг себя множество величественных структур – галактики, клетки, экосистемы, людей, – которым удастся каким-то образом собирать самих себя. Эта загадка не дает покоя научному сообществу и в наши дни.

Лишь в очень немногих ситуациях у нас есть понимание того, каким образом порядок возникает сам по себе. Первой из таких ситуаций был особый вид порядка в *физическом пространстве*, связанный с идеально повторяющимися структурами. Это тот вид порядка, который возникает, когда температура воды опускается ниже точки замерзания и триллионы молекул воды спонтанно образуют

жесткий симметричный кристалл льда. Однако объяснение порядка *во времени* оказалось более проблематичным. Даже простейший вариант, когда одни и те же события наступают одновременно, оказался трудноуловимым. Это тот порядок, который мы называем синхронизмом.

Поначалу может показаться, что здесь, вообще говоря, нечего объяснять. Вы можете договориться со своим приятелем встретиться в ресторане, и если оба вы достаточно пунктуальны, то ваше появление в ресторане будет синхронизированным. Столь же тривиальный вид синхронизма запускается реакцией на какой-либо общий стимул. Стая голубей, напуганных громким звуком из выхлопной трубы автомобиля, поднимется в воздух практически одновременно, причем в течение какого-то времени они могут даже синхронно взмахивать своими крыльями, однако это происходит лишь потому, что все они одинаково реагируют на один и тот же звук. Невозможно ведь подозревать, что голуби каким-то образом договорились между собой о ритме взмахов крыльями; к тому же синхронность их действий пропадает уже спустя несколько секунд после взлета. Другие виды кратковременного синхронизма могут возникать по чистой случайности. Воскресным утром колокола двух разных церквей могут случайно зазвонить в одно и то же время, и этот синхронизм будет поддерживаться в течение какого-то (непродолжительного) времени, после чего они начнут звонить вразнобой. Еще одна возможная ситуация: сидя в своем автомобиле на перекрестке в ожидании разрешающего сигнала светофора, вы можете заметить, что указатель поворота автомобиля, стоящего впереди вас, мигает практически синхронно с указателем поворота вашего автомобиля – и так может продолжаться в течение нескольких секунд. Такой синхронизм является чистой случайностью и его обсуждение не представляет для нас никакого интереса.

Несомненный интерес представляет для нас синхронизм, сохраняющийся длительное время. Когда два события наступают одновременно и этот синхронизм поддерживается в течение долгого времени, то говорить о случайном характере такого синхронизма уже не приходится. Более того, в силу каких-то причин такой непрекращающийся синхронизм доставляет нам, людям, удовольствие. Нам нравится танцевать вместе, петь хором, играть в оркестре. В своей наиболее утонченной форме постоянный синхронизм может

представлять собой поистине захватывающее зрелище, как, например, солдаты, марширующие на воинском параде, или выступления команд на соревнованиях по синхронному плаванию. Ощущение высокого исполнительского мастерства усиливается, когда зрители не знают, каких очередных чудес синхронизма им стоит ожидать в следующий момент времени. Мы интерпретируем постоянный синхронизм как признак кропотливого труда, высокого мастерства, точного планирования и хореографического искусства.

Но когда синхронизм наблюдается между неодушевленными объектами, наподобие электронов или биологических клеток, это кажется почти невероятным. Удивительно наблюдать совместные действия живых существ – тысяч светлячков, стрекочущих в унисон летней ночью, или косяков рыб, совершающих одинаковые элегантные волнообразные движения, – но еще более удивительно видеть скопления неодушевленных объектов, которые сами по себе совершают синхронные действия. Эти явления столь необъяснимы, что кто-то даже отказывается верить в их существование, приписывая их иллюзиям, случайным совпадениям или ошибкам восприятия. Другие же попросту впадают в мистицизм, пытаясь объяснить синхронизм действием сверхъестественных сил космоса.

Буквально до последнего времени изучением синхронизма занимались энтузиасты-одиночки – биологи, физики, математики, астрономы, инженеры и социологи, – каждый из которых замыкался в своей узкой области знаний, действуя по независимым друг от друга (на первый взгляд) направлениям исследования. Мало-помалу на основе фрагментарных представлений, выработанных в этих и других узких дисциплинах, начала формироваться наука о синхронизме. Эта новая наука сосредоточивается на изучении так называемых «связанных осцилляторов». Группы светлячков, планет или клеток-задатчиков ритма представляют собой совокупности осцилляторов – объектов, автоматически совершающих циклические действия, то есть действия, повторяющиеся снова и снова через более или менее регулярные интервалы времени. Светлячки мигают, планеты движутся по определенным орбитам, клетки-задатчики ритма (ритмоводители сердца) срабатывают одновременно. Говорят, что два или большее число осцилляторов связаны между собой, если некий физический или химический процесс позволяет им влиять друг на друга. Светлячки

взаимодействуют между собой с помощью света. Планеты влияют друг на друга посредством силы гравитации. Клетки сердца передают туда и обратно электрические импульсы. Как следует из этих примеров, природа использует каждый доступный ей канал, чтобы предоставить возможность своим осцилляторам взаимодействовать друг с другом. Результатом такого взаимодействия зачастую оказывается синхронизм, при котором все осцилляторы начинают действовать одинаково.

Тем из нас, кто работает в этой зарождающейся области науки, задают примерно одни и те же вопросы. Как именно связанные осцилляторы синхронизируют свои действия – и при каких условиях? Когда такой синхронизм оказывается невозможным, а когда он оказывается неизбежным? Какие другие способы организации могут возникнуть, когда синхронизм пропадает? И какими могут быть практические применения знаний, которые накапливаются в этой области науки?

Эти вопросы волнуют меня на протяжении последних двадцати лет – сначала как выпускника Гарвардского университета, затем как профессора прикладной математики в Массачусетском технологическом институте и Корнельском университете, где я по сей день занимаюсь преподавательской и исследовательской деятельностью в области теории сложности и хаоса. Однако интерес к изучению циклических процессов возник у меня еще раньше, когда в бытность мою студентом-первокурсником меня посетило озарение. Для одного из первых научных экспериментов м-р Ди Курцио вручил каждому из нас по секундомеру и маленькому игрушечному маятнику, который представлял собой хитроумное устройство с выдвижным («телескопическим») стержнем, длину которого можно было пошагово регулировать; это устройство напоминало старые модели подзорных труб, которые вы наверняка видели в фильмах про пиратов. Наша задача заключалась в изменении периода колебаний маятника – времени, которое требуется для совершения одного полного колебания маятника, – и вычислении зависимости периода колебаний маятника от длины стержня, на котором он крепится. Иными словами, нам предстояло выяснить, как поведет себя маятник при удлинении стержня: станет колебаться быстрее, медленнее или период его колебаний останется прежним. Чтобы ответить на этот вопрос, мы «настроили» наши маятники на минимальную длину, измерили период

его колебаний и отобразили результат на листе бумаги, разлинованном в клетку. Затем мы несколько раз повторили эксперимент, каждый раз увеличивая длину стержня на одно деление. Когда я отобразил на листе бумаги четвертую или пятую точку своего будущего графика, я заметил, что он похож на параболическую кривую. Оказалось, что колебания маятника подчиняются параболическому закону. (Что представляет собой парабола, мне было известно из курса алгебры.) Сделав это открытие, я испытал смешанные чувства удивления и страха. На меня снизошло озарение: я узнал о существовании тайного и восхитительного мира, который можно было исследовать лишь математическими методами. Я влюбился в этот мир буквально с первого взгляда; со временем мое восхищение этим миром лишь окрепло.

С тех пор прошло тридцать лет, но я по-прежнему очарован математической природой окружающего нас мира и особенно циклическими процессами, происходящими в нем (например, периодическими колебаниями маятника). Однако меня занимает изучение не столько какого-либо отдельно взятого колебательного процесса, сколько большой совокупности колебательных процессов, происходящих одновременно, то есть изучение упоминавшихся выше связанных осцилляторов. Со временем мне удалось разработать достаточно простые модели, которые, тем не менее, можно использовать для описания очень сложных совокупностей объектов. Разработанные мною идеализированные системы уравнений с достаточной степенью точности моделируют групповое поведение светлячков или сверхпроводников. Я пытаюсь использовать вычислительные методы и компьютеры, чтобы понять, как из хаоса рождается порядок. Эти загадки особенно интересны для меня тем, что являются, образно говоря, передним краем математики. Два связанных осциллятора не представляют собой проблемы: их поведение было изучено еще в начале 1950-х годов. Но когда речь идет о сотнях и тысячах связанных осцилляторов, наука по-прежнему бессильна. Нелинейная динамика систем со столь большим количеством переменных все еще недостижима для нас. Даже наличие суперкомпьютеров не помогает нам описать коллективное поведение гигантских систем осцилляторов.

И все же благодаря объединенным усилиям математиков и физиков всего мира за последнее десятилетие нам удалось описать один специальный случай связанных осцилляторов, что открыло путь к более глубокому пониманию феномена синхронизма. Если предположить, что все осцилляторы в данной группе почти идентичны и что они в одинаковой степени связаны между собой, то их динамика поддается математической трактовке. В частях I и II этой книги я рассказываю о том, как моим коллегам и мне удалось решить этот класс теоретических проблем и *что* означает их решение для синхронизма в реальном мире: в части I – для осцилляторов живой природы (биологические клетки, животные и люди), а затем, в части II, – для осцилляторов неживой природы (маятники, планеты, лазеры и электроны). В части III рассказывается о передних рубежах синхронизма, когда мы отказываемся от использования упрощающих предположений, выдвинутых нами ранее. Эта сфера остается в значительной мере неисследованной и включает ситуации, где место осцилляторов занимают хаотические системы или где они связаны менее симметричными способами со своими соседями в трехмерном пространстве или в сложных сетях, охватывающих огромные территории.

Настоящая книга представляет собой попытку синтезировать значительный объем знаний по этому предмету, которые были накоплены учеными, работавшими в разных дисциплинах, на разных континентах и даже в разных столетиях. Наука, которая пыталась изучить явление синхронизма, основывается на работах ряда выдающихся умов XX столетия, многие из которых известны едва ли не каждому из нас, тогда как другие *должны* быть известны каждому. В их числе такие величайшие физики, как Альберт Эйнштейн, Ричард Фейнман, Брайан Джозефсон и Ёсики Курамото; математики Норберт Винер и Пал Эрдёш; специалист в области социальной психологии Стенли Мильграм; химик Борис Белоусов; теоретик хаоса Эдвард Лоренц; а также биологи Чарльз Чейслер и Артур Уинфри.

Мое имя тоже связано с исследованиями, которые внесли определенный вклад в это новое научное направление. Разумеется, я не питаю никаких иллюзий относительно своего места в истории, но хочу лишь рассказать читателям о том, что представляет собой работа в научной сфере: долгое блуждание впотьмах, непростой путь к научному

открытию, изобилующий ошибками и разочарованиями, радость открытия, превращение студента в начинающего научного работника, а затем и в наставника молодых ученых. Пытаясь донести до самого широкого круга читателей мысль о необычайной важности математики в современной науке, я старался избегать в своей книге математических формул и полагался исключительно на метафоры и образы из повседневной жизни, иллюстрирующие ключевые идеи математики.

Надеюсь, читатели разделят мое восхищение необычайным многообразием синхронизма в окружающем нас мире и способностью математики объяснить его. Синхронизм – не только загадочное, но и восхитительное явление. Загадочное – потому что синхронизм, на первый взгляд, не считается с законами физики (хотя в действительности он базируется на этих законах – зачастую весьма оригинальными способами). С другой стороны, синхронизм приводит меня в восхищение, поскольку он порождает что-то наподобие космического балета – представления, которое разыгрывается на самых разнообразных сценах, начиная с человеческого тела и заканчивая Вселенной в целом. В то же время невозможно переоценить важность синхронизма. Наше базовое понимание синхронизма уже породило такие технологические чудеса, как глобальная система позиционирования, лазер и самые чувствительные в мире детекторы, используемые в медицине без хирургического вмешательства для определения точного местонахождения поврежденных тканей в мозге человека, страдающего эпилепсией; в технике – для поиска мельчайших трещин в крыльях самолета; в геологии – для поиска месторождений нефти, скрывающихся глубоко под землей. Выясняя, что происходит в случае, когда синхронизм нарушается, математики помогают кардиологам найти причину фибрилляции, смертельно опасной аритмии, которая ежегодно уносит жизни сотни тысяч людей – внезапно и без предупреждения, даже тех, кто ранее не жаловался на проблемы с сердцем. И это лишь один пример возможностей, которыми мы сейчас располагаем благодаря нашему растущему, но все еще находящемуся в зачаточном состоянии пониманию синхронизма.

Я глубоко благодарен судьбе за возможность на протяжении всей моей карьеры работать со многими блестящими и творческими умами. Исследования, о которых рассказывается в этой книге, выполнялись в

тесном сотрудничестве с моими консультантами Артом Уинфри, Ричардом Кронауером, Чаком Чейслером и Нэнси Копелл; моими научными сотрудниками Ренни Миролло, Полом Мэтьюзом, Куртом Визенфельдом, Джими Свифтом, Кевином Куомо, Элом Оппенгеймом и Тимом Форрестом; а также моими бывшими студентами Синьей Ватанабе и Дунканом Уоттсом. Благодарю вас за то, что были мне надежными спутниками во время нашего нелегкого путешествия в дебри синхронизма.

Другие ученые помогли улучшить эту книгу. Джек Кауен поделился со мной приятными воспоминаниями о совместной работе с Норбертом Винером в Массачусетском технологическом институте в конце 1950-х годов и познакомил меня с малоизвестной, но глубоко человеческой историей, связанной с открытием двойного спектра. Лу Пекора подробно рассказал мне о том, как вместе с Томом Кэрролом он пришел к открытию синхронизированного хаоса. Джим Торп с присущими ему мудростью и мягким юмором ответил на мои вопросы относительно силовой сетки. Седрик Лангборт любезно перевел для меня письма Гюйгенса о взаимовлиянии часов. Джо Бернс, Эрик Герцог, Крис Лобб, Чарли Маркус, Радж Рой и Джо Такахаси предложили чрезвычайно ценные комментарии к ранним наброскам текста этой книги. Марджи Нельсон с присущим ей сочетанием научного суждения и художественного таланта подготовила иллюстрации. Хочу выразить особую признательность Арту Уинфри за его глубокие и остроумные идеи по поводу синхронизма, а главное – за его поистине героические усилия по прочтению этого манускрипта от корки до корки, несмотря на крайне сложные обстоятельства, которые сопутствовали этому чтению.

Выражаю благодарность Линди Уильямс, Стивену Тайену, Герберту Хьюи, Тому Гиловху и всем остальным моим друзьям, которые заботливо оберегали автора этой книги от невзгод и проблем, навалившихся на него на ранних стадиях подготовки книги к публикации; Карин Дашифф Гилович, которая помогала мне обрести собственный голос; а также Алана Алда – моего незаменимого партнера по сеансам мозгового штурма, который научил меня, как нужно подходить к творческому процессу. (Правда, мне не удалось воспользоваться его советом относительно того, как написать первый

черновой вариант книги за один присест. Может быть, это удастся мне в следующий раз...)

Мои коллеги в Корнельском университете, в частности Ричард Рэнд и заведующий моего отдела Тим Хили, обеспечивали мне моральную поддержку в течение всего изнурительного процесса написания этой книги и были очень внимательны ко мне, когда видели, что мои мысли витают где-то далеко-далеко. Благодарю вас, коллеги, за понимание.

Мои литературные агенты Катинка Мэтсон и Джон Брокман чутко и с огромным энтузиазмом реагировали на каждое мое обращение. Джон предложил мне общее направление этой книги, как только услышал от меня ее описание. Катинка заботливо наставляла меня относительно всех аспектов процесса написания книги, начиная с составления плана и заканчивая публикацией.

Писателю трудно даже мечтать о лучшем издательском коллективе, чем коллектив издательства Hyperion Books. В частности, сотрудница редакции Кайра Гепфорд была неизменно любезна, оптимистично настроена и эффективна. Художественный редактор Фил Роуз придумал запоминающуюся и красивую обложку, которая, на мой взгляд, уловила самую суть синхронизма. Выражаю огромную благодарность своему редактору, Уиллу Швальбе, чей острый глаз, хороший вкус и ощущение структуры улучшили мою книгу во многих отношениях. Его неослабевающий энтузиазм по отношению к данному проекту побуждал меня к энергичным действиям в те моменты, когда это было особенно необходимо.

Хочу также поблагодарить членов своей семьи за их любовь и моральную поддержку, особенно это относится к моему отцу, который всегда был на моей стороне, подбадривал, улыбался и старался вселить в меня оптимизм. Невероятная самоотверженность моей тещи, Ширли Шиффман, дала мне возможность подолгу засиживаться за своей книгой, не чувствуя угрызений совести за то, что не уделяю достаточного внимания моим маленьким дочерям. Благодарю вас, мои крошки: Ли – за то, что, научившись ходить, вернула меня к действительности, и Джоанну – за то, что родилась в самый подходящий момент – не слишком рано и не слишком поздно. Моя жена, Кэрол, проявляла свою любовь всеми доступными ей способами, выслушивая меня, читая мои рукописи, уговаривая и прощая меня,

подсказывая, как нужно писать, в каких случаях следует развить мысль, а в каких – сократить текст. Ее душевная щедрость предоставила мне возможность полностью погрузиться в процесс написания книги.

Наконец, мне хотелось бы поблагодарить граждан Соединенных Штатов за их доверие и дальновидность. Поддерживая американские исследовательские учреждения посредством таких организаций, как Национальный научный фонд, налоги, выплачиваемые гражданами Соединенных Штатов, обеспечивают ученым самое ценное из того, что они могли бы желать, – возможность следовать за своим воображением туда, куда оно только может завести их. Надеюсь, вы получаете такое же удовольствие от наших открытий, какое получаем мы сами.

Часть I. Жизнь в синхронизме

Глава 1. Светлячки и неизбежность синхронизма

«Примерно двадцать лет тому назад я увидел – или мне показалось, что увидел – синхронное, или одновременное, мерцание светлячков. Я не мог поверить своим глазам, поскольку возможность такого явления среди насекомых, несомненно, противоречит любым законам природы»^[1].

Эти слова Филип Лорен опубликовал в журнале Science в далеком 1917 году, когда он присоединился к дискуссии об этом необъяснимом явлении. На протяжении трехсот лет западные путешественники, побывавшие в Юго-Восточной Азии, рассказывали легенды о колоссальных скоплениях на берегах рек светлячков (протяженность этих скоплений достигала нескольких миль), мерцающих в унисон^[2]. Эти истории о синхронно мерцающих светлячках, зачастую изложенные в весьма романтическом стиле, характерном для авторов книг о путешествиях в дальние страны, вызывали скепсис у очень многих читателей. Возможно ли, чтобы тысячи светлячков координировали свое мерцание со столь высокой точностью и на столь обширном пространстве? Тогда Филип Лорен был уверен, что ему удалось разрешить эту загадку: причиной этого очевидного явления, по его мнению, были произвольные движения век наблюдателя, то есть их внезапное закрывание и открывание, а насекомые не имели к этому никакого отношения.

В период между 1915 и 1935 гг. журнал Science опубликовал еще 20 статей^[3], посвященных этой загадочной форме массового синхронизма. Кто-то из ученых трактовал это явление как случайное, мимолетное совпадение. Другие объясняли это необычными атмосферными условиями: сочетанием очень высокой влажности, абсолютного безветрия или темноты. Кто-то полагал, что тут не обошлось без некоего «дирижера»^[4] – светлячка, который руководит действиями всех остальных своих собратьев. Как написал в 1918 г. Джордж Хадсон, «если необходимо, чтобы группа людей выполняла определенные действия, подчиняясь заданному ритму, то у этой группы

людей не только должен быть лидер, но они должны быть обучены выполнять указания этого лидера... Можно ли поверить в то, что этим насекомым присуще более совершенное чувство ритма, чем наше собственное?» Натуралист Хью Смит, который жил в Таиланде с 1923 по 1934 гг. и многократно наблюдал это явление, с раздражением отмечал, что «некоторые из опубликованных объяснений производят большее впечатление, чем само описываемое явление»^[5]. Однако и он признал, что не в состоянии предложить какую-либо более убедительную версию.

В течение нескольких десятилетий никто не мог сформулировать достаточно правдоподобную теорию, которая проливала бы свет на это загадочное явление. Лишь в 1961 г. Джой Адамсон в продолжении своей повести *Born Free* («Рожденная свободной») удивлялась тому же явлению, которое она наблюдала на африканском континенте^[6] (кстати, ее описание синхронного мерцания светлячков на африканском континенте является первым).

...полоса света шириною около десяти футов, образованная тысячами тысяч светлячков, зеленое фосфоресцирующее свечение которых создает восхитительный по красоте покров на высокой, по пояс, траве... Флуоресцирующая полоса, созданная этими крошечными организмами, раз за разом вспыхивает и погасает с поразительной по своей точности синхронностью. Остается лишь удивляться, какими средствами коммуникации должны обладать эти крошечные существа, чтобы они могли координировать свое мерцание так, словно ими управляет некое механическое устройство.

К концу 1960-х годов из отдельных фрагментов этого пазла начала вырисовываться некая картина. Одна из подсказок была столь очевидной, что почти никто не обратил на нее внимания. Синхронные светлячки мерцали не только в унисон – они мерцали в определенном *ритме*, в постоянном темпе. Даже когда они были изолированы друг от друга, они продолжали мерцать синхронно. Из этого следует, что каждое насекомое должно располагать своим собственным средством определения хода времени, своего рода внутренним часовым механизмом. Этот гипотетический осциллятор до сих пор не определен

анатомически, но почти наверняка он должен представлять собою некий кластер нейронов, находящийся где-то в крошечном мозге насекомого. Во многом подобный естественному задатчику ритма в сердце человека, этот осциллятор действует на определенной частоте, вырабатывая электрические сигналы ритма, которые поступают на светозадающий элемент светлячка^[7] и приводят к его периодическому срабатыванию («включению»).

Вторая подсказка содержится в работе биолога Джона Бака, который сделал больше, чем кто-либо другой, чтобы обеспечить научную достоверность исследований, пытающихся объяснить синхронизм действий светлячков. В середине 1960-х годов Джон Бак вместе со своей женой Элизабет впервые отправился в Таиланд в надежде увидеть собственными глазами это загадочное явление. В ходе неформального, но весьма полезного эксперимента супруги выловили на берегах рек в окрестностях Бангкока множество светлячков и выпустили их в своем гостиничном номере, предварительно затемнив его^[8]. Насекомые повели себя весьма нервно, но затем постепенно распространились по стенам и потолку, находясь друг от друга на расстоянии не менее 10 сантиметров. Поначалу они мерцали вразнобой. Вскоре супруги Бак, в молчаливом удивлении наблюдавшие за светлячками, заметили, что сперва пары, а затем и тройки светлячков начали мерцать в унисон. Группы синхронно мерцающих светлячков становились все больше и больше.

Из этих наблюдений следовало, что светлячки должны как-то «настраивать» свои ритмы в ответ на мерцания других светлячков. Чтобы непосредственно протестировать эту гипотезу, Бак и его коллеги провели впоследствии лабораторные исследования^[9], в ходе которых они создавали для светлячка мерцание искусственным светом (имитируя таким образом свечение другого светлячка) и наблюдали за его реакцией. Они обнаружили, что отдельно взятый светлячок корректирует моменты своих последующих мерцаний вполне определенным, предсказуемым образом и что величина и направление такой коррекции зависит от того, в какой момент цикла было воспринято внешнее воздействие. У некоторых видов светлячков внешнее воздействие всегда смещало ритм подопытного светлячка несколько вперед, словно переводя стрелки его внутренних часов вперед, тогда как у других видов светлячков внешнее воздействие

смещало ритм подопытного светлячка либо несколько вперед, либо несколько назад в зависимости от того, насколько подопытный светлячок был близок к тому, чтобы мигнуть (одно дело, если светлячок был буквально на грани очередного мигания, и другое – если он был лишь на полпути к очередному миганию).

Взятые вместе, эти две подсказки предполагали, что ритм мерцания регулируется внутренним, перенастраиваемым осциллятором^[10]. А это непосредственно указывало на возможное существование некоего механизма синхронизации: каждый из членов сообщества мерцающих светлячков непрерывно посылает и принимает сигналы, смещая ритмы других светлячков и смещая собственный ритм в результате воздействия с их стороны. Из всей совокупности таких взаимовлияний каким-то образом спонтанно возникает синхронизм.

Таким образом, мы приходим к объяснению, которое казалось немыслимым лишь несколько десятков лет тому назад: светлячки организуют сами себя. Им не нужен дирижер, и погода не имеет значения для них. Синхронизм возникает за счет взаимобмена сигналами – точно так же, как участники оркестра могут добиться идеальной синхронности своих действий без помощи дирижера. Правда, в случае светлячков исследователей ставит в тупик то обстоятельство, что для обеспечения синхронизма этим насекомым не требуется интеллект. Они располагают всеми необходимыми для этого ингредиентами: у каждого светлячка имеется осциллятор, что-то наподобие маленького метронома, моменты выработки сигналов которым корректируются автоматически в ответ на мерцания других светлячков. Вот, собственно, и все.

За одним исключением: отнюдь не очевидно, что этот сценарий работоспособен. Может ли идеальный синхронизм возникнуть из какофонии многих тысяч лишенных разума метрономов? В 1989 г. я вместе со своим коллегой Ренни Миролло доказали правильность такого ответа. Описанный сценарий не только работоспособен – он *обязательно* будет работоспособен при определенных условиях.

По причинам, которые нам непонятны до сих пор, тенденция к синхронизму является одной из самых распространенных движущих сил во Вселенной^[11], охватывая практически все уровни, начиная с атомов и заканчивая животными, начиная с людей и заканчивая

планетами. Женщины, которые дружат между собой, или сотрудницы, проводящие много времени вместе, нередко обнаруживают, что их менструальные циклы постепенно сближаются и начинаются примерно в один и тот же день. Сперматозоиды, двигающиеся бок о бок на своем пути к яйцеклетке^[12], машут своими «хвостиками» в унисон, демонстрируя что-то похожее на простейшие элементы синхронного плавания. Иногда синхронизм принимает разрушительный характер: эпилепсия вызывается патологическим синхронным разрядом миллионов клеток мозга, что приводит к ритмичным конвульсиям, вызывающим хватательные движения. Синхронизм может возникать даже в неживой природе. Поразительная когерентность лазерного луча обеспечивается синхронной пульсацией триллионов атомов, которые испускают фотоны одной и той же фазы и частоты. На протяжении многих тысячелетий Луна под воздействием Земли постепенно замедляла вращение вокруг собственной оси. Хотя Луна вращается вокруг собственной оси, она всегда обращена к Земле одной и той же стороной (ее темную сторону мы не видим никогда), так как обращение Луны вокруг Земли и вращение Луны вокруг собственной оси синхронизировано: фактически Луна, облетая Землю каждые двадцать семь с половиной дней, совершает также одно полное вращение вокруг собственной оси против часовой стрелки.

На первый взгляд, эти явления могут показаться не связанными между собой. В конце концов, силы, которые синхронизируют клетки головного мозга никак не связаны с силами, которые обеспечивают синхронизм атомов лазера. Однако при более близком рассмотрении можно обнаружить связь, которая охватывает собою детали любого конкретного механизма. Этой связью является математика. Все приведенные выше примеры представляют собой вариации одной и той же математической темы: самоорганизации, спонтанного возникновения порядка из хаоса. Изучая простые модели поведения светлячков и других самоорганизующихся систем, ученые начинают раскрывать тайны этой восхитительной разновидности порядка во Вселенной.

Исследовавшийся мною и Ренни вопрос о самоорганизации был поначалу сформулирован Чарли Пескином, специалистом по прикладной математике, сотрудником Института Куранта (Courant

Institute) при Нью-Йоркском университете. Человек с тихим и спокойным голосом, с аккуратно подстриженной бородкой и с неизменно приветливой улыбкой, Чарли Пескин является одним из самых выдающихся математиков с уклоном в биологию. Разгадывая тайны физиологии (например, как молекулы, ткани и органы человеческого тела справляются со своими сложными функциями), он предпочитает пользоваться компьютерами и математикой. Какие бы проблемы он ни пытался решать – как сетчатке человеческого глаза удается обнаружить даже самый слабый свет или как молекулярные «двигатели» вырабатывают силу в мышцах, – его «фирменным знаком» является разносторонность научных интересов. Создается впечатление, что он хочет попробовать себя во всех областях знания и исследовать все тайны природы. Если необходимого ему математического аппарата еще не существует, он обязательно должен изобрести такой аппарат. Если для решения рассматриваемой им проблемы требуется суперкомпьютер, Пескин разработает для него соответствующую программу. Если существующие процедуры работают слишком медленно, он придумает более быстрые процедуры.

Даже его математический стиль отличается высокой гибкостью и прагматизмом. Его самая известная работа связана с разработкой трехмерной модели тока крови в камерах сердца, качающего кровь. Эта модель отличается реалистичностью анатомии, сердечных клапанов и строения волокон. Для решения столь сложной задачи он использовал грубую мощь суперкомпьютерного моделирования в сочетании с изысканностью абсолютно оригинальной вычислительной схемы. Что же касается решения других проблем, Пескин обычно придерживается известной максимы Эйнштейна, согласно которой все нужно делать по возможности проще – но не проще необходимого. В таких случаях Пескин отдавал предпочтение минималистскому подходу, пренебрегая всеми биологическими подробностями, за исключением лишь самого важного. Именно в таком минималистском духе Пескин предложил схематическую модель того, как клетки, задающие ритм работы сердца, могли бы синхронизировать сами себя^[13].

Натуральный задатчик ритма работы сердца представляет собой подлинное чудо эволюции – возможно, самый впечатляющий осциллятор из когда-либо созданных природой. Кластер, состоящий из примерно 10 тысяч клеток и называемый синусно-предсердным узлом,

вырабатывает электрические импульсы, которые задают ритм работы сердца в целом. Синусно-предсердный узел должен действовать чрезвычайно надежно, минута за минутой, обеспечивая примерно три миллиарда сокращений сердца за все время жизни человека. В отличие от большинства клеток сердца, клетки-ритмоводители вырабатывают электрические импульсы автоматически; если их изолировать в чашке Петри, то напряжение генерируемых ими импульсов ритмично повышается и снижается.

Все это вызывает законный вопрос: зачем нужно так много этих клеток, если даже одной клетки вполне достаточно для того, чтобы справиться с данной работой? Возможно, это объясняется тем, что наличие единственного задатчика ритма не позволяет получить достаточно надежную структуру: лидер может начать неправильно функционировать или даже прекратить существование. Вместо ненадежной структуры с единственным лидером природа выработала более надежную, «демократичную» систему, в которой тысячи клеток коллективно задают нужный ритм. Разумеется, такая демократия порождает собственные проблемы: клетки должны каким-то образом координировать свои действия; если же они будут посылать конфликтующие между собой сигналы, сердце выйдет из строя. Пескина интересовал следующий вопрос: как всем этим клеткам удастся – в отсутствие лидера или каких-либо команд со стороны – действовать столь синхронно?

Обратите внимание, как похож этот вопрос на поставленный выше вопрос о светлячках. В том и другом случае речь идет о больших популяциях ритмичных объектов, вырабатывающих внезапные импульсы, которые задают ритмы для других членов группы, убыстряя или замедляя их в соответствии с определенными правилами. В обоих случаях синхронизм представляется неизбежным. Задача заключается в том, чтобы объяснить, почему это должно быть именно так, а не иначе.

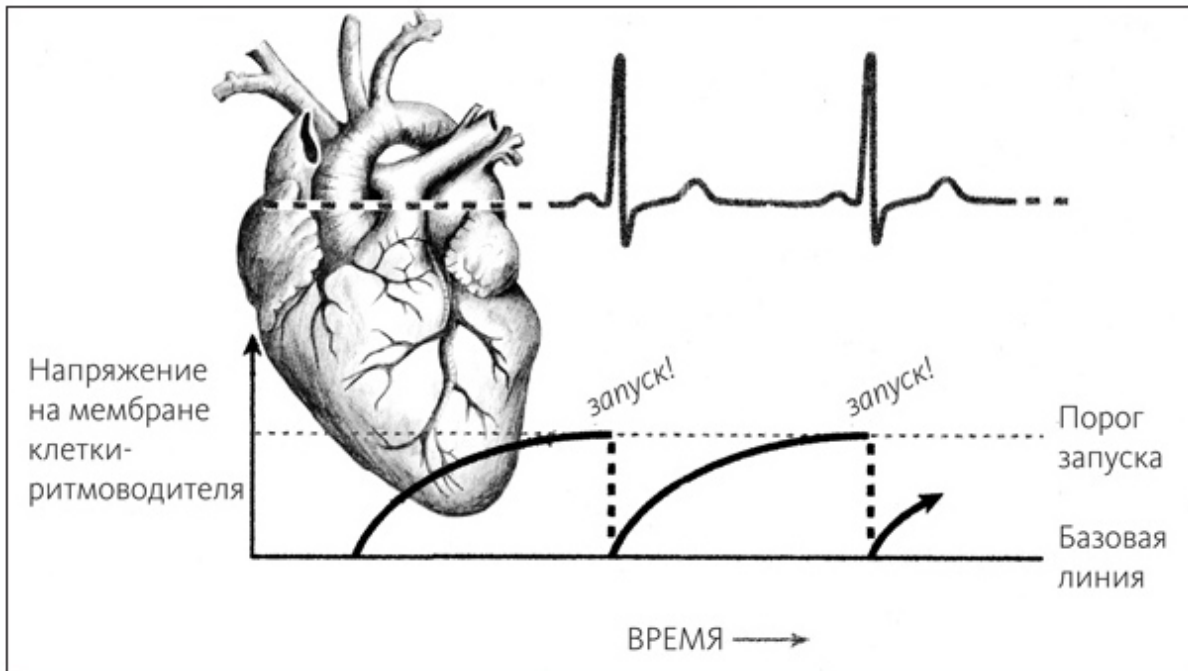
В 1975 г. Пескин изучил этот вопрос в рамках некой упрощенной модели. Каждая из клеток-ритмоводителей рассматривается как электрическая цепь, генерирующая импульсы (осциллятор) и эквивалентная конденсатору, подключенному параллельно резистору. (Конденсатор – это прибор, способный накапливать и хранить электрический заряд; в данном случае он играет роль, подобную той, которую играет мембрана клетки; резистор обеспечивает путь для

вытекания электрического тока из клетки, аналогично так называемым каналам утечки в мембране.) Постоянный входной ток заставляет конденсатор заряжаться, что приводит к росту напряжения на нем. Когда напряжение на конденсаторе повышается, величина тока, стекающего через резистор, растет, в результате чего скорость повышения замедляется. Когда напряжение достигает некоего порога, конденсатор разряжается и напряжение на нем мгновенно падает до нуля; такая модель имитирует запуск клетки-ритмоводителя и ее последующее возвращение к исходному состоянию. Затем напряжение снова начинает повышаться, и описанный выше цикл повторяется. Рассматриваемый как функция времени, такой цикл напряжения состоит из двух частей: плавный подъем вдоль кривой заряда (график в виде половины дуги, поднимающейся, но с постепенным замедлением роста), за которым следует практически вертикальное падение с возвратом к исходному состоянию.

Затем Пескин представил такой задатчик ритма сердца в виде огромной совокупности этих математических осцилляторов. Для простоты он предположил, что все осцилляторы идентичны (и, таким образом, характеризуются одной и той же кривой заряда), что каждый осциллятор связан в одинаковой степени со всеми остальными осцилляторами и что осцилляторы влияют друг на друга только в состоянии запуска. В частности, когда какой-либо осциллятор запускается, он мгновенно повышает напряжения всех остальных осцилляторов на некую фиксированную величину. Если напряжение какой-либо клетки превышает пороговое значение, она сразу же запускается.

Сложность и запутанность этой проблемы обусловлена тем, что в любой данный момент времени разные осцилляторы, как правило, пребывают на разных стадиях рассматриваемого нами цикла: некоторые из них находятся буквально на грани запуска, другие уже успели далеко продвинуться по кривой заряда, тогда как третьи могут приближаться к исходному состоянию. Как только ведущий осциллятор достигнет порогового значения, он запускается и проталкивает каждый из остальных осцилляторов в разные позиции вдоль кривой заряда. Результаты такого запуска имеют разноплановый характер: осцилляторы, которые были близки к пороговому значению, проталкиваются ближе к запускающемуся осциллятору, но те, которые

приближаются к исходному состоянию, выбиваются из фазы. Иными словами, отдельно взятый запуск оказывает синхронизирующее воздействие на некоторые осцилляторы и рассинхронизирующее воздействие на другие осцилляторы. Долгосрочные последствия всех этих перестроек невозможно уяснить, опираясь лишь на здравый смысл.



Чтобы получить более наглядную картину происходящего, представьте отдельно взятую клетку в виде бачка унитаза, наполняющегося водой. Когда вода поступает в бачок, ее уровень постепенно повышается, подобно напряжению в клетке. Допустим, что когда вода в бачке достигнет определенного уровня, произойдет автоматический слив воды из бачка. Быстрый слив воды вернет ее уровень к исходному (условно нулевому), после чего бачок начнет снова наполняться; возникнет своего рода спонтанный осциллятор. (Чтобы довершить аналогию, нам также нужно предположить, что бачок слегка протекает. Вода вытекает через небольшую дырочку у дна бачка. Вода просачивается быстрее, когда уровень воды в бачке выше, из чего следует, что бачок наполняется все медленнее по мере повышения уровня воды в нем. Наличие этой утечки не имеет особого значения для самой осцилляции – это устройство будет циклически

наполняться и опустошаться даже в отсутствие утечки, – но оно оказывается критически необходимым для синхронизации многих таких осцилляторов.) Наконец, представьте целое полчище из 10 тысяч таких осциллирующих туалетных бачков, соединенных между собой системой труб по принципу «каждый с каждым» таким образом, что когда происходит слив какого-либо из них, это приводит к одинаковому подъему уровня воды во всех остальных бачках. Если эта дополнительная вода поднимает уровень воды в каких-либо из этих бачков выше его порогового значения, то вода сливается и из этих бачков.

В связи с этим возникает следующий вопрос: как поведет себя такое хитросплетение бачков? Будут ли эти бачки наполняться и сливаться хаотически, когда каждому из них заблагорассудится? Распадется ли их сообщество на отдельные группировки, конкурирующие между собой? Может быть, они будут наполняться и сливаться по очереди, друг за другом?

Пескин предположил, что такая система всегда будет входить в синхронизм: какой бы ни была начальная ситуация в такой системе, в конечном счете все осцилляторы будут запускаться в унисон. Кроме того, он предположил, что синхронизм наступит, даже если эти осцилляторы будут не вполне идентичны. Но когда Пескин попытался доказать свои предположения, он столкнулся с определенными техническими препятствиями. В частности, отсутствовали надежные математические процедуры, которые позволяли бы описывать большие системы осцилляторов, обменивающихся между собой внезапными, дискретными импульсами. Поэтому он отказался от своего первоначального замысла и сосредоточился на простейшем возможном случае: двух идентичных осцилляторах. Однако даже в этом случае математические проблемы казались чересчур сложными. Пескин попытался еще больше упростить задачу, допустив возможность лишь бесконечно малых толчков и бесконечно малых утечек через резистор. После таких упрощений задача поддавалась решению: для этого специального случая Пескин доказал неизбежность синхронизма.

Доказательство, предложенное им, базируется на идее, сформулированной французским математиком Анри Пуанкаре, основателем теории хаоса. Концепция Пуанкаре представляет собой математический эквивалент стробоскопической фотографии. Возьмем два

идентичных осциллятора, А и В, и представим в графическом виде их работу, делая фотоснимок каждый раз, когда запускается осциллятор А. Как будет выглядеть соответствующая последовательность фотоснимков? Осциллятор А лишь запустился, поэтому он выглядит так, как будто все время находится в исходном положении (нулевом напряжении). Напряжение осциллятора В, напротив, меняется от одного снимка к следующему. Решая уравнения, описывающие такую модель, Пескин нашел исчерпывающую, но весьма «навороченную» формулу, описывающую изменения напряжения осциллятора В в промежутках между фотоснимками. Эта формула показала, что в случае, когда это напряжение оказывается меньше определенного критического значения, оно будет неуклонно снижаться, пока не достигнет нуля, тогда как в случае, когда это напряжение оказывается больше критического значения, оно будет неуклонно повышаться, пока не достигнет порогового значения. В любом случае осциллятор В в конечном счете синхронизируется с А. Есть лишь одно исключение: если напряжение осциллятора В в точности равно критическому значению напряжения, его невозможно изменить ни в сторону увеличения, ни в сторону уменьшения, поэтому оно остается в равновесном критическом значении. Осцилляторы А и В запускаются повторно, однако этот запуск происходит несинфазно, а с разницей во времени, составляющей половину цикла. Но это равновесие оказывается неустойчивым: малейший толчок смещает систему в направлении синхронизма.

Несмотря на успешный анализ такого двухосцилляторного случая, выполненный Пескином, случай произвольного количества осцилляторов ждал соответствующего доказательства целых 15 лет. На протяжении этих 15 лет о результатах, полученных Пескином, почти никто не вспоминал. Сведения об этих результатах были похоронены в какой-то заумной монографии, которая, по сути, представляла собой фотокопию конспекта его лекций и которую можно было получить из его отдела лишь по специальному запросу.

Однажды, в 1989 г., я листал книгу под названием *The Geometry of Biological Time* («Геометрия биологического времени»), написанную биологом-теоретиком Артом Уинфри, одним из героев моей нынешней книги^[14]. В то время я был научным сотрудником с ученой степенью,

специализировавшимся на прикладной математике в Гарвардском университете, и пытался подобрать какую-либо интересную тему для своих дальнейших исследований. Хотя я размышлял над книгой Уинфри предыдущие восемь лет, она продолжала казаться мне неисчерпаемым источником идей и вдохновения. Она представляла собой не просто изложение результатов последних исследований по биологическим осцилляторам, а своего рода карту для охотников за удачей, руководство к будущим научным открытиям. Почти на каждой странице Уинфри указывал путь к интересным нерешенным проблемам и высказывал собственные соображения относительно того, какие из них в наибольшей степени созрели для того, чтобы за их решение можно было приняться прямо сейчас.

В этой книге я натолкнулся на вариант, которого не замечал прежде: в разделе, посвященном осцилляторам, взаимодействующим посредством ритмических импульсов, Уинфри упоминал о модели, описывающей поведение клеток-ритмоводителей сердца, предложенной Пескином в его монографии. Хотя Пескину удалось проанализировать лишь случай двух идентичных осцилляторов, писал Уинфри, «задача со многими осцилляторами еще ожидает своего решения».

Это разожгло мое любопытство. Что же представляет собой эта фундаментальная загадка, которая все еще ожидает своего решения? Я никогда прежде не слышал о работах Пескина, но указанная им проблема произвела на меня сильное впечатление. Никто даже еще не пытался придумать математический аппарат, который описывал бы большую популяцию из «импульсно-связанных» осцилляторов, взаимодействие в которой осуществляется посредством кратковременных пульсирующих сигналов. Это было осязаемым пробелом в литературе по математической биологии – и к тому же весьма подозрительным пробелом, если принять во внимание широкую распространенность в природе именно такого способа взаимодействия между биологическими осцилляторами. Светлячки мерцают. Сверчки стрекочут. Нейроны посылают электрические сигналы. Все они используют внезапные импульсы для общения друг с другом. Тем не менее, теоретики уклонялись от изучения такой импульсной связи по причине отсутствия подходящего математического аппарата. Импульсы вызывают постоянные скачки переменных, однако у математики

возникают большие проблемы при описании таких скачков – математика предпочитает иметь дело с процессами, которые изменяются плавно. Однако Пескину удалось каким-то образом проанализировать два осциллятора, которые периодически воздействуют друг на друга кратковременными импульсами. Каким образом это удалось ему? И что помешало ему перейти от системы с двумя идентичными осцилляторами к системам со многими осцилляторами?

В нашей библиотеке не оказалось экземпляра монографии Пескина, однако Пескин любезно согласился переслать мне соответствующие страницы из этой монографии. Его анализ показался мне весьма элегантным и понятным. Но я быстро понял, почему он ограничился системой лишь с двумя идентичными осцилляторами: несмотря на всю элегантность выполненного им анализа, его формулы оказались чересчур громоздкими. С тремя осцилляторами дело обстояло еще хуже, а система из произвольного количества (n) осцилляторов представлялась вообще неподъемной. Я не понимал, как можно распространить его модель на большое количество осцилляторов и обойти возникающие осложнения.

Чтобы получить более полное представление об этой проблеме, я попытался решить ее на компьютере двумя разными способами. Первый подход заключался в постепенном наращивании сложности системы: я пробовал, подражая стратегии Пескина, найти решение для системы с тремя осцилляторами, используя малые толчки и утечки и перекладывая на компьютер решение всех алгебраических вопросов. Формулы оказались просто устрашающими – некоторые из них простирались на несколько страниц, – но с помощью компьютера мне удалось сократить их до вполне приемлемого вида. Полученные мною результаты показали, что предположение Пескина является, по-видимому, правильным для системы с тремя осцилляторами. Однако эти результаты также говорили о необходимости найти какой-то другой способ решения данной проблемы. С ростом количества осцилляторов используемый мною математический аппарат оказывался неприемлемым.

Второй подход заключался в компьютерном моделировании. Попытаемся на данном этапе обойтись без формул и предоставим возможность компьютеру продвигать систему во времени шаг за шагом

вперед, а затем посмотрим, что из этого получится. Компьютерное моделирование ни в коей мере не заменяет собою математический аппарат – оно никогда не позволит получить доказательство, – но если гипотеза Пескина ложна, то такой подход сэкономит массу времени, убедив меня в необходимости поиска других путей решения проблемы. Такой подход чрезвычайно ценен в математике. Когда вы пытаетесь доказать что-либо, желательно быть уверенным в том, что вы не пытаетесь доказать нечто изначально ложное. Такая уверенность придаст вам силы, которые понадобятся вам для поиска строгого доказательства.

Разработать компьютерную программу для моего случая оказалось сравнительно простым делом. Когда запускается один осциллятор, он подталкивает все остальные осцилляторы на определенную, фиксированную величину. Если какие-либо из «продвинутых» таким образом осцилляторов преодолеют определенный порог, предоставляем им возможность также запуститься – и соответствующим образом обновляем другие осцилляторы. В противном случае используем в промежутках между запусками формулы Пескина для подталкивания соответствующих осцилляторов в направлении их порогов.

Я испытал этот механизм на популяции из 100 идентичных осцилляторов. Изначально был создан случайный разброс их напряжений между базовым (нулевым) уровнем и порогом. Я отобразил этот разброс на диаграмме в виде совокупности точек, взбирающихся в направлении порога по общей для них кривой заряда, которая представляет собой зависимость напряжения от времени. Даже с помощью средств компьютерной графики мне не удалось выявить какой-либо определенной картины в их коллективном движении – полная путаница.

В данном случае проблемой оказался слишком большой объем информации. И здесь я оценил по достоинству еще одно преимущество метода стробов, предложенного Пескином: этот метод не только позволяет упростить анализ, но и представляет собой наилучший способ визуализации поведения системы. Все осцилляторы остаются невидимыми за исключением именно тех моментов, когда запускается какой-то конкретный осциллятор. В такие моменты свет воображаемого строба подсвечивает остальные осцилляторы, показывая их мгновенные напряжения. Затем вся эта система вновь погружается в

темноту до наступления следующего момента, когда запускается определенный осциллятор. Модель Пескина обладает тем свойством, что осцилляторы запускаются по очереди – никто и никогда не нарушает эту очередь; таким образом, 99 других осцилляторов запускаются в темноте, до того как произойдет вспышка следующего строба.

Отображаемые на компьютере, эти вычисления мелькали так быстро, что изображение на экране буквально мельтешило: 99 осцилляторов быстро взбирались вдоль кривой заряда, изменяя свои позиции с каждой очередной вспышкой строба. Теперь полученная картина не вызывала сомнений. Точки собирались в группы, образуя маленькие пакеты синхронизма, которые объединялись в более крупные пакеты, подобно каплям дождя, которые собираются в ручейки, стекающие по оконному стеклу.

Это казалось просто сверхъестественным – система синхронизировала сама себя. Бросая вызов Филипу Лорену и всем прочим скептикам, которые утверждали, что синхронизация светлячков невозможна в принципе и что такое явление «противоречило бы всем законам природы», компьютер демонстрировал, что большая совокупность маленьких осцилляторов, не обладающих разумом, *способна* достигать синхронизма автоматически. Наблюдая за этим явлением, я испытывал чувство, близкое к мистическому ужасу. Наблюдатель поневоле испытывал ощущение, что осцилляторы словно договариваются между собой о совместных действиях, сознательно стремясь к порядку, хотя ни о чем подобном, разумеется, не могло быть и речи. Каждый из них лишь автоматически реагировал на импульсы, посылаемые другими осцилляторами, не преследуя при этом никакой конкретной цели.

Чтобы убедиться в том, что картина, увиденная мною с первой попытки, не была чистой случайностью, я повторял моделирование десятки раз, каждый раз при других произвольно выбранных начальных условиях и для других количеств осцилляторов – и каждый раз я наблюдал тенденцию к синхронизации. Похоже, Пескин пришел к правильному выводу. Теперь моя задача заключалась в том, чтобы получить строгое математическое доказательство. Только «железное» математическое доказательство продемонстрировало бы – причем так, как не мог бы сделать ни один компьютер в мире – неизбежность

синхронизма, а еще лучше, если бы такое доказательство показало, *почему* именно наступление синхронизма неизбежно. Я обратился за помощью к своему другу Ренни Миролло, специалисту по математике, работающему в Бостонском колледже.

К тому времени я был знаком с Ренни Миролло уже около десяти лет. Будучи студентами-выпускниками Гарвардского университета, мы вместе отдыхали по выходным дням, вместе обедали по будням, уделяя в своих беседах примерно равное количество времени математике и женщинам. Но в те дни нам не приходилось работать вместе. По своему образованию Ренни Миролло был «чистым» математиком, тогда как я специализировался в прикладной математике. По этой причине мы понимали друг друга – но не всегда и не во всем.

Для своей докторской диссертации Ренни выбрал очень абстрактную тему. Интуиция подсказывала ему правильность некоей теоремы – проблема заключалась лишь в том, чтобы найти доказательство этой теоремы. Ренни потратил три года на поиск доказательства и в конце концов понял, что доказать ее невозможно: он нашел контрпример, опровергающий эту теорему. Таким образом, три года жизни были потрачены зря. Однако этот отрицательный результат не поверг Ренни в отчаяние – он решил переключиться на какое-нибудь новое направление математики, решить какую-либо из ключевых проблем этого направления и написать диссертацию. На все это Ренни решил отвести себе один год.

Моя совместная работа с Ренни началась примерно в 1987 г. В этой совместной работе мы как бы дополняли друг друга. Обычно я предлагал ему какую-либо задачу, разъяснял ее научный контекст, выполнял компьютерное моделирование и предлагал интуитивные аргументы. Ренни придумывал стратегии, позволяющие прояснить проблему, а затем находил способы доказательства соответствующей теоремы.

Когда я рассказал Ренни о своих компьютерных экспериментах с моделью Пескина, поначалу он проявил, скажем так, спокойный интерес к этой проблеме. Однако после того как он разобрался в ней глубже, его начало разбирать нетерпение: в то время он напоминал мне боксера, готовящегося выйти на ринг. Он предоставил мне совсем немного времени, чтобы подытожить выполненную мною работу, но

уже вскоре начал настаивать на том, что будет использовать свой собственный подход к решению этой проблемы.

Ренни безжалостно упростил мою модель. Его не заботили подробности, предусмотренные в исходной модели цепи, которую предложил Пескин – со всеми ее конденсаторами, резисторами и напряжениями. Единственной важной чертой этой модели, по мнению Ренни, является то, что каждый осциллятор следует кривой напряжения с замедлением роста в верхней ее части – по мере приближения к пороговому значению. Таким образом, он с самого начала заложил именно такую геометрию. Он отказался от схемы электрической цепи, которую предложил Пескин, заменив ее некой абстрактной переменной, изменяющейся по тому же закону, что и напряжение осциллятора: периодический подъем до порогового значения, запуск, сброс. Затем его воображение нарисовало совокупность из n таких переменных, идентичных друг другу и взаимодействующих между собой по описанному выше принципу: когда один осциллятор запускается, он «подтягивает» все остальные осцилляторы на некую фиксированную величину или до порогового значения (если оно будет достигнуто раньше).

Эта усеченная модель не только оказалась значительно проще первоначальной (что сильно упрощало математические выкладки), но и допускала более широкую область применения. Вместо чисто электрической интерпретации в терминах напряжения мы могли теперь рассматривать такую переменную как меру готовности любого из осцилляторов к запуску, будь то клетка сердца или сверчок, нейрон или светлячок.

Нам удалось доказать, что такая обобщенная система почти всегда становится синхронизированной – при любом количестве осцилляторов и при любых начальных условиях^[15]. Ключевым ингредиентом в доказательстве является понятие «абсорбции» – обозначение идеи о том, что если один осциллятор проталкивает другой осциллятор за пороговое значение, они остаются синхронизированными навсегда, как если бы один осциллятор поглотил другой. Такие поглощения были заметны в моих компьютерных экспериментах, когда у наблюдателя складывалось впечатление, будто осцилляторы сливаются вместе, подобно каплям дождя, стекающим по оконному стеклу. Кроме того, такие слияния необратимы: как только два осциллятора запускаются

вместе, они никогда не рассинхронизируются сами по себе, поскольку их динамика идентична; к тому же они одинаково связаны со всеми остальными осцилляторами, поэтому даже когда они испытывают толчок, их синхронизм не нарушается: ведь они испытывают одинаковый толчок. Следовательно, абсорбции действуют подобно храповому механизму, всегда приближая систему к синхронизму.

Основой доказательства является аргумент, демонстрирующий, что последовательность поглощений объединяет осцилляторы в группы, размеры которых все время увеличиваются – до тех пор, пока все они не образуют одну гигантскую совокупность. Если вы не математик, вас, наверное, интересует, как можно доказать все это. Существует бесконечно большое число способов запуска такой системы; как же в таком случае можно охватить одним доказательством все эти бесчисленные варианты? И где гарантия, что в конечном счете произойдет количество поглощений, достаточное для того, чтобы привести такую систему к полному синхронизму?

Ниже излагаются наши рассуждения по этому поводу. Не волнуйтесь, если какие-то детали этих рассуждений покажутся вам непонятными. Моя задача в данном случае заключается лишь в том, чтобы дать вам самое общее представление о том, как выстраиваются такие доказательства. Трудно рассчитывать на что-либо большее, если ваши познания в области математики ограничиваются курсом геометрии, который вы проходили в старших классах школы и который зачастую преподается в механистическом и авторитарном стиле. На самом деле конструирование математического доказательства – весьма творческий процесс, полный нечетких идей и образов, особенно на ранних стадиях этого процесса. Строгие формулировки появляются позже. (Если это не особенно интересует вас, можете пропустить следующие несколько страниц.)

Первым шагом является каталогизация всех возможных начальных конфигураций. Вернемся, например, к случаю двух осцилляторов. По причине использования Пескином уловки со строгами нам вовсе необязательно наблюдать за осцилляторами все время. Достаточно сосредоточиться на одном моменте в каждом цикле. В качестве такого момента мы выбрали момент непосредственно после запуска осциллятора А и его возвращения к исходному состоянию. Тогда на

осцилляторе В может быть любое «напряжение» между исходным состоянием и порогом. Представляя напряжение на осцилляторе В в виде точки на числовой оси, исходное состояние на которой отображается нулем, а порог – единицей, мы видим, что существует линейный сегмент разных возможностей. Этот одномерный сегмент охватывает все возможные начальные условия для данной системы (поскольку нам известно, что осциллятор А находится в 0 [только что запустился и сбросился в исходное состояние], единственной переменной является В, который должен пребывать где-то вдоль линейного сегмента между 0 и 1).

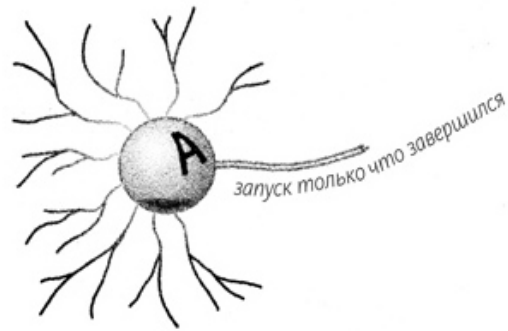
Три осциллятора создают большее пространство возможностей. В этом случае нам нужно знать два числа: учитывая, что А только что запустился и находится в 0, нам все еще нужно указать напряжения осцилляторов В и С в этот момент. Как выглядит геометрия, соответствующая какой-то паре чисел? Мы можем представлять их как две координаты некой точки в двумерном пространстве.

Изобразим плоскость x, y , которая наверняка знакома вам из курса математики в старших классах. В данном случае ось x (как обычно, это горизонтальная ось) представляет напряжение осциллятора В в момент, когда запускается А. Вертикальная ось y представляет напряжение осциллятора С в тот же момент. Пара напряжений отображается на этой плоскости одной точкой.

Когда мы предоставляем возможность В и С изменяться независимо, принимая любые напряжения в промежутке между 0 и 1 (охватывая все возможные варианты), соответствующая точка, изображающая пару напряжений, движется внутри некой области, представляющей собой квадрат.

Таким образом, в случае трех осцилляторов мы получаем квадрат возможных начальных условий: одна ось для осциллятора В и одна для осциллятора С. Обратите внимание, что для А нам не нужна ось, поскольку этот осциллятор всегда стартует с нуля (в соответствии с тем, как мы решили стробировать эту систему).

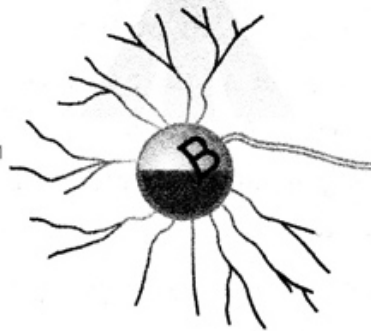
Клетка А только что активизировалась



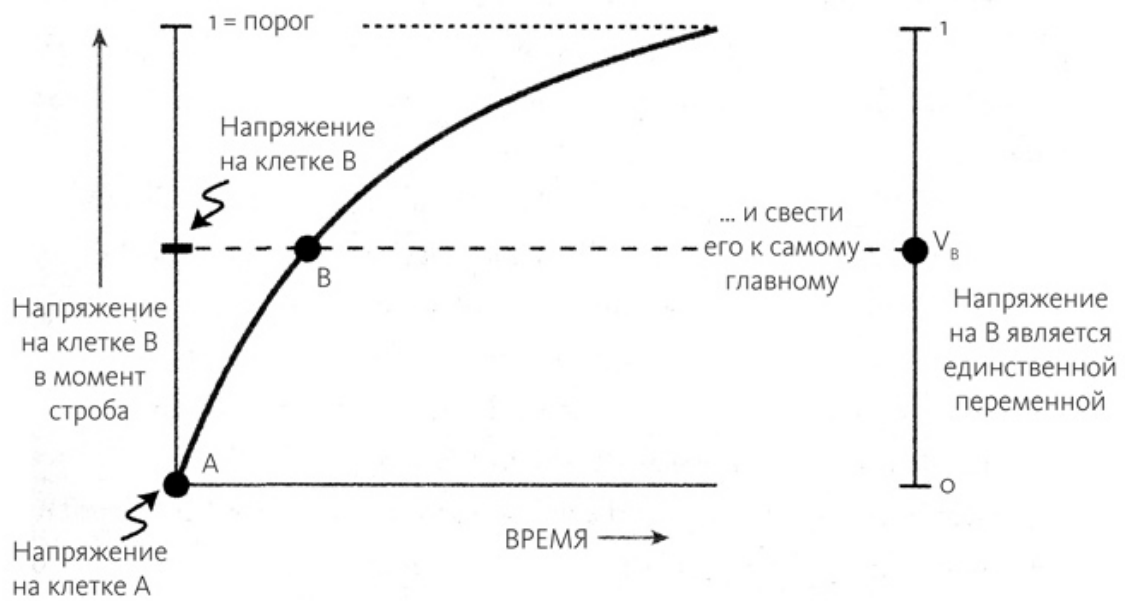
когда клетка В будет «захвачена в строб»...

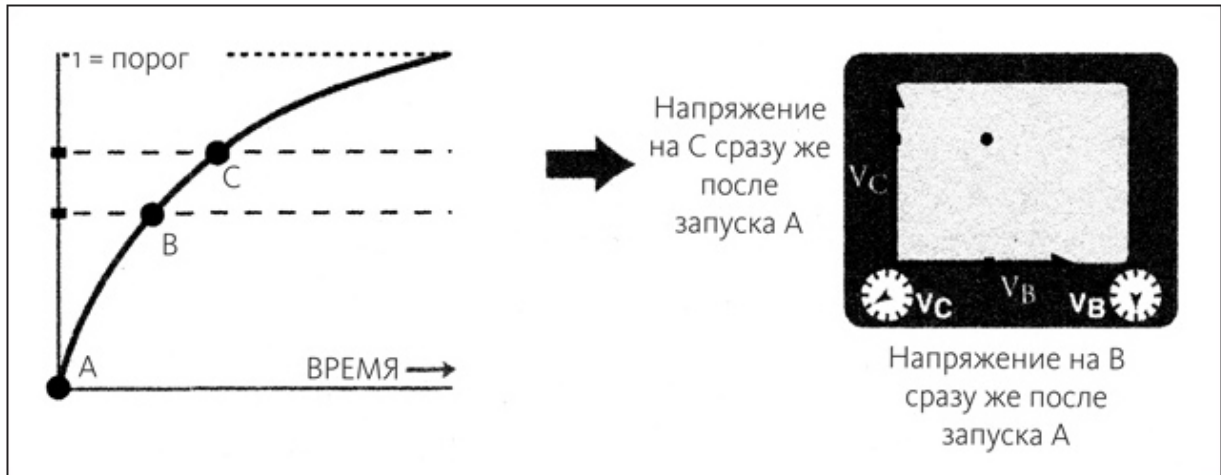


захват клетки В при напряжении V_B



Мы можем представить это в графическом виде





Картина постепенно проясняется. По мере добавления осцилляторов нам необходимо добавлять все больше измерений, чтобы можно было учитывать все возможности. Для четырех осцилляторов требуется трехмерный куб начальных условий; для пяти осцилляторов требуется четырехмерный гиперкуб, а в общем случае для n осцилляторов требуется $(n-1)$ – мерный гиперкуб. Людям, далеким от математики, это может показаться чересчур сложным (все это действительно сложно представить себе). Но с точки зрения формального математического подхода, вообще говоря, все равно, какому числу в каждом конкретном случае соответствует n : увеличение n не предполагает возникновения каких-либо новых сложностей. Поэтому, для большей определенности, в дальнейшем я продолжу рассматривать случай с тремя осцилляторами, который включает в себе все основные идеи.

Очередной шаг заключается в преобразовании рассматриваемой нами динамики – эволюции такой системы во времени – в графическое представление, которое мы стремимся получить. Мы хотим убедиться в том, что в такой системе действительно будет достигнут синхронизм при неких начальных состояниях осцилляторов В и С.

Представим, что произойдет, если мы позволим такой системе начать работать. Напряжение на всех осцилляторах поднимется до порогового значения, они запустятся, а затем вернутся в исходное (нулевое) состояние; они также будут реагировать на «толчки» со стороны других осцилляторов. Чтобы устранить избыточную

информацию, опять воспользуемся методом стробов: предоставим системе возможность работать в темноте до очередного момента, когда осциллятор А запустится и вернется в исходное состояние, а В и С отреагируют на это. Затем включим строб и сделаем очередной фотоснимок, зафиксировав новые позиции В и С.

Геометрический результат заключается в том, что старая точка в нашем квадрате оказалась на новом месте (обновленные напряжения В и С). Иными словами, динамическая эволюция нашей системы эквивалентна преобразованию, в результате которого любая данная точка в нашем квадрате оказывается в другом месте этого квадрата в соответствии с неким сложным правилом, которое определяется формой кривой заряда и величиной толчков.

Этот процесс можно повторить; при этом новую точку можно интерпретировать как начальную, которая изменяет свою позицию в соответствии с упомянутым преобразованием, снова и снова перепрыгивая с одного места в нашем квадрате на другое место. Если такая система должна в конечном счете прийти к синхронизму, то упомянутая нами точка должна постепенно продвигаться в сторону нижнего левого угла квадрата, то есть к точке с напряжениями $(0,0)$; это означает, что все осцилляторы достигнут исходного положения одновременно. (Почему именно нижний левый угол? Потому что именно в этой точке находится осциллятор А. Согласно определению строба, осциллятор А уже запустился и сбросился, поэтому напряжение на нем равно нулю. В синхронизированном состоянии напряжение на обоих других осцилляторах также равно нулю.)

В принципе, у каждой начальной точки есть некое конечное положение, которое можно вычислить. Если в конечном счете все осцилляторы запускались синхронно, то такую начальную точку мы называли «хорошей». В противном случае мы называли ее «плохой». Нам с Ренни не удалось найти способ, который позволял бы нам точно сказать, какие точки являются «хорошими», а какие — «плохими», однако нам удалось доказать, что почти все точки являются хорошими. Плохие точки действительно существуют, но они встречаются настолько редко и настолько сильно разбросаны, что если собрать их все вместе, то занимаемая ими площадь стремится к нулю. Иными словами, если выбрать какую-либо точку произвольным образом, то у вас чрезвычайно мало шансов выбрать плохую точку.

Это может показаться абсурдным: если плохие точки существуют, то вы можете полагать, что с вашим-то везением вы наверняка выберете плохую. Спешу вас успокоить: не выберете. Это практически то же самое, как если бы вы бросали дротик в мишень для игры в «дартс» в надежде, что он попадет точно в разделительную линию между двумя соседними концентрическими областями. Это чрезвычайно маловероятно. А теперь представьте, что толщина этой разделительной линии стремится к нулю (а именно это требуется, если ее площадь должна равняться нулю). Теперь, надеюсь, вы понимаете, почему у вас практически нет шансов попасть дротиком в эту линию.

Идея о теоретическом существовании «плохих» точек принадлежала Ренни, хотя мы, разумеется, были заинтересованы в «хороших» точках. Стратегия Ренни напоминала концепцию отрицательного пространства, к которой прибегают художники: чтобы лучше уяснить интересующий вас объект, постарайтесь уяснить пространство, окружающее этот объект. В частности, Ренни придумал, как доказать, что «плохие» точки занимают нулевую площадь.

Чтобы составить некоторое представление о его доказательстве, сосредоточимся на наихудших из «плохих» точек, которые я буду называть «ужасными». Эти точки – самые непокорные в своем стремлении воспрепятствовать достижению синхронизма: они вообще не поддаются поглощениям. Когда система начинает свою работу с какой-либо ужасной точки, никакая из пар осцилляторов (и тем более не вся популяция осцилляторов) не сможет синхронизироваться.

Чтобы понять, почему ужасные точки не могут занимать площадь больше нулевой, вообразите все эти точки в виде некой совокупности и проанализируйте, что произойдет, когда мы применим наше преобразование ко всем точкам в такой совокупности. Каждая ужасная точка перескочит в какое-то другое место, но после такого преобразования она все равно останется ужасной. Это звучит почти как тавтология: если какая-либо точка никогда не приводит к поглощению, то после одной итерации нашего преобразования она все равно никогда не приведет к поглощению. Следовательно, новая точка также является ужасной. Поскольку первоначальная совокупность включала *все* ужасные точки (по определению), эта новая точка должна была бы где-то здесь появиться, чтобы она могла исполнить роль начальной.

Наш вывод заключается в том, что преобразованная совокупность находится полностью внутри первоначальной совокупности. Могу предложить более наглядную аналогию: это похоже на хорошо известные вам фотографии «до» и «после», используемые в рекламе всевозможных диет для похудения. Преобразованная совокупность – похудевшая «после» – фотография – полностью содержится внутри толстой «до» – фотографии (как в рекламе диет для похудения).

До сих пор в нашем доказательстве не использовалась какая-либо информация о форме кривой заряда или величине «толчков». Когда мы в конечном счете учтем эти детали, мы придем к выводу, который, на первый взгляд, может показаться парадоксальным, хотя на самом деле он является решающим доводом в нашем доказательстве. Нам с Ренни удалось доказать, что преобразование из «до» в «после» действует подобно функции увеличения масштаба в фотокопировальном аппарате. Любая совокупность точек, которую вы подаете на вход нашего преобразования, на его выходе оказывается увеличенной в том смысле, что ее суммарная площадь оказывается умноженной на коэффициент, больший 1. Неважно, какую именно совокупность вы выберете (как неважно и то, какое изображение вы поместите в фотокопировальный аппарат): увеличится площадь всех совокупностей. В частности, увеличится площадь совокупности ужасных точек. Но погодите, это означает, что совокупность ужасных точек становится толще, а не тоньше. Но это, похоже, противоречит тому, о чем мы говорили выше. Если быть более точным, проблема в том, что преобразованная версия совокупности ужасных точек должна находиться внутри исходной совокупности при том, что ее площадь также должна увеличиться, что кажется невозможным. Единственным условием, при котором эти два вывода могут быть совместимы, является нулевая площадь исходной совокупности (фотография «до» должна представлять собой изображение тонкого прута). В таком случае никакого противоречия нет: при умножении на число, большее 1, площадь исходной совокупности останется нулевой, поэтому преобразованная совокупность может поместиться внутри исходной совокупности. Но это именно то, что мы хотели продемонстрировать: ужасные точки занимают нулевую площадь. Именно поэтому вам никогда не удастся выбрать их, если вы будете выбирать начальное условие случайным образом. Не сможете вы выбрать и какие-либо

другие «плохие» точки. Именно поэтому наступление синхронизма в такой модели является неизбежным.

Та же аргументация относится к любому другому количеству осцилляторов – с той небольшой поправкой, что в случае четырех или большего количества осцилляторов площадь нужно заменить на объем или гиперобъем. В любом случае вероятность начать процесс с плохой точки всегда остается равной нулю. Следовательно, Пескин был прав: в его модели идентичных импульсно-связанных осцилляторов каждый из осцилляторов в конечном счете запускается в унисон с остальными.

Конструируя это доказательство, мы пришли к выводу, что предположение Пескина об утечках было очень важным: в противном случае преобразование из «до» в «после» не расширяет площадь и все доказательство разваливается. Более того, оно *должно* развалиться, поскольку наша теорема без такого предположения недействительна. Если кривая заряда загибалась вверх, а не вниз – если напряжение растет все быстрее по мере приближения к пороговому значению, – то наше моделирование показывало, что рассматриваемая популяция осцилляторов вовсе не обязательно синхронизируется. Осцилляторы могут заикнуться в случайной картине хаотических запусков.

Этот тонкий момент зачастую ставил в тупик других математиков, когда я читал свои первые лекции по нашей работе: прежде чем я успевал дать развернутое пояснение этого момента, какой-нибудь критикан (а среди слушателей обязательно находился хотя бы один такой) прерывал меня и упрекал в тривиальности нашей теоремы: дескать, осцилляторы, конечно же, синхронизируются, поскольку все они идентичны и одинаково связаны друг с другом – а на какой же еще результат я рассчитывал? Но такое возражение слишком обманчиво: оно игнорирует слабое влияние кривой заряда. Синхронизм возникает с неизбежностью лишь в случае, когда эта кривая изгибается в «правильном» направлении. С биологической точки зрения, форма кривой заряда определяет, в какой момент толчки оказываются более сильными: в начале цикла (вблизи исходного состояния) или в конце цикла (вблизи порогового значения). Когда кривая заряда наклонена вниз, как в модели Пескина, данный толчок напряжения трансформируется в больший сдвиг фазы для осцилляторов, близких к пороговому значению, что в свою очередь гарантирует, что система

будет синхронизирована, хотя понять, почему именно она будет синхронизирована, не так-то просто.

Сконструированное нами доказательство выводов, сделанных Пескином, оказалось первым строгим результатом, относящимся к популяции осцилляторов, обменивающихся внезапными импульсами. Что же касается реальных светлячков или клеток-ритмоводителей сердца, такая модель является очевидным упрощением. Она предполагает, что запуск одного осциллятора всегда подталкивает другие осцилляторы в направлении порога, продвигая таким образом их фазы вперед; реальные биологические осцилляторы могут, вообще говоря, сдвигать фазу как вперед (опережение), так и назад (запаздывание). Кроме того, тайские светлячки, которые являются самыми большими мастерами в части синхронизации – вид, известный как *Pteroptyx malaccas*, – используют совершенно другую стратегию^[16]: они непрерывно корректируют частоту своих «внутренних часов», а не их фазу, в ответ на сторонние вспышки. По сути, они заставляют свои «внутренние часы» тикать быстрее или медленнее, вместо того чтобы переводить свою минутную стрелку немного вперед или назад. К тому же, предполагая, что все осцилляторы идентичны, наша модель не принимает во внимание генетическое разнообразие, присущее любой реальной популяции. И наконец, наше допущение, что все осцилляторы оказывают одинаковое воздействие друг на друга, является очень грубым описанием клеток сердца, которые влияют главным образом на своих ближайших соседей. Учитывая все эти ограничения нашего анализа, мы оказались не готовы к реакции, которую он должен был вызвать с неизбежностью.

В течение нескольких следующих лет было опубликовано более 100 статей, посвященных импульсно-связанным осцилляторам. Авторами этих статей были ученые, представлявшие множество дисциплин, начиная с нейробиологии и заканчивая геофизикой. Что касается нейробиологии, то теоретиков, изучающих модели нейронных сетей, категорически не устраивал преобладающий подход, согласно которому нейроны весьма грубо описывались средними скоростями их запуска (количеством скачков напряжения в секунду), а не фактическим распределением самих этих скачков во времени^[17]. Предложенная нами новая модель импульсно-связанных осцилляторов идеально отвечала потребностям ученых-нейробиологов и духу времени в целом.

По случайному стечению обстоятельств или, может быть, в силу каких-то других причин в начале 1990-х годов ученые в других областях также размышляли над поведением систем такого рода. Например, влиятельный биофизик Джон Хопфилд, работающий в Калифорнийском технологическом институте, обнаружил связь между землетрясениями и импульсно-связанными нейронами^[18]. В упрощенной модели землетрясения пласты земной коры постоянно воздействуют друг на друга, создавая напряжение, которое нарастает до тех пор, пока не будет достигнут некий порог. Затем эти пласты внезапно начинают скользить относительно друг друга; высвобождающаяся при этом энергия приводит к взрыву. Весь этот процесс напоминает постепенное повышение и внезапный скачок напряжения нейрона. В описанной выше модели землетрясения соскальзывания одного пласта может оказаться достаточно, чтобы запустить соскальзывание других пластов (точно так же, как запуск нейрона может вызвать цепную реакцию других разрядов в мозге). Эти каскады множасьихся событий могут приводить к землетрясениям (или эпилептическим хватательным движениям у человека). В зависимости от того, какой именно оказывается конфигурация других элементов системы, результатом может быть либо едва различимый гул, либо сильное землетрясение.

Такая же математическая структура возникала в моделях других взаимодействующих систем, начиная с лесных пожаров и заканчивая массовыми вымираниями живых организмов. В каждом таком случае какой-то отдельно взятый элемент подвергается нарастающему давлению, продвигается в направлении некоего порога, а затем внезапно высвобождает накопившееся напряжение и распространяет его на другие элементы, что способно вызвать эффект домино. Модели с таким характером широко обсуждались в начале 1990-х годов. Статистика каскадов – в основном небольших, но в нескольких случаях катастрофических – изучалась теоретически физиком Пером Баком и его сотрудниками в связи с тем, что они называли самоорганизующейся критичностью^[19].

Открытие, сделанное Хопфилдом, заключается в том, что самоорганизующаяся критичность может быть тесно связана с синхронизацией в импульсно-связанных системах осцилляторов. Интригующая возможность связи между этими двумя областями

породила десятки статей, в которых исследовались возможные варианты связи^[20]. Этот эпизод служит примером того, как математики могут выявлять скрытую связь явлений, которые на первый взгляд кажутся не связанными между собой.

Наша работа привлекла также внимание средств массовой информации – в основном из-за ее связи со светлячками, которые вызывали у большинства людей детские воспоминания о летних вечерах, когда они ловили этих мерцающих насекомых в стеклянные банки^[21]. В результате этого повышенного внимания со стороны прессы в 1992 г. я получил восторженное письмо от женщины по имени Линн Фост, проживающей в Ноксвилле, Теннесси. В характерной для нее вежливой и непосредственной манере она была готова разрушить давний миф о синхронно мерцающих светлячках. Вот о чем она поведала мне в своем письме.

Я уверена, вам известно об этом. Поэтому хочу лишь напомнить о том, что в национальном парке «Грейт-Смоки Маунтин» вблизи г. Элмонт, Теннесси, у мерцающих насекомых наблюдается что-то наподобие группового синхронизма. Сеансы мерцания у них происходят с середины июня и начинаются каждые сутки примерно в 10 часов вечера. После 6 секунд полной темноты тысячи насекомых в течение трех секунд с идеальным синхронизмом совершают шесть быстрых вспышек, после чего *все* они «потухают» еще на 6 секунд.

В Элмонте у нас есть маленький домик (к сожалению, по распоряжению руководства национального парка, он должен быть снесен в декабре 1992 г.) и, насколько нам известно, этот конкретный вид группового синхронного мерцания наблюдается лишь на этой небольшой территории. Между тем это поистине завораживающее зрелище.

Описанные мною насекомые существенно отличаются от наших обычных светлячков, которые после наступления темноты просто загораются и потухают в произвольные моменты времени.

Далее Линн Фост рассказала в своем письме, что по другую сторону речушки, на берегу которой стоит их домик, светлячки,

расположившиеся выше по склону холма, начинают свою последовательность свечений чуть раньше тех, которые расположились ниже, поэтому у наблюдателя возникает впечатление огоньков, сбегających волной вниз по склону холма, «что-то наподобие водопада светлячков».

Она отправила письмо руководству национального парка в Элкмонт с просьбой не проводить реконструкцию парка и не разрушать естественную среду обитания насекомых по крайней мере до тех пор, пока ученые не изучат их поведение. Ведь это явление можно наблюдать лишь в строго определенном месте этого национального парка. Кстати, уникальность этого места натолкнула Линн Фост на мысль о том, что проживающие там люди, наверное, делают что-то такое, что способствует столь необычному мерцанию светлячков. Она предположила, что причиной может быть периодическое подстригание травяных газонов местными жителями. На протяжении 50 лет жители Элкмонта подстригают свои газоны примерно каждые две недели. Это позволяло личинкам светлячков благополучно перезимовать, зарывшись в заросли короткой травы на болотистой почве. Весной эти личинки превращались в светлячков, которые размножались летом. Следовательно, по мнению Линн Фост, если Элкмонт покинут все его нынешние жители, регулярно подстригающие свои газоны, светлячки могут быть утрачены для науки раз и навсегда. В поддержку своей гипотезы, касающейся стрижки травяных газонов, Линн Фост указывала, что самые высокие концентрации светлячков отмечались

непосредственно возле домиков местных жителей и охватывали участки, на которых регулярно подстригалась трава... Ни одной из личинок не удалось обнаружить на участке, где раньше стоял дом «дядюшки Лема Оуенбая», то есть там, где уже давно не подстригают траву. На протяжении 15 лет, за которые на месте лужайки, примыкавшей к дому Мейны Маккинн, успел вырасти лес, она отмечала существенное уменьшение «своей» популяции светлячков.

Линн также удручала перспектива расставания со своим жильем и привычным окружением. К тому времени семейство Фостов наслаждалось фантастическим мерцанием светлячков уже на протяжении 40 лет. Каждый июнь три поколения Фостов укутывались в

пледы и молча сидели на неосвещенном крыльце своего домика в ожидании начала очередного представления.

То, что было так знакомо семейству Фостов, было новостью для науки^[22]. Эти любительские наблюдения могли стать первым хорошо задокументированным случаем синхронного мерцания светлячков в Западном Гэмпшире. На протяжении многих десятилетий после дискуссии, разгоревшейся в начале XX века в журнале Science, было принято считать, что такое явление не встречается на американском континенте – только в Азии и Африке. Я познакомил Линн с Джонатаном Коуплендом, исследователем светлячков, работающим в Южном университете Джорджии. Коупленд вместе со своим коллегой Энди Моисеффом из Коннектикутского университета подтвердил, что светлячки, обитающие у домика Фостов, мерцают синхронно, причем величина рассинхронизации между светлячками не превышает трех сотых долей секунды.

Несмотря на то что в 1992 г. Элмонт был в конечном счете поглощен национальным парком «Грейт-Смоки Маунтин», светлячкам удалось пережить эту трансформацию, и их «Световое шоу» продолжилось, став хорошей приманкой для туристов. Что касается Линн Фост, то ее по-прежнему увлекает повсеместность синхронизма в природе и она по-прежнему совершает свои открытия. Вот, например, о чем она написала мне в 1999 г.: «Еще одно явление простого синхронизма мне довелось наблюдать этой весной, когда четыре индюка (не диких, а домашних) во время весеннего брачного периода собираются в круг и начинают синхронно кулдыкать, после того как их вожак (во всяком случае, мне показалось, что он является их вожаком) издает первый звук».

Далеко не все из нас способны оценить по достоинству чудеса синхронизма в мире животных^[23]. Например, 18 мая 1993 г. в таблоиде National Enquirer была опубликована статья, озаглавленная «Правительство швыряет на ветер деньги налогоплательщиков, выделяя средства на изучение светлячков, обитающих на острове Борнео. Не самая блестящая идея!». Автор статьи издевательски высказывался по поводу предоставления Национальным научным фондом одного из грантов и сообщал, что член Палаты представителей Том Петри (член Республиканской партии от штата Висконсин) «не считает, что это исследование окажется таким уж полезным, и хочет

“зарубить” его. “Тратить деньги налогоплательщиков на изучение светлячков кажется мне не самой лучшей идеей”».

Нет ничего удивительного в том, что Том Петри – как и большинство людей, далеких от науки – не понимает важность этой проблемы. Между тем важность изучения светлячков трудно переоценить. Например, до 1994 г. самопроизвольные пульсации трафика между устройствами, которые называются маршрутизаторами, доставляли немало проблем специалистам, работающим с интернетом^[24]. Лишь в 1994 г. стало понятно, что маршрутизаторы ведут себя подобно светлячкам, периодически обмениваясь сообщениями, которые непреднамеренно синхронизировали их. Как только причина была выявлена, стало ясно, как избавиться от этих «заторов» в компьютерной сети. Инженеры разработали децентрализованную архитектуру, обеспечивающую более эффективное тактирование компьютерных цепей: для достижения синхронизма с невысокими затратами и высокой надежностью они взяли на вооружение стратегию светлячков. (Эти скромные насекомые даже помогают спасти людям жизнь. По иронии судьбы, на той же неделе, когда в National Enquirer были опубликованы «разоблачения» Тома Петри, в статье, опубликованной журналом Time, сообщалось о том, что врачам удалось использовать светоизлучающий фермент светлячков – люциферазу – для ускорения испытаний лекарств от особо стойких разновидностей туберкулеза^[25].)

Групповое поведение светлячков не только служит источником вдохновения для инженеров, но имеет более широкое научное значение. Это один из немногих поддающихся трактовке примеров сложной самоорганизующейся системы, в которой одновременно происходят миллионы взаимодействий, когда каждый элемент системы изменяет состояния всех остальных ее элементов. Практически все основные нерешенные проблемы в современной науке имеют такой запутанный характер. Рассмотрим, к примеру, каскад биохимических реакций в отдельно взятой клетке и нарушение их хода, когда эта клетка оказывается раковой; взлеты и падения фондового рынка; формирование сознания в результате взаимодействия триллионов нейронов в мозге; зарождение жизни из сложнейшей сети химических реакций, протекавших в первичном бульоне. Все эти примеры включают огромные количества «действующих лиц», соединенных

между собой в сложные сети. В каждом таком случае самопроизвольно возникают изумительные картины. Богатство окружающего нас мира во многом объясняется чудесами самоорганизации.

К сожалению, наш разум не в состоянии уяснить столь сложные системы. Мы привыкли мыслить о системах с точки зрения централизованного управления, четких цепочек команд, простой причинно-следственной логики. Но когда нам приходится иметь дело с системами, содержащими огромные количества взаимосвязанных элементов, когда каждый элемент в конечном счете влияет на все остальные части системы, наши стандартные способы мышления оказываются бессильны. Простые картины и словесные формулировки слишком близоруки. Именно это создает проблемы в экономике, когда мы пытаемся предугадать последствия какого-нибудь очередного урезания налогов или изменения процентных ставок, или в экологии, когда применение какого-нибудь нового пестицида приводит вовсе не к тем результатам, на которые мы рассчитывали (например в продукты питания попадают вредные вещества).

Загадка синхронного мерцания светлячков стоит в одном ряду со множеством концептуальных проблем, подобных ей, хотя, разумеется, найти ее решение гораздо легче, чем найти решение проблем экономики или экологии. Мы имеем достаточно полное представление о природе индивидуальных организмов (светлячков), их поведении (ритмичное мерцание) и их взаимодействии («перезапуск» в ответ на свечение), в отличие от наших весьма приблизительных представлений об экологических системах или глобальном рынке, которые характеризуются множеством разнообразных компаний и видов живых организмов и неизвестными нам режимами взаимодействия элементов этих сложных систем. Достичь понимания таких систем отнюдь не просто. В действительности все, о чем было сказано выше, является лишь незначительной частью того, что нам удалось понять к настоящему времени. Однако приведенной выше информации вполне достаточно для того, чтобы читатели уяснили, как математика помогает нам раскрывать тайны спонтанно возникающего порядка, и получили наглядный пример того, что может (и чего не может) сделать для нас математика на этой примитивной, самой начальной стадии исследования.

Несмотря на то что в живом мире синхронизм встречается повсеместно, его функция не всегда очевидна. Почему, например, светлячки мерцают в унисон? Биологи предлагают по меньшей мере 10 правдоподобных объяснений этого явления^[26]. Старейшая из них называется «гипотезой маяка». Уже давно известно, что лишь самцы светлячков синхронизируют свои мерцания; таким образом, согласно данной точке зрения, это «световое представление» адресовано самкам – что-то наподобие коллективного приглашения в компанию. Синхронно мерцая, самцы усиливают этот приглашающий сигнал, охватывая им значительную площадь джунглей и привлекая самок, которые в противном случае могли бы не заметить свечения. Именно поэтому такой синхронизм характерен для местностей, покрытых густой растительностью (подобно джунглям Таиланда и Малайзии или лесу позади домика Линн Фост), но редко наблюдается на открытых лугах восточной части Соединенных Штатов, где светлячки могут без проблем назначать свидания друг другу.

Второе возможное преимущество синхронизма заключается в том, что вам может просто повезти: самка, которая положила глаз на светлячка, похожего на вас, может легко спутать вашего конкурента с вами и явиться на свидание не с ним, а с вами. Именно поэтому синхронизм может быть необходим и для того, чтобы запутать хищников: в толпе всегда можно затеряться. Самое последнее по времени своего появления объяснение заключается в том, что синхронизм является отражением конкуренции, а не сотрудничества: каждый из светлячков пытается сверкнуть первым (поскольку самки, по-видимому, предпочитают именно первого), но если этой стратегии придерживается каждый из светлячков, то синхронизм наступает автоматически^[27].

У многих других живых существ взаимный синхронизм также каким-то образом связан с функцией продолжения рода. Периодические цикады^[28] пытаются перехитрить своих врагов, прячась под землей на долгие семнадцать лет, после чего миллионы этих насекомых одновременно появляются на свет, проводят брачный период длиною в один месяц и прекращают свое существование^[29]. Группы самцов манящего краба (род *Uca*, семейство *Ocypodidae*), у каждого из которых имеется единственная, невероятно большая клешня, находят наилучшее применение своим природным талантам: они заигрывают с самкой,

окружив ее и размахивая в унисон своими гигантскими клешнями^[30]. (Весь этот ритуал выглядит так, словно множество маленьких дирижеров дирижируют единственным музыкантом.)

Что же касается людей, то синхронизацией занимаются именно женщины. Большинству женщин знакомо явление менструального синхронизма, суть которого заключается в том, что у сестер, женщин, проживающих в одной комнате, близких подруг или сотрудников, проводящих много времени вместе, менструальные циклы начинаются примерно в одно и то же время. Такой менструальный синхронизм, долгое время бывший скорее объектом для шуток, чем серьезного изучения, впервые был научно задокументирован Мартой Макклинток, в то время студенткой, обучавшейся в женском колледже Wellesley (штат Массачусетс) по специальности «Психология»^[31]. Она провела исследование, объектом которого были 135 ее товарищей по учебе, попросив их на протяжении всего учебного года фиксировать даты начала своих менструальных циклов. В октябре менструальные циклы близких подруг и девушек, проживавших в одной комнате студенческого общежития, различались в среднем на 8,5 дня, но уже к марту среднее расхождение сократилось до 5 дней – статистически значимое сокращение. В контрольной группе, составленной из произвольно подобранных пар девушек, не удалось выявить каких-либо изменений.

Высказывались разные соображения относительно механизма синхронизации в этом случае, однако наиболее правдоподобная версия заключается в том, что это каким-то образом связано с феромонами, то есть неустановленными химическими веществами без запаха, которые каким-то путем передают сигнал синхронизации^[32]. Первым подтверждением этой догадки стал эксперимент, о котором сообщил в 1980 г. биолог Майкл Рассел. Его коллега, Женестьева Свиц, обнаружила этот эффект в своей собственной жизни: проживая в течение всего лета в одной комнате с одной из своих подруг, она обратила внимание, что их менструальные циклы сблизились. После того как они расстались, их менструальные циклы рассинхронизировались. Из этого можно было заключить, что Женестьева – мощный синхронизатор. Рассел попытался выяснить, что же такого особенного в Женестьеве, что обеспечивает ей столь уникальное свойство. В ходе эксперимента она клала себе под мышки

небольшие хлопчатобумажные прокладки, каждый день сдавая на анализ Расселу пот, накопившийся в этих прокладках. Рассел смешивал эти пробы пота с небольшим количеством спирта и делал мазок этой «эссенцией Женевьевы» на верхней губе женщин, согласившихся выполнять роль «подопытных» в этом эксперименте. Эти опыты проводились трижды в неделю на протяжении четырех месяцев.

Результаты эксперимента оказались впечатляющими. По истечении четырех месяцев менструальные циклы женщин, участвовавших в эксперименте, в среднем начинались с разницей 3,4 дня по сравнению с началом менструального цикла у Женевьевы, между тем как в начале эксперимента эта разница составляла в среднем 9,3 дня. С другой стороны, начало менструальных циклов женщин в контрольной группе (на верхние губы которых наносился лишь спиртовой раствор) существенно не изменилось. Совершенно очевидно, что какое-то вещество в потовых выделениях Женевьевы передавало информацию о фазе ее менструального цикла таким образом, что это увлекало за собой менструальные циклы других женщин, которые улавливали запах этого вещества.

Последующие исследования принесли не столь впечатляющие результаты. В некоторых из них были обнаружены статистические свидетельства синхронизма, в других – нет. Скептики восприняли эти противоречивые данные как свидетельство слабости или случайной природы данного явления. Недавняя работа Макклинтон (в настоящее время она занимается исследованиями по биологии в Чикагском университете) свидетельствует об обратном – о том, что синхронизм менструальных циклов – это лишь наиболее заметное следствие более масштабного явления: химической связи/взаимодействия между женщинами^[33]. В ходе эксперимента, проведенного в 1998 г., Макклинтон вместе со своей коллегой Кэтлин Стем выяснила: если брать мазки из подмышек женщин в разные моменты их менструальных циклов и наносить эти мазки на верхние губы других женщин, то донорские секреты систематическим образом сдвигают фазу менструального цикла у реципиента. Мазки, взятые у женщин в начале их менструального цикла, в фолликулярной фазе до овуляции, обычно сокращали менструальные циклы женщин, которые получали эти мазки. Иными словами, овуляция у реципиентов происходила на несколько дней раньше, чем обычно. Напротив, мазки, взятые у

женщин во время овуляции, продлевали менструальные циклы реципиентов. А секреты, собранные на лютеиновой фазе (фаза желтого тела яичника), в дни перед менструацией, не вызывали никаких изменений.

Наш вывод сводится к тому, что женщины в какой-либо сплоченной группе всегда оказывают воздействие на менструальные циклы друг друга, бессознательно участвуя в молчаливом общении феромонами. Одним из возможных последствий такого общения является синхронизм менструальных циклов. Но если принять во внимание, что такие феромональные сигналы могут либо сближать циклы, либо разводить их во времени в зависимости от того, в какой день месяца были сгенерированы эти сигналы, нет ничего удивительного в том, что в данном случае синхронизм не является неизбежным – должен также быть возможен асинхронизм или даже антисинхронизм (при котором менструальные циклы наступают в противофазе друг другу), что и наблюдается на практике.

Функция этого «химического диалога» остается для ученых загадкой. Возможно, что женщины подсознательно стремятся к тому, чтобы овуляция и зачатие происходили у них синхронно с подругами (чтобы получить возможность совместно выхаживать, родить и вскармливать детей) и в противофазе со своими недругами (чтобы избежать конкуренции с ними за ограниченные ресурсы). Сколь бы притянутыми за уши ни казались такие соображения, именно такой сценарий реализуется у других млекопитающих. Самки крыс в синхронизированной группе производят более многочисленное и здоровое потомство, чем то, которое приносит отдельно взятая самка крысы. Репродуктивный синхронизм обеспечивает преимущества всем, если другие самки в группе склонны к сотрудничеству.

С математической точки зрения данные, полученные Макклиток, подтверждают то, о чем вы, вероятно, уже догадываетесь: женщины, если их рассматривать как связанные осцилляторы, синхронизируют друг друга значительно слабее, чем светлячки. Биохимические взаимодействия между ними не всегда приводят их к синхронизму, в отличие от светлячков в Юго-Восточной Азии, которые синхронизируют свои мерцания ночь напролет, 365 дней в году. Неизбежный синхронизм этих светлячков (и клеток-ритмоводителей сердца) напрочь лишен гибкости, и именно по этой причине редко

встречается в других биологических системах. Подобно женщинам, большинство осцилляторов достигают синхронизма в одних обстоятельствах и не достигают в других.

Таким образом, модель, рассмотренная нами ранее в этой главе, начинает выглядеть как чересчур упрощенная. Несмотря на то, что она помогла нам понять, почему синхронизм может оказаться неизбежным при определенных условиях, она зашла слишком далеко: она не учитывает всего остального. Уточненная теория связанных осцилляторов должна уметь предсказывать, будет ли синхронизироваться какая-то определенная группа осцилляторов; она должна также указывать нам, какие факторы являются решающими в этом отношении.

Эта теория должна также учитывать весь спектр способов взаимодействия между осцилляторами. Вспомните, что светлячки «подталкивают» друг друга внезапными импульсами – световыми ударами, – но затем игнорируют друг друга в оставшееся время своего цикла, тогда как женщины все время взаимодействуют с осцилляторами друг друга. В природе часто встречаются оба типа связи, но существующая модель учитывает лишь импульсы. Более совершенная модель должна распространяться и на непрерывное взаимодействие.

Кроме того, до сих пор мы предполагали, что все осцилляторы в данной популяции строго идентичны. Однако реальные осцилляторы не могут быть строго идентичны, а это означает, что фактическая длительность цикла у всех них тоже неодинакова. Точно так же, как длительность менструального цикла у одной женщины может составлять 25 дней, а у другой – 35 дней, все другие виды биологических осцилляторов характеризуются неким статистическим распределением длительностей цикла. Даже электронным и механическим осцилляторам, которые *должны* характеризоваться строго определенной длительностью цикла (номинальное значение которой является одним из важнейших параметров таких осцилляторов), присущ некоторый разброс, что объясняется незначительными погрешностями производства или колебаниями свойств материалов, использовавшихся для их изготовления.

К сожалению, эти нюансы порождают колоссальные математические трудности. Одно дело – желать более реалистичной модели, и другое – создать такую модель, поддающуюся

интерпретации. Мы не сможем углубить свои познания, если используемая нами модель окажется такой же сложной, как и явление, которое описывает эта модель. Именно поэтому математическое моделирование является не только наукой, но и искусством: элегантная модель представляет собой идеальный компромисс между простотой и достоверностью. Сегодня мы располагаем прекрасной моделью синхронизма, в которой достигнут именно такой компромисс. Ее создание является результатом коллективного труда, который растянулся на три десятилетия и потребовал усилий трех первопроходцев, первый из которых был одним из самых прозорливых и оригинальных мыслителей XX столетия.

Глава 2. Мозговые волны и условия синхронизма

Норберт Винер никогда не был знаменитостью в полном смысле этого слова. Но когда в 1950-е годы была опубликована его книга «Кибернетика», она вызвала большие волнения среди читающей публики. Обозреватель газеты New York Times назвал эту книгу «основополагающей и сопоставимой по своей важности с трудами Галилея, Мальтуса, Руссо или Милля». Винер предложил единый подход к осмыслению проблем связи и управления, будь то системы нервных клеток или общества, животные или машины, компьютеры или люди^[34]. В большей степени это было похоже на мечту, чем на законченную теорию, а выводы, сделанные Винером, были несколько скоропалительными и преждевременными. Сегодня никто не сказал бы, что его специальностью является кибернетика, однако первая половина слова «кибернетика» продолжает свою жизнь в качестве модного префикса в таких, например, словах, как «киберпространство» и «киберпанк».

Однако в научном мире имя Норберта Винера никогда не будет забыто по причинам как серьезным, так и не очень серьезным^[35]. Что касается серьезных причин, то имя Норберта Винера увековечено в математической терминологии: винеровский процесс, теорема Пэли-Винера, метод Винера-Хопфа и т. д. Бывший вундеркинд, который в восемнадцать лет защитил диссертацию в Гарвардском университете, Норберт Винер совершил революцию в теории случайных процессов. Выполненный им анализ броуновского движения, хаотических перемещений молекул в растворе, оказался значительным шагом вперед по сравнению с интуитивным подходом Альберта Эйнштейна к решению той же проблемы, а предложенные им методы заложили фундамент для последующих работ Ричарда Фейнмана по квантовой электродинамике, а также для работ в области финансов, выполненных будущими лауреатами Нобелевской премии Фишером Блэком и Майроном Скоулзом.

Что же касается менее серьезной стороны, то математики любят пересказывать друг другу разные истории о Винере. Невысокого роста,

похожий на колобка, всегда в очках с толстыми линзами и с неизменной сигарой в зубах, Винер обожал разъезжать по коридорам Массачусетского технологического института на своем уницикле – одноколесном велосипеде. Даже в профессии, обладатели которой не могут похвастаться своей любовью к спорту или здравому смыслу, Винер выделялся из общей массы. Когда ему не удалось нормально принять ни одной из многочисленных подач от своего партнера по теннисной партии, Винер предложил тому поменяться ракетками. Винер славился своей рассеянностью. Когда он вместе со своей семьей переезжал из Кембриджа в Ньютон (их новое место жительства), его жена выписала на листке бумаги их новый адрес и подробнейшим образом описала, как туда добраться из его офиса (она была уверена, что Норберт забудет об их переезде). Так и случилось. Винер использовал этот листок бумаги в качестве черновика для каких-то вычислений, выбросил его в корзину для мусора и по окончании работы вернулся в свой старый дом. Прибыв туда, он понял, что уже не проживает там, остановил на улице маленькую девочку и спросил, не знает ли она, куда переехало семейство Винеров. Она сказала: «Конечно, дедушка, знаю. Пойдем со мной».

Винер является одной из центральных фигур в науке о синхронизме. Частично это объясняется тем, что именно он сформулировал вопрос, который не отваживался поставить никто из ученых до него. До Винера математики довольствовались изучением систем лишь с двумя связанными осцилляторами. Винер взялся за изучение систем, включающих в себя миллионы осцилляторов. Еще более важным является, наверное, то обстоятельство, что Винер первым указал на повсеместность синхронизма во Вселенной. Стрекошечные сверчки, квакающие лягушки, мерцающие светлячки, интервалы в поясе астероидов, генераторы в энергосистеме – во всех этих системах Винер обнаружил синхронизм. Поверхностные различия не ввели его в заблуждение. Его интересовали глобальные принципы. Он полагал, что выявил один из таких принципов, когда размышлял над происхождением мозговых волн у человека.

В конце 1950-х годов никто не понимал, зачем мозг вообще излучает волны. Но несколькими десятилетиями ранее физиологи обнаружили, что если к разным точкам кожи на черепе человека

подсоединить электроды, на электродах появляется очень небольшое напряжение, причем это напряжение изменяется во времени. После того как инженерам удалось разработать весьма чувствительные электронные усилители, появилась возможность автоматически представить эти микроскопические флуктуации напряжения, или «мозговые волны», в графическом виде на бумажной ленте. Устройство, использующееся для регистрации мозговых волн, называется электроэнцефалографом. (Такая же технология используется в тестах на детекторе лжи и для контроля работы сердца и должна быть знакома каждому, кто смотрел по телевизору репортажи из больниц.)

Специалисты по измерению мозговых волн (то есть по расшифровке электроэнцефалограмм) умеют распознавать в этих записях мозговой деятельности характерные картины. Одна картина, так называемый альфа-ритм, наблюдается у людей, которые бодрствуют, но пребывают в расслабленном состоянии, а их глаза закрыты^[36]. Субъективно это ощущается как приятное состояние «отключения» от внешнего мира. На электроэнцефалограмме это выглядит как ярко выраженная осцилляция с частотой примерно 10 циклов в секунду.

Винер хотел изучить альфа-ритм гораздо подробнее, поскольку у него были кое-какие соображения по поводу того, какой может быть функция альфа-ритма. Винер полагал, что альфа-ритм является отражением работы некоего задающего (или тактового) генератора, встроенного в мозг человека. Компьютеру необходим тактовый генератор, чтобы синхронизировать сигналы, которыми обмениваются между собой тысячи компонентов машины. Винер предположил, что мозг мог бы поступать аналогично и координировать миллиарды нейронов, заставляя их действовать в ритме, задаваемом неким «барабанщиком». Очевидно, отдельно взятые нейроны не могли выполнять такую функцию, поскольку были известны как слишком неточные осцилляторы, неспособные исполнять роль надежного тактового генератора. Винер выдвинул гипотезу, что мозг весьма изобретательно формирует точный тактовый генератор на основе огромного количества неточных тактовых генераторов. Он предположил, что в каком-то месте мозга могут быть сосредоточены миллионы специализированных осцилляторов, которые, возможно, являются отдельными нейронами или небольшими кластерами

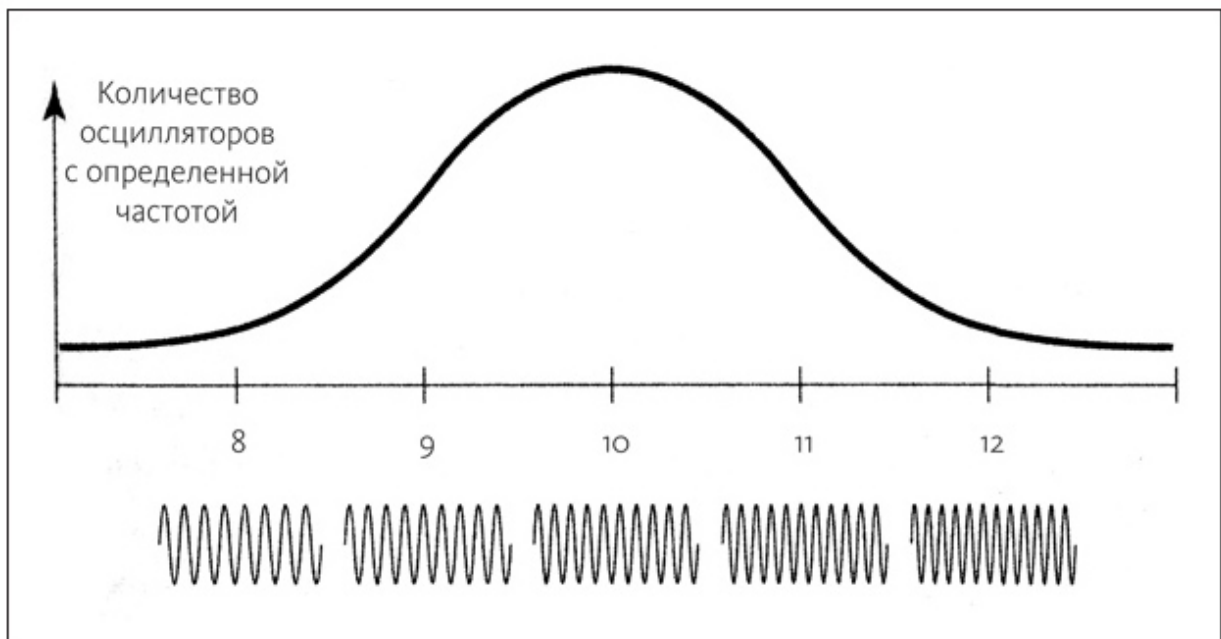
нейронов, причем все они разряжаются с частотой примерно 10 раз в секунду. Подобно любой другой биологической популяции, эти осцилляторы, несомненно, не идентичны: некоторые из них изначально действуют быстрее других, срабатывая 12 раз в секунду, тогда как другие, напротив, действуют медленнее, срабатывая лишь 8 раз в секунду; при этом большинство осцилляторов работают на частоте, близкой к средней, то есть к 10 циклам в секунду. Предоставленная сама себе, эта разнородная совокупность нейронных осцилляторов выдает импульсы с разными частотами, создавая электрическую какофонию, подобную звучанию оркестра во время настройки инструментов перед началом представления. Чтобы работать вместе как единый и слаженный часовой механизм, эти гипотетические осцилляторы должны координировать свои действия, чувствовать электрические ритмы друг друга и реагировать на них соответствующим образом.

Идея Винера заключалась в том, что эти осцилляторы должны самопроизвольно синхронизироваться, подстраивая частоты друг друга. Если какой-то осциллятор работает слишком быстро, остальные осцилляторы в соответствующей группе должны замедлить его; если же какой-то осциллятор работает слишком медленно, остальные осцилляторы должны ускорить его работу.

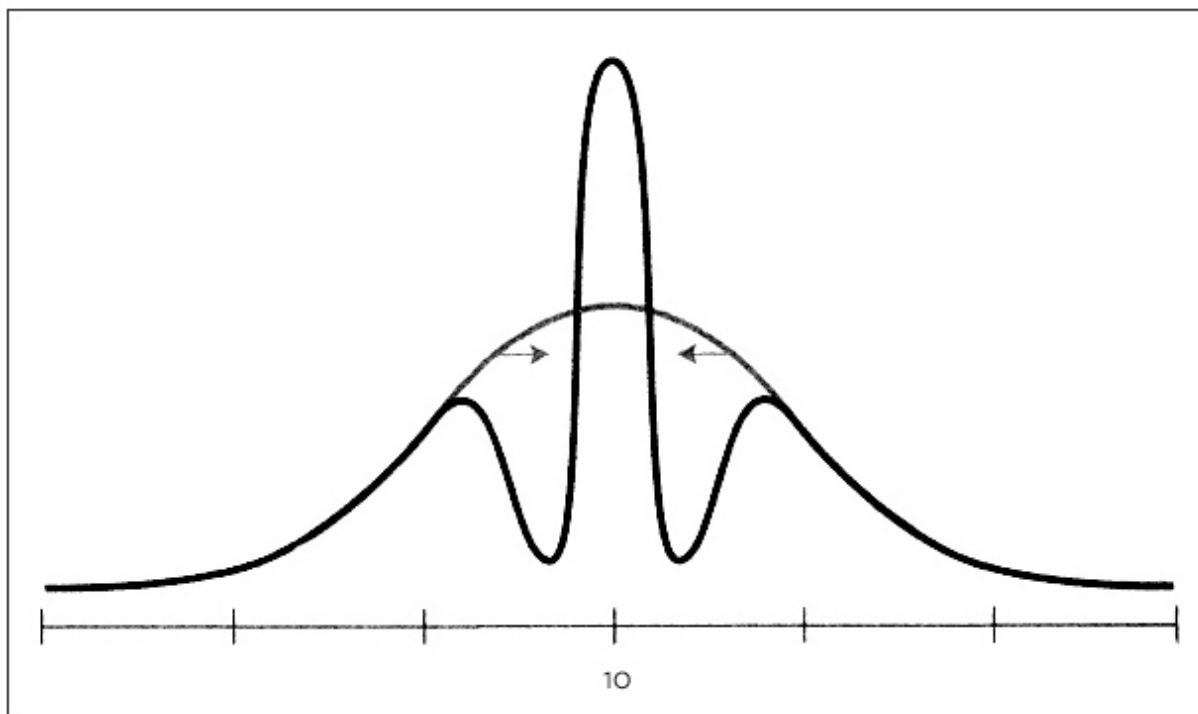
Чтобы проверить, работает ли в действительности этот механизм «подтягивания» частот, Винер предложил отыскать характерные «отпечатки», которые он должен оставлять на альфа-ритме. В этом случае нам на помощь может прийти аналогия с политикой. Естественные частоты осцилляторов можно представлять себе как спектр политических взглядов в гипотетическом обществе. Крайне левые радикалы соответствуют крошечной совокупности осцилляторов, которые предпочитают работать на частоте, скажем, 8 циклов в секунду. Продвигаясь постепенно по нашему спектру вправо, мы встретим более многочисленную субпопуляцию либералов, работающих на частоте 9 циклов в секунду, доминирующее ядро центристов, работающих на частоте 10 циклов в секунду, затем натолкнемся на менее многочисленную группу консерваторов, работающих на частоте 11 циклов в секунду, и наконец – лишь небольшую горстку крайне правых радикалов, работающих на частоте 12 циклов в секунду. Положим для простоты, что диаграмма количества людей в каждой из перечисленных

категорий представляет собой хорошо знакомую нам колоколообразную кривую, в которой доминирует мощный центр, и симметрично сходящуюся на нет по мере продвижения в правую или левую сторону от центра.

Имейте в виду, что такая картина отражает лишь тенденции, внутренне присущие системе политических взглядов. Это политические взгляды, которых придерживались бы люди (или частоты, на которых работали бы осцилляторы), если бы они были полностью изолированы от влияния других.



А теперь предоставим возможность отдельным индивидуумам влиять друг на друга; допустим также (хотя политики лишь в редких случаях действуют подобным образом), что эти осцилляторы могут изменять свои частоты. В результате уговоров со стороны других осцилляторов медленный осциллятор можно убедить работать быстрее, а быстрый осциллятор можно убедить работать медленнее. Затем, если измерить весь этот спектр, окажется, что он уже не похож на колоколообразную кривую. Винер предположил, что он выглядел бы примерно так:



Чтобы уяснить специфическую форму этого графика, вспомним, что большинство осцилляторов поначалу работало вблизи середины колоколообразной кривой. Воздействуя на частоты друг друга, многие из них сместились в абсолютный центр, образовав мощный мейнстримный консенсус (высокий и узкий пик). Их совместное влияние на остальную популяцию оказалось достаточно сильным для того, чтобы оттащить ряд «умеренных» от левого и правого крыльев (еще больше увеличив высоту пика и понизив кривую на собственных позициях «умеренных», что привело к появлению «провисаний» по обе стороны от пика). Тем не менее достигнутый консенсус не был настолько убедительным, чтобы вытеснить большинство упрямых экстремистов на краях спектра (изображенных в виде плечей на обоих концах спектра).

Винер прогнозировал, что альфа-ритм продемонстрирует точно такой же специфический пик и двойное «проседание» в своем спектре частот. В таком случае это могло бы стать убедительным свидетельством идеи Винера о том, что причиной альфа-ритма является синхронизация между осцилляторами с разными естественными частотами. Чтобы удостовериться в своей правоте, Винеру нужно было придумать способ, с помощью которого он мог бы измерить такой

спектр с небывалой точностью. В данном случае Винер намеревался использовать экспериментальный метод, который несколькими годами ранее изобрел его сотрудник Уолтер Розенблит, инженер по электротехнике из Массачусетского технологического института. Розенблит придумал способ, с помощью которого мозговые волны можно регистрировать на магнитной ленте, а не на бумаге; это означало, что полученные таким образом данные можно обработать электронным способом, выполнив первый в мире количественный анализ спектра мозговых волн. Все предшествующие работы носили качественный характер: они основывались на распознавании образов, субъективных суждениях специалистов, умеющих выявлять определенные картины, анализируя электроэнцефалограммы. Пользуясь методом, предложенным Розенблитом, соответствующие вычисления можно было автоматизировать, а процесс анализа сделать вполне объективным.

О полученных таким образом результатах Винер объявил в своей монографии, написанной в 1958 г., хотя его презентация носила подозрительно отрывочный, эскизный характер. Вместо того чтобы опубликовать фактические данные (как полагалось сделать согласно критериям, принятым в научном мире – если ученый собирался обнаружить данные, подтверждающие выдвинутую им гипотезу), он сделал приблизительный набросок измеренного спектра^[37] – что-то наподобие графика, представленного выше на моем рисунке. Такие результаты показались слишком банальными и чересчур уж «правильными», чтобы быть похожими на правду. Складывалось впечатление, будто Винер что-то скрывает.

Однако его статья вовсе не заслуживала недоверия. Он утверждал, что «подтягивание» частот является универсальным механизмом самоорганизации, касающимся не только осцилляторов в мозге, но буквально всего в природе – как в живой, так и в неживой. Он настойчиво призывал биологов проводить эксперименты на лягушках, сверчках и даже на светлячках Юго-Восточной Азии задолго до появления в научной литературе статей об их синхронном мерцании. В 1961 г. он писал: «Не отваживаясь высказываться по поводу возможного исхода экспериментов, которые еще не проводились, я все же полагаю, что это направление исследований является весьма многообещающим и не слишком сложным»^[38].

Его следующей задачей была разработка подробной теории «подтягивания» частот.

К сожалению, когда он попытался подкрепить свои догадки строгими математическими доказательствами, он столкнулся с непреодолимыми трудностями. Он представил ряд грубых расчетов, но они выглядели весьма неуклюже и вели в никуда. Винер умер в 1964 г., так и не решив одну из важнейших для себя задач. Годом позже одному из студентов удастся найти правильный подход к ее решению.

В то время Арт Уинфри был старшим научным сотрудником в Корнельском университете и занимался технической физикой. Он давно мечтал стать биологом, однако вместо того чтобы идти к своей цели проторенным путем, он решил основательно пополнить багаж своих знаний по математике и физике, надеясь освоить новый для себя инструментарий. Электроника и компьютеры, квантовая механика и дифференциальные уравнения – этими инструментами биологи в то время, как правило, не пользовались.

Когда Уинфри размышлял над проблемой группового синхронизма, он думал о самих осцилляторах, а не просто об их частотах^[39]. В этом отношении его концептуализация данной проблемы была гораздо более подробно разработанной, чем у Винера. Он не просто характеризовал каждый осциллятор частотой, на которой тот работает (его местоположением на политическом спектре, если вернуться к нашей предыдущей аналогии), а изображал его работу шаг за шагом, на протяжении всего цикла, что является, в конце концов, самым существенным для каждого осциллятора. Это сразу же привело к сложностям, которые заставили бы опустить руки любого другого – только не Уинфри^[40]. Преимущество молодости в том и состоит, что в эту пору жизни для вас нет почти ничего невозможного.

Свою модель он совершенно сознательно сделал приблизительной. Он намеревался сделать ее достаточно общей, чтобы ее можно было применить к *любой* популяции биологических осцилляторов. Единственным способом охватить одной моделью типичные характеристики стрекочущих сверчков, мерцающих светлячков, пульсирующих нейронов, задающих ритм, и тому подобных объектов было не обращать внимания на все их биохимические различия, а

вместо этого сосредоточиться исключительно на двух вещах, типичных для всех биологических осцилляторов: их способности отправлять и принимать сигналы.

Запутанность этой проблемы обусловлена тем, что оба указанных свойства изменяются в течение цикла осциллятора: влияние и чувствительность являются функциями фазы. Например, цикл светлячка состоит из внезапной вспышки, затем следует интервал темноты (пока светлячок перезаряжает орган, который обеспечивает свечение), затем следует очередная вспышка и т. д. Эксперименты показали, что светлячки на приемном конце замечают вспышку другого светлячка, но игнорируют темноту. Поэтому в математическом описании, предложенном Уинфри, «функция влияния» должна изменяться в промежутке между двумя уровнями: высоким во время вспышки и близким к нулю во время темноты. Аналогично «функция чувствительности» показывает, как осциллятор реагирует на принимаемые им сигналы. Увидев вспышку в течение одной части своего цикла, светлячок может ускорить работу своего внутреннего таймера. Увидев точно такую же вспышку в течение какой-либо другой части цикла, светлячок может замедлить работу своего внутреннего таймера или вообще не влиять на его работу. Чтобы полностью охарактеризовать любой осциллятор в своей модели, Уинфри было достаточно использовать эти две функции. Выбрав эти две функции, можно было определить поведение осциллятора и как отправителя, и как получателя сигналов.

Чтобы сделать эти идеи как можно более конкретными, представим осциллятор в виде бегуна трусой, бегущего по круговой дорожке стадиона. Разные места на этой дорожке представляют разные фазы цикла биологической активности осциллятора. Если дорожка представляет, например, менструальный цикл, то одна из ее точек соответствовала бы овуляции. Другая, соответствующая примерно половине длины дорожки, соответствовала бы менструации, а места между этими двумя точками соответствовали бы промежуточным гормональным событиям. После совершения одного круга бегун снова вернулся бы в точку овуляции. Или, если такая дорожка должна представлять ритм мерцания светлячка, разные ее места означали бы свечение как таковое, сопровождаемое разными стадиями биохимического восстановления, в ходе которого орган, отвечающий за

свечение этого насекомого, перезаряжается и готовится к своему очередному свечению.

Если следовать подобной логике, то два связанных осциллятора будут похожи на двух бегунов, которые во время бега постоянно обмениваются между собой командами. Что именно они кричат друг другу и насколько громко они произносят эти слова, определяется их текущими местоположениями на дорожке: эта информация заключена в функции влияния, предложенной Уинфри. Если, например, величина функции влияния одного бегуна в данный момент мала и положительна, он кричит другому бегуну: «Беги, пожалуйста, немного быстрее». С другой стороны, высокое отрицательное значение функции влияния означает: «Ты бежишь слишком быстро. Помедленнее, пожалуйста!» А нулевое значение функции влияния вообще ничего не означает для партнера. С течением времени оба бегуна продолжают свой бег по дорожке, поэтому выкрикиваемые ими команды продолжают меняться от момента к моменту.

Такая картина носит слишком общий характер. Она может учитывать импульсные взаимодействия, используемые светлячками, сверчками и нейронами (аналогично внезапному крику, за которым следует молчание в течение остальной части цикла), или постоянное подталкивание и подтягивание феромонов, обнаруженное Макклинток и Стерном для менструального цикла (постоянно меняющаяся последовательность требований ускориться или замедлиться).

Между тем оба бегуна и прислушиваются к командам своего партнера, и выкрикивают их. Как именно они реагируют на поступающее сообщение, определяется другой функцией Уинфри – функцией чувствительности, которая также бывает разной в разных местах дорожки. Когда чувствительность оказывается высокой и положительной, бегун демонстрирует покладистость и выполняет любые инструкции, которые поступают ему в данный момент. Если же чувствительность равна нулю, он не обращает внимания на эти инструкции. А если чувствительность отрицательна, бегун поступает вопреки принимаемым им инструкциям: он ускоряется, когда от него требуют замедлиться, и наоборот. В данном случае модель также носит слишком общий характер, как и модель Пескина, которую мы обсуждали в предыдущей главе (она предполагала, что осцилляторы всегда продвигаются вперед, когда их подталкивает импульс). В модели

Уинфри фазу осциллятора можно либо продвинуть вперед, либо задержать в зависимости от того, на каком этапе своего цикла этот осциллятор принял импульс. Эксперименты показали, что именно так ведут себя реальные биологические осцилляторы.

Для большей простоты Уинфри предположил, что все осцилляторы в данной популяции имеют одинаковые функции влияния и чувствительности. Но он допустил возможность разнообразия так же, как сделал до него Винер: он предположил, что естественные частоты осцилляторов распределены по всей популяции в соответствии с колоколообразной кривой. Если продолжить нашу аналогию с бегунами на дорожке стадиона, то такую популяцию осцилляторов следовало бы представить в виде клуба любителей бега трусцой, тысячи членов которого вышли одновременно на беговую дорожку. Большинство этих бегунов бегут с некой средней скоростью, но в клубе есть несколько очень быстрых ребят, которые еще в школьные годы блистали на беговой дорожке, и некоторое число «тюфяков», которые после многих лет, в течение которых они вели малоподвижный образ жизни, пытаются восстановить свою былую форму. Другими словами, мы имеем дело с неким распределением естественных способностей членов клуба бегунов точно так же, как мы имеем дело с неким распределением естественных частот осцилляторов в данной биологической популяции.

Будто перечисленных выше сложностей оказалось недостаточно, нам необходимо определить еще один, последний аспект этой модели: связи между осцилляторами. Уинфри пришлось сделать предположение относительно того, кто кому кричит и кто кого слушает. Здесь наблюдается довольно широкий разброс – все зависит от того, какой биологический пример мы имеем в виду. Возьмем, к примеру, циркадные (околосуточные) ритмы. В этом случае Уинфри предположил возможность существования «стыковочных» клеток, рассредоточенных по всему телу; каждая из таких клеток в ходе суточного цикла выделяет в кровотока определенные химические вещества. Каждая клетка организма омывается смесью выделений всех остальных клеток; по сути, каждая клетка взаимодействует со всеми другими клетками. С другой стороны, сверчки уделяют наибольшее внимание сигналам, поступающим от их непосредственных соседей. А

в случае осциллирующих нейронов в мозге такой клубок взаимосвязей оказался невероятно сложным.

Признав, что решить проблему связи между осцилляторами было бы невероятно трудно, Уинфри попытался уклониться от вопросов связи и решить простейший вариант этой задачи^[41]. Что произойдет, размышлял он, если каждый осциллятор подвергается *одинаковому* воздействию со стороны всех остальных осцилляторов? Это было похоже на то, как если бы каждый бегун одинаково реагировал на крики всех остальных бегунов, а не только на крики тех, кто бежит рядом с ним. Или, если воспользоваться более реалистичной аналогией, представьте, что вы сидите в переполненном зрительном зале по завершении восхитительного концерта. Если зрители начнут аплодировать в унисон, вас увлечет оглушительный ритм хлопков всего зала, а не пары, сидящей рядом с вами.

Уинфри составил уравнения для своей системы осцилляторов, описывающие, как быстро каждый из этих осцилляторов будет проходить свой цикл. В любом случае скорость осциллятора определяется тремя факторами: предпочтительным для него темпом, который пропорционален его естественной частоте; его текущей чувствительностью к любым внешним воздействиям (которая зависит от того, в какой точке своего цикла он находится в данный момент); и совокупным влиянием, оказываемым всеми остальными осцилляторами (которое зависит от того, в какой точке своего цикла находятся все эти осцилляторы). Это поистине колоссальный объем «математической бухгалтерии», но, в принципе, поведение такой системы в целом на протяжении всего времени определяется текущими местоположениями всех осцилляторов. Иными словами, полное знание текущего момента позволяет полностью предсказать будущее – по крайней мере в принципе.

Соответствующее вычисление осуществляется методически. Зная текущие местоположения всех осцилляторов, мы можем с помощью уравнений Уинфри вычислить их мгновенные скорости. Эти скорости говорят нам о том, как далеко каждый из осцилляторов продвинется на следующем этапе. (Мы исходим из того, что этап представляет собой очень короткий интервал времени и что в течение этого времени все осцилляторы продвигаются неуклонно. В этом случае расстояние, преодолеваемое каждым осциллятором за время цикла, равняется его

скорости, умноженной на время цикла.) Таким образом, все осцилляторы могут теперь продвинуться к своим новым фазам, а указанное вычисление повторяется снова и снова, каждый раз продвигаясь вперед на один этап. Если итерации этого процесса выполнять достаточно долго, то, по крайней мере концептуально, мы увидим, какая судьба ожидает эту совокупность осцилляторов.

То, что я только что описал, называется системой дифференциальных уравнений. С такими уравнениями нам приходится иметь дело каждый раз, когда правила для скоростей зависят от текущих положений. Задачи, подобные этой, изучаются еще со времен Исаака Ньютона (поначалу в связи с движением планет в Солнечной системе). В этом случае каждая планета притягивает все другие планеты, изменяя их местоположения, что, в свою очередь, изменяет гравитационные силы, действующие между ними, и т. д. – зеркальное отражение, во многом похожее на осцилляторы Уинфри с их постоянно изменяющимися фазами, а также с их силами воздействия и чувствительностью. Ньютон изобрел дифференциальное исчисление именно для решения сложных проблем, подобных рассматриваемой нами. Являясь автором одного из величайших достижений западной науки, он решил так называемую «задачу о двух телах» и доказал, что орбита Земли вокруг Солнца является эллиптической, как было предсказано Кеплером до него. Интересно, однако, что «задача о трех телах» оказалась совершенно неподъемной. На протяжении двух столетий лучшие математики и физики мира пытались найти формулы, описывающие движение трех притягивающих друг друга планет, но лишь в конце XIX века французский математик Анри Пуанкаре доказал тщетность таких попыток: таких формул нет и быть не может.

С тех пор мы осознали, что большинство систем дифференциальных уравнений не имеет решения в том же самом смысле: невозможно найти формулу, которая позволяла бы получить ответ. Однако существует одно замечательное исключение: для линейных дифференциальных уравнений есть решение. Технический смысл слова *линейные* на данном этапе не должен интересовать нас; гораздо важнее для нас то обстоятельство, что линейные уравнения модульны по своей природе. То есть большую и запутанную линейную задачу всегда можно разделить на меньшие и более обозримые части.

Каждую такую часть можно решить по отдельности, а полученные таким образом «маленькие ответы» можно воссоединить для решения более крупной задачи. Поэтому утверждение о том, что в линейной задаче целое равняется в точности сумме его частей, вообще говоря, верно.

Проблема, однако, в том, что линейным системам присуще лишь весьма примитивное поведение. Распространение инфекционных заболеваний, сильная когерентность лазерного луча, взбаламученное движение турбулентной жидкости – все эти явления описываются *нелинейными* уравнениями^[42]. Когда целое отличается от суммы его составных частей (когда имеет место сотрудничество или конкуренция), уравнения, описывающие соответствующие явления, должны быть нелинейны.

Таким образом, вряд ли приходится удивляться тому, что когда Уинфри взглянул на свои дифференциальные уравнения для биологических осцилляторов, он увидел, что они нелинейны. Все линейные методы, о которых ему рассказывали на лекциях по физике и прикладным дисциплинам, в данном случае были неприменимы: он никогда не сможет найти формулы для решения этой задачи. Что же касается нелинейных методов, то те немногие, которые имелись в его распоряжении, были пригодны лишь для очень небольших систем, таких как отдельно взятый осциллятор или два связанных осциллятора. Для задачи, решение которой он пытался найти (динамика популяции, насчитывающей тысячи нелинейных осцилляторов, взаимодействующих между собой), нужно было придумать особый подход.

Чтобы имитировать работу своей модели, Уинфри использовал компьютер. То есть вместо использования чисто математического аппарата ему предстояло провести что-то наподобие эксперимента. Компьютер должен был отслеживать поведение осцилляторов по мере прохождения ими цикла за циклом с их переменными скоростями. Машине было все равно, о каких объектах – линейных или нелинейных – идет речь. От нее лишь требовалось постепенно, шаг за шагом, продвигаться вперед, обеспечивая достаточно надежную аппроксимацию истинного поведения модели, предложенной Уинфри. Уинфри надеялся, что полученные результаты подскажут ему, как

должны вести себя осцилляторы. По крайней мере он мог бы увидеть, что должно происходить, даже если ему было не вполне понятно, почему это происходит именно так, а не иначе.

Вообще говоря, легко понять один ограниченный случай. Если осцилляторы полностью игнорируют друг друга, они распределяются по всей круговой дорожке, поскольку каждый из них «бежит» с предпочтительной для себя скоростью, а остальные осцилляторы не влияют на него. Более быстрые осцилляторы перегоняют более медленные осцилляторы и со временем обгоняют их на целый круг. На достаточно продолжительном отрезке времени осцилляторы будут распределены по всей дорожке. Говорят, что такая система некогерентна. Это похоже на то, как аплодируют зрители на концертах в Америке. Каждый из американских зрителей аплодирует сам по себе, не обращая внимания на соседей, – в том ритме, который подходит именно для него. В совокупности это похоже на устойчивый аритмичный шум.

Эксперименты с имитацией, проводившиеся Уинфри, зачастую приносили результаты, напоминающие именно этот вид некогерентности, даже когда осцилляторам *предоставлялась* возможность влиять друг на друга. При разных сочетаниях функций чувствительности и влияния популяция активно противодействовала синхронизации. Даже если все осцилляторы начинали работу строго синфазно, они нарушали согласованность своих действий и дезорганизовывались. Эта популяция настаивала на анархии.

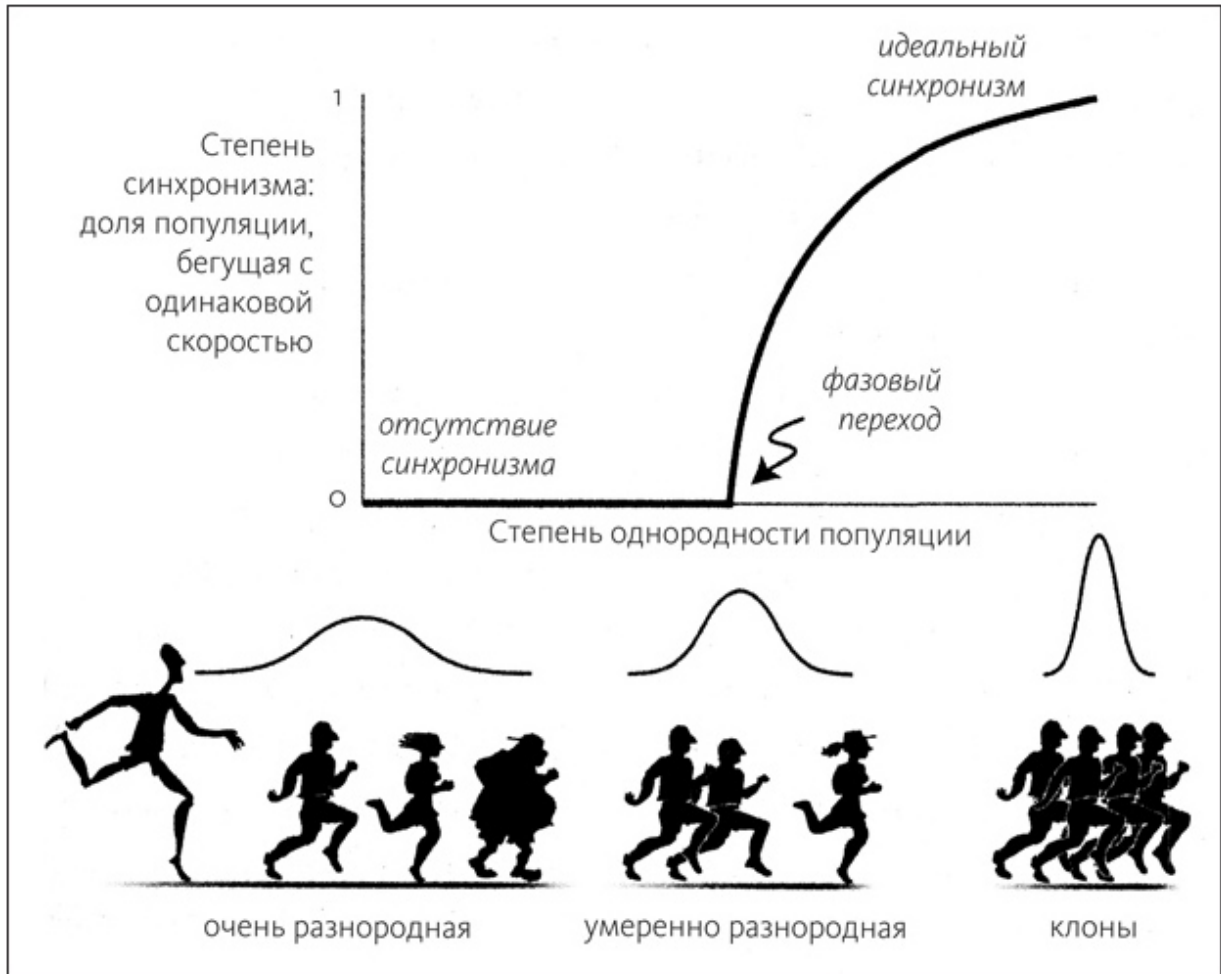
Но в случае других пар функций чувствительности и влияния Уинфри обнаружил, что эта популяция самопроизвольно синхронизируется. Какими бы ни были начальные фазы осцилляторов, некоторые из них всегда слипались в прочный ком и бежали круг за кругом дружной компанией. В этом случае популяция вела себя подобно восточноевропейской зрительской аудитории, которая совершает синхронные хлопки без каких-либо видимых подсказок.

В подобных случаях синхронизация наступала в результате «сотрудничества» осцилляторов. Как только несколько осцилляторов входили в синхронизм (возможно, по чистой случайности), их совместные, когерентные «выкрики» начинали выделяться на фоне остального шума и оказывать более сильное влияние на все остальные осцилляторы. Это ядро начинало вербовать в свои ряды другие

осцилляторы, в результате чего оно разрасталось и усиливало свой сигнал. Результирующий процесс положительной обратной связи приводил к самопроизвольному, все более ускоряющемуся процессу синхронизации, в ходе которого многие осцилляторы стремились присоединиться к формирующемуся консенсусу. Тем не менее некоторые осцилляторы оставались несинхронизированными, поскольку их естественные частоты слишком выбивались из общего ряда, чтобы их можно было вовлечь в процесс установления синхронизма. В конечном счете популяция разделялась на синхронизированную совокупность и дезорганизованную группу осцилляторов-экстремистов.

Когда в такой системе происходила самосинхронизация, Уинфри обнаруживал, что ни один из осцилляторов нельзя было обозначить как абсолютно необходимый. Иными словами, среди них не было «самого большого начальника». Любой осциллятор можно было убрать из такой системы, и это не повлияло бы на конечный результат. Кроме того, совокупность синхронно работающих осцилляторов вовсе не обязательно работала со скоростью самого быстрого из них. В зависимости от выбора функций воздействия и чувствительности эта совокупность могла действовать в ритме, ближайшем к средней скорости членов этой совокупности, или могла действовать быстрее или медленнее, чем любой из ее членов. Все это выглядело весьма парадоксально. Групповая синхронизация не носила иерархического характера, но она не всегда носила и чисто демократический характер.

Самое важное открытие Уинфри стало результатом странного и по-настоящему оригинального мысленного эксперимента. Вместо того чтобы рассматривать отдельно взятую популяцию осцилляторов, характеризующуюся одной колоколообразной кривой естественных частот, он рассмотрел целое семейство таких популяций, каждая из которых является более однородной, чем предыдущая. Если вернуться к нашей аналогии с бегунами, представьте себе множество разных клубов любителей бега трусцой.



Первый из них чрезвычайно разнороден по своему составу: члены этого клуба весьма отличаются друг от друга по уровню своей физической подготовки. Уинфри пришел к выводу, что такой клуб никогда не достигнет синхронизма. Его члены не смогут бежать в общем для всех темпе, даже если их функции влияния и чувствительности предрасполагают бегунов к такому синхронизму. В конечном счете их способность громко кричать и хорошо слышать крики других не принесет нужного результата: разнородность этой группы возьмет верх над их взаимным желанием бежать в общем для всех темпе и разбросает их по всей длине беговой дорожки, как если бы они не обращали внимания друг на друга и каждый из них бежал в предпочтительном для себя темпе.

Теперь рассмотрим несколько более однородный клуб бегунов. Его члены характеризуются одинаковыми функциями влияния и

чувствительности, но их физические способности укладываются в более узкую и высокую колоколообразную кривую (это означает, что большее количество бегунов обладают средними физическими способностями, тогда как количества «слабаков» и хороших бегунов оказываются относительно небольшими). На первый взгляд может показаться, что у такого клуба больше шансов на достижение синхронизма – по крайней мере частичного, – но Уинфри обнаружил обратный эффект. Рассматривая все более однородные популяции осцилляторов, синхронизм не удавалось выявить до достижения некой критической точки: порога разнородности. Затем, внезапно, некоторые из осцилляторов самопроизвольно синхронизировали свои частоты и начинали действовать слаженно. После того как Уинфри обеспечил еще более узкое распределение, к синхронизированной группе подключалось все большее и большее число осцилляторов.

Создавая это описание, Уинфри обнаружил неожиданную связь между биологией и физикой. Он понял, что взаимная синхронизация аналогична фазовому переходу – например, когда вода, замерзая, превращается в лед. Задумайтесь над тем, насколько удивительно явление замерзания воды. Когда температура лишь на один градус превышает точку замерзания воды, молекулы воды движутся свободно, соударяясь друг с другом и разлетаясь в стороны. При такой температуре вода представляет собой жидкость. Но давайте охладим ее чуть ниже точки замерзания. Внезапно, словно по мановению волшебной палочки, рождается новая форма материи. Триллионы молекул самопроизвольно формируют некую структуру, создавая жесткую пространственную решетку – твердый кристалл, который мы называем льдом. Аналогично, переход к синхронизму наступает резко (не постепенно), когда ширина колоколообразной кривой распределения частот оказывается меньше некоторого критического значения. Если провести аналогию с температурой, то ширина кривой распределения частот подобна температуре, а осцилляторы похожи на молекулы воды. Основное различие заключается в том, что когда осцилляторы «замораживаются» в синхронизм, они «работают» во времени, а не в пространстве. Выявление этого концептуального переключателя было творческой составляющей аналогии, использованной Уинфри.

Сделав это открытие, Уинфри выявил связь между двумя огромными корпусами знания, которые в прошлом лишь в редких случаях обращали внимание друг на друга. Одним из них является нелинейная динамика – наука о сложных путях, по которым происходит эволюция систем во времени; другим является статистическая механика – отрасль физики, которая изучает коллективное поведение гигантских систем атомов, молекул или других простых элементов. Тот и другой корпусы знания обладали достоинствами, которые компенсировали слабости другого. Нелинейная динамика хорошо подходила для малых систем с небольшим количеством переменных, но не могла справиться с большими совокупностями частиц, которые не составляли никакой проблемы для статистической механики. С другой стороны, статистическая механика хорошо подходила для анализа систем, пришедших в состояние равновесия, но не могла справиться со скачками колебательных процессов и всего остального, что изменяется во времени.

Уинфри удалось проложить путь к некой гибридной теории, которая обещала стать гораздо более мощной, чем нелинейная динамика и статистическая механика по отдельности. Это обещало стать важным шагом в развитии науки, который в конечном счете помог бы разрешить загадки спонтанного формирования порядка во времени и в пространстве. А на более практическом уровне это означало, что аналитические методы статистической физики могли теперь дать ответ на вопрос о том, как клеткам мозга, светлячкам и прочим объектам живой материи удастся синхронизировать друг друга.

Спустя несколько лет о работе Уинфри стало известно молодому японскому физику по имени Йосики Курамото. Его также увлекал феномен самоорганизации во времени, и он хотел найти способ проникнуть в математическую суть этого феномена. В 1975 г. он сосредоточился на изучении более простой и абстрактной версии модели Уинфри и в конечном счете ему удалось показать, как можно решить эту задачу.

Это было поистине выдающееся достижение. Речь шла о системе бесконечно большого числа дифференциальных уравнений, причем все эти дифференциальные уравнения были нелинейными и связаны друг с другом. Такие вещи практически не поддаются решению. Немногие

исключения из этого правила подобны бриллиантам. Такое сравнение представляется вполне оправданным ввиду математической красоты этих исключений, а также благодаря свету, который они проливают на внутренние аспекты нелинейности. В данном случае анализ, выполненный Курамото, выявил сущность групповой синхронизации.

На первый взгляд не так-то просто понять, что же такого особенного в структуре модели, предложенной Курамото. Как и в работе Винера, модель Курамото описывает огромную популяцию осцилляторов, характеризующуюся колоколообразной кривой распределения естественных частот; как и в модели Уинфри, каждый осциллятор одинаково взаимодействует со всеми остальными осцилляторами^[43]. Важнейшая инновация, предложенная Курамото, заключается в замене функций влияния и чувствительности на особый вид взаимодействия – очень симметричное правило, которое воплощает и уточняет концепцию подтягивания частот, предложенную Уинфри.

Природу этого взаимодействия легче всего понять для популяции, состоящей лишь из двух осцилляторов. Вообразите их как друзей, бегущих вместе по дорожке стадиона. Поскольку эти осцилляторы – друзья, они хотят разговаривать во время бега, поэтому каждый из них несколько корректирует предпочтительную для себя скорость бега. Правило Курамото заключается в том, что быстрый бегун несколько замедляется, а медленный бегун ускоряет свой бег в такой же степени. (Если быть более точным, величина этой коррекции является функцией синуса угла между ними, умноженного на число, называемое силой связи; это число определяет максимально возможную коррекцию.) Это корректирующее действие ведет к синхронизации осцилляторов. Однако, если разность их естественных скоростей оказывается слишком большой по сравнению с силой связи, они не смогут компенсировать разницу в своих физических способностях. Более быстрый бегун постепенно оторвется от своего более медленного товарища; в этом случае им обоим следовало бы подумать о выборе более подходящего для себя партнера по бегу трусцой. Математическая привлекательность этого правила заключается в его симметричности. В отличие от первоначальных формул Уинфри, в этом случае на беговой дорожке нет каких-либо особых мест (когда разные места соответствуют разным характерным событиям в биологическом цикле активности). Для Курамото все места неразличимы между собой. Нет

никаких вех. *По сути*, бегуны не могут узнать, в каком именно месте они находятся, поэтому они бегут молча – никто ничего не выкрикивает, никто ни к кому не прислушивается, – но при этом они внимательно присматриваются друг к другу. Во время бега они вносят соответствующие коррективы в свою скорость, используя формулу, которая зависит лишь от расстояния между ними, а не от места на дорожке, в котором они оказались.

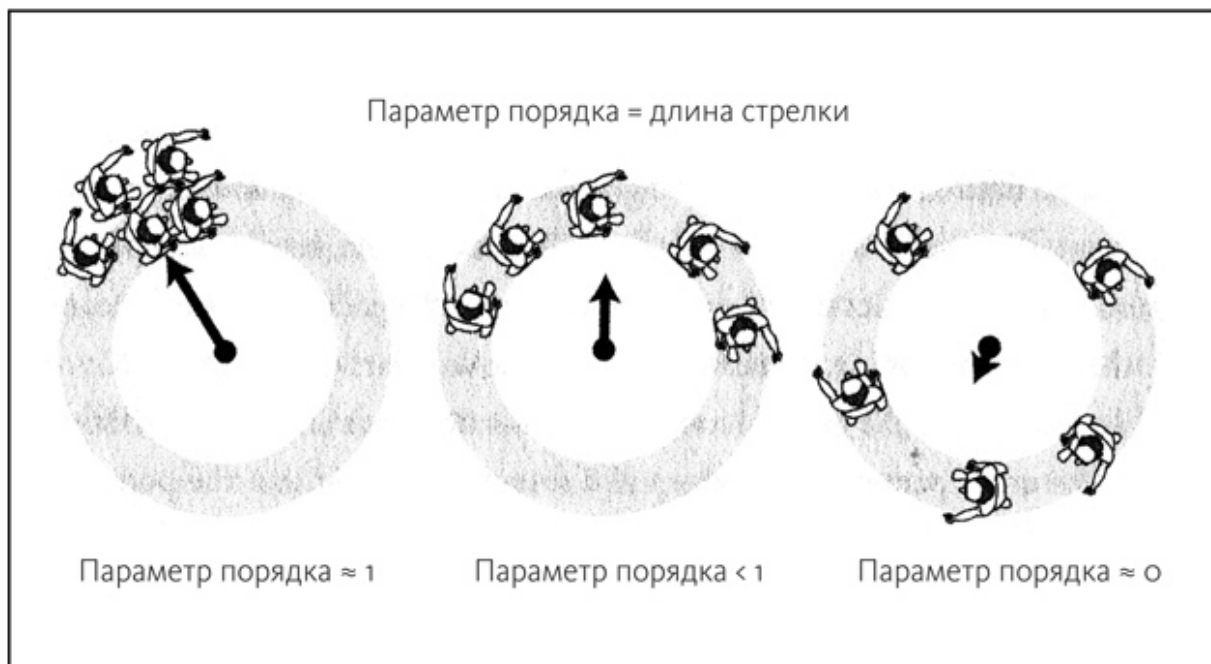
А теперь представьте себе гораздо большую совокупность осцилляторов и, как и ранее, представьте ее в виде клуба бегунов, члены которого весьма различаются между собой по степени физической подготовки. Правило взаимодействия заключается в том, что каждый бегун смотрит на всех остальных бегунов, подсчитывает предположительную коррекцию своей скорости относительно каждого из остальных бегунов и усредняет вычисленные таким образом величины, чтобы получить фактическую величину коррекции. Допустим, например, что в какой-то момент эти бегуны образовали достаточно плотную группу. Правило Курамото говорит лидеру забега о том, что он должен замедлить свой бег относительно предпочтительной для себя скорости, что представляется вполне благоразумным, поскольку в данный момент он опережает всех остальных бегунов. Бегуну, находящемуся в середине этой группы, поступают противоречивые сообщения: некоторые из них рекомендуют ему ускорить свой бег, тогда как согласно другим ему следовало бы замедлиться. Бегун, замыкающий эту группу, получает от своих товарищей призывы ускорить бег.

Все эти корректировки происходят раз за разом, осциллятор за осциллятором. Чтобы сделать задачу такой самокоррекции более интересной, предположим, что участники этого забега договорились начать его с произвольных мест на дорожке. Иными словами, поначалу все бегуны распределены по всей длине дорожки совершенно случайным образом.

Даже если группа сформируется, вовсе не обязательно, что самые сильные бегуны окажутся в ее главе, то есть возможна любая расстановка бегунов в группе. В течение всего времени группа будет продолжать переформировываться и, по мере того как бегуны будут занимать в ней места согласно своим физическим возможностям, будут меняться лидеры группы.

Совсем не очевидно, во что все это выльется на достаточно продолжительном отрезке времени. Самые сильные бегуны могут значительно оторваться вперед от основной группы, тогда как самые слабые бегуны будут плестись далеко в хвосте. Более того, может даже не сформироваться основная группа как таковая. Разброс скоростей бегунов может оказаться столь значительным, что бегуны распределятся по всей длине дорожки. В таком случае все они будут принимать от своих партнеров по забегу столь противоречивые сообщения («беги быстрее», «беги медленнее»), что корректировки скорости вообще прекратятся и каждый будет бежать с наиболее предпочтительной для себя скоростью.

Анализируя столь запутанную ситуацию, Курамото посчитал целесообразным количественно охарактеризовать степень синхронизации с помощью одного числа, которое он назвал параметром порядка.



Интуитивно, когда участники забега бегут плечом к плечу, это представляет собой более тесную форму синхронизма, чем в случае, когда они находятся на значительном удалении друг от друга, и поэтому заслуживают более высокого «балла за синхронизм», то есть должны характеризоваться более высоким значением параметра порядка.

Числовое значение параметра порядка всегда находится в диапазоне от 0 до 1 и вычисляется с помощью математической формулы, которая зависит от относительного положения каждого из бегунов. В одном крайнем случае, когда все бегуны пребывают в идеальном синхронизме, то есть бегут «в унисон», параметр порядка равняется 1. В другом крайнем случае, когда все бегуны распределены случайным образом по всей длине беговой дорожки, параметр порядка равняется 0.

В отличие от Уинфри, Курамото не использовал компьютер, чтобы получить примерную оценку того, как такая система будет вести себя. Он полагался исключительно на свою интуицию. Это делает его догадку относительно конечного исхода еще более провидческой: Курамото предположил, что на достаточно продолжительном отрезке времени такая популяция всегда перейдет в как можно более устойчивое для себя состояние. Участники забега будут продолжать бежать, но их относительные позиции в группе не будут изменяться, поэтому параметр порядка будет оставаться неизменным. Более того, сама по себе группа выйдет на некую компромиссную скорость, определяемую членами этой группы. Курамото предположил, что эта скорость также должна оставаться постоянной.

В своем смелом математическом порыве Курамото стремился отыскать лишь такие решения своих уравнений, которые отвечали его интуитивной догадке. Если у какого-либо решения не было постоянного параметра порядка и постоянной скорости группы, такое решение не интересовало Курамото. Он знал, что ищет, а на все остальное он просто не обращал внимания. Это был весьма смелый способ рассуждений, поскольку, если бы истина находилась не там, куда двигался Курамото, руководствуясь своей интуицией, он никогда не отыскал бы эту истину. Другая опасность заключалась в том, что решений, которые интересовали Курамото, могло бы не существовать вообще. Тем не менее он предположил, что такие решения существуют, и поставил перед собой цель найти их. Чтобы обеспечить себе максимальный простор для маневра, Курамото не указал заранее, какими именно должны быть значения параметра порядка и скорости группы – они просто должны быть постоянными. Определить их значения было одной из составляющих задачи, которую ему предстояло решить.

Он пришел к выводу, что такая система может удовлетворять его требованиям двумя разными способами. Параметр порядка мог равняться нулю всегда; это означало, что соответствующая популяция абсолютно и навсегда дезорганизована. Никакая группа в ней никогда не сформируется. Вы будете просто видеть бегунов, движущихся с самыми разными скоростями, причем эти бегуны будут рассредоточены по всей длине беговой дорожки. Такая система будет полностью рассинхронизирована. Как ни странно, это «некогерентное состояние» представляет собой исход, возможность которого нельзя исключить никогда, сколь бы разными или одинаковыми по уровню своей физической подготовки ни были участники забега. Даже если уровень физической подготовки всех участников забега одинаков, некогерентность может сохраняться все время, если она установилась изначально. Интуиция подсказывает, что участники забега не ставят перед собой цели бежать общей группой и с одинаковой скоростью, поэтому «по умолчанию» каждый из них бежит с наиболее комфортной для себя скоростью, а популяция в целом остается такой же дезорганизованной, как и прежде. Другой возможностью является «частично синхронизированное» состояние, которое характеризуется наличием трех групп: синхронизированная группа бегунов, имеющих некий средний уровень физической готовности; более медленная, рассинхронизированная стайка «слабаков»; и более быстрая, также рассинхронизированная стайка сильных бегунов. В отличие от случая некогерентности, такое состояние возможно *не* всегда. Курамото пришел к выводу, что существование такого состояния возможно лишь до определенного порога разнородности. Если колоколообразная кривая оказывается шире, чем этот порог (а это означает, что состав клуба бегунов чересчур разнороден), такое частично синхронизированное состояние пропадает. Из этого можно сделать вывод, что в популяции светлячков или клеток мозга осцилляторы должны быть достаточно однородны; в противном случае синхронизация вообще невозможна.

Одним махом Курамото «реабилитировал» и Винера, и Уинфри. Частично синхронизированное состояние является именно тем, что имел в виду Винер, когда он моделировал альфа-ритм мозговых волн. Узкий пик в центре спектра Винера соответствует синхронизированной группе, а «хвосты» по обе стороны от пика соответствуют

рассинхронизированным осцилляторам, слишком медленным или слишком быстрым, чтобы можно было обеспечить их синхронизм с основной группой. Фазовый переход, обнаруженный Уинфри, был, по сути, то же самое, что и порог, обнаруженный Курамото. Как поняли они оба, синхронизированная группа не может образоваться, если соответствующая популяция не окажется в достаточной степени однородной. Этот важный момент Винер упустил из виду.

Курамото не только заметил этот фазовый переход, но и смог вывести точную формулу для него. Кроме того, он смог точно вычислить степень упорядоченности группы как функцию ширины колоколообразной кривой. Его формулы показали, что крошечное синхронизированное ядро зарождается при достижении порога; при этом параметр порядка едва превышает 0. По мере снижения разнородности (когда осцилляторы становятся все более похожи друг на друга) к синхронизированной группе подключается все большее число членов популяции, а параметр порядка повышается. Наконец, при достижении нулевой ширины колоколообразной кривой (все осцилляторы идентичны) формула Курамото прогнозирует состояние идеального порядка, то есть состояние полного синхронизма.

Вскоре после того как в 1986 г. мне было присвоено звание доктора философии, я начал стажироваться у Нэнси Копелл, математика из Бостонского университета^[44]. В то время Нэнси Копелл была лишь в начале своей научной карьеры. Симпатичная и веселая женщина, тонкий мыслитель и прирожденный лектор, она уже в те годы получила признание как один из лучших в мире биологов-математиков. (В частности, они вместе со своим сотрудником Бардом Эрментраутом заявили о себе во весь голос, применив новые математические методы к изучению нервной системы.) Мы несколько раз встречались с ней на научных конференциях, и она показалась мне идеальным наставником для очередного этапа в моей научной карьере, когда моя цель заключалась в углублении своей подготовки в области математики. Когда я сказал ей, что хотел бы работать над какой-либо проблемой, касающейся популяций осцилляторов, Нэнси предложила мне ознакомиться с моделью Курамото.

Результаты, полученные Курамото, привели меня в восторг. Во время учебы в магистратуре нам говорили, что большие нелинейные

системы – настоящие монстры, практически не поддающиеся решению. Однако Курамото удалось найти решение для одной из таких систем – и это решение было просто блестящим. Более того, это решение показалось мне не таким уж трудным для понимания. Знакомясь с ходом рассуждений Курамото, я чувствовал себя так, словно именно я сам прихожу к таким выводам. Нэнси лишь улыбалась, слушая, с каким энтузиазмом я рассказываю о своих впечатлениях от знакомства с моделью Курамото. Затем она, как бы невзначай, указала на слабые места в рассуждениях Курамото, на все его логические нестыковки. Одним словом, здесь было к чему приложить руку молодому и многообещающему математику – такому, например, как я. Моя задача заключалась в том, чтобы поместить интуитивные догадки Курамото на более солидный математический фундамент. В течение всего следующего года я работал вместе с Нэнси, пытаясь доказать теорему, которая, по нашему общему мнению, должна быть верна. Хотя мне так и не удалось решить эту задачу, модель, предложенная Курамото, все больше увлекала меня.

Даже по окончании стажировки у Нэнси Копелл я продолжал размышлять над этой моделью на протяжении нескольких последующих лет. Аспект, который интересовал меня больше всего, касался возникновения порядка из хаоса случайности. Каким образом системе, состоящей из миллионов частиц, удастся спонтанно организовать себя? В этом вопросе заключалось нечто мистическое. В нем звучали даже религиозные нотки, напоминающие мне библейскую историю рождения земной тверди из чего-то совершенно бесформенного и аморфного или, как называли это состояние древние греки, из хаоса.

Возможно, мы никогда не поймем причины возникновения порядка в реальной Вселенной, но в воображаемой вселенной модели Курамото эта задача упрощается до такой степени, что мы можем найти для нее математическое решение. Здесь возникает вопрос генезиса: каким образом некогерентность порождает синхронизм? Однажды мне пришло в голову, что существует достаточно простой способ сформулировать этот вопрос в виде упражнения на решение дифференциальных уравнений: нужно лишь рассматривать некогерентность как состояние равновесия, а затем вычислить его устойчивость.

Чтобы прояснить математический смысл таких знакомых большинству из нас понятий, как *равновесие* и *устойчивость*, рассмотрим ряд примеров из окружающего нас мира. Допустим, мы поставили стакан с водой на кухонный стол. Секунду-другую вода будет «устаканиваться», а затем придет в состояние покоя. Теперь поверхность воды в стакане выглядит плоской и горизонтальной. Это и есть состояние равновесия – в том смысле, что в таком состоянии вода может пребывать сколь угодно долго. Такое равновесие можно также назвать устойчивым состоянием, поскольку, если немного встряхнуть стакан, а затем оставить его в покое, то поверхность воды в нем быстро вернется к исходному состоянию. Таким образом, равновесие означает, что ничего не меняется; устойчивость означает, что слабые возмущения быстро сходят на нет. Теперь рассмотрим другой пример. Возьмите карандаш и заточите его, затем поставьте этот карандаш вертикально на заточенный кончик грифеля и попытайтесь тщательно сбалансировать его. Отпустите карандаш. Если вам удалось идеально сбалансировать его, он продолжит стоять вертикально; таким образом, по определению, это состояние также является состоянием равновесия. Но совершенно очевидно, что такое состояние не является устойчивым: даже легчайшее дуновение ветерка опрокинет карандаш, после чего он уже не вернется самостоятельно в вертикальное положение.

Для модели Курамото некогерентность является состоянием равновесия: если осцилляторы каждой частоты распределены равномерно по окружности, то они навсегда останутся распределенными равномерно. Несмотря на то что осцилляторы бегут по окружности, их равномерное распределение остается неизменным. Нерешенная проблема заключалась в том, остается ли это состояние равновесия устойчивым, подобно воде в стакане, или неустойчивым, подобно карандашу, балансирующему на кончике своего грифеля. Если оно неустойчиво, это означало бы, что синхронизм мог бы возникнуть самопроизвольно и что бегуны со временем соберутся в группу.

Этот вопрос не давал покоя ученым в течение 15 лет. Сам Курамото публично признавался в этом. В своей книге он написал, что не знал, как подступиться к решению этой проблемы. Этот вопрос ставил ученых в тупик, поскольку существовало бесконечно большое множество способов некогерентной организации осцилляторов. Именно в этом заключалось главное препятствие. Некогерентность не

была каким-то одним состоянием; это было семейство из бесконечно большого числа состояний.

На протяжении многих лет мне не удавалось добиться хоть какого-то успеха в решении проблемы устойчивости. Однажды поздно вечером, в момент, когда я уже был готов погрузиться в сон, у меня в голове мелькнула неожиданная идея: а что, если осцилляторы похожи не на бегунов, а на молекулы в жидкости! Точно так же как вода состоит из триллионов дискретных молекул, эта воображаемая «осцилляторная жидкость» должна состоять из триллионов дискретных точек, бегущих по окружности^[45].

Вообще говоря, родившийся в моей голове образ должен был выглядеть еще более сложно и необычно. Мне нужно было вообразить множество разных жидкостей, по одной для каждой частоты, представленной в соответствующем распределении частот. Точнее говоря, бесконечно большое число разных частот, подобно сочетанию цветов в радуге. Поэтому я нарисовал в своем воображении радугу цветных жидкостей, причем все они «завихряются» вокруг одной и той же окружности, никогда не смешиваясь между собой, поскольку осцилляторы никогда не меняют свою естественную частоту. Преимущество этой психоделической картины заключается в том, что некогерентность становится единственным состоянием. Таким образом, я имею дело уже не с бесконечно большим семейством, а лишь с одним состоянием однородной плотности, причем каждая цветная жидкость равномерно распределена по всей окружности.

Я буквально выскочил из постели, схватил карандаш и бумагу. В голове засыпающего человека чаще всего возникают всевозможные фантастические картины, но идея, родившаяся в моей голове, казалась мне очень близкой к тому, что имеет место в реальности. Первым делом мне нужно было адаптировать законы механики жидкостей к моей воображаемой «осцилляторной жидкости». Затем я составил уравнения для создания стандартного теста на устойчивость: вывести систему из равновесия, решить уравнения для соответствующих возмущений (эти уравнения имеют решение, поскольку они линейны, даже если исходная система не является линейной) и проверить, нарастают ли эти возмущения или, наоборот, сходят на нет.

Составленные мною уравнения показали, что ответ зависит от того, насколько подобны между собой осцилляторы. Я нашел, что в случае, если они идентичны или почти идентичны, возмущения нарастают по экспоненциальному закону по мере того, как осцилляторы сближаются между собой по фазе, образуя зачаточную форму синхронизма. Затем родилась формула, описывающая скорость экспоненциального роста (аналогичная процентной ставке, определяющей скорость приращения суммы на вашем банковском счете). Никто до меня такой формулы не смог предложить. Это был точный прогноз, правильный или неправильный – другое дело. Наутро мне предстояло проверить свои догадки на компьютере.

У меня вспотели ладони, когда я, строка за строкой, проводил свои вычисления. Все работало! Я наблюдал рождение порядка. Затем я ненадолго остановился. Существует ли интервал критических частот, в котором скорость нарастания падает до нуля, а некогерентность уже не является неустойчивой? Да, такое критическое состояние возникает при достижении такого же порога, который был обнаружен Курамото. Это выглядело весьма убедительно. Итак, я нашел новый способ вычисления фазового перехода – точки замерзания, при которой впервые наступает синхронизация.

Через несколько часов после восхода солнца я позвонил своему сотруднику Ренни Миролло, чтобы сообщить ему приятную новость. Я начал описывать свои соображения относительно «осцилляторной жидкости», но он быстро прервал меня: «К чему вся эта софистика?» Будучи «чистым» математиком, он никогда не изучал механику жидкостей и доверял лишь уравнениям, не прибегая к помощи воображения. Мои вычисления казались ему весьма сомнительными. Но я был уверен в своей правоте. Несколько позже в тот же день я вернулся к себе в офис и убедился в том, что предсказанные мною скорости нарастания идеально совпадали с результатами компьютерного моделирования. Ренни быстро заключил мир с «осцилляторной жидкостью».

Вместе с Ренни мы решили вопрос устойчивости некогерентного состояния по другую сторону порога, где интервал частот достаточно большой, аналогично температурам выше точки замерзания. Мы ожидали, что некогерентность должна теперь стать устойчивой. Но вместо этого уравнения указывали на то, что она «нейтрально

устойчива» – очень редкий, пограничный случай, когда переходные возмущения ни нарастают, ни затухают.

Вообразите, например, маленький шарик, который находится на дне чашки с полусферической формой внутренней поверхности. Если такой шарик переместить в любую другую точку на внутренней поверхности чашки, он скатится обратно на дно, которое является точкой устойчивого равновесия. Теперь допустим, что форму внутренней поверхности чашки можно регулировать: с помощью некоего рычажка вы можете постепенно делать ее более плоской (то есть придавать ей форму с меньшей кривизной). Дно по-прежнему остается устойчивым, но все же менее, чем прежде: шарик, перемещенный в любую другую точку на внутренней поверхности чашки, медленнее скатывается в точку устойчивого равновесия. По мере того как вы все больше поворачиваете рычажок регулирования кривизны, форма внутренней поверхности чашки становится все более плоской. Когда рычажок регулирования достигнет некоего критического деления, внутренняя поверхность чашки станет совершенно плоской и горизонтальной, а в результате дальнейшего изменения положения рычажка она станет похожа на выпуклую контактную линзу (слабо выраженная куполообразная форма), превратившись в конечном счете в выпуклую полусферу. В ходе такого постепенного превращения вогнутое дно чашки превратилось в куполообразную выпуклость. Теперь, если шарик слегка подтолкнуть, он скатится на край дна: состояние равновесия оказалось неустойчивым. Наш регулировочный рычажок оказался на критической границе между устойчивостью и неустойчивостью, когда контактная линза стала совершенно плоской. В этом – и *только* в этом – положении регулировочного рычажка равновесие нельзя назвать ни устойчивым, ни неустойчивым. Шарик находится в состоянии неопределенности; можно сказать по-другому: это состояние является нейтрально устойчивым. Если шарик сместить с этого положения нейтрального равновесия, он не вернется в исходное положение, но и не скатится в какое-то другое положение.

Как следует из этой метафоры, нейтральная устойчивость обычно имеет место лишь в переходных состояниях, при неких критических значениях параметров системы («рычажков», которые управляют ее свойствами). Но модель Курамото нарушала это правило. Ее некогерентное состояние упрямо оставалось нейтрально устойчивым,

даже когда мы расширяли колоколообразную кривую, чтобы сделать популяцию более разнородной. Изменение положения нашего «рычажка» в достаточно широком диапазоне значений параметров не оказывало никакого влияния.

Мы обсудили этот необычный результат с Полом Мэтьюзом, преподавателем прикладной математики в Массачусетском технологическом институте. Пол провел ряд сеансов компьютерного моделирования, результаты которых, однако, повергли нас в еще большее недоумение. Он протестировал устойчивость другим способом, вычислив поведение параметра порядка на достаточно продолжительном отрезке времени, и обнаружил, что значение этого параметра снижается по экспоненциальному закону – что было, вообще говоря, характерным признаком устойчивости, а не нейтральной устойчивости. Теперь мы оказались по-настоящему озадаченны: некогерентность была нейтральной по одному показателю, но устойчивой по другому показателю.

Спустя несколько недель Пол читал лекцию у себя на родине, в Англии, в университете Уорвика. В ходе этой лекции он описал странные результаты, полученные нами^[46]. Один из присутствующих на этой лекции, профессор Джордж Роуландз, сказал Полу, что на самом деле в этом результате нет ничего странного: это явление называется демпфированием Ландау^[47] и стало известно физикам, изучающим свойства плазмы, еще около 45 лет назад.

О свойствах плазмы нам было известно не так уж много, но все мы, конечно же, слышали о Ландау. Лев Ландау был одним из выдающихся физиков XX столетия. В эпоху узкой специализации он хорошо разбирался во всех отраслях теоретической физики, начиная с субатомных частиц и заканчивая турбулентностью в жидкостях. Он был яркой личностью, эксцентричным и вспыльчивым гением, карьера которого завершилась 7 января 1962 г., когда он попал в ужасную автокатастрофу под Москвой^[48]. Его тело было раздавлено, кости переломаны, многие органы серьезно повреждены. Он впал в состояние комы. В течение 100 суток его электроэнцефалограмма представляла собой практически горизонтальную линию. Врачи подключили его к аппарату для искусственного дыхания и прилагали героические усилия, пытаясь спасти ему жизнь. Четырежды констатировали его смерть, но каждый раз, буквально чудом, он возвращался к жизни. Позже в том же

году он был награжден Нобелевской премией за открытия, сделанные им десятью годами ранее (он использовал квантовую теорию, чтобы объяснить необычное поведение сверхтекучего гелия при температурах, близких к абсолютному нулю). В октябре 1964 г. его выписали из больницы, однако ему так и не удалось выздороветь полностью. Он умер через несколько лет.

За свою жизнь Ландау совершил немало открытий. В частности, в конце 1940-х годов он предсказал необычные свойства плазмы. Плазму иногда называют четвертым состоянием материи, возникающим при очень высоких температурах, намного превышающих температуры, при которых материя пребывает в твердом, жидком и газообразном состояниях. Такие температуры действуют на Солнце, а также в реакторах термоядерного синтеза, где обычные атомы превращаются в ионизированный газ, состоящий из примерно равных количеств электронов и положительно заряженных ионов. Парадоксальное явление, которое в настоящее время носит имя Ландау, происходит, когда электростатические волны проходят через высоко разреженную плазму. Ландау показал, что эти волны могут затухать даже в отсутствие столкновений между частицами в плазме, а также в отсутствие какого-либо трения или рассеяния. Джордж Роулан্ডз понял, что демпфирование Ландау описывается, по сути, тем же математическим механизмом, что и сползание в некогерентность в модели Курамото: электроны, содержащиеся в плазме, играют роль осцилляторов, а величина колебаний в генерируемом ими электрическом поле играет роль параметра порядка.

На первый взгляд кажется удивительным, что между неистовым миром сверхгорячей плазмы на Солнце, где атомы регулярно теряют свои электроны, и спокойным миром биологических осцилляторов, в котором светлячки тихо мерцают, расположившись на берегах реки, может существовать какая-то связь. Действующие лица разные, но абстрактные картины взаимодействия между ними, по сути, одинаковы. Когда эта связь была выявлена, нам удалось перенести методы Ландау на модель Курамото, раскрыв таким образом тайну, которая многие годы не давала покоя ученым. Биологии также удалось внести вклад в развитие физики. Джон Дэвид Кроуфорд, физик из Питтсбургского университета, смог применить результаты, полученные при

исследовании биологического синхронизма, для решения давней проблемы, касающейся поведения плазмы^[49].

Теории взаимной синхронизации биологических осцилляторов оказались правильными с математической точки зрения. Они пролили свет на один из самых фундаментальных механизмов самоорганизации. Однако предстояло ответить на более сложный вопрос: насколько точно эти модели описывают реальность. Позволяют ли они предсказывать явления, которые согласуются с данными, описывающими реальных светлячков, клетки сердца или нейроны^[50]?

Этого мы не знаем. До настоящего времени никакие тесты в этом отношении не проводились. Соответствующие эксперименты выполнить было бы очень непросто, поскольку они требуют измерений на уровне отдельно взятых животных или клеток, в частности измерений их естественных частот и их реакций на внешние воздействия разной силы и в определенные моменты времени, а также на уровне сети в целом, чтобы количественно оценить взаимодействия между осцилляторами и результирующее коллективное поведение. Особенно трудно измерить взаимодействия между парами осцилляторов. Если эти пары осцилляторов оставить в сети, то на результатах наших измерений может сказаться влияние со стороны других осцилляторов; если же эти пары осцилляторов изъять из сети, хирургическим или иным способом, то в процессе такого изъятия могут пострадать окружающие осцилляторы и соединения между ними. Кроме того, соединения внутри сетей, как правило, остаются неизвестными за исключением нескольких малых систем нейронов. Не зная, кто с кем взаимодействует, невозможно выполнить количественное тестирование моделей. Например, если на дереве расположилось множество светлячков, то вам пришлось бы точно определить, какие из них кого видят, измерить естественные частоты мерцания каждого из них и, наконец, измерить функции чувствительности и влияния каждого насекомого. Никто не пытался выполнить такой эксперимент даже для двух светлячков, не говоря уж о том, чтобы выполнить его для большой совокупности светлячков.

Тест, носящий более качественный характер, следовало бы выполнить, чтобы подтвердить или опровергнуть существование фазового перехода. Прогноз заключается в том, что степень

синхронизации должна повышаться резко, а не постепенно, при превышении определенного (критического) значения либо силы связи, либо разброса частот. В этом случае проведение эксперимента также оказалось бы очень непростым делом. Чтобы изменить силу связи между светлячками, вы могли бы поместить их в затемненное помещение, а затем регулировать уровень освещенности в этом помещении с помощью реостата, чтобы насекомые могли лучше или хуже видеть друг друга. В этом нет ничего сложного, но измерить одновременно картины мерцаний у всех насекомых было бы чрезвычайно сложно. Но без такой информации мы не могли бы определить степень синхронизации и, следовательно, не могли бы определить, произошел ли переход. Аналогичный эксперимент было бы легче выполнить с нейронами, но в этом случае вам пришлось бы одновременно фиксировать сигналы от каждой клетки (что, с технической точки зрения, было бы чрезвычайно трудно); параллельно с этим вам пришлось бы дозированно вводить лекарственные препараты для постепенного устранения связей между ними и следить за тем, чтобы эти препараты не повлияли на какие-либо другие свойства этих клеток, помимо их взаимной связи. Пока еще никто не пытался провести столь сложный эксперимент.

Или можно было бы попытаться воспроизвести винеровский спектр частот, с его узким центральным пиком и «провалами» по обе стороны от пика. Это было важнейшим свидетельством в пользу его теории подтягивания частот, но, учитывая его центральную роль, мне всегда казалось странным, что я никогда не слышал о попытках такого воспроизведения. И еще кое-что казалось мне подозрительным. Если Винеру и его сотрудникам действительно удалось найти важнейшее доказательство – спектр с двойным провалом, который, по мнению Винера, является свидетельством синхронизации, – то почему он не предоставил соответствующие данные, которые говорили бы сами за себя? В своей книге «Нелинейные задачи в теории случайных процессов», опубликованной в 1958 г.^[51], он предложил схематическую картину спектра, которую мы видели ранее, с ее идеально симметричным пиком, возвышающимся меж двух провалов, идеально симметрично расположенных по обе стороны от пика, причем центр этой идеально симметричной картины соответствует в точности 10 циклам в секунду. Это не должно было никого ввести в заблуждение.

На осях предложенной им диаграммы даже не было разметки. Впоследствии – в книге «Управление и связь в животном и машине. Новые главы кибернетики», изданной в 1961 г.^[52], – Винер наконец-то представил кое-какие реальные данные (предположительно, это был самый убедительный пример, имевшийся в его распоряжении), однако на рисунках отсутствовал его любимый «провал».

Несколько лет тому назад я спросил у Пола Раппа, биолога-математика и эксперта по мозговым волнам, не приходилось ли ему встречать такой спектр в своих собственных измерениях. Нет, не приходилось, но если бы такой спектр действительно существовал, то обнаружить его было бы не так уж сложно. Он провел ряд новых экспериментов, целенаправленно пытаясь обнаружить такой эффект, но даже при использовании новейших технологий его попытки не принесли желаемого результата. Неужели Винер пытался ввести нас в заблуждение? Неужели столь любимый им «провал» был лишь плодом его богатого воображения? Я не хотел верить этому, поэтому лично для меня было огромным облегчением узнать подоплеку того, что в действительности случилось в 1958 г.

Во время посещения мною конференции по прикладной математике в июле 2001 г. мне удалось поговорить с Джеком Кауэном, биологом-теоретиком, который долгое время работал над математическими моделями мозга. Рассчитывая на то, что Джек Кауэн располагает обширной информацией об альфа-ритмах, я спросил у него, знаком ли он со старой теорией Винера. Разумеется, ответил он с улыбкой. В то самое время он тоже работал в Массачусетском технологическом институте. Однажды у него состоялась продолжительная беседа с Винером, во время которой тот прочитал ему целую лекцию об интересующем меня спектре. «Норберту вообще нравились люди, готовые слушать его долгие рассуждения».

Джек Кауэн прибыл в МТИ осенью 1958 г. и был включен в группу аспирантов, работающих под руководством Уолтера Розенблита. Примерно в то же время Маргарет Фриман, работавшая исследователем в группе Розенблита, выполнила первые измерения спектра. Именно она открыла этот пресловутый пик и двойной «провал», которые привели в восторг Винера. Несмотря на то что это были лишь

предварительные результаты, Винер раструбил о них в своей книге, опубликованной в 1958 г.

К сожалению, результаты, полученные Фриман, оказались неправильными. «Другие исследователи пытались воспроизвести эти результаты, – рассказал мне Кауэн, – а когда их попытки завершились неудачей, все теоретические построения, базировавшиеся на этих результатах, оказались несостоятельными». Фриман допустила ошибку в своих вычислениях. Когда она повторила свои вычисления, двойной «провал» исчез. Впрочем, спустя три года, когда была опубликована книга «Управление и связь в животном и машине. Новые главы кибернетики», у Винера появился шанс исправить эту досадную ошибку. На этот раз он решил продемонстрировать реальные данные. Вот как он описывает этот спектр:

Когда мы анализировали эту кривую, мы обнаружили ярко выраженный провал мощности вблизи частоты, составляющей 9,05 цикла в секунду. Точка, в которой наблюдается существенное «проседание» спектра, очень резкая и характеризует объективное количественное значение, которое можно проверить с гораздо большей точностью, чем любую количественную величину, встречавшуюся до настоящего времени в электроэнцефалографии^[53].

В приведенной цитате голос Винера звучит очень уверенно. Это голос гения, который решил поучить уму-разуму специалистов по электроэнцефалографии. Но затем его речь начинает звучать гораздо осторожнее, а его высказывания носят сослагательный характер.

У нас имеются некоторые свидетельства того, что в других кривых, которые мы получили, но надежность которых вызывает определенные сомнения, это внезапное падение мощности сопровождается весьма кратковременным внезапным подъемом, в результате чего между ними наблюдается провал кривой. Так это или нет, у нас есть все основания утверждать, что мощность в пике соответствует оттягиванию мощности от участка, на котором наблюдается проседание кривой.

Когда я впервые прочитал это десять лет тому назад, я был поражен невняtnостью этих высказываний. Это было так непохоже на Винера, обычно предпочитающего смелые и безапелляционные формулировки. Но когда я читаю этот отрывок сейчас, он берет меня за душу. Я будто слышу голос человека, переживающего мучительную борьбу с самим собой, – ученого, цепляющегося за идею, которая, по его твердому убеждению, должна быть правильной, и вместе с тем пытающегося найти в себе силы быть интеллектуально честным. Несмотря на то что «провал» нигде не обнаруживается, он призывает нас верить, что этот «провал» обязательно обнаружится в ходе других исследований, но он не позволяет себе «давить» на нас слишком сильно: он допускает, что результаты этих других исследований могут «вызывать определенные сомнения», и говорит, что существуют лишь «некоторые свидетельства» наличия «провала» в кривых. Есть этот «провал» или его нет, последнее предложение показывает, что Винер вовсе не был намерен отказываться от представления о том, что осцилляторы синхронизируются путем подтягивания частот друг друга. Он был уверен, что такой механизм синхронизации является универсальным. Этот механизм был обязан играть важную роль. Винер не желал пасть жертвой того, что Т. Г. Хаксли называл «великой трагедией науки – уничтожения прекрасной теории каким-нибудь отдельным безобразным фактом».

Винер напоминает мне пророка, который знает, как должен быть устроен мир. Это качество наблюдается у других великих ученых. Галилей не открыл бы, что у движущегося тела есть тенденция к продолжению движения (закон инерции), если бы он ограничился описанием того, что происходит в действительности (сила трения приводит к остановке движущегося тела). Абстрагируясь от несущественного и второстепенного, он открыл самый фундаментальный закон механики. Грегор Мендель открыл законы генетики, изучая картины наследования у бобовых культур. Некоторые современные статистики подвергают сомнению данные, полученные Менделем, называя их слишком идеальными, чтобы быть похожими на правду, тогда как другие проявляют большую снисходительность, предполагая, что Мендель скрупулезно отбирал образцы, которые лучше всего подтверждают сформулированные им принципы. Какая бы

из этих версий ни казалась вам более правдоподобной, очевидно, что Мендель точно знал, *что* он хочет доказать.

Несмотря на то что Винер ошибался со своими выводами относительно альфа-ритма, ирония судьбы заключается в том, что он оказался прав относительно другого вида ритмов в мозге. В 1995 г. биологи Дэвид Уэлш и Стив Репперт из Массачусетского военного госпиталя обнаружили, что в мозге имеется популяция осцилляторов с распределенными естественными частотами, которые, подтягивая друг друга, достигают синхронизма и которые в совокупности образуют более точный осциллятор, чем каждый из них в отдельности^[54]. Винер предвидел все это, но упустил из виду важную деталь: вместо того чтобы генерировать колебания с частотой 10 циклов в секунду, эти клетки генерируют колебания с частотой, примерно в миллион раз меньшей. Речь идет о клетках — задатчиках циркадного ритма — внутреннего хронометра, который поддерживает нас в синхронизме с окружающим миром.

Глава 3. Сон и ежедневная борьба за синхронизм

Подобно всем новорожденным, моя дочь Леа на протяжении первых трех месяцев жизни была ярко выраженным анархистом. Она кушала и спала, когда ей заблагорассудится. Ко времени, когда ей исполнилось 11 месяцев, она уже спала всю ночь, правда, с одной небольшой проблемой: она неизменно будила меня и жену ровно в 5:20 утра. Она хваталась за поручни своей детской кровати, принимала вертикальное положение и тактично покашливала несколько раз, словно объявляя о том, что готова позавтракать. Мы понимали, что жаловаться на судьбу нам не приходится (многие родители терпят гораздо большие лишения), но очень хотели, чтобы дочь просыпалась хотя бы на час позже. Чтобы «подтолкнуть» ее в этом направлении, однажды вечером мы попытались уложить ее спать попозже. Естественно, из этой затеи не вышло ничего хорошего: на следующее утро, ровно в 5:20, из спальни дочери раздалось то же тактичное покашливание, но поскольку на этот раз ей удалось меньше поспать, она наказала нас тем, что капризничала весь день.

Эти проблемы, связанные с отклонением от привычного режима дня, были, по сути, проблемами синхронизации. В первые дни своей жизни Леа вообще не могла синхронизироваться с окружающим миром: ее ритмы сна, бодрствования и приема пищи (в той степени, в какой они успели выработаться у нее в первые дни жизни) хаотически изменялись туда-сюда относительно мировых суточных циклов. К 11 месяцам у нее возникла противоположная проблема: теперь ее ритмы были слишком жестко синхронизированны, прочно привязаны к определенному 24-часовому графику, который мне с женой показался весьма некомфортным.

От нарушенного синхронизма и сопутствующих ему проблем со сном страдают не только младенцы и их родители. Американское общество постепенно приходит к пониманию того, что склонность подростков слишком поздно укладываться в постель и трудности с подъемом ранним утром, когда им нужно идти в школу, объясняются вовсе не чрезмерной медлительностью или «моральным разложением»,

а тем, что их внутренние часы настроены на другой часовой пояс, расположенный западнее часового пояса, в котором проживаем мы, взрослые^[55]. На другом конце спектра находятся пожилые люди, многие из которых просыпаются рано утром, задолго до восхода солнца, после чего долго не могут уснуть и чувствуют себя совершенно разбитыми.

Другие разновидности разлада синхронизма никак не связаны с возрастом. Мы сами навлекаем на себя эти проблемы, не придерживаясь определенного режима дня. Представьте себе проблемы со здоровьем и семейные проблемы, с которыми приходится сталкиваться медсестрам, водителям грузовиков, операторам атомных электростанций и людям других профессий, которым приходится работать то днем, то ночью. Техногенные катастрофы в Бхопале, Чернобыле и Три-Майл-Айленде случились в ночное время, между полночью и 4 часами утра, и были вызваны усталостью и ошибками при принятии решений, связанными с нарушением суточного ритма организма. Все это также является побочным продуктом нарушений синхронизма, несоответствий между физическими возможностями человеческого организма и требованиями нового, «24-часового» общества.

Вы только представьте: разве это не чудо, что нам так легко удается поддерживать синхронизм с окружающим миром! Однако у слепых людей возникают немалые трудности: большинству из них не удастся придерживаться 24-часового режима. Каждые две-три недели они выбиваются из фазы с остальной частью общества, к которому они принадлежат, что затрудняет им выполнение своей работы и социальных обязанностей. Вот что говорит по этому поводу одна слепая женщина: «Быть слепым не так уж страшно, хотя и возникают определенные неудобства. Ужасно, например, то, что часы сна и бодрствования у вас меняются непредсказуемым образом»^[56].

Это свидетельствует лишь о том, каким благом для остальных людей является синхронизм. Разумеется, мы почти никогда не задумываемся над этим, поскольку это происходит само по себе. Миллионы лет эволюции настроили организм человека на автоматическую синхронизацию с циклами дня и ночи. Но как именно действует этот механизм? Мы говорим о «стыковочных узлах» организма, но существуют ли они в действительности или это просто

фигура речи? Где они находятся: в мозге или в каждой клетке? В чем заключается их биохимический механизм? Как они синхронизируют друг друга и что подравнивает их под цикл дня и ночи? После многих десятков лет, потраченных на исследования (многие из которых тянулись слишком долго и оказались безрезультатными), ответы на некоторые из этих загадок, возможно, удастся получить в не столь отдаленном будущем. Изучение биологических часов стало одним из самых животрепещущих направлений современной науки^[57].

Наше воображение рисует картину, на которой мы представлены в виде маленьких колесиков, находящихся внутри больших колесиков; вся эта совокупность колесиков представляет собой иерархическую структуру живых осцилляторов. Можно попытаться нарисовать еще более наглядную картину человеческого организма в виде огромного оркестра. Музыкантами в таком оркестре являются отдельные клетки, причем всем этим клеткам изначально присуще чувство 24-часового ритма. Эти исполнители сгруппированы на разных участках. Вместо струнных и духовых инструментов мы имеем дело с такими органами, как почки и печень, каждый из которых состоит из многих тысяч клеточных осцилляторов, одинаковых в пределах одного органа, но разных в разных органах, причем все они поддерживают 24-часовой биохимический ритм, но вступают в действие и замолкают в строго определенные моменты времени. Внутри каждого органа в разные периоды суток совокупности генов^[58] пребывают в активном или пассивном состоянии, обеспечивая своевременную (строго по графику!) выработку определенных протеинов соответствующего органа. В качестве дирижера этой симфонии выступает задатчик циркадного ритма сердца, нейронный «распылитель» тысяч клеток внутренних часов в мозге, которые сами синхронизированы в некий когерентный модуль.

Синхронизм возникает на трех разных уровнях. На нижнем, самом микроскопическом уровне клетки внутри определенного органа взаимно синхронизированы; их химические и электрические ритмы изменяются строго одновременно. На следующем уровне синхронизм устанавливается между разными органами^[59] – в том смысле, что все они придерживаются одного периода, несмотря на то что клетки разных органов относятся к совершенно разным типам. Этот вид синхронизма устанавливается в организме в целом, поэтому он

называется внутренней синхронизацией. Это вовсе не означает, что все органы активны в одни и те же периоды времени. Напротив, некоторые из них пребывают в покое, в то время как другие действуют на полную силу. Это синхронизм в смысле совпадения периода, поддержания одного и того же ритма точно так же, как ритм продолжает звучать в головах музыкантов, даже когда они ожидают своего вступления, начала своей партии. Наконец, третий уровень синхронизма – это синхронизм между нашим организмом и окружающим миром. Когда наш организм живет в привычном для себя режиме, бодрствуя днем и засыпая на ночь, он синхронизирован с 24-часовым ритмом смены времени суток, подчиняясь главным образом циклу света и темноты. Этот процесс внешней синхронизации, шагания в ногу с окружающим миром, называется захватом или вовлечением.

На сегодняшний день наши лучшие теории циркадных ритмов человека носят более описательный, чем математический характер. Тут уж ничего не поделаешь: у нас отсутствует глубокое понимание архитектуры и динамики этой системы. Ее иерархическая организация оказалась гораздо более сложной, чем все, что описывается простыми моделями популяций осцилляторов, обсуждавшимися выше. Сообщество светлячков можно аппроксимировать как совокупность самоподдерживающихся идентичных (или почти идентичных) и мерцающих почти одновременно осцилляторов. В этом смысле уровень сложности, ассоциирующийся с синхронными светлячками, соизмерим с уровнем сложности отдельно взятого органа или, возвращаясь к нашей аналогии с оркестром, отдельной группы инструментов. Мы лишь приступаем к изучению того, как отдельные группы инструментов играют вместе как единый оркестр и как задатчик ритма координирует и направляет их действия. Иными словами, мы пытаемся изучать правила циркадной симфонии.

Мы знаем, что такие правила существуют, поскольку мы можем наблюдать их проявления в большем масштабе, в поведении целого, всего человеческого организма: в наших повседневных ритмах сна и бодрствования, флуктуаций гормонов, пищеварения, бдительности, уровня физической активности и когнитивных способностей. На этом более высоком уровне ученые недавно обнаружили загадочные регулярности^[60] во временных графиках циклов сна и бодрствования, а также других циркадных ритмов, несмотря на то, что

микроскопический базис для этих законов остается неразгаданным. В этом отношении наша нынешняя ситуация напоминает начальный период развития генетики. Мендель обнаружил, что разные характеристики бобовых культур передаются их потомству в соответствии с определенными математическими законами, и понял, что эти явления можно объяснить, допустив существование гипотетических объектов, называемых генами, которые рекомбинируют в соответствии с определенными правилами. Все это было сделано задолго до возникновения каких-либо знаний о том, что представляют собой гены в действительности, и об их физическом воплощении в нитях ДНК. Аналогично, сейчас мы знаем о том, что циркадные ритмы человека подчиняются своим собственным правилам, хотя мы по-прежнему остаемся в неведении относительно их фундаментальной биохимической основы.

Что же касается влияния синхронизма на нашу повседневную жизнь, то один из самых насущных вопросов заключается в том, как задатчик циркадного ритма влияет на сон. Эта часть загадки в значительной мере решена благодаря драматичным экспериментам, в ходе которых смелые добровольцы месяцами жили в полном одиночестве в подземных пещерах или в помещениях без окон и часов, лишённые информации о времени суток; они могли спать или бодрствовать в любое время, которое им казалось подходящим для этого. Результаты этих исследований оказались настолько странными и в то же время были переполнены столь интригующими намеками, что Арт Уинфри заявил: «В нашем распоряжении появилось нечто наподобие знаменитого камня Розетта^[61]»^[62]. Расшифровка циркадного кода помогает ученым и врачам давать научно обоснованные рекомендации относительно составления щадящих графиков для работы в несколько смен и составить более четкое представление о некоторых разновидностях бессонницы, ранее недоступных для понимания. Они даже объясняли некоторые из «маленьких мистерий» жизни: например, почему у многих народов мира практикуется послеобеденная сиеста или почему нам зачастую бывает нелегко уснуть вечером в воскресенье.

Взирая 14 февраля 1972 г. на пустынный пейзаж вблизи Дель-Рио, Техас, Мишель Сиффре любовался лучами солнечного света, которые

ему не придется видеть в течение ближайших шести месяцев. Затем он беззаботно улыбнулся в объективы устремленных на него телекамер, обнял мать, обменялся прощальными поцелуями со своей женой и спустился на дно 100-футовой вертикальной шахты. Там, в недрах подземной пещеры Миднайт-Кейв (Midnight Cave), его ждала нейлоновая палатка с мебелью и холодильниками, полными еды, 780 баллонов воды (каждый из них емкостью в один галлон), а также комплекс научного оборудования.

Сиффре, французский геолог и исследователь сна, был готов к тому, чтобы выступить в роли подопытного кролика для своих собственных исследований. Ему предстояло стать непосредственным участником тщательно продуманного, всесторонне спланированного и самого необычного из когда-либо проводившихся экспериментов по изоляции человека от времени^[63]. Мишель Сиффре вместе со своей командой – и при содействии НАСА – хотел изучить основные ритмы человеческой жизни в отсутствие часов, календаря и всех других «подсказок», которые могли бы обеспечивать ему привязку ко времени. Сиффре уже предпринимал такие попытки. В ходе первого такого эксперимента, проведенного десятью годами ранее и впервые в мире выполненного над человеком, он провел в полном одиночестве два месяца в холодной подземной пещере в альпийских горах, выйдя оттуда, по его собственному признанию, «полусумасшедшей марионеткой с бессвязной речью». Это суровое испытание стало первым научным свидетельством того, что у человека есть встроенные циркадные часы, цикл которых несколько превышает 24 часа.

Теперь, пребывая в постоянном безмолвии и покое пещеры Миднайт-Кейв, температура в которой никогда не отклонялась от 70 градусов по Фаренгейту^[64], Сиффре надеялся получить более приятные впечатления от своего эксперимента. Как бы то ни было, на этот раз все оказалось значительно хуже. В результате пребывания в полном одиночестве на протяжении шести месяцев он едва не свихнулся от постоянного напряжения. Его аудиоплеер вышел из строя, а книги покрылись плесенью до такой степени, что их невозможно было читать. Чтобы каким-то образом скрасить одиночество, он приручил крошечную мышь, соблазнив ее крошками со своего стола. Однако его дружба с мышью закончилась трагически: он нечаянно уронил на нее самодельную клетку, которую он смастерил из кастрюли. Проходили

месяцы постоянной апатии, длительного сна и нарастающего раздражения. На 79-й день своего добровольного заточения Сиффре позвонил по телефону своим сотрудникам на поверхности, умоляя выпустить его на волю: “J’en ai marre!” («С меня довольно!») Ему ответили: «Да, да, все идет как нельзя лучше!» Постоянно щурясь в темноте, вдыхая пещерную пыль попеременно с запахом экскрементов летучих мышей, Сиффре начал подумывать о самоубийстве. В последний день эксперимента природа словно услышала его мысли: он получил удар электричеством через электроды, предназначенные для записи ритмов его сердца (возможно, причиной этому стала молния, ударившая о поверхность земли, и стекание статического электричества на значительную глубину). Показателем того, насколько ухудшились его умственные способности и притупилась чувствительность, было то, что лишь с третьего удара электричеством Сиффре додумался отключить оборудование.

К счастью, эксперимент Сиффре не оказался напрасным и принес ряд впечатляющих результатов. В течение первых пяти недель своего пребывания в пещере Сиффре жил, сам того не ведая, в 26-часовом цикле. Каждый день он просыпался примерно на два часа позже и «дрейфовал» относительно времени, по которому жил окружающий его мир, в непосредственной близости от этой привязки. Во всех остальных отношениях он придерживался обычного для себя режима, пребывая в состоянии сна примерно треть времени суток.

Между тем температура его тела каждый день повышалась и понижалась, как это обычно происходит с каждым из нас. Это может показаться странным: вопреки тому, что думают многие из нас, температура тела здорового человека не держится все время на уровне 98,6 градуса по Фаренгейту^[65] (или на каком-то другом уровне); обычно на протяжении суток она колеблется в диапазоне 1,5 градуса, даже если мы все время лежим в постели и не напрягаемся. Еще в 1866 г. врач Уильям Огли отмечал: «Рано утром, когда мы еще спим, температура нашего тела слегка повышается, а вечером, когда мы еще бодрствуем, температура слегка понижается... Эти понижения и повышения обусловлены не изменениями освещенности в окружающем нас мире; вероятно, они вызваны периодическими изменениями активности органических функций»^[66].

Сейчас Сиффре подтверждал на практике то, о чем с такой точностью догадывался Уильям Огли более ста лет тому назад, размышляя над причинами температурного цикла тела человека. Пребывая в неизменных условиях пещеры Миднайт-Кейв, Сиффре не замечал смены времени суток и не располагал какими-либо часами за исключением внутренних ритмов своей собственной физиологии. Избавленные от влияния внешнего мира с его 24-часовым циклом, его «органические функции» – отражаемые температурой его тела – осциллировали в синхронизме с его собственным циклом сна и бодрствования с тем же 26-часовым периодом. По сути, он всегда укладывался спать, когда температура его понижалась, хотя он и не задумывался об этом.

На этой стадии своего эксперимента Сиффре вел себя как хомячок, или как мушка-дрозофила, или как любой другой организм, который исследовался учеными в изоляции от времени.

Цикл некоторых живых созданий бывает несколько короче 24 часов, у других – несколько продолжительнее. Этим объясняется происхождение термина *циркадный ритм* (circadian rhythm). Этот термин происходит от латинского *circa* (что означает «приблизительно») и *dies* (что означает «день»). Например, лабораторная мышь, которую держат в клетке и в постоянной темноте, радостно запрыгивает на свое «беличье колесо» в одно и то же время, примерно на полчаса раньше, чем в предыдущий день, и пробегает в нем несколько миль. Из этого можно сделать вывод, что циркадный ритм активности у мыши составляет 23,5 часа. Мимоза, которая растет в условиях постоянного искусственного освещения, раскрывает и закрывает свои листики с цикличностью, составляющей 22 часа. Практически все живые существа, начиная с обезьян и заканчивая микробами, демонстрируют столь же устойчивые ритмы, когда им предоставляется возможность действовать «по собственному усмотрению» в отсутствие каких-либо временных подсказок.

На 37-й день своего эксперимента Сиффре утратил сходство со всеми остальными видами. Его тело вело себя как-то странно, как-то уникально «по-человечески»: его ритмы сна и температуры тела рассинхронизировались. Он часами продолжал бодрствовать после снижения температуры своего тела, не спал почти всю ночь, после чего мог проспать 15 часов подряд, то есть почти вдвое дольше обычного

для себя времени. В следующем месяце график сна и бодрствования Сиффре вел себя непредсказуемым образом, иногда возвращаясь в своему первоначальному, 26-часовому варианту, чтобы затем, совершенно неожиданно, войти в цикл сна и бодрствования продолжительностью 40 или даже 50 часов. Однако Сиффре не отдавал себе отчета в столь значительных изменениях своего цикла сна и бодрствования. Сколь значительными ни были бы изменения, его температурный ритм никогда не выбивался из привычного 26-часового цикла.

Столь необычное явление называется самопроизвольной внутренней рассинхронизацией. Эта внутренняя рассинхронизация^[67] означает, что два циркадных ритма (сон и температура тела) в одном и том же организме могут идти вразнобой. С тех пор как в 1965 г. германский биолог Юрген Ашофф впервые сообщил о самопроизвольной внутренней рассинхронизации, исследователи не могли найти объяснения этому внезапному нарушению временной упорядоченности человеческого организма – тем более что у растений и животных явление самопроизвольной внутренней рассинхронизации никогда не наблюдалось. Когда Сиффре анализировал свои собственные данные, его удивлению тоже не было границ. «На первый взгляд, совершенно непредсказуемое поведение»^[68], – вот как он охарактеризовал этот феномен спустя три года.

Теперь мы знаем, что цикл сна и бодрствования Сиффре вовсе не был непредсказуемым. В действительности он подчинялся достаточно простым математическим правилам. Что еще более удивительно, оказалось, что те же самые правила распространяются на всех людей, поведение которых изучалось в условиях изоляции от времени. Первые признаки этой универсальной структуры были обнаружены молодым аспирантом, который работал в одной из больниц Нью-Йорка, – в то время еще новичком в науке, которому было уготовано судьбой стать впоследствии общепризнанным мировым авторитетом в исследовании циркадных ритмов человека.

В середине 1970-х годов Эллиот Вейцман вместе со своим учеником Чарльзом Чейзлером решили попробовать свои силы на проведении экспериментов с изоляцией от времени. Тогда в мире было еще лишь три группы ученых, которые работали в этой области:

Сиффре во Франции, Ашофф в Германии и группа, возглавляемая Джоном Миллсом, в Англии. Это было, мягко говоря, весьма дорогостоящее и сложное предприятие, однако потенциальная польза для медицины и биологии человека была несомненна.

На пятом этаже одного из старых корпусов больницы Монтефьоре в Бронксе Вейцман и Чейзлер создали звукоизолированное помещение без окон, состоящее из трех спальных комнат и одной контрольной комнаты посередине. В местной газете они разместили объявление о найме добровольцев в надежде привлечь внимание квалифицированных рабочих, художников или аспирантов – одним словом, людей, твердо намеренных довести начатое дело до конца (таким делом мог быть какой-либо долгосрочный проект или какая-либо иная причина полностью отгородиться от окружающего мира на срок от одного до шести месяцев). Кандидатам предстояло пройти психологический отбор. Поскольку затраты на проведение этого эксперимента составляли примерно 1000 долларов в день, для его организаторов было бы крайне нежелательно, если бы по причине недостаточной психологической устойчивости у кого-то из участников «поехала крыша» и эксперимент пришлось бы свернуть досрочно.

В качестве компенсации за неудобства, вызванные спецификой этого эксперимента, его участники получали щедрое вознаграждение: им выплачивали по несколько сотен долларов в неделю, предоставляли комфортабельное жилье и качественное питание, позволяли проводить время, как они пожелают. Они могли просыпаться и укладываться спать, когда захотят. Они могли читать книги, работать, выполнять физические упражнения или слушать музыку, могли требовать, чтобы им доставили еду. Они могли даже читать газеты и журналы при условии, что опубликованные там материалы будут относиться к давно прошедшему времени. С другой стороны, им не разрешалось носить наручные часы, звонить по телефону, слушать радио или смотреть телепередачи – одним словом, им не разрешалось пользоваться такими источниками информации, из которых они могли узнать текущее время. Цель такого «протокола изоляции от времени» заключалась в наблюдении за циркадными ритмами человека в их наиболее изначальной форме, не подверженной воздействиям окружающего мира. По тем же причинам участникам эксперимента запрещалось употреблять все, что могло нарушить нормальный ритм сна и

бодрствования: пить кофе и чай, алкоголь, принимать снотворное, всевозможные стимуляторы и так называемые «рекреационные наркотики», то есть вещества, принимаемые людьми от случая к случаю для получения «кайфа», особенно в компании. (Более ранние эксперименты на животных показали, что алкоголь и кофеин способны даже «перевести» сами по себе циркадные часы, хотя этот эффект представляется весьма незначительным по сравнению с хорошо знакомым нам седативным или стимулирующим действием этих химических агентов.)

День за днем, неделя за неделей Вейцман и Чейзлер отслеживали быстроту реакций участников эксперимента, когда те бодрствовали, регистрировали мозговые волны, когда те спали, и круглосуточно измеряли температуру тела и уровни гормонов. Например, чтобы отслеживать быстро изменяющиеся профили гормона роста и гидрокортизона (гормон стресса в организме человека), они вводили постоянный катетер в руку участника на все время эксперимента, чтобы у лаборантов была возможность делать анализы микропроб крови каждые 20 минут. Между тем с помощью ректального зонда (что-то наподобие отрезка струны) выполнялись постоянные измерения температуры в прямой кишке каждого из участников эксперимента. Чтобы избежать ложных скачков температуры в процессе ее регистрации, участникам рекомендовали вынимать этот зонд во время принятия душа или когда у них возникала потребность мастурбировать.

В отличие от Сиффре в пещере, участники этого эксперимента не были социально изолированы и не страдали от каких-либо психологических травм. Им была предоставлена возможность общаться с лаборантами (в некоторых случаях между участниками эксперимента и лаборантами даже завязывалась дружба). Разумеется, персоналу приходилось быть бдительным, чтобы не проболтаться о времени суток. Например, мужчины-врачи и лаборанты всегда являлись к участникам эксперимента тщательно выбритыми, чтобы щетина на их лицах не указывала на позднее время. Члены персонала всегда здоровались с участниками эксперимента, используя слово «привет» (ни в коем случае не «доброе утро» или «добрый вечер»), а распределение их по сменам выполнялось с помощью компьютера (случайным образом), чтобы участники эксперимента не могли определить время по тому, кто из персонала сейчас находится на

дежурстве. (Учитывая столь «рванный» график работы персонала, было бы не менее интересно исследовать циркадные ритмы сотрудников.)

Вот небольшой отрывок из воспоминаний одного из участников этого эксперимента.

Когда я окончил очередной год учебы в колледже, я чувствовал смертельную усталость, и участие в этом эксперименте стало для меня шансом заработать неплохие деньги. Я потратил много времени, чтобы ликвидировать «хвосты», накопившиеся у меня за последний семестр. За месяц мне удалось сделать больше, чем за целый семестр. Я полагал, что важно придерживаться определенного режима и не опуститься, поэтому я носил рубашку с галстуком и брился каждый день. Одной из самых серьезных моих проблем было то, что я носил шерстяные брюки и не мог отгладить на них «стрелки». Поэтому я ходил в рубашке с галстуком и в шортах!

Иногда я чувствовал себя, как узник в тюрьме, променяв свою молодость на деньги. Хотя я не казался самому себе ненормальным, полагаю, что другие вполне могли принять меня за ненормального. Оказавшись, в какой-то мере, в роли заключенного, я чувствую себя вполне комфортно. Я был счастлив, как счастлив моллюск в своей раковине. Все эти лаборанты тоже кажутся мне немного странными: анализы моей мочи интересуют их больше, чем фантазии, которые роятся в моей голове.

Они берут у меня кровь на анализ каждые пятнадцать минут. В мою руку вставлен катетер, в задницу вставлен зонд, а все эти штуковины подсоединены к подвижному шесту. Первые несколько дней это слегка напрягало меня, но через неделю оно уже как бы срослось со мной, стало моей неотъемлемой частью. Мне казалось, что у меня отрос хвост...

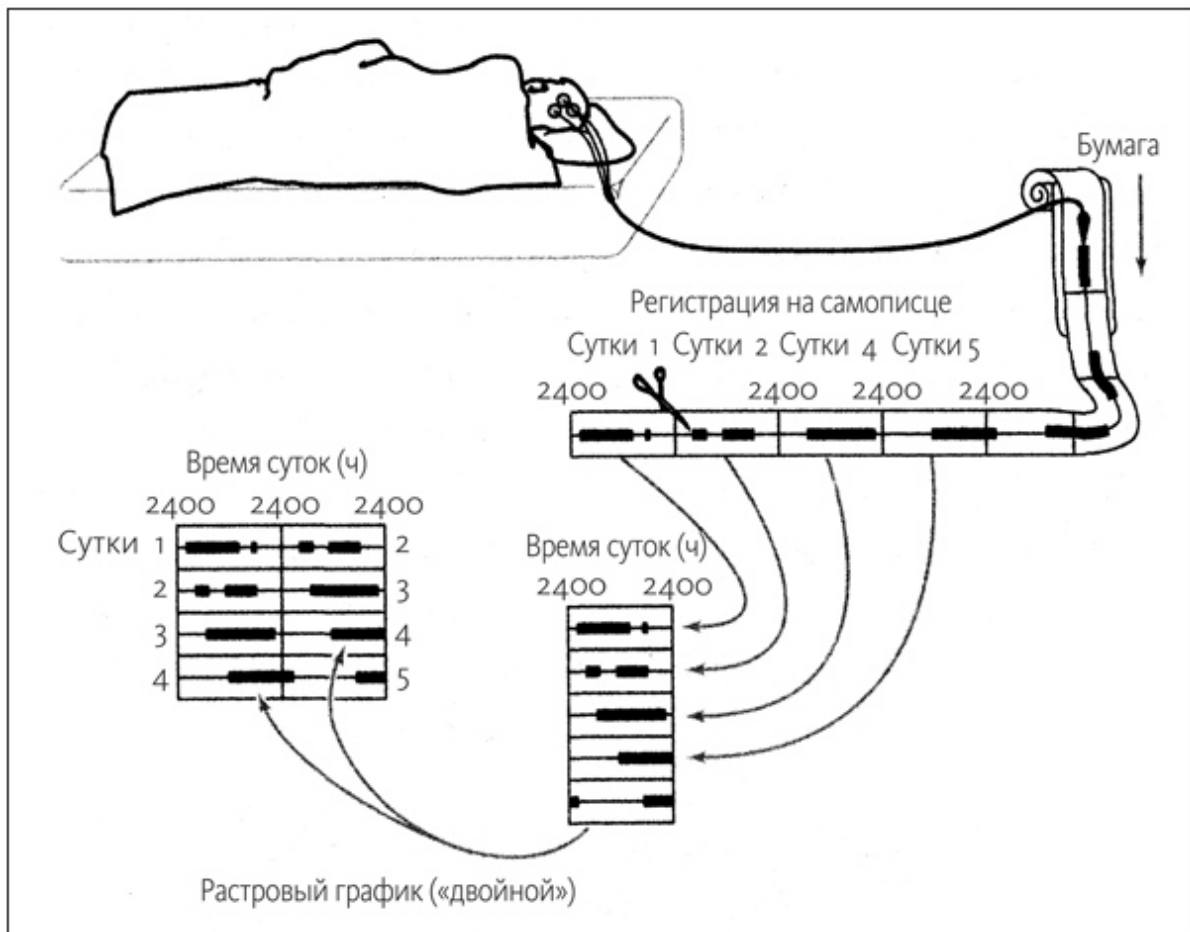
Я никогда не знал, который сейчас час, но, по правде говоря, я даже не задумывался над этим. Правда, однажды, когда кто-то из лаборантов явился ко мне с совершенно усталым и помятым лицом, я сказал ему: «Нелегкая выдалась ночь, не правда ли?»^[69]

Из первых 12 «подопытных кроликов», которых изучали Вейцман и Чейзлер, шестеро пережили состояние внутренней рассинхронизации^[70]. В силу каких-то причин эти участники эксперимента раз за разом подолгу (очень подолгу!) спали и бодрствовали, то есть с ними происходило то же самое, что с Сиффре в пещере Миднайт-Кейв. У кого-то из них этот странный режим сна и бодрствования (в среднем циклы сна и бодрствования составляли у них 40 часов) поддерживался до самого окончания эксперимента. У других длительные циклы сна и бодрствования регулярно чередовались с более привычными циклами, тогда как у третьих циклы сна и бодрствования в ходе эксперимента систематически удлинялись и к концу эксперимента они спали раз в двое суток, не отдавая себе отчета в этом. Казалось, что этому невозможно найти логическое объяснение.

Чейзлер был особенно заинтригован продолжительными эпизодами сна. Почему человек спит 15 часов подряд? Можно ли это объяснить продолжительностью периода бодрствования, предшествовавшего сну? Это выглядит вполне логично: нет ничего удивительного в том, что после продолжительного периода бодрствования человеку приходится больше спать. Но когда Чейзлер построил график зависимости продолжительности сна от продолжительности периода бодрствования, предшествовавшего этому сну, он увидел унылую горизонтальную линию. Несмотря на то что статистический тест на корреляцию выявил слабую тенденцию к увеличению продолжительности сна с увеличением продолжительности периода бодрствования, предшествовавшего этому сну, эта зависимость выглядела весьма неубедительно. Внимательно анализируя полученные данные, Чейзлер смог обнаружить немало контрпримеров, когда продолжительные периоды бодрствования сопровождалась более *коротким* сном.

Между тем круглосуточные физиологические измерения показали, что ритмы температуры тела участников эксперимента, секреции гидрокортизона и быстрота реакций всегда оставались нерушимыми, как скала, а их периодичность была немногим больше 24 часов. Как бы непредсказуемо ни вел себя цикл сна и бодрствования, эти три внутренних ритма всегда оставались на удивление стабильными. Более того, они всегда оставались взаимно синхронизированными: их периоды были идентичны. Это могло стать ключом к разгадке.

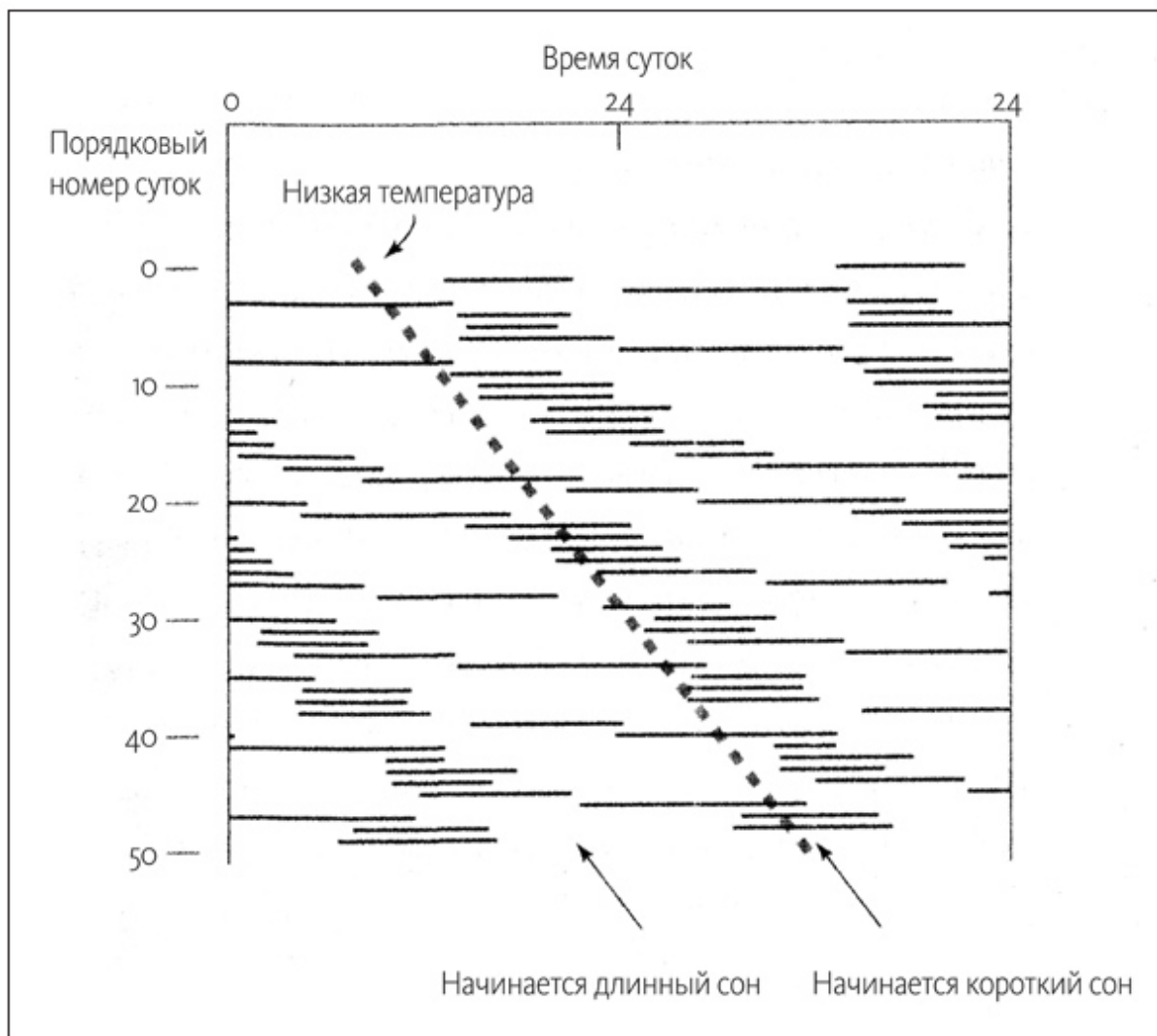
Чейзлер решил испытать другой подход. Он представил на одном графике циклы температуры тела и сна в двумерном формате, который называется растровым графиком. Биологи с Оркнейских островов уже не один десяток лет пользуются этим типом графиков. Это стандартный способ представления ритма раскрытия листьев растений или ритма мыши, которая вертится в беличьем колесе, но еще никто не пытался использовать такие графики для исследования ритмов в организме человека. Термин «растровый» применяется по аналогии с растровой разверткой в телевидении, когда в ходе процесса, называемого наложением раstra, осуществляется преобразование непрерывного потока электронной информации в двумерное изображение. Аналогично, при построении растрового графика поток данных, образующихся на выходе эксперимента, преобразуется в двумерный график. В процессе наложения раstra этот поток данных разделяется на 24-часовые блоки, которые затем укладываются один на другой в виде штабеля кирпичей.



День 1 находится на самом верху такого штабеля, день 2 находится непосредственно под днем 1, и т. д. вплоть до последнего дня эксперимента, который находится на самом дне штабеля. Чтобы подытожить циркадные ритмы участника эксперимента в какой-то определенный день, черный квадрат отображает часы, когда этот участник спал, а серый квадрат показывает, когда температура его тела опускалась ниже своего среднего значения. Достоинство растрового графика заключается в том, что любые повторяющиеся картины в данных буквально бросаются вам в глаза. Строгий 24-часовой ритм распознается сразу же как вертикальная полоса, состоящая из квадратов, причем все они начинаются и заканчиваются в одно и то же время суток. Ритм, более продолжительный, чем 24 часа, выглядит как диагональная полоса с наклоном вправо.

Когда Чейзлер построил растровый график для одного из рассинхронизированных участников эксперимента, он сразу же

заметил, что все эпизоды продолжительного сна – которые выглядели весьма загадочно – выстроились по диагонали. То же самое произошло с эпизодами короткого сна, которые выстроились вдоль другой диагонали, причем обе эти диагонали были параллельны диагональной полосе, образованной впадиной ритма температуры тела.



Из этого следовал потрясающий вывод. Несмотря на то что цикл сна и бодрствования, на первый взгляд, не был связан с температурным циклом, налицо была постоянная, устойчивая связь между ними: эпизоды продолжительного сна всегда начинались при высокой температуре тела, а эпизоды короткого сна всегда начинались при низкой температуре. Чейзлер сверил эти результаты с результатами других участников эксперимента и оказалось, что обнаруженная им

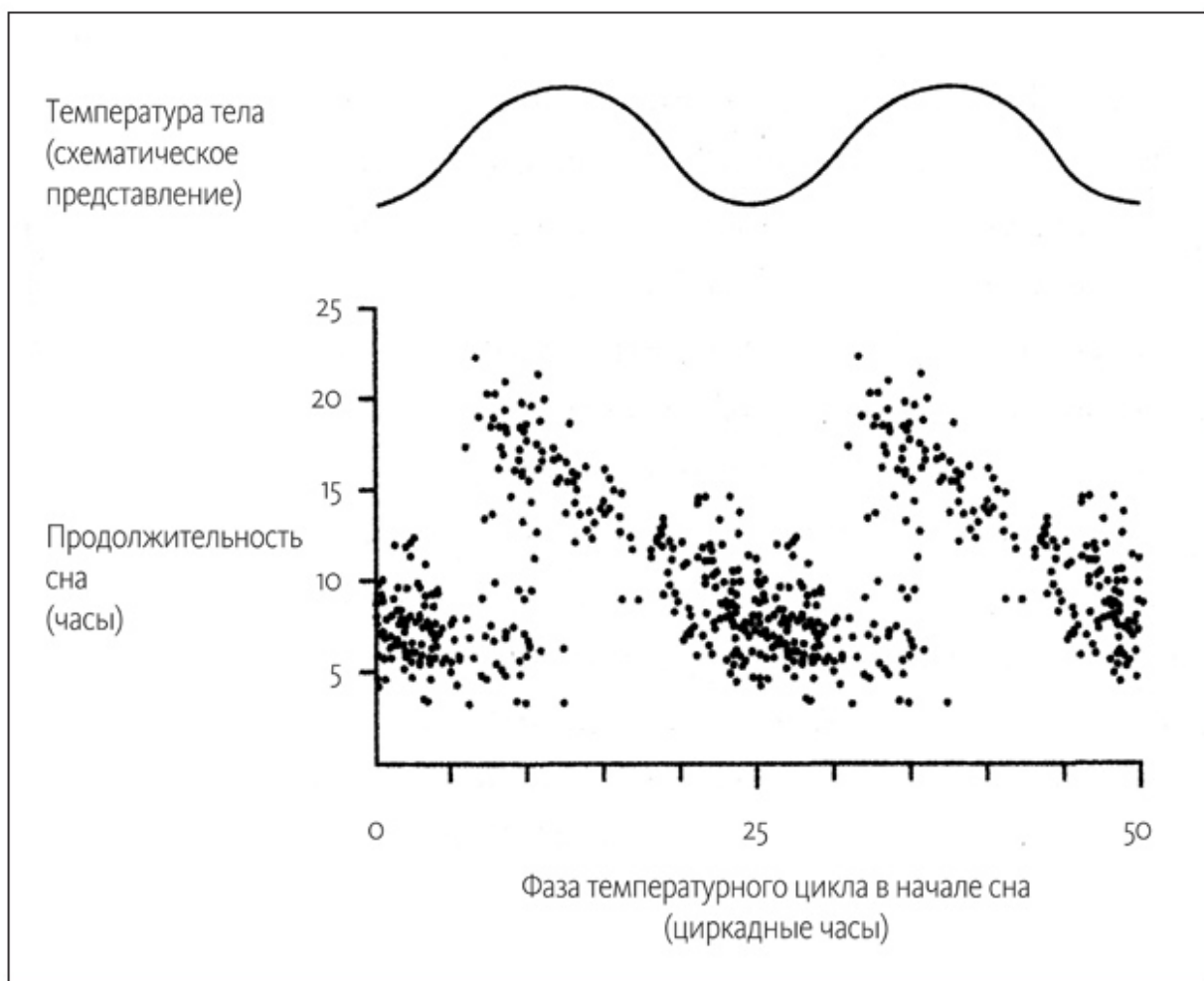
закономерность соблюдается во всех случаях. Он повторно проанализировал старые данные, опубликованные группами исследователей во Франции, Германии и Англии, и оказалось, что во всех случаях соблюдается та же закономерность.

Чейзлер разгадал циркадный код! Изучая сон в его связи с циклом температуры тела (а не в связи со временем суток или какой-либо другой внешней переменной), он выявил естественную систему отсчета, естественную меру внутреннего времени организма человека. Если вопрос рассматривать с этой точки зрения, то данные, которые ранее казались «рваными» и «случайными», внезапно продемонстрировали стройность и организованность. Продолжительность сна человека не зависела от того, как долго он бодрствовал перед этим; она зависела от соотношения между моментом, когда этот человек уснул, и циклом температуры его тела.

Чтобы конкретизировать математическую форму этого соотношения, Чейзлер построил еще один график – график зависимости продолжительности десятков разных эпизодов сна от фазы цикла температуры человеческого тела во время сна. Другими словами, он взял все эпизоды сна, которые начинались, когда температура тела была низкой, и сгруппировал их вместе. Затем он проделал то же самое для эпизодов сна, которые начинались вблизи максимума температуры, и т. д. Это дало ему возможность сравнивать, образно говоря, яблоки с яблоками; его растровый график уже показал ему, что эпизоды сна, начинающиеся при одних и тех же фазах цикла температуры человеческого тела, должны быть одинаковыми по своей продолжительности. Чейзлер собрал данные по всем рассинхронизированным участникам своего эксперимента – кто-то из них был молодым, кто-то старым, для кого-то из них были характерны 30-часовые циклы, для кого-то 40-часовые. Несмотря на существенные индивидуальные различия во всех остальных отношениях между этими участниками эксперимента, продолжительность их сна группировалась в достаточно узком диапазоне, образуя слегка размытую версию некой универсальной математической кривой.

Каждый раз, когда участники эксперимента укладывались спать вблизи пика своего температурного цикла, последующий эпизод сна всегда оказывался очень продолжительным, составляя в среднем 15 часов. И наоборот, когда они укладывались спать вблизи времени

минимальной температуры, они спали гораздо меньше – в среднем около 8 часов. «Облако» продолжительностей сна, рассматриваемое по всем фазам, было похоже на волну в форме зубца пилы^[71].



Такой результат оказался весьма неожиданным. В отличие от температурного цикла тела, который имеет более привычный для нас вид синусоидальной кривой, «облако» продолжительностей сна было на удивление асимметричным. Продолжительность сна совершала вертикальный скачок с 7 часов до 18 часов для эпизодов, начинавшихся примерно через 9–10 часов после наступления минимальной температуры, затем следовало постепенное снижение по линейному закону с возвращением к коротким эпизодам сна.

Такое снижение по линейному закону представляется несколько нелогичным. Когда участники эксперимента укладывались спать с

большим запаздыванием по сравнению с температурными циклами своего тела, они фактически спали *меньше*, несмотря на то что бодрствовали дольше. Столь же специфическая картина присутствовала в иррегулярном сне машинистов поездов и других людей, которым приходится работать в ночную смену^[72]; то же самое явление вы можете наблюдать, когда сами возвращаетесь домой после вечеринки, затянувшейся далеко за полночь. Оказавшись в конце концов в постели и пытаясь поскорее уснуть в надежде на продолжительный, восстанавливающий силы сон, вы встаете уже через 5 или 6 часов, на протяжении которых тщетно пытались уснуть, беспокойно ворочаясь с боку на бок. Проблема в срабатывании внутреннего будильника вашего организма. Участники эксперимента, изолированные от времени, почти всегда просыпаются в первые несколько часов после того, как начнет повышаться температура их тела, примерно в то время, когда в организм выбрасывается максимальное количество гидрокортизона (гормон стресса в нашем организме) и нарастает наша готовность к действию. То же самое происходит в течение 24-часового вовлечения, о котором мы упоминали выше. Поэтому, если мы укладываемся спать позже, мы склонны просыпаться раньше: дело в том, что внутренний будильник нашего организма начинает звенеть независимо от того, удалось нам выспаться или нет.

Это было весьма приблизительное объяснение упоминавшегося выше наклона вниз. Чтобы понять вертикальный скачок, когда продолжительность сна может быть либо очень короткой, либо очень длительной, либо где-то в промежутке между этими крайностями, представьте, что вы не спали всю ночь, вплоть до наступления второй половины следующего дня. Затем, если вы позволите себе короткий послеобеденный сон, то может оказаться, что вы действительно просто вздремнете, а может так получиться, что вы проспите всю вторую половину дня, а затем и весь вечер и даже всю ночь.

Это объяснение основывается на подразумеваемом переходе между временем суток и так называемой аркадной фазой (фаза температурного цикла тела, единственный показатель времени, который имеет физиологическое значение в условиях продолжительной изоляции от времени). Чтобы экстраполировать этот результат на реальный мир, где как цикл сна и бодрствования, так и температурный цикл тела вовлекаются в 24-часовой суточный цикл, нам нужно

привязать все биологические события к нижней точке температуры тела. Соответствующая формула перехода стала результатом дальнейших исследований, проведенных Чейзлером. У людей, которые вовлечены в 24-часовой, суточный цикл, температура тела обычно достигает своего минимума примерно за 1 или 2 часа до привычного для них времени пробуждения. Например, большинство тех, кто регулярно ходит на работу, просыпаются в 6 или 7 часов утра. Следовательно, минимальная температура тела у этих людей, вероятно, приходится на время между 4 и 6 часами утра. Скачок в продолжительности сна, вероятно, должен происходить у них примерно через 9–10 часов после этого, то есть в промежутке от 1 до 4 часов дня (от 13:00 до 16:00). А это и есть время послеобеденного сна.

Чейзлер и Вейцман обнаружили, что многие другие физиологические и когнитивные ритмы привязаны к фазе цикла температуры тела. Например, они попросили каждого из участников эксперимента оценить свою alertность^[73] в разные моменты периодов своего бодрствования. Каждому из участников эксперимента вручили нечисловую непрерывную вертикальную шкалу, самая верхняя точка которой была помечена словами «очень alertный», а самая нижняя – словами «очень сонный», и попросили оценить свою alertность в те или иные моменты бодрствования, начертив линию на соответствующем уровне. (Шкалу решили не размечать числами, чтобы не вызывать у участников эксперимента соблазн автоматически повторять свои предыдущие оценки.) Результаты этого теста показали, что alertность идет рука об руку с температурой тела: alertность находится на низком уровне при низкой температуре и на высоком уровне при высокой температуре.

При использовании все той же формулы преобразования для перевода циркадной фазы в абсолютные значения времени эти данные предсказывают, что на протяжении 24-часового вовлечения минимальная alertность должна наступать примерно в момент температурного минимума, а именно между 4 и 6 часами утра. Это весьма специфическое время суток, пользующееся дурной славой. Инцидент на атомной электростанции Три-Майл-Айленда произошел именно в это время, причем в это время на дежурстве находилась бригада специалистов, которая успела поработать в ночную смену лишь

несколько дней. Чернобыль, Бхопал, Exxon Valdez^[74] – все эти катастрофы происходили посреди ночи, а их непосредственной причиной был пресловутый «человеческий фактор». Полевые исследования показали, что в период с 3 до 5 часов утра работники проявляют наибольшую медлительность при ответах на телефонные звонки и при реагировании на сигналы тревоги, а также неправильно оценивают показания измерительных приборов^[75]. Это не самое лучшее время для бодрствования, особенно если от вас требуется выполнять монотонную, но важную работу. Те, кому часто приходится работать в ночную смену, называют этот промежуток времени «зомби-зоной».

Даже если вам никогда не приходилось работать в ночную смену, вы, наверное, замечали свой ритм alertности во время ночных бдений, которые случаются почти у каждого из нас. В какой-то момент, обычно между 3 и 6 часами утра, ваши глаза начинают слипаться. Желание уснуть становится почти непреодолимым. Однако спустя какое-то время откуда ни возьмись появляется «второе дыхание», и вы начинаете чувствовать себя значительно лучше. Это означает, что вы уже прошли впадину своего циркадного цикла. Теперь ваша alertность начинает повышаться вместе с повышением температуры тела и секрецией гидрокортизона. Интересный момент: то же самое «сонливое время» обнаруживается в результатах эксперимента по изоляции от времени, несмотря на то что участники эксперимента отнюдь не переутомлялись и не работали в ночную смену. Это означает, что зомби-зона встроена в биологическую систему человека.

Наряду с влиянием на alertность и продолжительность сна циркадные часы также регулируют внутреннюю структуру сна, в частности предрасположенность к быстрому движению глаз (rapid-eye movement – REM) во время сна^[76]. REM является необычным состоянием – возможно, гораздо более необычным, чем кажется многим из нас. В этом состоянии так называемого «быстрого» сна наши глаза бегают из стороны в сторону. Частота нашего дыхания и сердцебиения изменяется хаотически. Функция спинномозгового подавления парализует тело, что, вообще говоря, не так уж плохо, поскольку это не позволяет нам совершать во сне какие-то действия под влиянием испытываемых нами эмоций. (В опытах на кошках, когда

исследователи блокировали функцию спинномозгового подавления, кошки, пребывая в состоянии «быстрого» сна, бегали за воображаемой мышью.) У мужчин в состоянии «быстрого» сна часто бывает эрекция. Это явление непроизвольной эрекции позволяет врачам отличить психологическую импотенцию от физической; на время сна они заворачивают пенис пациента в рулончик почтовых марок, и если пациент просыпается с порванными почтовыми марками, значит его проблема носит скорее психологический, чем физический характер.

«Быстрый» сон в такой же степени отличается от «медленного» сна, в какой он отличается от бодрствования. Сон было принято считать примитивным, однообразным состоянием, при котором мозг и организм в целом «отключаются» на ночь. Лечь спать считалось примерно тем же самым, что загнать автомобиль в гараж и выключить двигатель^[77]. Теперь нам известно, что наш двигатель — мозг — не отключается никогда. В состоянии «медленного» сна наш «автомобиль» (организм) пребывает в «гараже» с работающим двигателем, причем и педаль газа, и педаль тормоза полностью утоплены. (Нажатая до отказа педаль газа в данном случае означает работу мозга на полную мощность, а роль тормоза играет функция спинномозгового подавления, которая не позволяет нашему телу выполнять какие-то физические действия.)

«Быстрый» сон характеризуется своим собственным ритмом, гораздо более быстрым, чем циркадный ритм. Примерно каждые 90 минут наш мозг проходит разные стадии сна. После того как мы улеглись в постель, мы «проваливаемся» из бодрствования в легкий сон; затем — в глубокий сон, когда мозговые волны становятся большими и медленными; затем мы возвращаемся к легкому сну и переходим в состояние REM — первого из нескольких «быстрых» снов. Этот первый «быстрый» сон, как правило, бывает коротким (примерно от 10 до 20 минут). Эпизоды REM на протяжении ночи обычно удлиняются, и к наступлению раннего утра мы можем в течение целого часа выступать в роли зрителей некоего сюрреалистического представления (возможно даже полноценного фильма ужасов).

Для людей, которые обычно вовлечены в 24-часовые сутки, пиковым временем для REM является раннее утро, близко к окончанию сна. Это объясняет, почему мы так часто просыпаемся именно после долгого сна и почему мужчины так часто просыпаются в состоянии эрекции. Но это общепринятое увязывание REM с окончанием сна на

самом деле является неправильным обобщением. Это не является законом REM. Правильный закон был открыт Чейзлером и Вейцманом в ходе их экспериментов с изоляцией от времени. Когда они поначалу измерили мозговые волны участников своего эксперимента, они были поражены, увидев, что REM быстрее всего аккумулировался ближе к началу сна, а не к его окончанию. К тому же именно в это время наблюдались самые продолжительные эпизоды REM. Эти результаты полностью противоречили тому, что обычно рассказывают на лекциях студентам-медикам. Вообще говоря, REM в начале сна обычно случается очень редко и является признаком нарколептического заболевания – разладом сна, подрывающим силы человека.

Столь парадоксальные результаты начали обретать смысл, когда Чейзлер и Вейцман поняли, в чем заключается истинный закон REM. Предрасположенность REM синхронизирована с температурным циклом тела, а не со сном как таковым. Нашему мозгу все равно, в какой стадии сна – начальной или конечной – мы пребываем; для него гораздо важнее, какое время в данный момент показывают внутренние часы нашего организма. Правило заключается в том, что наступление REM наиболее вероятно сразу же после завершения той части температурного цикла, когда наше тело оказывается самым холодным. В случае 24-часового вовлечения большинство людей пробуждается в момент циркадной фазы и именно поэтому REM так часто встречается в конце сна. Напротив, рассинхронизированные участники эксперимента зачастую *засыпают* при достижении минимума температуры, и именно поэтому REM у них зачастую наступает в начале сна. Ничего патологического в этом нет.

В ногу с температурным циклом тела шагают не только циркадные ритмы продолжительности сна, alertности и предрасположенности REM. Дальнейшие исследования показали, что наши ритмы краткосрочной памяти, секреции гормона мозга мелатонина и нескольких других когнитивных и физиологических функций совпадают с тем же периодом и поддерживают постоянные соотношения фаз с температурным циклом тела и друг с другом. Существует лишь один простой способ объяснить, как все эти разнородные ритмы могут быть тесно связаны между собой: все они

должны управляться из одного и того же биологического центра (пункта привязки).

В течение долгого времени этот циркадный задатчик ритма был лишь неким умозрительным объектом, гипотезой. О его существовании лишь догадывались на основе ряда косвенных признаков; для науки он был тем же самым, чем в конце XIX столетия были для нее атомы. Поиск его местоположения в организме всегда имел шансы свестись к погоне за ложной целью. В конце концов, ранние эксперименты с одноклеточными водорослями показали, что даже у них могут проявляться циркадные ритмы. Поэтому у более сложных, многоклеточных организмов (например у человека) могло оказаться, что весь организм состоит из триллионов таких центров. Иными словами, в уточнении нуждается сама формулировка: не центр может содержаться внутри нас, а *мы сами* можем быть таким центром.

И эта «сумасшедшая» догадка оказывается правильной. Вот уже на протяжении 30 лет мы знаем, что клетки печени и надпочечника могут проявлять свои собственные циркадные ритмы, даже если их изъять из организма и поддерживать их жизнедеятельность в специальном сосуде. То же можно сказать о клетках сердца и клетках почек. Гены, отвечающие за работу внутренних часов организма, встречаются повсеместно в тканях организмов мушек-дрозофил и маленьких млекопитающих, таких как мыши и хомяки; предположительно и мы, люди, также представляем собой конгрегации циркадных осцилляторов.

Тем не менее всегда было достаточно оснований полагать, что по крайней мере у млекопитающих все эти периферийные часы управляются из единого центра, который, вероятно, расположен где-то в той части мозга, которая называется гипоталамусом^[78]. Еще в начале XX века врачи заметили, что пациенты с опухолями в этой области мозга страдают непостоянством циклов сна и бодрствования. Еще более убедительным свидетельством стала работа Курта Рихтера, биолога из университета Джонса Хопкинса, который потратил почти 60 лет на поиск циркадного задатчика ритма. В серии тяжелых и малоприятных экспериментов^[79] Рихтер ослеплял крыс, а затем систематически удалял их надпочечники, гипофизы, щитовидные железы или половые железы; вызывал у них конвульсии, электрошок, алкогольный ступор и продолжительную анестезию. Зашив раны и

вернув крыс в их клетки, Рихтер обнаружил, что ни одна из его ужасных операций не повлияла на ритмы активности крыс: их внутренние часы продолжали идти как ни в чем не бывало. Затем он делал разрезы в разных местах их мозга, проверяя, не нарушило ли причиненное им повреждение мозга циркадные ритмы крыс. Нет, ни одно из этих повреждений не внесло каких-либо изменений в поведение крыс: они по-прежнему являлись в привычное для себя время, чтобы получить пищу и питье, и вообще действовали в привычном для себя ритме. Исключением из этого правила был лишь один случай: когда повреждению подвергалась передняя часть гипоталамуса. В этом случае крысы становились аритмичными.

В 1970-е годы другие исследователи указали местоположение внутренних часов еще точнее. Исходя из того, что циклы света и темноты могут вовлекать циркадные ритмы, они впрыскивали в глаза крыс аминокислоты с радиоактивными метками в надежде проследить нейронные пути от сетчатки глаза обратно к предполагаемым внутренним часам. Наряду с ожидаемыми путями к зрительным центрам мозга, они обнаружили также моносинаптический путь – нейронную линию экстренной связи – к сверх-хиазмальным ядрам, которые представляют собой пару крошечных пучков нейронов, расположенную в передней части гипоталамуса. По-видимому, эти часы играли столь важную роль в выживании животного, что в процессе эволюции сформировалась специальная прямая линия связи этих часов с глазами (вместо того чтобы использовать для этой цели уже готовые, составные – и более медленные – синаптические линии связи). Чтобы решить для себя этот вопрос раз и навсегда, исследователи разрушили хирургическим путем эти сверх-хиазмальные ядра и обнаружили, что в результате этой операции исчезли и циркадные ритмы крысы. Итак, ученым наконец удалось найти точное местоположение главных внутренних часов.

Мы по-прежнему имеем лишь весьма приблизительное представление о том, как именно работает этот задатчик ритма^[80]. Нам известно, что многие из тысяч нейронов в этих сверх-хиазмальных ядрах являются осцилляторами. Они самопроизвольно генерируют колебания в результате изменения концентраций молекул, называемых протеинами-задатчиками времени. Сами эти молекулярные циркадные ритмы вырабатываются взаимосвязанной совокупностью

биохимических петель обратной связи, в которой задействуется перезапись и преобразование ДНК примерно восьми генов внутреннего времени (точное их количество указать невозможно, поскольку соответствующие исследования еще не завершены). Затем тысячам этих осциллирующих «клеток внутреннего времени» удастся каким-то образом синхронизировать свою электрическую активность (возможно, это обуславливается химической диффузией^[81] нейротрансмиттера, называемого GABA). Наконец, *этот* коллективный электрический ритм такого задатчика ритма передается – опять-таки, неизвестным (пока) нам способом – на периферические осцилляторы в печени, почках и прочих органах человеческого тела, заставляя их функционировать с тем же периодом, что и «главные часы».

Таким образом, объяснение, предложенное Чейзлером, заключается в том, что все измеренные им ритмы координируются единым циркадным задатчиком ритма. Надежным показателем этого является температурный цикл тела; именно этим объясняется выравнивание всех остальных ритмов, если рассматривать их в этой естественной системе отсчета. Нам по-прежнему неизвестно, как именно этот задатчик ритма биохимически определяет продолжительность сна или склонность к REM. Надеюсь, что это станет известно в не столь отдаленном будущем.

Пока же нам остается лишь изумляться исполнительскому мастерству этого выдающегося маэстро, таинственным образом дирижирующего десятками ритмов внутри нас. Когда все это, вместе взятое, функционирует безупречно – когда у нас не возникает синдром смены часовых поясов или какая-либо другая разновидность рассинхронизации, – функционирование этого задатчика ритма поражает воображение. Посмотрите, как он управляет нашим организмом в самый напряженный, с биологической точки зрения, момент суток – в момент нашего пробуждения от сна. По команде этого задатчика ритма температура нашего тела уже начала повышаться (примерно за два часа до нашего пробуждения). Надпочечник выбрасывает в организм порцию гидрокортизона, чтобы настроить нас на великие дела, которые ожидают нас днем. Начинает звонить наш внутренний будильник. Включаются в работу ритмы когнитивной функции, памяти, сообразительности. В течение всего оставшегося времени дня система практически всех органов и физиологические

функции действуют по определенному, заранее предусмотренному расписанию. Эта молчаливая симфония внутри нас объясняет, почему химиотерапия раковых заболеваний^[82] оказывается наиболее эффективной в определенные часы (что является отражением ритмов в синтезе ДНК и других процессов на клеточном уровне) и *почему* сердечные приступы^[83] (и инфаркт) наиболее вероятны около 9 часов утра (в этот момент кровяное давление достигает пика). Роды наиболее вероятны ранним утром, приблизительно с 3 до 4 часов утра; то же самое касается смертей (это, возможно, указывает на то, что человек обычно проживает некоторое количество *полных* дней^[84]).

Эти теоретические построения выглядят очень красиво, за одним исключением: мы все еще не в состоянии объяснить, что происходит, когда у человека наступает самопроизвольная рассинхронизация, как это случилось с Сиффре в пещере Миднайт-Кейв. Когда случается такая рассинхронизация, складывается впечатление, будто время сна перестает подчиняться командам задатчика ритма. Возможно ли такое в действительности или существует еще какая-то тайна, скрывающаяся в данных, полученных исследователями, – недостающий ключ к разгадке циркадного кода? Это была задача, которую я мечтал решить в ходе исследований, связанных с написанием моей докторской диссертации.

Осенью 1982 г. я прибыл в Гарвардский университет в качестве аспиранта, специализирующегося в области прикладной математики. На другом берегу реки там же, в Бостоне, Чак Чейзлер только что приступил к исполнению обязанностей в своей новой должности помощника профессора медицинского факультета Гарвардского университета и больницы Brigham and Women's Hospital. Я слышал о Чаке еще летом того же года, когда работал вместе с Артом Уинфри. Арт рассказывал мне, что Чак самостоятельно выполнил новаторское исследование циркадных ритмов. Особенное впечатление произвело на Уинфри недавнее открытие Чаком Чейзлером закона продолжительности сна^[85] (Уинфри даже посвятил этому открытию хвалебную статью, которая была опубликована в *Nature*, одном из самых авторитетных научных журналов мира). Помню, как эта статья потрясла меня. Казалось поразительным, что несмотря на причуды психологии и волеизъявлений человека цикл сна и бодрствования мог подчиняться столь простому и универсальному механизму. На первый

взгляд, внутренняя рассинхронизация могла казаться делом случая, однако на более глубоком уровне она оказалась тонко структурированной. Возможно, своего открытия ждали и какие-то другие законы. Передо мной открывались захватывающие перспективы.

Я почувствовал, что оказался в нужном месте в нужное время. Наряду с недавним появлением на медицинском факультете Гарвардского университета Чейзлера, профессорско-преподавательский состав пополнили Ричард Кронауер, инженер-механик, который разработал самую совершенную на тот момент математическую модель циркадных ритмов человека; Мартин Мур-Эде, физиолог и крупный специалист по циркадным ритмам у беличьих обезьян (саймири); а также Вуди Гастингс, биолог, проводящий исследования на клеточном уровне и потративший 35 лет на выявление молекулярных механизмов циркадных часов. Все эти люди хорошо знали друг друга и преподавали на медицинском факультете; все они были научными руководителями многочисленных аспирантов и младших научных сотрудников, каждый из которых жаждал получить интересную тему для исследований.

Я познакомился с Чейзлером буквально в первый же день своей работы в Гарвардском университете. Высокий мужчина чуть старше тридцати лет, с усами в стиле Кларка Гейбла, он был похож на кинозвезду (во всяком случае, так считала моя мать, когда год спустя увидела телевизионное интервью с ним). А после того как Чейзлер блестяще защитил диссертацию, он был буквально обречен на то, чтобы стать яркой звездой в научном мире. Руководство больницы Brigham and Women's Hospital отвело для его лабораторий целый этаж в здании больницы Old Boston Lying-in Hospital. Когда Чейзлер решил устроить для меня экскурсию по своим владениям, нас приветствовал грохот отбойных молотков: рабочие-строители создавали специальное помещение для изоляции от времени в соответствии с конструктивными решениями, использовавшимися ранее Вейцманом в Монтефьоре.

Лишь примерно через год Чейзлер смог приступить к новым исследованиям. Между тем в уже имеющихся данных заключалось множество трудноразрешимых загадок. В частности, Уинфри не давала покоя фундаментальная асимметрия^[86]: продолжительность сна была предсказуема, тогда как продолжительность бодрствования – нет. Даже в свете самых последних достижений науки никто не знал, как

предсказать продолжительность бодрствования рассинхронизированного человека. А это означало, что половина цикла сна и бодрствования по-прежнему остается для нас загадкой.

Чтобы приступить к поиску закона, определяющего продолжительность бодрствования, я собрал все доступные мне данные. Чейзлер щедро поделился со мной своими старыми записями из Монтефьоре, а также некоторыми данными, полученными им от французской группы исследователей. Уинфри передал мне несколько совокупностей данных, которые встретились ему в научной литературе. Со своей стороны, я пытался найти в научной литературе примеры внутренней рассинхронизации. Сбор всей этой информации занял у меня около года. В то время в нашем распоряжении еще не было устройств для оцифровки информации и фотокопировальной техники с возможностью увеличения изображений, поэтому процесс сбора информации был весьма утомительным. Если, например, я находил в каком-либо журнале статью, содержащую растровый график, мне приходилось просить профессионального фотографа снять копию этого графика и настолько увеличить изображение, чтобы я мог с помощью линейки и лупы точно измерить продолжительности всех эпизодов сна и бодрствования.

Постепенно мне удалось накопить огромную базу данных ^[87] рассинхронизированных циклов сна и бодрствования и приступить к поиску каких-то закономерностей. Я пытался построить функцию зависимости продолжительности бодрствования от какой-либо предшествующей переменной, которая казалась мне правдоподобной, например от продолжительности предыдущего эпизода сна или от фазы цикла температуры тела в момент пробуждения. Увы, построение этих графиков ничего не дало мне. Затем я пытался выявить связи между продолжительностью бодрствования и *двумя* предшествующими переменными. Опять ничего. Если закон, определяющий продолжительность бодрствования, действительно существует, его не удалось найти до сих пор.

В течение всего этого бесплодного поиска я продолжал встречаться со своим новым консультантом, Ричардом Кронауером, седовласым ученым, отличавшимся непоколебимой уверенностью в собственных силах и оптимизмом. У него всегда находилось время для меня; к тому же он любил размышлять над данными – это было увлекательным

занятием для нас обоих. Кроме того, у него была любимая модель функционирования циркадных ритмов человека, и тут между нами возникало противоречие, особенно когда я раздражал его напоминаниями о несоответствиях между его моделью и собранными мною данными. Он повышал голос. Мое лицо покрывалось красными пятнами. Оба мы были изрядными упрямыми.

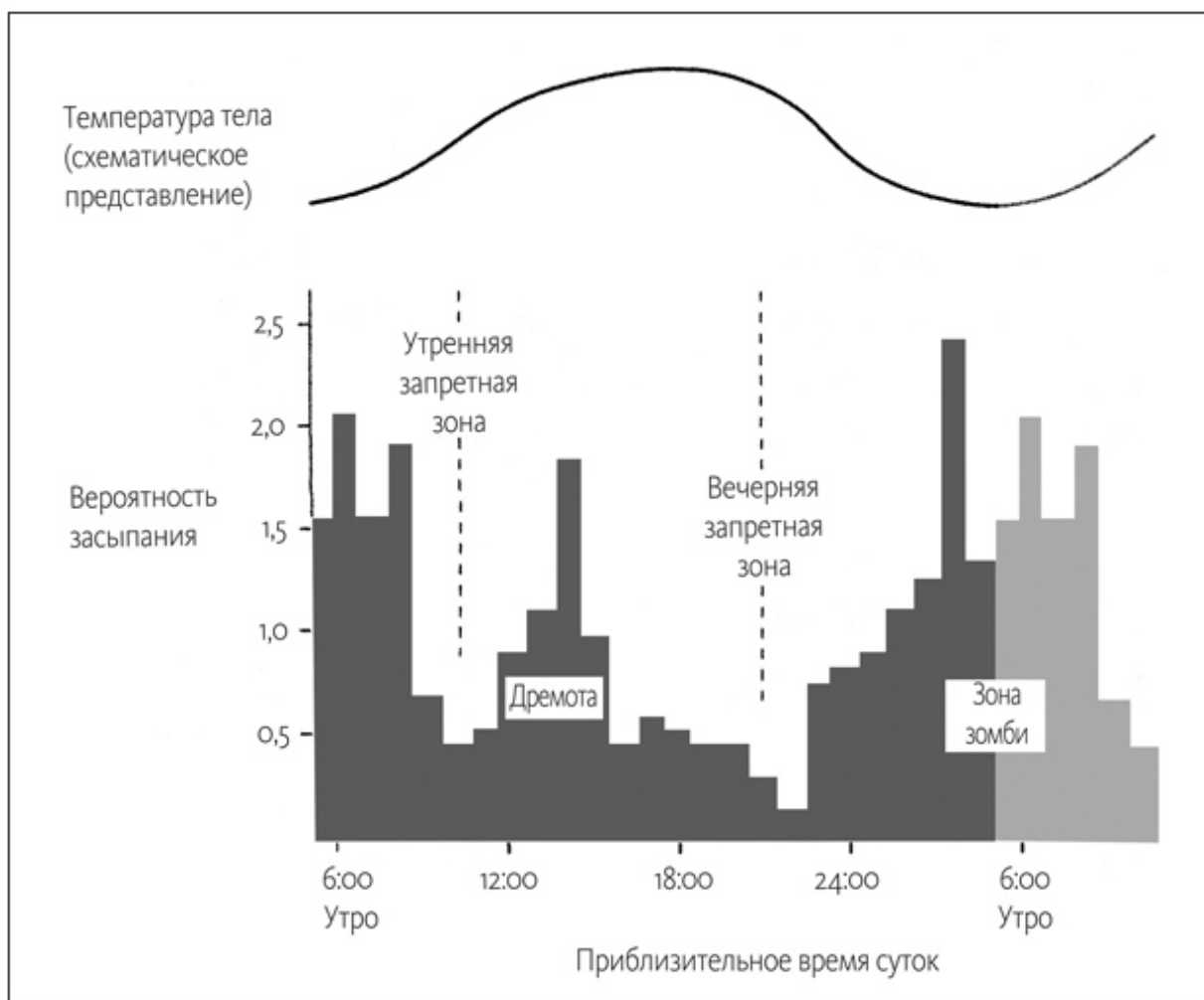
Одна из любимых идей Кронауера заключалась в том, что в циркадном цикле есть два особых периода, когда люди не могут уснуть. Он называл их запретными зонами^[88]. Он брал в руки свою линейку, рисовал на растровом графике несколько параллельных линий и говорил мне: «Смотри сюда. Человек никогда не засыпает в этом или в том диапазоне». Я скептически улыбался: нет ничего сложного, чтобы обнаружить такие закономерности, если вы уже поверили в их существование. Кронауер знал о человеческой склонности к самообману, но он продолжал настаивать, что эти зоны находятся в определенных, постоянных местах – одних и тех же для каждого человека.

Нужды в перепалках не было: существующие между нами разногласия можно было уладить с помощью моей базы данных. Если запретные зоны действительно существуют, они должны проявляться в виде двух впадин в распределении моментов времени, когда человек укладывается спать, выбранных в течение внутренней рассинхронизации. Напротив, если люди с одинаковой вероятностью укладываются спать в любой момент циркадного цикла температуры (то есть не отдают предпочтение какому-то определенному времени), то такое распределение должно быть плосковершинным.

Кронауер был прав. Когда я построил график зависимости относительной частоты времени засыпания от циркадной фазы, то заметил две ярко выраженные впадины, причем ширина каждой из них составляла 2–3 часа, а их центры располагались примерно на 5 часов позже и на 8 часов ранее момента наступления температурного минимума.

Вероятность того, что человек уснет в одном из этих двух промежутков времени («запретных зон», по определению Кронауера), была очень мала (хотя и не исключалась полностью). Соответствующие моменты, выраженные во времени суток, можно было оценить, применив упоминавшуюся ранее формулу преобразования:

температурный минимум наступает приблизительно за 1–2 часа до привычного времени пробуждения. Таким образом, для того, кто привык спать с 23:00 до 7:00, эти данные прогнозировали «утреннюю запретную зону» примерно с 10 до 11 утра, а «вечернюю запретную зону» – примерно с 21:00 до 22:00, то есть за один-два часа до укладывания в постель.



В этом распределении также присутствовало два пика, представляющих самые «сонные» моменты в цикле, – в том смысле, что это были моменты засыпания, выбираемые участниками эксперимента чаще всего (разумеется, участники эксперимента не задумывались над этим, поскольку пребывали в изоляции от времени). Центр широкого пика находился в районе температурной впадины, совпадающей с «зомби-зоной», указывая на то, что это окно

минимальной alertности является также временем максимальной сонливости. Второй пик наступал примерно через 9–10 часов после температурного минимума, соответствуя времени сиесты^[89], то есть промежутку с 14:00 по 15:00 в окружающем мире. Интересный вывод заключается в том, что сонливость в послеобеденное время у нас появляется не потому, что мы плотно пообедали, или потому, что на улице жарко, а потому, что это продиктовано нашим циркадным задатчиком времени.

Когда мы с Кронауером видели, что моменты послеобеденной сонливости совпадают с пиком сонливости в данных о рассинхронизации, мы понимали, что находимся на пороге важного открытия. Для нас не было очевидным, что данные, полученные в ходе эксперимента с изоляцией от времени, обязательно свидетельствуют о существовании какой-то закономерности в реальном мире. В конце концов, условия в том и другом случае совершенно разные. В ходе вовлечения ритмы сна и температуры тела синхронизированы по фазе между собой и со временем суток, тогда как при внутренней рассинхронизации ритмы сна и температуры тела не совпадают между собой, а их периодичность превышает 24 часа. Тем не менее наша формула преобразования позволяет получить правильный прогноз фазы сонливости, что, возможно, позволяет нам экстраполировать остальную часть ритма сонливости. Это означало, что мы можем найти в реальном мире соответствия для обеих «запретных зон».

Спустя несколько недель на совещании, посвященном исследованиям сна, я услышал лекцию о распределении частоты автокатастроф, случавшихся с одним грузовым автомобилем^[90], по времени суток. Это было практически такое же распределение, какое мы исследовали вместе с Кронауером! (Под автокатастрофой, случившейся с одним грузовым автомобилем, подразумевается, что этот грузовик был смят в лепешку, перевернулся, разбился о береговую устой моста или свалился в кювет исключительно по вине водителя этого грузовика. То есть, он не столкнулся с каким-то другим грузовиком. Возможно, его водитель просто уснул за рулем.) Статистика свидетельствует о том, что такие автокатастрофы, случающиеся с одним грузовым автомобилем, происходят примерно в 5 часов утра гораздо чаще, чем в дневное время. Второе самое вероятное

время автокатастроф, случавшихся с одним грузовым автомобилем, — это время между 13:00 и 16:00, то есть во время фазы повышенной сонливости. Реже всего такие автокатастрофы случаются в 10:00 и в 21:00, что соответствует периодам, прогнозируемым для утренней и вечерней «запретных зон». Объяснение этого факта представлялось вполне очевидным: водители редко засыпают за рулем в эти промежутки времени. Подобно зомби-зоне и сиесте, «запретные зоны» должны быть встроены в наш циркадный цикл.

Примерно в то же время Мэри Карскадон, исследователь сна из больницы Bradley Hospital и медицинского факультета университета Brown University, занималась изучением мозговых волн участников эксперимента по «постоянной программе» (протокол, предназначенный для обнаружения циркадной составляющей температурного цикла путем как можно большего выравнивания поведения участника эксперимента и его окружения). Участники эксперимента на протяжении 40 часов пребывают в горизонтальном положении, лежа на кровати, в условиях постоянного искусственного освещения и каждый час получают питание (питательный напиток). Хотя предполагается, что все это время они бодрствуют, на самом деле это не совсем так: время от времени они впадают в «микросон». Их мозг засыпает на несколько секунд, а картина, которую исследователи видят на электроэнцефалограмме, внезапно меняется.

Мэри Карскадон обнаружила, что эти эпизоды непреднамеренного сна вероятнее всего происходят в определенные моменты суток. Когда она представила в графическом виде распределение «микроснов»^[91] в течение последних 22 часов эксперимента (к этому времени участники эксперимента были лишены сна), она обнаружила пики в зомби-зоне и фазе сонливости. А также впадины в двух «запретных зонах».

Таким образом, все сходилось. Одно и то же распределение было выявлено в «микроснах», в автокатастрофах, случавшихся с одним грузовым автомобилем, и в моментах засыпания, выбранных при внутренней рассинхронизации. Для нас было очевидным, что все эти ситуации отражали циркадный ритм сна и бодрствования, внутренне присущий мозгу человека.

С учетом того, что вечерняя запретная зона ситуационно близка к привычному времени засыпания — и наступает за один-два часа до него, — мы с Кронауером заинтересовались, может ли она быть

замешана в каких-либо формах бессонницы. Наши данные, связанные с изоляцией от времени, лишь показывали, что рассинхронизированные участники эксперимента редко *предпочитают* укладываться в постель примерно за 8 часов до своего температурного минимума. Оставалось получить ответ на следующий вопрос: если люди намеренно *пытались* уснуть именно в это время, казалось ли им это трудным?

Ответ на этот вопрос уже можно было найти в научной литературе. В середине 1970-х годов несколько исследователей заставили участников своих экспериментов жить по существенно сокращенным графикам сна и бодрствования, пытаясь выяснить их способность засыпать несколько раз в течение суток. Например, Мэри Карскадон и Уильям Демент заставили студентов-добровольцев из Стэнфордского колледжа жить по графику «90-минутных суток»^[92], который представлял собою весьма изнурительный режим, предполагающий 30 минут сна, за которыми следовали 60 минут принудительного бодрствования, после чего участник эксперимента должен был снова лечь в постель на 30 минут и т. д., 16 раз в сутки – и так на протяжении пяти календарных дней. Иногда участникам эксперимента удавалось сполна воспользоваться своим драгоценным 30-минутным отдыхом – они засыпали, как только их голова касалась подушки. Иногда им вообще не удавалось уснуть, несмотря на крайнюю усталость. Их способность уснуть менялась ритмично каждые сутки и прочно коррелировала с фазой температурного цикла их тела. Наихудшее время наступало примерно за 8 часов до наступления температурного минимума (для этих студентов колледжа это было приблизительно в 22:30). Как ни странно, участникам эксперимента тяжелее всего было уснуть непосредственно перед наступлением привычного для них времени укладывания в постель. Этот факт озадачил Карскадон и Демент, однако теперь для этого существовало объяснение: они наблюдали сильное влияние вечерней запретной зоны.

Кронауер нашел очередное свидетельство того, что запретная зона может быть причиной бессонницы в начале сна^[93]. В эксперименте, проведенном в Корнельском институте хронобиологии, Джефф Фуксон вместе со своими коллегами предложил здоровому 21-летнему молодому человеку жить по жесткому расписанию 23,5-часовых суток. Другими словами, в условиях полной изоляции от времени этот молодой человек должен был подчиняться строгому расписанию:

каждый день он должен был на полчаса раньше укладываться спать и просыпаться. В течение этого времени ему не разрешалось вздремнуть ни на минуту – только единый, консолидированный блок отдыха в постели на 7–7,5 часов в каждом цикле. «Подопытному» зачастую не удавалось как следует воспользоваться предоставленным ему временем для сна: он не мог уснуть сразу же, ворочаясь в постели с боку на бок в течение примерно трех часов. В процессе эксперимента дефицит сна у «подопытного» нарастал, хотя во время, предоставленное ему для сна, он страдал от бессонницы. Молодой человек резко протестовал против расписания, по которому его заставляли жить. Что-то, по его мнению, было не так, хотя он не понимал, что именно было «не так». Более того, он угрожал самовольно прекратить эксперимент. И все это из-за того, что его сутки были укорочены на какие-то жалкие полчаса!

Предложенное Кронауером объяснение заключалось в том, что это укороченное расписание нарушило соотношения между внутренними фазами «подопытного», привязав его вечернюю запретную зону ко времени засыпания, задаваемому расписанием, что создало проблемы с засыпанием. Чтобы понять, как такие последствия могли быть вызваны искусственным сокращением суток, представьте себе циркадный задатчик ритма в виде упирающегося пса, которого тащит за собой на поводке по дорожке стадиона хозяин, совершающий утреннюю пробежку. (Подобно медлительному псу, задатчик ритма этого «подопытного» стремился совершать свой полный циркадный цикл каждые 24,7 часа, тогда как окружающий мир нетерпеливо тащил его за собой, пытаясь завершать каждый очередной круг за 24 часа.) Теперь, если владелец собаки станет двигаться еще быстрее, ускорит свое движение и собака, но растянет поводок и еще больше отстанет от своего хозяина. Для задатчика ритма это означает, что, если продолжительность цикла расписания сокращается с 24 часов до 23,5 часа, все события, привязанные к задатчику ритма (в том числе запретные зоны), тоже отстанут и сдвинутся на более позднее время относительно этого расписания. Следовательно, запретная зона, которая привычно опережала на несколько часов момент укладывания в постель (и была прочно привязана к нему), теперь будет находиться в непосредственной близости от этого момента (или даже совпадать с ним) и окажется весьма ненадежно привязанной к нему. Такое, более чем неподходящее, состояние будет сохраняться до тех пор, пока что-

нибудь не разорвет этот «поводок» и не разрушит это вовлечение. Финальная часть этого эксперимента подтвердила правильность именно такой интерпретации. Когда этот принудительно навязанный цикл был милосердно сокращен до 23 часов, температурный ритм «подопытного» порвал связывавшие его путы: он оказался не в состоянии синхронизироваться со столь укороченным расписанием. В результате привязка запретной зоны «подопытного» к моменту его засыпания оказалась разрушенной, его бессонница прошла, а его настроение заметно улучшилось.

В реальном мире встречаются люди, страдающие такой же формой бессонницы, как у нашего «подопытного». Причина такой формы бессонницы всегда одна и та же. Собственный циркадный период у нашего «подопытного» составлял 24,7 часа, и жить по 23,5-часовому расписанию, навязанному ему, оказалось весьма непростым делом; следуя той же логике, людям с собственным периодом, близким к 25,2 часа, но вынужденным жить в 24-часовом мире, вполне возможно, придется засыпать в запретной зоне, что окажется для них нелегким испытанием. Это может служить объяснением так называемого «синдрома задержки фазы сна»^[94], который, по некоторым оценкам, причиняет страдания сотням тысяч людей во всем мире. Люди, страдающие синдромом задержки фазы сна, могут спать хорошо, но в неподходящее для этого время суток, например с 4 часов утра до полудня. Таким людям практически невозможно выполнять работу, которая требует высокой степени сосредоточенности в утренние часы.

Когда вечерняя запретная зона оказывается настолько близкой к привычному времени укладывания в постель, даже людям, не страдающим разладами сна, приходится подчас пытаться уснуть в моменты, когда сделать это тяжелее всего. Если вам когда-либо приходилось укладываться спать пораньше (например, чтобы утром успеть на самолет), то вы, наверное, замечали, как тяжело бывает уснуть в таком случае. Проблема не только в том, что вы несколько взвинчены предстоящей поездкой; дело в том, что вы пытаетесь уснуть в самое неподходящее время в своем циркадном цикле. Та же самая причина объясняет, почему люди так часто страдают бессонницей в ночь с воскресенья на понедельник. Вставая поздно и поздно засыпая в выходные дни, вы невольно смещаете свой циркадный задатчик ритма

и свою вечернюю запретную зону на более позднее время и, возможно, нарушаете привычное для себя время засыпания.

Многие люди страдают другими формами рассинхронизации с 24-часовыми сутками или неспособностью к синхронизации как таковой. В частности, на тех, кому приходится работать посменно, постоянно воздействуют взаимно противоречивые «послания». Когда им приходится работать в ночную смену, циркадный задатчик ритма рекомендует им спать днем, но дневной свет и уличный шум (а также их дети) рекомендуют им спать ночью. Вообще говоря, посменная работа порождает серьезные проблемы для всех промышленно развитых стран – проблемы, которые со временем будут лишь усугубляться. Экономика заставляет нас жить по 24-часовому расписанию^[95], когда заводы, всевозможные компании и финансовые рынки работают круглосуточно. Примерно четверть трудовых ресурсов США уже живет в соответствии с этим противоестественным расписанием. Несмотря на то что экономические преимущества такого круглосуточного графика очевидны, трудно оценить издержки, которые приходится нести при этом как самим работникам, так и обществу в целом. К числу этих издержек относятся поломанная семейная и социальная жизнь, заболевания желудочно-кишечного тракта, разлады сна, а также цена, которую приходится платить за ошибки (иногда с катастрофическими последствиями), обусловленные необходимостью работать в зомби-зоне.

Кандидатом на самое худшее расписание всех времен и народов является расписание, используемое на ядерных подводных лодках ВМС США^[96]. Согласно уставу ВМС, морякам отводится 6 часов на исполнение их служебных обязанностей и 12 часов – на отдых; иными словами, от них требуют жить по расписанию 18-часовых суток. Задатчик ритма не может приспособиться к столь короткому циклу, в результате чего моряки живут в постоянном состоянии рассинхронизации. Командование ВМС оправдывается тем, что продолжительность 8-часовой смены слишком велика, чтобы на ее протяжении человек мог все время поддерживать высокую бдительность; кроме того, на подводной лодке предусмотрено место для хранения лишь трех комплектов повседневной формы для каждого моряка – отсюда следует 18-часовое (3 раза по 6 часов) расписание.

Какими оказываются медицинские последствия жизни во 18-часовому расписанию, неизвестно до сих пор, но некоторым указанием на такую проблему является колоссальная текучесть рядового и сержантского состава на экипажах подводных лодок США (от 33 до 50 % на одно плавание), причем лишь небольшое число моряков соглашается участвовать в более чем 2–3 морских походах длительностью 90 дней. Между тем офицеры обычно живут по 24-часовому расписанию и служат на подводном флоте гораздо дольше – нередко по несколько лет, большую часть из которых они проводят в морских походах.

Дневной свет является самым важным сигналом, который поддерживает организм человека в синхронизме^[97]. Его влияние на задатчик ритма оказывается разным на разных стадиях циркадного цикла – очень тонкий эволюционный механизм, который гарантирует правильный ход внутренних часов человека. В частности, утром солнечный свет ускоряет их ход (как бы говоря нашему организму: «Эй, ты уже прозевал наступление рассвета, поэтому завтра я разбужу тебя раньше»). Солнечный свет в середине дня слабо влияет на ход наших внутренних часов, тогда как в вечернее время он замедляет его. Определенная коррекция бывает необходима каждый день, поскольку циркадный задатчик ритма человека склонен к несколько замедленной работе, а его естественный период оказывается несколько более продолжительным, чем 24 часа. Ученые все еще пытаются выяснить, как именно дневной свет влияет на работу задатчика ритма человека, но в целом нам известно, что свет, попадая на сетчатку глаза, вызывает определенные химические изменения в фоторецепторах сетчатки, которые затем отправляют электрический сигнал по нейронным путям к сверх-хиазмальным ядрам в гипоталамусе, то есть туда, где находится задатчик ритма. Как ни странно, эти фоторецепторы до сих пор не выявлены. Это вовсе не палочки и колбочки^[98], которые позволяют нам видеть окружающий мир; слепая мышь с генетическим заболеванием, которое разрушает ее палочки и колбочки, все же сохраняет способность к вовлечению в цикл света и темноты.

Еще одним свидетельством эффекта синхронизации, вызываемого дневным светом, является то обстоятельство, что 80 % слепых людей страдают хроническими расстройствами сна^[99]. Будучи неспособны каждые сутки подстраивать соответствующим образом ход своих внутренних часов, они испытывают проблемы со сном и с

поддержанием бодрствования согласно расписанию, по которому живет общество в целом. Их жалобы имеют периодический характер: каждый месяц, на протяжении двух или трех недель, когда нарушается их синхронизация с окружающим миром, днем у них случаются неконтролируемые приступы сонливости, тогда как их ночной сон носит рваный, обрывочный характер. Но постепенно их биологические часы начинают отставать настолько, что они вновь возвращаются к гармонии с окружающим миром. Неделью-другую они чувствуют себя прекрасно, после чего их накрывает очередная волна рассинхронизации.

Интересно, что остальным 20 % слепых людей удастся достичь синхронизма с циклом света и темноты. Вероятное объяснение такого феномена заключается в том, что циркадные фоторецепторы в сетчатке их глаз остаются неповрежденными, даже если повреждены ее палочки и колбочки. Это дает возможность свету выполнять свое корректирующее воздействие на ход их внутренних часов, попадая на их глаза, а затем проходя по нейронным путям к задатчику ритма. Другими словами, хотя эти люди неспособны видеть окружающий их мир, они способны воспринимать свет в невизуальном, циркадном смысле. Подтверждением этой неожиданной идеи могут служить результаты недавних исследований мелатонина – гормона мозга, вырабатываемого шишковидным телом (эпифизом мозга). У зрячих людей секреция мелатонина колеблется в соответствии с суточным циклом, причем пик секреции наступает в ночные часы, когда мы спим. Этот циркадный ритм задается «главными часами», подобно температуре тела, alertности и многим другим физиологическим функциям. В этом смысле уровни мелатонина служат еще одним «представителем» задатчика ритма. Кроме того, секреция мелатонина реагирует на свет: она резко снижается, когда нам в глаза попадает яркий свет. (В данном случае «яркий» означает свет, интенсивность которого типична для дневного времени, то есть гораздо ярче, чем типичный свет внутри помещения, но ничего необычного во всех остальных отношениях.) В 1995 г. Чейзлер вместе со своими коллегами исследовали реакцию подавления мелатонина у совершенно слепых людей, подвергая их воздействию яркого света в момент, когда уровни мелатонина в их крови были высокими. У большинства участников эксперимента эффект подавления, как и следовало ожидать, не

наблюдался вообще: свет не добирался до их внутренних часов. Но среди той особой субпопуляции слепых людей, которым как-то удавалось синхронизироваться с 24-часовыми сутками, свет подавлял секрецию мелатонина точно так же, как он делает это у обычных, зрячих людей. Вывод заключается в том, что от глаз к мозгу есть два пути: один для зрения, осознаваемого человеком, а другой для циркадного вовлечения. Эта гипотеза соответствует известной анатомии мозга млекопитающих: нейронная линия связи с задатчиком ритма отделена от зрительных путей мозга.

Точно так же как особенности, свойственные слепым людям, помогают нам понять природу циркадного фоторецептора, люди, подверженные другому синдрому, проливают свет на внутреннее устройство часового механизма, встроенного в человека. Недавно ученые, исследуя пациентов с редким заболеванием под названием «наследственный синдром смещенной фазы сна»^[100], выявленным в 1999 г., обнаружили первый ген, связанный с циркадным ритмом человека. Членов семьи, страдающих этим заболеванием, можно отнести к типу «супержаворонков»: они засыпают примерно в 19:30 и самостоятельно просыпаются в 4:30 утра. Лабораторные исследования показали, что циркадные часы у этих людей «торопятся», причем их период примерно на один час короче обычного, что указывает на некую генетическую мутацию функции часов. Группа исследователей из университета штата Юта, возглавляемая Луисом Птасеком, смогла выявить ген, подверженный этой мутации. Этим геном оказался hPer2, белковый продукт которого, как полагают, играет существенную роль в молекулярных петлях обратной связи, которые генерируют циркадные осцилляции в отдельно взятых клетках.

У некоторых других семей, страдающих наследственным синдромом смещенной фазы сна, мутации указанного гена не обнаружены. Это означает, что, вероятно, существуют и какие-то другие гены-мутанты. Когда будет обнаружено достаточное число таких мутантов, мы можем рассчитывать на то, что ученые добьются быстрого прогресса в определении молекулярной и генетической основы циркадных ритмов человека. А это с неизбежностью приведет к разработке более эффективных способов лечения нарушений суточного ритма организма, вызванных резкой переменой часовых поясов, последствий, вызванных посменной работой, а также расстройств сна и

психических заболеваний, связанных с нарушениями суточного синхронизма.

Часть II. Открытие синхронизма

Глава 4. Благожелательная Вселенная

Наука о синхронизме прошла долгий путь с тех далеких от нас времен, когда Александр Македонский по прозвищу Александр Великий впервые привел письменное свидетельство существования биологического ритма^[101]. Примерно в IV столетии до н. э., во время своего похода в Индию, он заметил, что листья тамариндового дерева (индийский финик) всегда раскрываются днем и закрываются на ночь. Понадобилось еще два тысячелетия, прежде чем человечество открыло для себя еще более таинственный вид синхронизма – синхронизацию между неживыми объектами.

Некоторые из эпохальных открытий в истории науки были сделаны благодаря чистой случайности. Вспомните хотя бы об Александре Флеминге, который, как нам всем известно, открыл пенициллин, когда плесенный грибок, случайно занесенный воздушным потоком, нарушил чистоту эксперимента, проводившегося Флемингом, и погубил изучавшуюся им бактерию. Возьмем другой пример: Арно Пензиас и Роберт Уилсон, соскребая голубиный помет со своей гигантской радиомантенны на штаб-квартире компании Bell Laboratories, пытались избавиться от раздражающего фонового шипения, которое, как казалось, исходило из космоса, распространяясь во всех направлениях, пока не поняли, что слышат крик рождения Вселенной – эхо большого взрыва, который произошел 14 миллиардов лет тому назад.

Хотя роль интуитивной прозорливости, вообще говоря, хорошо известна всем нам, далеко не все понимают, как сильно интуитивная прозорливость отличается от удачного стечения обстоятельств^[102]. Интуитивная прозорливость – это не просто способность совершать замечательные открытия в результате удачного стечения обстоятельств, как это обычно объясняется в толковых словарях. Благодаря интуитивной прозорливости обычно совершают открытия люди с определенным образом мышления – предельно сосредоточенные и собранные, потому что находятся в постоянном поиске, что-то ищут. Просто случилось так, что они нашли не то, что намеревались найти, а что-то другое – может быть, даже более важное.

Именно так был открыт синхронизм неживых объектов. В феврале 1665 г. голландский физик Кристиан Гюйгенс оказался на несколько дней прикован к постели, страдая тем, что он впоследствии описал в письме к своему другу сэру Роберту Морэю как «легкое недомогание»^[103]. Он не успел своевременно ответить на полученную им корреспонденцию. В частности, он не успел ответить на три письма Роберта Морэя, и сейчас он сообщил ему новость о странном явлении, которое он наблюдал во время вынужденного заточения у себя в спальне – «необычное явление, которое удивит тебя».

В его спальне висели две пары маятниковых часов – два самых точных маятниковых механизма из существовавших в то время. Гюйгенс изобрел маятниковые часы^[104] десятилетием раньше, и сейчас с их помощью он рассчитывал решить величайшую технологическую проблему своей эпохи: задачу определения географической долготы на море. Как превосходно показано в широко известной книге Longitude («Долгота»)^[105] (ее автор – Dava Sobel), решение проблемы определения географической долготы имело огромное значение в эпоху Великих географических открытий. Бурно развивалось мореплавание – странам нужно было активизировать торговлю и иметь преимущество в войнах за территории. В отличие от географической широты, которая измеряет угловое расстояние от экватора и которая достаточно легко определяется на основании продолжительности дня или высоты солнца над горизонтом, географическая долгота, то есть угловое положение корабля в восточном или западном полушарии, определяется произвольно, без какой-либо эквивалентной величины в окружающем пространстве. Моряки не могли использовать для определения своей географической долготы звезды, солнце или какие-либо иные физические ориентиры, даже несмотря на наличие у них самых точных географических карт и компасов. Не имея возможности определить свое точное местонахождение в океане, даже самые опытные капитаны сбивались с пути и отклонялись на сотни миль от правильного курса или напарывались на прибрежные скалы. Те же, кто держался хорошо знакомых маршрутов, становились легкой добычей пиратов, карауливших их на оживленных морских путях. Правительства Португалии, Англии, Испании и Голландии обещали щедрые вознаграждения тем, кто предложит приемлемый способ решения данной проблемы. Несмотря на то что поисками решения занимались

многие выдающиеся умы того времени – Галилей, Джованни Доменико Кассини, Исаак Ньютон, Эдмонд Хэлл, – она оставалась нерешенной на протяжении более чем четырех столетий.

Теперь решением этой проблемы занимался Гюйгенс, выбрав направление, первоначально предложенное фламандским ученым-астрономом Геммой Фризиусом, который в 1530 г. пришел к выводу, что долготу можно определить, по крайней мере в принципе, путем точного хронометрирования. Допустим, на корабле есть часы, которые были правильно выставлены при отправлении корабля из исходного порта, и с этого момента идут очень точно. Поддерживая таким образом это «исходное время», штурман может определить географическую долготу, зафиксировав время на корабельных часах точно в момент наступления местного полдня, когда солнце находится в наивысшей точке над горизонтом. Поскольку Земля совершает полный оборот (на 360°) за 24 часа, каждый час расхождения между местным временем и «исходным временем» соответствует 15 градусам долготы. С точки зрения расстояния, эти 15 градусов соответствуют тысяче миль на экваторе. Таким образом, чтобы эта стратегия оказалась полезной с практической точки зрения, точность хода корабельных часов должна быть не хуже двух-трех секунд за сутки. Вопрос заключался лишь в том, чтобы сконструировать такие механические часы, на точность хода которых не оказывала бы влияния корабельная качка (не говоря уж о сильных штормах), а также значительные перепады влажности, давления и температуры, которые могут вызвать коррозию шестеренок в часах, привести к расширению пружин или загустеванию смазки, что, в свою очередь, может ускорить или замедлить ход часов (или вообще привести к их остановке).

Все часовые механизмы, которые изготавливались в XVI и XVII веках, страдали ужасающей неточностью. Лучшие из них отставали или спешили на пятнадцать минут за сутки – и это в идеальных условиях! Однако новый маятниковый часовой механизм Гюйгенса работал в сто раз точнее. Между тем решение задачи долготы находилось буквально на расстоянии вытянутой руки. В ходе морских испытаний, проводившихся в 1664 г. в сотрудничестве с Королевским обществом Лондона, два маятниковых часовых механизма, сконструированных Гюйгенсом специально для использования на кораблях, достигли островов Кабо-Верде (у западного побережья

Африки) и на протяжении всего этого пути способствовали успешному измерению долготы. Два часовых механизма использовались на случай возникновения непредвиденных обстоятельств, например, если какой-либо из них остановится или ему срочно понадобится чистка (тогда второй часовой механизм будет продолжать отсчитывать точное время). К сожалению, эти часовые механизмы оказались неустойчивы к внешним воздействиям: они хорошо работали при благоприятных погодных условиях, однако во время штормов были перебои.

Во время этих морских испытаний Гюйгенс оставался в Гааге и вел переписку с Королевским обществом Лондона через сэра Роберта Морэя, чтобы постоянно быть в курсе результатов испытаний и параллельно с этим информировать коллег о своих текущих попытках усовершенствовать конструкцию маятниковых часов. Примерно в это время, в один из дней конца февраля 1665 г., свое веское слово сказала интуитивная прозорливость Гюйгенса. Вот что писал Гюйгенс в письме своему отцу.

Будучи вынужден на протяжении нескольких дней оставаться у себя дома и наблюдая все это время за работой двух моих новых конструкций маятниковых часов, я заметил поразительный эффект, о котором мне еще не приходилось слышать. Этот эффект заключается в том, что маятники этих двух часовых механизмов, висящих на стене неподалеку друг от друга (на расстоянии одного или двух футов), шагают строго в ногу друг с другом. Понаблюдав какое-то время за столь удивительным явлением, я пришел в конце концов к выводу, что между этими двумя часовыми механизмами возникает что-то наподобие взаимной симпатии: принудительно рассинхронизировав качания этих маятников, я обнаружил, что примерно через полчаса они возобновляют синхронизм своих качаний и продолжают пребывать в этом состоянии синхронизма до тех пор, пока я предоставляю им такую возможность. Затем я решил разделить их, повесив один из них в одном конце комнаты, а другой – в другом, на расстоянии около пятнадцати футов, и заметил, что за сутки между ними возникла разница во времени, составляющая пять секунд. Следовательно, причиной прежнего согласия между ними должно, по моему мнению, быть неощутимое

для человека возбуждение воздуха, вызываемое колебательными движениями маятников. Эти часовые механизмы всегда заключены в деревянные корпуса, причем общий вес каждого из них не превышает 100 фунтов. Пребывая в состоянии согласованного, синхронного движения, эти маятники раскачиваются не параллельно друг другу, а навстречу друг другу^[106].

В письме к своему другу Р. Ф. де Служе от 24 февраля 1665 г. Гюйгенс описывал этот эффект «взаимной симпатии» как «загадочный»^[107]. А 27 февраля он отправил письмо сэру Роберту Морэю с просьбой сообщить об этих наблюдениях членам Королевского общества.

В течение следующей недели Гюйгенс провел серию экспериментов, чтобы выявить причины этой «взаимной симпатии». Он повесил оба часовых механизма на крюках, закрепленных на одном и том же деревянном стержне, и обнаружил, что когда они повернуты друг по отношению к другу на 90° или когда расстояние между ними превышает 6 футов, их «взаимная симпатия» исчезает. Но когда он помещал между часовыми механизмами большую доску, чтобы заблокировать прохождение воздуха между ними, «взаимная симпатия» сохранялась. Таким образом, его первая догадка оказалась неправильной: часы взаимодействовали друг с другом вовсе не при помощи воздуха.

Затем Гюйгенс предположил, что его часовые механизмы могут взаимодействовать посредством очень слабых вибраций. Чтобы исследовать эту возможность, он попытался подвесить часовые механизмы на не связанных между собой стержнях, которые он уложил на два хлипких, расшатанных кресла, поставленных спинка к спинке. Часы вновь проявили взаимную симпатию: их маятники расходились в противоположные стороны и сходились, расходились и сходились, подобно паре аплодирующих ладошек. Когда один часовой механизм произносил *тик*, другой отвечал *так*. Затем Гюйгенс нарушил их взаимную симпатию, чтобы увидеть, что из этого получится. Результат поверг его в изумление: кресла начали подрагивать. Когда маятники часов пребывали в состоянии взаимной симпатии, кресла были неподвижны, но теперь они подрагивали и постукивали по полу. Такое

их поведение продолжалось в течение получаса, до момента полного восстановления взаимной симпатии маятников, после чего кресла стали неподвижны.

У Гюйгенса появился свой ответ на столь необычное поведение кресел. Несмотря на то что каждый из его часовых механизмов был заключен в тяжелый корпус весом от 80 до 90 фунтов, качания маятника оказывали слабое воздействие на корпус, которые, в свою очередь, оказывал воздействие на стержни, которые, в свою очередь, оказывали воздействие на кресла^[108]. Но когда часовые механизмы переходили в состояние взаимной симпатии – то есть, когда их маятники колебались во взаимно противоположных направлениях, – равные и взаимно противоположные силы, которыми они воздействовали на стержни, взаимно компенсировали друг друга, в результате чего кресла оставались неподвижны. И наоборот, когда он нарушал состояние взаимной симпатии, эти противоположные силы уже не могли все время взаимно уравнивать друг друга и понемногу двигали стержни туда и сюда, из стороны в сторону, что вызывало подрагивание кресел. Вот что сказал об этом сам Гюйгенс: «При достижении синхронизма кресла перестают двигаться, что не позволяет часам выйти из состояния взаимной симпатии, поскольку, как только они попытаются сделать это, слабое движение кресел возвратит их в предыдущее состояние». Говоря более современным языком, Гюйгенс впервые в мире сформулировал концепцию отрицательной обратной связи.

Члены Королевского общества были обескуражены таким объяснением – и вовсе не потому, что сомневались в его правильности. Напротив, они опасались, что это объяснение правильно! В протоколе собрания Королевского общества от 8 марта 1665 г. говорится, что «некоторые из присутствовавших усомнились в точности хода этих часов во время морского плавания, если даже столь слабые, почти неощутимые воздействия могли повлиять на их ход». Иными словами, сама логика рассуждений Гюйгенса указывала на чрезвычайную чувствительность маятникового механизма. Однако именно высокая чувствительность такого механизма не позволяла использовать его для определения долготы на кораблях.

Свойство взаимной симпатии маятниковых механизмов, которое еще пару недель назад казалось Гюйгенсу столь восхитительным,

теперь выглядело как досадная помеха на пути к решению задачи определения географической долготы на кораблях. Впрочем, ему так и не удалось решить эту задачу. Лишь в середине XVIII века Джон Гаррисон, англичанин, не имевший формального образования, сконструировал ряд моделей морских часов, детали которых были изготовлены из разных металлов, не подверженных коррозии и подобранных таким образом, чтобы взаимно компенсировать расширение и сжатие друг друга, вызванное температурными колебаниями. Четвертая модель его хронометра – шедевр, который он назвал Н-4 – содержала детали, изготовленные из алмаза и рубина, что позволило снизить почти до нуля силу трения. Его вес составлял лишь три фунта, а диаметр – пять дюймов, то есть не больше, чем крупные карманные часы. В процессе морских испытаний, проводившихся в 60-е годы XVIII века, географическую долготу удавалось определить с точностью до 10 миль. Этого оказалось вполне достаточно, чтобы получить премию британского парламента в размере 20 тысяч фунтов стерлингов, что эквивалентно нескольким миллионам долларов в наше время.

По иронии судьбы, чем больше времени проходит с момента, когда удалось окончательно решить задачу вычисления географической долготы на кораблях, тем сильнее науку интересует феномен взаимной симпатии часов. Сколь бы бесспорным ни был научный гений Гюйгенса (Ньютон называл его «Суммусом Гюйгением»), даже он не смог оценить подлинное значение того, что Вселенная открыла ему в дни его вынужденного затворничества. Но сейчас, по прошествии более чем 300 лет с того времени, мы в состоянии оценить его открытие по достоинству. Гюйгенс открыл один из самых универсальных механизмов природы – синхронизм в неживой природе.

Нам кажется само собой разумеющимся, что мы можем петь и танцевать вместе с другими людьми, шагать в ногу с ними, в унисон хлопать в ладоши. Синхронизм – наша вторая природа. Но поскольку он дается нам очень легко, мы плохо представляем себе, какие требования синхронизм предъявляет к нам. По-видимому, он требует от нас хотя бы минимального уровня интеллекта, способности планировать свои действия во времени и прогнозировать действия других людей. Именно поэтому публикации о синхронном мерцании

тысяч светлячков столь долго вызывали скептицизм ученых и именно поэтому на нас производит столь сильное впечатление синхронное стрекотание сверчков или способы ухаживания самцов манящего краба, которые стараются привлечь самок, размахивая в унисон своими гигантскими клешнями.

Тем не менее эти чудеса синхронизма в живой природе всегда можно объяснить результатами эволюции, следствием миллионов лет естественного отбора. В этом свете должно быть совершенно понятно, почему открытие Гюйгенса, совершенное благодаря его интуитивной прозорливости, оказалось столь шокирующим.

Дело в том, что он обнаружил феномен синхронизма в *неживой* природе – у маятниковых часов.

Бездушные, безжизненные предметы могут самопроизвольно достигать синхронизма.

Взаимная симпатия маятниковых часов показала нам, что способность к синхронизму не зависит от наличия интеллекта, души или естественного отбора. Она возникает из самого глубинного источника всего сущего – из законов математики и физики.

Этот вывод породил глубочайшее почтение к синхронизму в технологии. Например, если бы не синхронизм, у нас не было бы лазерной хирургии глаза, проигрывателей компакт-дисков, сканеров, которыми пользуются кассиры в супермаркетах, и прочих устройств на основе лазеров, которые применяются в нашей повседневной жизни. Интенсивный, когерентный, тонкий, как иголка, лазерный луч является результатом синхронного испускания световых волн триллионами атомов. Сами по себе эти атомы ничем не отличаются от атомов в обычной лампочке накаливания – хитрость заключается лишь в способе их взаимодействия. Вместо света, создаваемого какофонией разных цветов и фаз, у лазерного света лишь один цвет и одна фаза – как у хора, поющего лишь одну ноту. Можно добиться, что этот свет будет очень сильным (хотя это вовсе необязательно); он сосредоточен в узком луче и может быть сфокусирован в виде крошечного светового пятна. Напротив, силу обычного света можно существенно увеличить лишь за счет приложения очень большой энергии (возможно, настолько большой, что приложение ее станет для нас непозволительной роскошью); обычный свет сильно рассеивается, а его интенсивность резко снижается с увеличением расстояния от источника света; к тому

же обычный свет трудно сфокусировать. Все эти преимущества лазерного света позволяют легко управлять им. Например, хирургические лазеры создают пятно сконцентрированной энергии, диаметр которого оказывается меньше толщины режущей кромки обычного хирургического скальпеля и может добираться до больных тканей в таких местах, куда обычным хирургическим скальпелем добраться невозможно^[109]. Кроме того, лазерная хирургия почти бескровна, поскольку свертывание крови происходит практически мгновенно: в процессе разрезания ткани лазерный луч прижигает ее.

В течение многих лет после изобретения лазера никто не знал, для каких целей можно использовать это изобретение. Кое-кто, посмеиваясь, описывал лазер как решение, для которого еще предстоит найти задачу. Тем не менее этот плод фундаментальных исследований, родившийся из чистого любопытства ученых, которым просто хотелось исследовать поведение световых волн в синхронизме, стал одним из самых универсальных устройств нашего времени, область применения которого никто не мог предвидеть. На торжественном вечере, устроенном в честь сорокалетия лазера, Артур Шавлов, лауреат Нобелевской премии по физике за 1981 г. (в частности, за совместную с Чарльзом Таунзом разработку лазера), вспоминал:

Мы полагали, что он может найти применение в научных исследованиях, а также в системах связи, однако мы не имели в виду какие-то конкретные его применения. Если бы имели в виду что-то конкретное, это могло бы лишь помешать нам... Некоторые из вас, возможно, уже слышали мое высказывание о том, что, хотя в газетах много пишут о так называемых «лучах смерти», в действительности никаких таких «лучей смерти», насколько мне известно, не существует. Но одним из первых практических применений лазеров было их использовании в хирургии сетчатки глаза для предотвращения слепоты, вызванной отслоением сетчатки. Ни Чарли, ни мне никогда не приходилось слышать о выполнении хирургических операций для предотвращения слепоты, вызванной отслоением сетчатки глаза, а если бы слышали, то, наверное, не стали бы заниматься такой ерундой, как индуцированное излучение из атомов^[110].

В этих словах – «индуцированное излучение из атомов» – заключен принцип действия лазера. Правда, – и мне стыдно признаться в этом – мне не менее десяти раз пытались объяснить принцип действия лазера, но эти объяснения так и не закрепились у меня в голове. Все эти рассуждения о возбужденных атомах и инверсиях населенностей энергетических уровней^[111] входят в одно мое ухо, задерживаются в голове на несколько секунд, рождая некое смутное и весьма приблизительное понимание, и благополучно выходят из другого уха. Я не теряю надежды подыскать какую-нибудь простую аналогию, которая будет иметь смысл для меня, – что-нибудь такое, что я могу нарисовать в своем воображении и закрепить в памяти, – но чувствую, что это будет дьявольски сложно. Если читатель понимает принцип действия лазера – или если ему, на самом деле, все равно, как работает лазер, – он может не читать следующий раздел.

Вообразите, что однажды утром вы проснулись на какой-то другой планете и вашему зору открывается безжизненная пустыня. Вокруг вас нет ничего, кроме арбуза, рядом с которым стоит табуретка. Вас, естественно, интересует, зачем здесь табуретка. В поисках ответа на этот вопрос вы берете в руки арбуз и кладете его на табуретку. После этого арбуз начинает проявлять беспокойство, ерзая и слегка подпрыгивая на табуретке. Почти сразу же он сваливается с табуретки и раскалывается на мелкие кусочки. Расколовшись, он сразу же выстреливает семечком, которое со скоростью пули вылетает в случайном направлении.

Описанная мною картина может служить некой аналогией того, как вырабатывается обычный свет. Допустим, вы включили свой тостер и его нагревательный элемент испускает яркий красный свет. Причина этого свечения заключается в том, что электрический ток, проходя через нагревательный элемент, накаляет его. Нагрев переводит атомы нагревательного элемента на более высокий энергетический уровень (анalogией такого перевода на более высокий энергетический уровень может служить поднятие вами арбуза на табуретку). Спустя короткое время каждый разогретый атом самопроизвольно соскакивает на свой самый нижний энергетический уровень – то есть переходит в свое «базовое состояние» – и отдает свою избыточную энергию, испуская фотон (световую частицу) в процессе, называемом спонтанным излучением; это подобно тому, как беспокойно ерзающий на табуретке

арбуз скатывается с нее, раскалывается на части и выстреливает семечком. Накаленный нагревательный элемент излучает красный свет, поскольку возбужденные атомы нагревательного элемента самопроизвольно испускают множество красных фотонов.

Продолжая исследовать планету, на которой вы проснулись, вы подходите к краю обширного поля, на котором разбросано огромное множество арбузов, причем рядом с каждым арбузом стоит табуретка. Вас начинает разбирать любопытство: а что, если семечко, вылетевшее со скоростью пути из расколовшегося арбуза, попадет в другой арбуз? Чтобы инициировать этот процесс, вы поднимаете один из арбузов и кладете его на табуретку, которая стоит рядом с ним. Вскоре этот арбуз падает, раскалывается и выстреливает семечком в произвольном направлении, однако, на ваше счастье, на пути его движения оказывается другой арбуз, лежащий на земле (хотя речь идет о неизвестной планете, будем называть ее поверхностью землей). Как только арбуз, оказавшийся на пути семечка, вберет в себя энергию удара, он вспрыгнет на свою табуретку и сразу же начнет ерзать на ней, после чего скатится с нее, расколется на части, выстрелит своим собственным семечком – разумеется, в произвольном направлении. Это будет поистине завораживающее зрелище: одно семечко будет инициировать выстреливание другого семечка, арбузы будут вспрыгивать на свои табуретки, а затем скатываться с них... Подняв первый арбуз, вы непреднамеренно запустили цепную реакцию – правда, очень слабую и невзрывоопасную: ее масштаб поддерживается на постоянном уровне, каждый раз выстреливает лишь одно семечко. Правда, нужно заметить: если какое-либо из выстреливших семечек не попадет ни в один из арбузов, наша цепная реакция полностью «заглохнет».

Этот каскадный процесс представляет немалый интерес, но он не является аналогией лазера. Он не обеспечивает усиления света, поскольку не увеличивает количество фотонов в воздухе. Мы упустили из виду лишь один – но очень важный – аспект этой «физики арбузов»: что произойдет, если семечко попадет в арбуз, который находится на табуретке, а не на земле? Чтобы ответить на этот вопрос, вы одновременно поднимаете много арбузов и кладете их на соответствующие табуретки (правда, для этого вам придется очень быстро перебегать от арбуза к арбузу, чтобы успеть уложить их на

табуретки еще до того, как хотя бы один из них свалится на землю). Потрудившись таким образом, вы быстро отбегаете в сторону и наблюдаете за результатами своих усилий. Со временем какой-то из арбузов обязательно упадет на землю, выстрелит семечком и попадет в какой-то другой из арбузов, уложенных вами на табуретки. (Вероятность такого попадания довольно высока, поскольку вы успели водрузить на табуретки изрядное количество арбузов.) После этого начинается самое интересное. Вместо того чтобы застрять в арбузе, семечко, нанесшее удар, пронизывает арбуз, не изменив направление своего полета; еще более удивительным оказывается то, что теперь это семечко продолжает свое движение в компании с другим семечком, которое является точной его копией. Иными словами, происходит клонирование семечка, которое нанесло удар по арбузу. То есть было одно семечко, летящее в определенном направлении, а теперь их стало два.

Именно в этом и заключается принцип действия лазера. Этот принцип действия называется индуцированным излучением, и вы видите, что он обеспечивает возможность увеличения количества фотонов, движущихся в определенном направлении. Каждый раз, когда фотон попадает в возбужденный атом, он удваивается, усиливая количество света, движущегося в данном направлении. Теперь читателям должно быть понятно, откуда взялось название *лазер* (laser): Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (усиление света посредством индуцированного излучения). Об индуцированном излучении (а не о самопроизвольном излучении) говорится потому, что входящий фотон заставляет возбужденный атом выстрелить еще одним фотоном.

Однако самое главное здесь заключается в том, что новый фотон неотличим от породившего его фотона. Если эти фотоны представлять себе не как частицы, а как крошечные световые волны, то они оказываются идеально синхронизированными. Все их пики и впадины оказываются строго выровненными по времени, а это означает, что они являются носителями света одного и того же цвета, который движется в одном и том же направлении и с одной и той же фазой.

Руководствуясь логикой здравого смысла, нам не понять возможность индуцированного излучения, как нельзя понять на основе

той же логики здравого смысла возможность появления нового фотона, представляющего собой точную копию «старого» фотона. Этот феномен является следствием «нелогичной логики» квантовой механики, физики атомного и субатомного мира, не подчиняющегося логике здравого смысла. Эйнштейн открыл теоретическую возможность индуцированного излучения еще в 1917 г., но прошло еще 43 года, прежде чем ученые поняли, как можно использовать индуцированное излучение для создания первого в мире действующего лазера^[112].

Вообще говоря, индуцированное излучение является условием необходимым, но не достаточным: лазер базируется еще на двух важнейших составляющих^[113]. Во-первых, мы должны придумать способ, как поддерживать большинство арбузов на их табуретках в течение достаточно продолжительного времени, поскольку именно они являются теми мишенями, которые могут привести к возникновению индуцированного излучения. Если арбуз покоится на земле, проку с него мало. А это означает, что мы должны приложить значительную энергию, поскольку арбузы скатываются на землю каждый раз, когда возникает индуцированное излучение. Процесс непрерывного подъема их на табуретки называется «накачкой» лазера, которая обеспечивает «инверсию населенностей (энергетических уровней)». В зависимости от типа используемого вами лазера вы возбуждаете атомы путем одновременного нагрева их, или воздействия на них с помощью импульсной лампы, или пропускания через них электрических разрядов. Такое инжектирование энергии инвертирует населенности – в том смысле, что оно переводит большую часть атомов на более высокий энергетический уровень, чем предпочтительное для них пребывание в базовом («наземном») состоянии.

Вторым необходимым условием работы лазера является способ усиления света и создания узкого пучка света, движущегося в строго определенном направлении. То и другое условие выполняются путем помещения атомов в эхо-камеру для света – то есть то, что физики называли бы резонатором. Труба органа представляет собой резонатор звука. Корпус гитары является резонатором звука для гитары: он усиливает даже самые слабые вибрации натянутых струн, превращая их в полноценные звуки. Лазерный резонатор выполняет такую же функцию по отношению к световым волнам. Возьмите длинную и

тонкую стеклянную трубку и наполните ее газом, содержащим подходящие виды атомов и молекул, или возьмите рубиновый стержень; вообще говоря, существует множество конструкций лазера. Затем разместите с обоих концов зеркала. Поверните выключатель, чтобы инициировать процесс накачки лазера (поднятия арбузов на табуретки). Самопроизвольное излучение запустит цепную реакцию. Вспомните, что эти первые фотоны испускаются в произвольных направлениях. Затем, когда они запустят последующий процесс индуцированного излучения, эти первоначальные фотоны клонируются, но поскольку они все еще движутся в своих первоначальных произвольных направлениях, многие из них ударяются о стенки трубки и поглощаются ими: они не вносят свой вклад в свет, излучаемый лазером. Иными словами, все такие направления аккуратно отфильтровываются. Остаются лишь фотоны, курсирующие туда и обратно между зеркалами. Впрочем, они не просто остаются – они размножаются. С каждым отражением от зеркал и прохождением через трубу они порождают все большее и большее число своих идеальных копий, усиливая свой свет и создавая великолепный пучок идеально синхронизированных фотонов. Чтобы часть этого света могла выходить наружу, одно из зеркал устанавливается так, чтобы оно отражало несколько меньше, чем 100 % света, попадающего на него. Крошечная доля синхронизированного света, выходящая за пределы лазера, – вот что мы видим как лазерный луч.

К самой большой загадке здесь – почему вновь создаваемые фотоны всегда пребывают в синхронизме с фотонами, породившими их, – мы еще вернемся в следующей главе, когда мы присмотримся пристальнее к феномену синхронизма в квантовом мире.

Еще одна разновидность синхронизма положена в основу единой энергосистемы ^[114] Соединенных Штатов – электроэнергетического монстра, который обеспечивает подачу переменного тока к розеткам в наших домах и офисах. Тысячи электрогенераторов на электростанциях по всей стране соединены между собой, образуя два гигантских синхронных электрогенератора – региональные энергосистемы, которые обслуживают все штаты, расположенные на восток и на запад от Скалистых гор. (Техас, конечно же, располагает своей собственной энергосистемой – на то он и Техас...) Каждая такая энергосистема

функционирует как единый огромный электрогенератор, причем все составляющие его генераторы вращаются в унисон.

Мне уже давно приходилось слышать о такой энергосистеме, но никогда раньше я не задумывался над тем, что же все это означает в действительности. Возможно, и вы, подобно мне, никогда не задумывались над тем, откуда берется электричество в ваших розетках, а если и задумывались, то, скорее всего, полагали, что оно вырабатывается вашей местной электростанцией, как и во всех остальных уголках Соединенных Штатов. Однако в действительности ситуация такова, что, когда Средний Запад накрывает жара, воздушный кондиционер где-нибудь в Висконсине может приводиться в действие электричеством, выработанным мгновением раньше на какой-то из электростанций в Южной Каролине. В отсутствие синхронизма такое перераспределение электроэнергии, совершенно незаметное для ее потребителей, было бы невозможно.

В общих чертах эта система работает так. Каждая электростанция использует ту или иную форму природной энергии для приведения в движение турбины, которая вращает генератор, вырабатывающий электричество. Например, электростанция может сжигать уголь, мазут или природный газ или использовать ядерную энергию для выработки тепла, достаточного для нагревания воды до кипения и превращения ее в пар, который затем подается на лопатки турбины и вращает ее. Для выработки электроэнергии может также использоваться энергия падающей воды (как на Ниагарском водопаде), которая вращает гидротурбину. После того электричество сгенерировано, оно преобразуется в электрический ток очень высокого напряжения (до 765 тысяч вольт), передаваемый по единой электросети страны. Это дает возможность электростанциям передавать электроэнергию с одного конца страны на другой, компенсируя таким образом нехватку электроэнергии в тех или иных местах или используя к своей выгоде ценовые дифференциалы. На конце электропередающей линии напряжение понижается до 120 вольт, которые мы снимаем с розеток у себя дома или в офисе.

История единой энергосистемы восходит к 1882 г., когда состоялось открытие электростанции Томаса Эдисона Pearl Street Station на Манхэттене, поставлявшей электроэнергию 59 потребителям. Эта новая технология стала настоящей сенсацией, и к концу 80-х годов

XIX столетия было электрифицировано несколько других городов. Молодая компания Эдисона General Electric поставляла своим потребителям так называемый постоянный ток (такого рода ток обеспечивают электрические батареи и аккумуляторы), который движется строго в одном направлении: от высокого потенциала к низкому потенциалу, подобно воде, стекающей сверху вниз.

Проблема с постоянным током, однако, заключалась в том, что его можно было передавать лишь на очень небольшие расстояния. При попытке передать постоянный ток на большие расстояния недопустимо большая часть энергии терялась на нагрев (неизбежное следствие сопротивления проводов). Единственным способом решения этой проблемы была передача электричества при очень высоком напряжении и очень малом токе (поскольку безвозвратные потери электроэнергии возрастают пропорционально квадрату величины тока, идеальным решением данной проблемы является максимально возможное снижение величины тока). Однако для питания маленьких лампочек и примитивных устройств потребителям нужно было именно *низкое* напряжение, а не высокое. Эту проблему можно было бы решить с помощью трансформатора постоянного тока, то есть устройства, позволяющего преобразовать высокое напряжение постоянного тока в низкое. В то время никто, даже Эдисон, не мог предложить конструкцию такого трансформатора постоянного тока.

Между тем в 90-е годы XIX столетия компания Westinghouse Company экспериментировала с новым видом электричества, идея которого была предложена Николой Тесла, – с переменным током, который попеременно менял направление своего движения, синхронно с вращением электрогенератора, вырабатывающего этот ток. В результате острых дискуссий, касавшихся сравнительных достоинств постоянного и переменного тока, победителем оказался переменный ток, поскольку его оказалось гораздо легче преобразовывать из высокого напряжения в низкое и наоборот. К тому же конструкция генераторов переменного тока также оказалась намного проще, поскольку вращающиеся магниты автоматически создают переменный ток, тогда как для преобразования его в постоянный ток требуется дополнительный шаг.

Главным вопросом касательно переменного тока был выбор самой подходящей частоты. Иными словами, сколько раз в секунду ток

должен изменять свое направление? В 1900 г., когда принималось это решение, многие из местных электростанций работали независимо друг от друга и использовали разные частоты. Некоторые упрямо цеплялись за постоянный ток, тогда как другие генерировали переменный ток с частотами 25, 50, 60, 125 или 133 циклов в секунду. Например, гидроэлектростанции на Ниагарском водопаде, а также другие гидроэлектростанции предпочитали частоту 25 циклов в секунду, поскольку турбины их электрогенераторов могли работать эффективнее именно на такой частоте. Эта частота обладала интересным недостатком, который носил не столько технологический, сколько психологический характер: она вызывала у лампочек накаливания мерцания, заметные и раздражающие для большинства людей. (В наши дни стандартной частотой переменного тока в Северной Америке является частота, равная 60 циклам в секунду, тогда как в других странах стандартная частота переменного тока равняется 50 циклам в секунду.)

Со временем, с ростом спроса на электроэнергию, местные электростанции расширяли территории, которые они охватывали своими услугами, и даже «вторгались» на территории друг друга. Примерно в это время началось становление единой энергосистемы. Такая консолидация обеспечивала несколько преимуществ. Сетевая система отличалась более высокой надежностью, поскольку, если на одной электростанции происходила авария или возникал дефицит вырабатываемой электроэнергии, другая могла его восполнить. Существовала и определенная финансовая выгода: электростанции в разных регионах могли продавать и покупать электроэнергию друг у друга, пользуясь разницей в себестоимости вырабатываемой ими электроэнергии. Подчас электростанции было выгоднее купить электроэнергию в сети, чем выработать ее самостоятельно.

Техническая трудность объединения в такую сеть заключалась в том, что нужно было строго синхронизировать скорость вращения всех электрогенераторов, даже если они отстояли друг от друга на сотни миль. В этом случае синхронизм играл решающую роль. В противном случае электроэнергия могла хаотически перетекать по сети туда и обратно, вызывая громадные скачки тока в линиях электропередачи. В наихудшем случае генератор мог принять на себя столь большую мощность, что это привело бы к взрыву или, по крайней мере, к

серьезному повреждению. (В наши дни специальное защитное оборудование отключает любой генератор, который выбивается из синхронизма.) Частично решением этой проблемы стало использование законов физики. Электроинженеры обнаружили, что генераторы, соединенные параллельно друг другу, со временем взаимно синхронизируют скорость своего вращения. Другими словами, сеть, состоящая из параллельно соединенных между собой генераторов, проявляет тенденцию к самосинхронизации: превосходный пример самопроизвольной синхронизации, вполне в духе взаимной симпатии маятниковых часов Гюйгенса.

Этот эффект легче всего понять в случае двух генераторов, параллельно соединенных между собой. Если вдруг окажется, что они вращаются с разной скоростью, генератор, вращающийся с меньшей скоростью, автоматически примет на себя электроэнергию с более быстрого генератора, в результате чего медленный генератор начнет вращаться быстрее, а быстрый генератор замедлится, что приведет к устранению разницы их скоростей. Если пользоваться строго научными терминами, то любое возмущение, которое заставляет один генератор «оторваться» от другого генератора, уравнивается корректирующими электрическими токами, которые тотчас же начинают циркулировать в цепи; это, в свою очередь, приводит к появлению вращающих моментов, которые приводят к взаимному выравниванию скоростей генераторов. Таким образом, пара генераторов проявляет тенденцию к самопроизвольной взаимной синхронизации.

Недостатком взаимосвязанности генераторов является возможность распространения сбоев по сети. Такие «эффекты домино» могут быть достаточно сложными, непредсказуемыми и драматичными. В вечерний час пикового потребления электроэнергии 9 ноября 1965 г. высоковольтные линии электропередачи от гидроэлектростанций на Ниагарском водопаде до Нью-Йорка работали с максимальной нагрузкой, когда произошел резкий скачок электроэнергии^[115]. Незадолго до 17:15 случилось ложное срабатывание защитного устройства, которое заблокировало 300 тысяч киловатт электроэнергии, предназначенных для передачи в Нью-Йорк, и направило эту электроэнергию в какое-то другое место сети, запустив таким образом цепную реакцию, в ходе которой один за другим срабатывали

автоматические выключатели. В результате единая энергосистема северо-востока страны разделилась на ряд автономных электрических «островков». Торонто погрузился во тьму в 17:15, Рочестер – в 17:18, Бостон – в 17:21. В конечном счете на протяжении примерно 13 часов без электричества оставались 30 миллионов человек, проживающих в штатах Нью-Гэмпшир, Вермонт, Массачусетс, Коннектикут, Род-Айленд, Нью-Йорк, в городе Нью-Йорк, а также в некоторых частях штата Пенсильвания.

Нетрудно понять, что каскадные сбои, подобные описанному выше, время от времени должны происходить. Энергосистема является чрезвычайно сложной и динамичной системой. Ей приходится решать задачи невероятной сложности: предоставлять электричество в соответствии с динамично изменяющимися потребностями, предоставлять его мгновенно – с требуемыми уровнями напряжения и строго определенной частотой. В отличие от других продуктов, электричество невозможно хранить «про запас». Его нужно вырабатывать и предоставлять потребителю тотчас же, по первому требованию; выработка электроэнергии является именно той отраслью, где продукцию нужно поставлять «точно в срок» – и никак иначе. Задача поставки электроэнергии потребителям чрезвычайно усложняется тем обстоятельством, что спрос на продукцию энергосистемы зависит от неконтролируемых факторов, например наступления жары или причуд человеческой психологии. После того как был зачитан вердикт по делу О. Джей Симпсона, в энергосистеме произошло резкое падение потребления электроэнергии, которое, скорее всего, было вызвано тем, что миллионы людей, выслушав приговор суда, практически одновременно выключили телевизоры. Теперь, после принятия правительством решения о дерегулировании электроэнергетики и потенциально дестабилизирующего влияния экономики свободного рынка на функционирование единой энергосистемы, инженеры и ученые столкнутся с еще большими проблемами, связанными с необходимостью гарантировать, что эта крупнейшая в мире система продолжит функционировать так же надежно, как функционирует уже многие десятки лет.

В других технологических системах синхронизм используется для поддержания надлежащего порядка вещей. Точное соглашение о

времени суток в двух или нескольких удаленных на значительные расстояния друг от друга пунктах является жизненно важным для выполнения банками электронных переводов денег, для синхронизации телевизионных передач и для пересылок информации, начиная с электронной почты и заканчивая трансляцией песен на радио. (Когда вы настраиваетесь на какую-либо радиостанцию, вам нужно установить регулятор настройки на определенную частоту, что дает возможность вашему радиоприемнику синхронизироваться с соответствующей радиопередачей. В противном случае вы не смогли бы настроиться на радиоволну, транслирующую музыку, и не услышали бы ничего, кроме разрядов статического электричества.) Тот же принцип используется в мобильных телефонах и в спутниковой связи, а также во всех других формах беспроводной связи.

Все электрические компоненты в компьютерной микросхеме тактируются, чтобы они могли работать синхронно^[116]. Тактовый генератор, задающий ритм работы компьютерной микросхемы, работает на частоте, равной нескольким миллиардам колебаний в секунду, включая и выключая определенным образом миллионы цифровых схем, входящих в состав этой микросхемы, что позволяет всем этим цифровым схемам эффективно взаимодействовать между собой. Такая централизованная система, все компоненты которой работают под управлением тактового генератора (играющего роль «центральных часов»), обладает рядом существенных недостатков: 15 % всех цифровых схем, входящих в состав микросхемы, занимаются исключительно распределением тактового сигнала, а сам тактовый генератор потребляет примерно 20 % мощности, потребляемой микросхемой в целом. Однако инженеры отдают предпочтение именно такому конструктивному решению из-за его концептуальной простоты, а также потому, что альтернативное решение – «демократия» многих локальных «часов» (тактовых генераторов), как в случае сообществ светлячков и клеток-задатчиков циркадного ритма – до сих пор не понято в достаточной степени, что не позволяет легко имитировать его на практике.

Самые технически совершенные применения синхронизма являются прямыми наследниками маятниковых часов Гюйгенса и упоминавшейся нами проблемы определения географической долготы. В наши дни самыми точными часами в мире являются атомные

часы^[117]. Подобно всем предшествующим конструкциям часов, принцип их действия основан на подсчете колебаний какого-либо периодического события. Но вместо того чтобы подсчитывать колебания маятника, как в случае маятниковых часов Гюйгенса, атомные часы подсчитывают переходы атома цезия с одного своего энергетического уровня на другой (у этого атома есть два энергетических уровня). Универсальный стандарт времени NIST-F1, поддерживаемый Национальным институтом стандартов и технологий (National Institute of Standards and Technology) в Баулдере, Колорадо, представляет собой цезиевые суперчасы, ошибка которых не превышает одной секунды за 20 миллионов лет. В настоящее время разрабатываются новые оптические часы, точность которых будет примерно в тысячу раз выше, чем у цезиевых суперчасов, а погрешность составит меньше одной секунды за время, которое прошло с момента возникновения Вселенной.

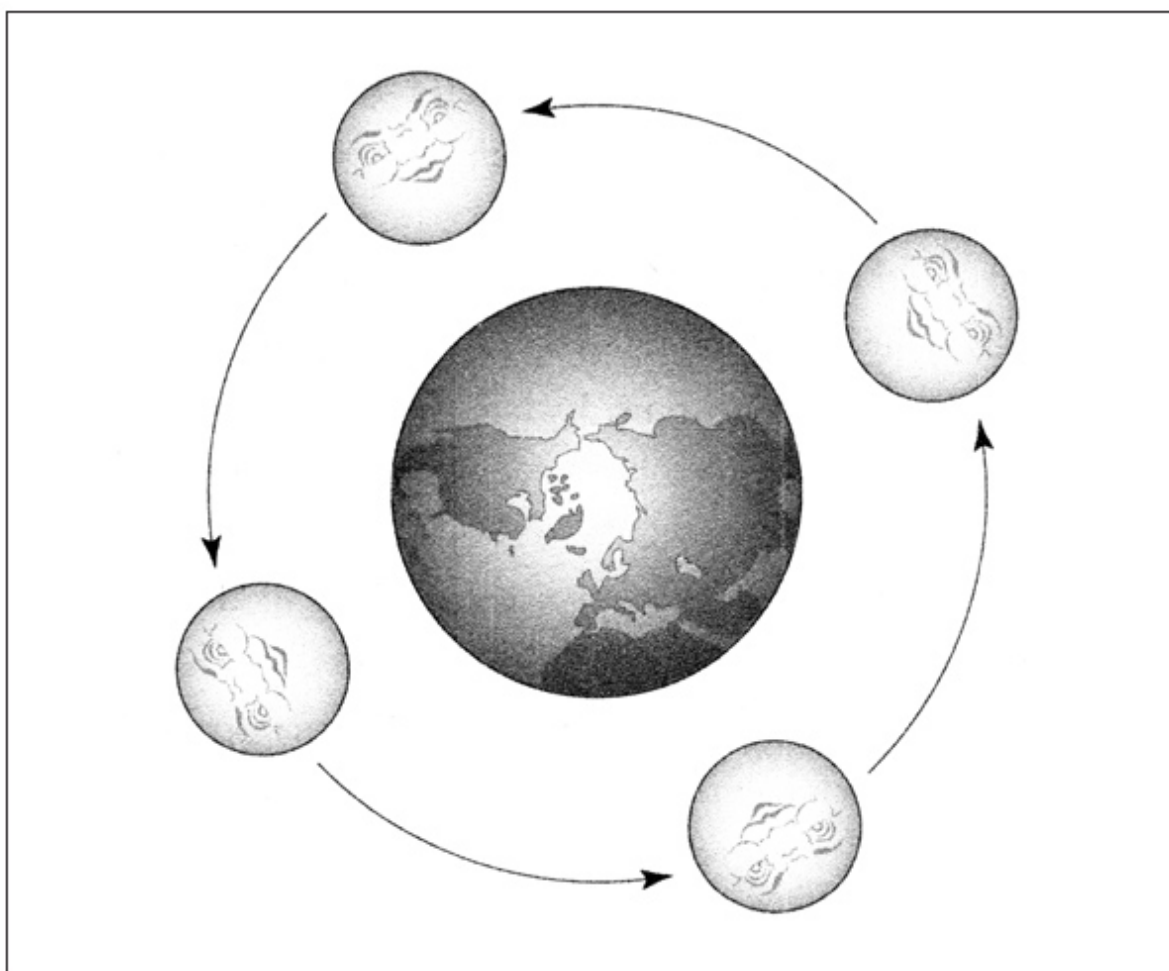
Одержимость желанием создать как можно более точный стандарт времени представляет собой нечто большее, чем свидетельство щепетильности ученых. Точно так же, как наличие надежных часов было ключом к решению проблемы определения географической долготы, атомные часы позволили определять любое местоположение на Земле с точностью до нескольких метров. Соответствующая технология известна как глобальная система навигации и позиционирования (Global Positioning System – GPS). Впервые информация о глобальной системе навигации и позиционирования (определения местоположения), разработанной американскими военными для повышения точности запуска баллистических ракет с подводных лодок, была опубликована в открытой печати в 1991 г.^[118], когда она обеспечила очень точное наведение крылатых ракет во время войны в Ираке (ракеты залетали буквально в окна зданий, предназначенных для уничтожения) и позволяла войскам коалиции ориентироваться в иракской пустыне ночью. Мирные применения GPS могут быть самыми разными, начиная с оказания помощи водителям, потерявшимся в автомобилях, взятых ими напрокат, и заканчивая усовершенствованными системами оказания экстренной помощи («служба 911»), которые автоматически определяют кратчайшие маршруты для автомобилей «скорой помощи» и пожарных расчетов. В настоящее время проводятся испытания еще более совершенных версий

GPS, обеспечивающих «слепую» посадку самолетов в условиях сильного тумана (в этих случаях самолет нужно позиционировать с точностью до 10 сантиметров как по горизонтали, так и по вертикали). Однако GPS – это не просто навигационная система: она обеспечивает временную синхронизацию с точностью, превышающей миллионную долю секунды, что необходимо для координирования банковских переводов и других финансовых транзакций.

Глобальная система навигации и позиционирования состоит из 24 спутников, вращающихся по орбитам на расстоянии примерно 11 тысяч миль от Земли. Они распределены по своим орбитам таким образом, чтобы в любой данный момент времени любое место на нашей планете было одновременно видно по меньшей мере шести спутниками системы GPS. На борту каждого такого спутника имеются по четыре экземпляра атомных часов, причем все они синхронизированы друг по отношению к другу (с помощью главных суперчасов в Баулдере) с точностью, не ниже миллиардной доли секунды. Любой GPS-приемник, подобный тем, которые устанавливаются в дорогах автомобилях или мобильных устройствах, принимает сигналы не менее чем с четырех таких спутников и использует эти четыре числа для вычисления своего местоположения в трехмерном пространстве, а также для определения текущего времени. Это вычисление основано на использовании принципа триангуляции: спутники непрерывно передают радиосигналы, каждый из которых снабжен меткой времени (с точностью до наносекунды – вот для чего нужны бортовые атомные часы спутников); затем приемник сравнивает время приема и время передачи сигнала и умножает разницу на скорость света, чтобы вычислить расстояние до спутника. Одновременно выполняя *то же самое* вычисление не менее чем с четырьмя спутниками (позиции которых известны очень точно), приемник может определить свое местоположение с точностью до нескольких метров; для такого вычисления ему нужно не более десятой доли секунды.

Синхронизм в неживой природе не ограничивается лишь пределами ближнего космоса, который бороздят искусственные спутники Земли, входящие в систему GPS. Многие из нас даже не подозревают о существовании синхронизма в космическом масштабе. Возможно, это объясняется непостижимыми расстояниями и временами, которыми нам приходится оперировать применительно к

космосу. Но после того как астрономы недавно открыли две малые планеты, вращающиеся вокруг звезды Gliese 876 (на расстоянии около 15 световых лет от Земли), одним из первых фактов, на которые они обратили внимание, было то, что эти планеты пребывают в состоянии так называемого орбитального резонанса^[119] – грациозного танца, при выполнении которого одна из этих планет совершает вокруг своей звезды два полных оборота за то время, пока другая планета совершает вокруг этой звезды один полный оборот. Кое-что еще более впечатляющее происходит с нашей «родной» Луной: она вращается вокруг собственной оси точно с такой же скоростью, с какой она вращается вокруг Земли (именно поэтому мы всегда видим одну и ту же сторону Луны – ту, на которой можно увидеть, если у вас хорошо развито воображение, нечто, похожее на мужское лицо, тогда как темная сторона Луны всегда находится на затылке этой «головы»).

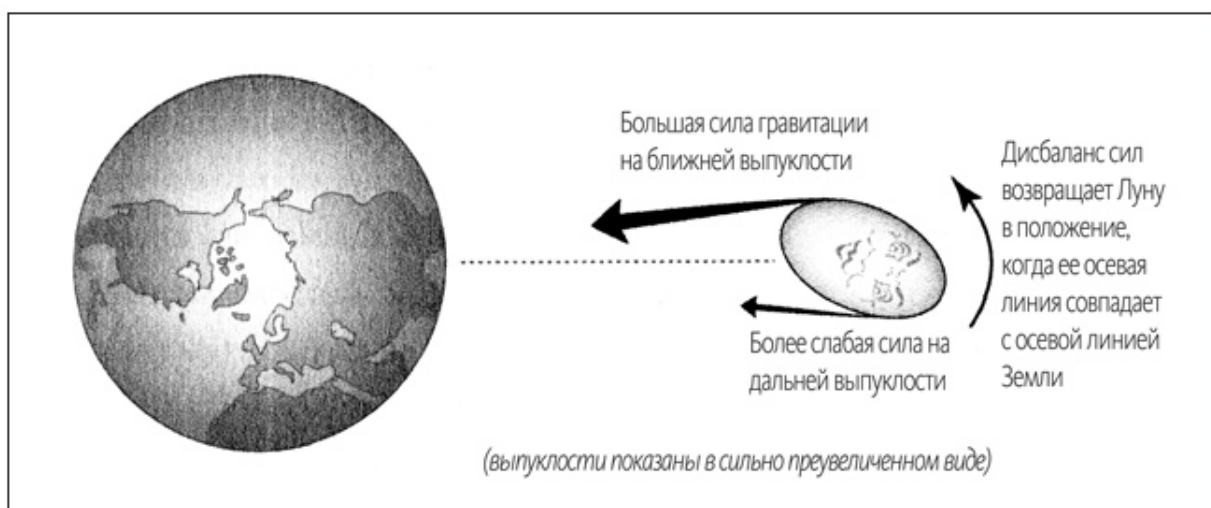


Синхронизацию между орбитой Луны и ее вращением вокруг собственной оси можно объяснить на интуитивном уровне. Чтобы упростить наши рассуждения, допустим, что Луна вращается вокруг Земли по круговой орбите. Диаметр этой окружности определяется балансом двух сил: силы притяжения со стороны Земли и центробежной силы, вызванной движением Луны (эта центробежная сила пытается оторвать Луну от Земли). (Центробежная сила – это сила, которая прижимает вас к двери вашего автомобиля, когда вы делаете резкий поворот.) Эти две силы – сила притяжения и центробежная сила – идеально уравнивают друг друга в центре Луны. Но следует иметь в виду, что Луна представляет собой огромный шар, а не точку. В точках, отличных от центра, указанные силы не вполне уравнивают друг друга. На ближней к нам стороне Луны сила притяжения оказывается сильнее, тогда как на дальней стороне Луны оказывается сильнее центробежная сила. Этот дисбаланс создает на Луне две небольшие выпуклости, одна из которых находится на ближней к нам стороне, а другая – на дальней стороне. То же самое происходит на Земле благодаря притяжению со стороны Луны (именно это является причиной океанских приливов и отливов). На Луне, где отсутствует вода, этот «приливной эффект» менее заметен, но все же важен, поскольку он деформирует Луну, превращая ее из строго сферической в слегка сигарообразную. Из-за гравитационного поля Земли эта «сигара» всегда стремится указывать строго в направлении центра Земли. Чтобы такое позиционирование сохранялось даже в процессе вращения Луны вокруг Земли, Луна должна совершать полный оборот вокруг собственной оси в точности за то самое время, которое требуется ей для совершения полного оборота вокруг Земли. Именно такое условие соблюдается на практике; это условие известно как резонанс 1:1 вращения вокруг собственной оси и вращения по орбите (так называемое приливное захватывание).

Если бы Луна по тем или иным причинам нарушила это состояние резонанса, то приливная сила обязательно вернула бы ее в состояние резонанса. Чтобы понять, почему это обязательно должно было бы произойти, допустим, что «сигара» не указывает в направлении центра Земли.

Возникшая ситуация несколько напоминала бы стрелку компаса, которая не указывает на север – силовое поле (магнитное для стрелки

компаса и гравитационное для Луны) создает корректирующий вращающий момент, который стремится вернуть «сигару» в ее равновесное положение. Точнее говоря, сила притяжения Земли поворачивает ближнюю выпуклость Луны в одном направлении, а дальнюю ее выпуклость – в противоположном направлении, однако ближняя выпуклость поворачивается сильнее из-за того, что она ближе. В результате «сигара» возвращается в свое равновесное положение, что приводит к восстановлению упоминавшегося выше резонанса 1:1 вращения вокруг собственной оси и вращения по орбите.



Вместо аналогии со стрелкой компаса можно было бы воспользоваться аналогией, с детства знакомой многим из нас. Я имею в виду детскую игрушку «ванька-встанька»: если вы попытаетесь поставить такую игрушку с ног на голову, она обязательно, автоматически, вернется в свое исходное положение, поскольку центр ее тяжести искусственно смещен вниз. Образно говоря, у Луны центр тяжести тоже смещен вниз – в том смысле, что ее ближняя к нам выпуклость больше «нагружена» силой земного притяжения, что обеспечивает корректирующий вращающий момент, необходимый для возвращения Луны в состояние синхронизма.

Еще одна форма астрономического синхронизма может быть ответственна за вымирание динозавров на Земле^[120] – событие, которое навсегда изменило ход жизни на нашей планете, предоставив возможность малым млекопитающим выжить, эволюционировать и в

конечном счете превратиться в человека. Согласно господствующей ныне теории, предложенной Луисом и Уолтером Альваресами (отец и сын), а также их коллегами, динозавры и многие другие формы жизни внезапно исчезли с лица Земли, когда какой-то гигантский объект – возможно, астероид или комета – врезался в Землю примерно 65 миллионов лет тому назад. Воздействовав на Землю с разрушительной силой, эквивалентной примерно 100 миллионам водородных бомб, он вызвал катастрофу планетарного масштаба в форме пожаров, высоких температур, ядовитых кислотных дождей и непроницаемых облаков пыли и дыма, которые на многие месяцы полностью затмили солнечный свет.

Чтобы понять, как такой катаклизм может быть связан с синхронизмом, нам нужно сначала уяснить, почему время от времени на нас падают камни с неба. Ученые полагают, что эти метеоры представляет собой последствия неудавшейся попытки формирования некой планеты в первые дни существования нашей Солнечной системы. В то очень далекое от нас время частицы пыли вращались вокруг новорожденного Солнца и постепенно соединялись между собой, превращаясь в глыбы, которые, в свою очередь, соединялись между собой во все большие и большие фрагменты, постепенно образуя планеты, которые мы видим сегодня.

Одной из самых замечательных особенностей возникшей в то время солнечной системы является пустота, которая отделяет ближние планеты Солнечной системы (Меркурий, Венера, Земля и Марс) от более удаленной гигантской планеты – Юпитера. Большинство из нас имеют весьма приблизительное представление о величине расстояний, которые разделяют эти планеты. Эти расстояния кажутся просто непостижимыми. Но мы начинаем получать более отчетливое представление о них здесь, в Итаке, благодаря модели Солнечной системы, выполненной в масштабе. Эта модель называется Sagan Walk («Путь Сагана»); она была создана в честь ныне покойного Карла Сагана, выдающегося астрофизика, большая часть научного пути которого прошла в Корнельском университете, находящемся в Итаке. Начав осмотр этой модели с Солнца, расположенного на центральной площади города, вы практически сразу же наталкиваетесь на четыре ближние планеты Солнечной системы, размеры каждой из которых не превышают обычной горошины; каждая из них помещена в свою

собственную коробку, выполненную из прозрачного оргстекла. Чтобы перейти от одной из этих планет к другой, вам нужно сделать буквально пару шагов, и вы сразу же понимаете, что путешествие от Меркурия до Марса будет очень коротким. Все ближние планеты находятся прямо здесь, на той же площади. Но чтобы добраться до следующей планеты, вам придется покинуть центральную площадь города и пройти по улице, ведущей в сторону ресторана Moose-wood Restaurant, где вас ожидает Юпитер; путь к нему займет у вас несколько минут. Почему же столь велико расстояние между ближними планетами и Юпитером, заполненное вакуумом?

На самом деле это не совсем вакуум. Между Марсом и Юпитером находится пояс, состоящий из миллионов глыб, вращающихся вокруг Солнца; все это множество глыб называется поясом астероидов^[121]. Некоторые из этих глыб цельные, тогда как другие представляют собой груды не скрепленных между собой камней разных размеров, начиная с песчинок и заканчивая огромными валунами шириной в милю. В отличие от привычных сплошных камней, цельность которых обеспечивается химическими связями, единственное, что удерживает между собой такие несвязанные скопления, – сила их взаимного притяжения.

Такой пояс астероидов является для нас загадкой по нескольким причинам. Во-первых, он представляется более «рыхлым», чем должен бы быть. Совокупная масса этого пояса сейчас составляет примерно одну двадцатую часть массы Луны, хотя в какое-то время он должен был содержать массу, достаточную для образования нескольких планет, таких как наша Земля. Однако сейчас масса астероидного пояса чрезвычайно далека от такой величины. Куда же она девалась?

Существует еще одна загадка, связанная с этой. На протяжении более чем ста лет астрономам известно о загадочных «пустотах» в этом поясе, круговых выемках, в которых отсутствуют астероиды (эти выемки представляют собой нечто наподобие промежутков между записями на виниловой грампластинке)^[122]. Они были обнаружены в 1857 г. Дэниелом Керквудом, бывшим школьным учителем, который освоил алгебру, штудировав учебник по алгебре вместе с одним из своих учеников, и который впоследствии стал профессором математики в университете штата Индиана. Анализируя данные, собранные астрономами, Керквуд обратил внимание на неравномерность

расположения этих промежутков; к тому же их местоположения не следовали каким-либо правилам, которым должны были следовать.

Важная подсказка, которая помогла найти ответ на этот вопрос, появилась в 1866 г., когда Керквуд переформулировал его как вопрос о времени, а не о расстоянии. Сколько времени, спросил себя Керквуд, понадобилось бы гипотетическому астероиду, находящемуся в одном из таких промежутков, чтобы совершить один полный оборот вокруг Солнца? Воспользовавшись третьим законом Кеплера (описывающим математическую связь между расстоянием от какого-либо небесного тела до Солнца и временем, которое требуется этому небесному телу, чтобы совершить один полный оборот вокруг Солнца), он смог вычислить орбитальные периоды для каждого такого промежутка. Например, чтобы совершить один полный оборот вокруг Солнца астероиду, находящемуся в самом большом промежутке, понадобилось бы примерно 4 года – интересное число, поскольку оно в точности равняется одной трети орбитального периода Юпитера, составляющего около 12 лет. Аналогично, астероид, находящийся в одном из других промежутков, совершил бы пять полных оборотов вокруг Солнца за то время, которое требуется Юпитеру для совершения двух полных оборотов вокруг Солнца. Вообще говоря, все промежутки подчинялись одному и тому же замечательному правилу: их орбитальные периоды всегда были связаны с орбитальным периодом Юпитера посредством некоторого соотношения небольших целых чисел, например 3:1, 5:2, 7:3 или 2:1.

Такая нумерология вовсе не была случайной. Эти промежутки, которые получили название промежутков Керквуда, представляют собой верный знак астрономического синхронизма. Они указывают на то, что все дело здесь в силе притяжения Юпитера: она «резонирует» с любым астероидом, который попал в промежутки, систематически воздействуя на него и в конечном счете выбрасывая его из пояса.

Этот резонансный механизм^[123] работает следующим образом. Рассмотрим астероид с периодом, составляющим приблизительно 4 года; этот астероид вращается вокруг Солнца в 3 раза быстрее, чем Юпитер, что соответствует промежутку Керквуда 3:1. Когда Юпитер совершает свой величественный обход вокруг Солнца по практически круговой орбите, астероид начинает свое путешествие на плечах Юпитера, а затем устремляется к Солнцу по удлинённой,

эллиптической орбите. Огромная сила притяжения Солнца играет астероидом, как мячиком, и швыряет его обратно, в сторону Юпитера, так быстро, что он успевает совершить три полных оборота вокруг Солнца за то время, пока Юпитер совершит один оборот. В конце своего третьего круга астероид оказывается именно в том самом месте, с которого началось его путешествие – на плечах Юпитера. Иными словами, эта точка наибольшего сближения всегда оказывается в одном и том же месте орбит астероида и Юпитера.

Эти тесные сближения оказывают сильное возмущающее воздействие на астероид, что обусловлено громадными размерами Юпитера и его огромной силой притяжения – особенно в момент их максимального сближения. Кроме того, одни и те же возмущающие воздействия все время аккумулируются, поскольку такие взаимодействия между астероидом и Юпитером всегда происходят в одной и той же точке орбиты. После того как совершится несколько сотен таких циклов, эти периодические напряжения накапливаются до такой степени, что искажают траекторию астероида, делая ее хаотической, что существенно повышает вероятность выхода астероида за пределы пояса. (Если бы астероид не находился в резонансе 3:1, он сближался бы с Юпитером в произвольных точках своей орбиты, в результате чего на достаточно продолжительном отрезке времени все перечисленные эффекты взаимно компенсировались бы.)

Компьютерное моделирование показывает, что астероиды, отрывающиеся от пояса, чаще всего падают на Солнце или покидают пределы Солнечной системы. Иногда, однако, они сталкиваются с одной из ближних планет. Если такой ближней планетой оказывается Земля и если размеры астероида оказываются сопоставимы с размерами горы Эверест (а именно такими, по-видимому, были размеры астероида, уничтожившего динозавров на нашей планете, если принять во внимание величину кратера, обнаруженного южнее полуострова Юкатан и образовавшегося в результате падения этого астероида), то нетрудно понять, насколько важен для нас этот астрономический синхронизм.

Однако эта аргументация не может служить исчерпывающим ответом на первую загадку. Промежутки Керквуда чересчур узкие, чтобы их существование могло объяснить всю массу, которая покидает пояс. Это делает крайне маловероятным предположение о том, что ее

источником может быть лишь Юпитер. Астрономы Джон Чемберс и Джордж Уэзерилл недавно предложили альтернативное решение. Они предположили, что на заре развития Солнечной системы несколько «планетарных эмбрионов» – некоторые из них величиной с Марс – сформировались из глыб, обитающих в поясе астероидов (точно так же, как это происходило в других местах при формировании планет, которые мы видим сегодня). Эти протопланеты воздействовали на другие глыбы, обитающие в поясе астероидов, подталкивая их в резонансные «аварийные люки», что приводило к более быстрому утоньшению пояса астероидов, чем в случае воздействия лишь со стороны Юпитера. Со временем некоторые из этих эмбриональных планет (или все они) сами попадали в промежутки Керквуда – лишь для того, чтобы впоследствии быть выброшенными из пояса и исчезнуть навсегда.

В развитие этой логики астрономы Алессандро Морбиделли и Джонатан Луини предположили, что один из этих неуправляемых «планетарных эмбрионов» мог врезаться в молодую Землю, что привело к появлению на ней океанов. Вообще говоря, появление воды на Земле всегда было загадкой для ученых^[124]. На других ближних планетах вода отсутствует (или почти отсутствует). Учитывая положение Земли в Солнечной системе, мы располагаем гораздо большими запасами воды, чем должны были бы.

Традиционное объяснение заключается в том, что кометы, которые содержат большую долю воды, чем все другие небесные тела, бомбардировали Землю на более поздних стадиях ее формирования, поставляя на Землю воду, которая присутствует сейчас в океанах, озерах и реках. Но астрономы начали подвергать сомнению такую гипотезу, поскольку химический состав воды в кометах обычно полностью отличается от химического состава воды на Земле. (Кометы содержат более высокий процент тяжелой воды – чрезвычайно редкого варианта, в котором водород с единственным протоном в своем ядре замещен дейтерием с одним протоном и одним нейтроном.) С другой стороны, вода, обнаруженная в высокоуглеродистых метеоритах, которые, как полагают, являются фрагментами астероидов, по своему химическому составу оказывается гораздо ближе к воде в океанах.

Таким образом, новая гипотеза заключается в том, что избыточное количество воды на нашей планете могло оказаться делом случая,

удачным результатом случайного столкновения с ледяной глыбой, запущенной из астероидного пояса. Если правильность этой гипотезы подтвердится, нам останется лишь поблагодарить астрономический синхронизм не только за уничтожение динозавров и расчистку места для эволюции наших предков, но и за доставку воды, без которой жизнь на нашей планете была бы невозможна.

Сколь бы величественное зрелище ни представлял собой синхронизм в космических масштабах, еще более впечатляет он в микромире. Здесь, глубоко в недрах материи, роль осцилляторов исполняют электроны, светлячки микромира. Но в отличие от настоящих светлячков, которых мы, для большего математического удобства, решили считать идентичными, эти квантовые частицы идентичны по-настоящему. Каждый электрон во Вселенной неотличим от любого другого электрона. Они никогда не стареют. Они никогда не ломаются и не разрушаются. А совершенство электронов обеспечивает возможность их беспрецедентного группового поведения, которому нет аналогов в макромире.

В своей повседневной жизни мы привыкли к электричеству лишь в его хаотической форме – суеда независимых частиц, не сотрудничающих между собой. Электрический ток, который питает тостер, представляет собой беспорядочную толкотню электронов, продирающихся через нагревательный элемент и раскаляющих его. Но если взять те же самые электроны и упорядочить, скоординировать их движение, вы получите одно из самых восхитительных явлений, известных науке, – триллионы электронов, которые маршируют в ногу, не встречая на своем пути никакого электрического сопротивления и проскальзывая сквозь металл без каких-либо затрат энергии в форме трения или нагрева. Эта невероятно неустойчивая форма электрической проводимости называется в наши дни сверхпроводимостью. Подобно открытию «взаимной симпатии» маятниковых часов, явление сверхпроводимости было открыто благодаря интуитивной прозорливости – в данном случае благодаря тому, что ученым стало интересно, что происходит с электричеством при температурах, близких к абсолютному нулю.

Глава 5. Квантовый хор

Когда мне было шесть лет, мои родители подарили мне в качестве игрушки большую батарею – такую, которые обычно используют в мощных электрических фонарях. Мне почему-то пришло в голову соединить проволокой два полюса этой батареи. Пока я шел к дому моего приятеля Кейси, чтобы продемонстрировать ему свою новую игрушку, я чувствовал, что проволока и батарея нагреваются у меня в руках все больше и больше. Электричество бешено циркулировало по созданной мною цепи, а сопротивление этой цепи электрическому току вырабатывало значительное количество тепла^[125].

На микроскопическом уровне триллионы электронов продвигались по проволоке, соскакивая в произвольных направлениях с пространственной решетки атомов меди подобно тому, как во время игры в пинбол шарики соскакивают с амортизаторов в пинбол-машине. Вообще говоря, движение электронов оказывается еще более хаотическим, чем движение шариков во время игры в пинбол. Атомы меди, в отличие от амортизаторов, не стационарны. Они все время трясутся и покачиваются. Чем выше окружающая температура, тем больше они трясутся и покачиваются. Поэтому более точной аналогией была бы совокупность шариков, пытающихся проложить себе путь через препятствие в виде множества вибрирующих амортизаторов. Каждое столкновение с вибрирующей атомной пространственной решеткой препятствует движению электронов и порождает сопротивление.

Эта модель электрической проводимости была знакома всем физикам еще в начале XX столетия. Согласно этой модели, сопротивление металла должно неуклонно снижаться по мере снижения температуры (поскольку меньшая подвижность пространственной решетки означает уменьшение количества и силы соударений). Когда эксперименты подтвердили такой теоретический вывод, некоторые физики заинтересовались: что могло бы произойти с электрической проводимостью в случае снижения температуры металла до абсолютного нуля, то есть до температуры, при которой движение атомов прекращается? Одна группа ученых полагала, что сопротивление должно снижаться вместе с температурой и полностью

исчезнуть при абсолютном нуле. Другие ученые утверждали, что сопротивление будет снижаться до определенного предела, но никогда не исчезнет полностью по причине наличия в реальной пространственной решетке всевозможных дефектов и примесей.

Долгое время ученым не удавалось получить окончательный ответ на этот вопрос, поскольку не удавалось достичь абсолютного нуля. Научный прорыв удалось совершить после того, как голландский физик Хейке Камерлинг-Оннес придумал способ сжижения гелия, что позволило ему охлаждать объекты до 269°C , то есть всего на 4 градуса выше абсолютного нуля. Теперь ничто не мешало Камерлинг-Оннесу получить ответ на вопрос о «нулевом сопротивлении», не дававший покоя ученым. В 1911 г. он обнаружил, что ожидания как той, так и другой групп ученых оказались несостоятельными. Когда он снизил температуру, погрузив в жидкий гелий тонкую трубку, наполненную ртутью, сопротивление ртути вначале постепенно снижалось, что, впрочем, ни для кого не стало неожиданностью. Однако затем, при температуре примерно на $4,2$ градуса выше абсолютного нуля, сопротивление ртути резко «обнулилось». Оно не снизилось постепенно до нуля – оно отвесно рухнуло до нуля. При какой-то температуре ртуть демонстрировала ощутимое сопротивление, но после того как температура понизилась буквально на какую-то долю градуса, сопротивление исчезло.

Так Камерлинг-Оннес открыл явление сверхпроводимости^[126].

С точки зрения классической физики, сверхпроводимость вообще невозможна. Материал, который проводит электричество без какого-либо сопротивления, кажется столь же безумной концепцией, как пресловутый вечный двигатель, то есть двигатель, работающий бесконечно долго, не испытывая силы трения и не требуя для себя энергии. Однако результат, полученный Камерлинг-Оннесом, вовсе не нарушал законы термодинамики; хитрость в том, что его система функционировала не как двигатель – в том смысле, что она не выполняла никакой работы по отношению к своему окружению. Тем не менее, если не принимать во внимание эту принципиально важную оговорку, сверхпроводники действительно способны обеспечивать своего рода «вечное движение». Последующие эксперименты продемонстрировали, что импульс электрического тока может годами циркулировать по контуру сверхпроводящего проводника без каких-

либо потерь энергии. Насколько нам известно – и каким бы неправдоподобным это ни казалось, – сопротивление в состоянии сверхпроводимости не просто близко к нулю: оно *в точности* равняется нулю. Это невозможно доказать экспериментальным путем – для этого мы должны были бы предоставить возможность импульсу электрического тока бесконечно долго циркулировать по контуру сверхпроводящего проводника, – но такие эксперименты налагают четкий верхний предел на сопротивление: по меньшей мере оно в миллиард миллиардов раз меньше сопротивления меди при комнатной температуре. Речь идет о коэффициенте, меньшем 0,000000000000000001.

В течение многих десятилетий после открытия Камерлинг-Оннеса ученые не могли найти объяснения сверхпроводимости. Почему сопротивление падает столь резко? Как оно может исчезнуть при температуре выше абсолютного нуля, когда атомная пространственная решетка все еще не погрузилась в состояние полного покоя? Было невозможно вообразить триллионы шариков, которые движутся мимо трясущихся, вибрирующих амортизаторов, не обращая на них даже малейшего внимания. Что-то было «не так» в традиционной модели.

В начале XX столетия, когда ученые начали проникать все глубже и глубже в недра материи, в микроскопическое царство атомов и электронов, подобные научные прорывы наблюдались во многих областях физики. Например, классическая физика не могла объяснить устойчивость электронов, вращающихся вокруг ядер атомов. Преобладающие теории утверждали, что в процессе такого вращения электроны должны непрерывно излучать часть своей энергии в окружающее пространство, что в конечном счете должно заставить их «пикировать» на ядро. Ничего хорошего в таком падении, конечно, не было бы и, к счастью, ничего подобного не наблюдалось в действительности.

В течение нескольких следующих десятилетий эти парадоксы разрешались один за другим творцами квантовой механики, революционного направления физики, которое исходило из того, что материя и энергия фундаментально дискретны^[127]. Макс Планк предположил, что материя упакована в крошечные комочки, и пришел к выводу, что это позволяет объяснить характерные картины излучения,

испускаемого раскаленными докрасна материалами. Альберт Эйнштейн выдвинул концепцию квантов света – частиц, которые сейчас называют фотонами, – чтобы объяснить загадочное явление, называемое фотоэлектрическим эффектом, когда свет, попадая на определенные металлы, вызывает испускание ими электронов. До Эйнштейна (который впоследствии получил за свою работу Нобелевскую премию) никто не мог понять, почему некоторые цвета света испускали электроны с высокими скоростями, тогда как другие были совершенно бесплодны. Нильс Бор разгадал тайну «пикирующих электронов», издав соответствующее постановление: он объявил, что электроны могут вращаться лишь по определенной совокупности орбит, угловой момент которых определяется в единицах измерения, называемых постоянной Планка. Это позволило ему вычислить спектральные линии – штрих-код цветных световых волн, – которые испускаются атомами водорода в возбужденном состоянии, что полностью соответствовало результатам измерений, на протяжении десятилетий остававшимся без объяснения.

Последующие концепции в квантовой теории казались еще более парадоксальными. Свет иногда вел себя как частицы, иногда – как волны. То же самое можно сказать об электронах, атомах и всех квантовых объектах. Даже пустота ничем не заполненного пространства уже не была тем, чем казалась. В теории квантового поля вакуум становился скоплением хаотически движущихся частиц и античастиц, внезапно рождающихся из ничего, а затем столь же быстро исчезающих.

Если бы нужно было выразить квинтэссенцию этой квантовой странности одним предложением, то таким предложением должен был бы стать знаменитый принцип неопределенности Вернера Гейзенберга, уточненная версия изречения, гласящего, что за все в нашем мире приходится платить: если вы пытаетесь что-то улучшить, то это улучшение непременно достигается за счет ухудшения чего-то другого. Принцип неопределенности выражает обратно-пропорциональное соотношение между флуктуациями определенных пар переменных, таких как позиция электрона и его скорость. Все, что снижает неопределенность одной переменной, обязательно должно повышать неопределенность другой переменной; вы не можете одновременно снизить неопределенность обеих переменных. Например, чем сильнее

вы удерживаете электрон, тем сильнее он мечется. Пытаясь как можно точнее зафиксировать позицию электрона, вы усложняете себе задачу определения его скорости. С другой стороны, пытаясь как можно точнее зафиксировать скорость электрона, вы лишь повышаете неопределенность, «размытость» его позиции; в конечном счете это приводит к тому, что его позиция может оказаться практически какой угодно.

В течение долгого времени ученые утешали себя мыслью, что столь странные результаты ограничиваются лишь субатомарным уровнем. Сегодня нам известно больше. Сегодня мы понимаем, что сверхпроводимость – это не что иное, как вторжение квантовой механики в наш повседневный, макроскопический мир. В этом заключается намек на то, что странность, скрывавшаяся где-то в подвале, уже поднимается по лестнице на поверхность.

Оказалось, что ключом к разгадке сверхпроводимости является выдающаяся способность электронов объединяться в пары и двигаться синхронно. Чтобы понять, как вообще возможно такое «сотрудничество электронов», нам сначала нужно узнать немножко больше о правилах поведения квантовых групп^[128].

Все квантовые частицы можно классифицировать, разделив их на «фермионы» и «бозоны»^[129]. Фермионы являются отшельниками: два фермиона никогда не могут одновременно пребывать в одном и том же квантовом состоянии. Это правило, известное как принцип исключения Паули, обеспечивает строгий порядок заполнения электронами орбитальных оболочек вокруг атомов; электроны строго соблюдают очередь, занимая в каждый отдельный момент времени определенную, «персональную» орбитальную оболочку (по одному электрону в каждой оболочке), подобно вежливым людям, занимающим свои места в определенном ряду театра. Стремление фермионов избегать друг друга порождает в конечном счете базовые законы химии, в частности структуру периодической таблицы элементов, правила образования химических связей между атомами и поведение магнитов.

У бозонов противоположный характер. У них очень сильны стадные инстинкты. Сколь угодно большое их число может одновременно пребывать в одном и том же квантовом состоянии. Вообще говоря, они предпочитают находиться в обществе себе подобных: чем больше бозонов находится в каком-то определенном

состоянии, тем привлекательнее это состояние для других бозонов. В частности, вероятность перехода какого-либо бозона в определенное состояние прямо пропорциональна количеству бозонов, уже пребывающих в этом состоянии, плюс единица. Это означает, например, что квантовое состояние, содержащее 99 бозонов, оказывается в 100 раз более привлекательным, чем незаполненное состояние. В этом смысле бозоны являются закоренелыми конформистами, «компанейскими ребятами». Им нравится петь хором.

Первым, у кого возникло представление о таком квантовом хоре, был Альберт Эйнштейн^[130]. Это случилось в 1924 г. Недавно Эйнштейн получил письмо от молодого малоизвестного индийского физика по имени Шатъендранат Бозе (по-другому его имя произносится как Сатъендра Нат Бозе), у которого возникла парадоксальная идея, которую он хотел бы опубликовать; к сожалению, его статью уже отвергли в одном научном журнале, и теперь он хотел заручиться поддержкой столько авторитетного ученого, как Эйнштейн, прежде чем повторять свои попытки. В отличие от прочих писем, которые Эйнштейн в изобилии получал от всевозможных непризнанных гениев, это письмо заинтриговало Эйнштейна. Бозе придумал оригинальный способ доказательства закона излучения, который был впервые сформулирован Планком в 1900 г. и стал теоретическим прорывом, ознаменовав собой начало квантовой революции. Старое доказательство, предложенное Планком, имело характер *ad hoc*, то есть было ориентировано лишь на данный случай – это доказательство не вполне устраивало даже самого Планка. Но Бозе, по-видимому, удалось переформулировать его более изящным образом. Однако после более тщательного анализа идеи, предложенной Бозе, Эйнштейн обратил внимание на оригинальную логику, заложенную в вычисления Бозе: в ходе перечисления множества разных способов, какими неразличимые между собой квантовые частицы могли занимать энергетические уровни, Бозе предложил новые правила подсчета^[131].

Данный вопрос, если сформулировать его более понятным для читателей образом, мог бы звучать так: сколькими разными способами два полных близнеца, Питер и Поль, могут сидеть на двух стульях? Привычный для нас подсчет показывает, что таких способов существует два: Питер может сидеть справа, а Поль – слева, или наоборот. Но допустим, что Питера совершенно невозможно отличить

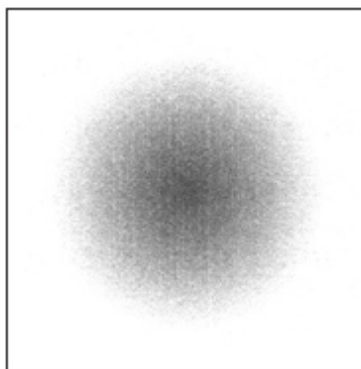
от Поля, и если вы на мгновение повернетесь к ним спиной, а затем вновь посмотрите на них, то уже не сможете сказать наверняка, поменялись ли они местами. Таким образом, если они неразличимы между собой, то в действительности существует лишь одна конфигурация: по одному из близнецов на каждом стуле. Когда объекты неразличимы между собой, утверждал Бозе, подсчет нужно вести по-другому. Спустя многие годы Бозе признал, что на самом деле сам он не заметил никакой новизны в своем подходе. Его интуитивный «выстрел в темноте» показался ему вполне естественным.

Эйнштейн расширил рамки работы Бозе, рассмотрев групповое поведение *любой* совокупности квантовых частиц, которые подчиняются этой необычной статистике. В то время как Бозе сосредоточил свое внимание на чистом излучении (которое, подобно всем формам света, состоит из фотонов, которые ведут себя так, словно они не обладают массой), Эйнштейн обобщил эту теорию на материю в целом (состоящую из частиц, обладающих массой, например атомов). Его математические выкладки предсказали нечто потрясающее: если такие бозоны (как их теперь называют) заморозить до достаточно низкой температуры, они могут проявлять своего рода взаимную квантовую симпатию: все они будут действовать как один – в буквальном смысле. В этом случае частицы утратят свою идентичность и превратятся в нечто неопишное: ни твердое тело, ни жидкость – одним словом, какой-то новый вид материи.

Ход рассуждений Эйнштейна носит слишком узкоспециальный характер, чтобы я мог описать его здесь на языке, понятном широкому кругу читателей, – даже в метафорическом виде. Но его выводы станут более понятны, если мы применим принцип неопределенности, открытый Гейзенбергом три года спустя, в 1927 г. Приведенное ниже упрощенное доказательство, даже если оно покажется вам анахроничным, соответствует тому, как большинство физиков в наши дни понимает явление, предсказанное Эйнштейном.

Запомните: мы хотим показать, что при достаточно низких температурах огромное количество бозонов может превратиться («сплавиться») в некий единый объект. Пытаясь представить себе бозон, не воображайте его как некую точку; вместо этого нарисуйте силой своего воображения некое размытое, размазанное облако

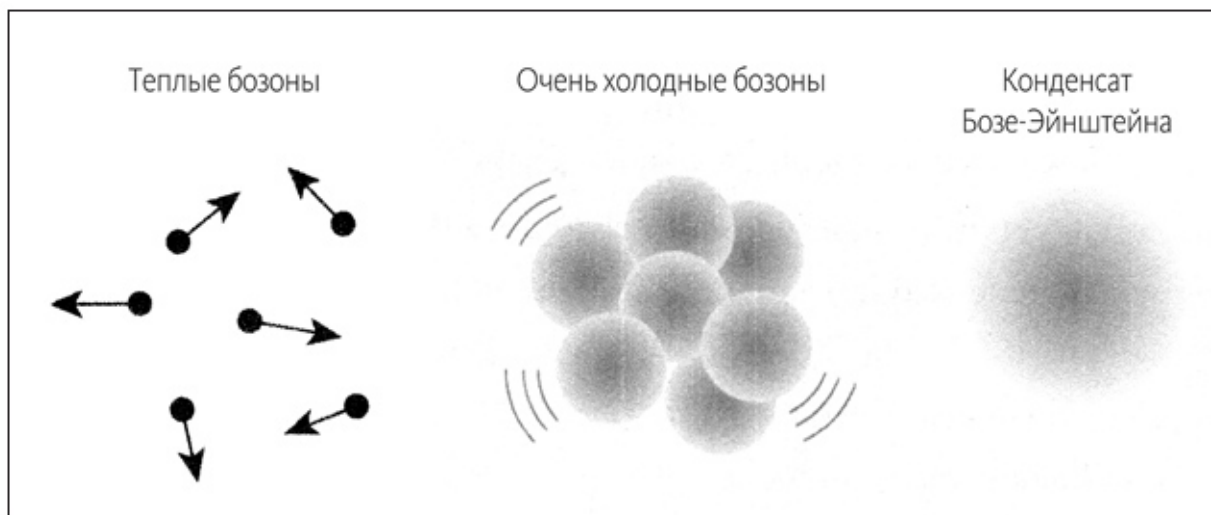
вероятности, которая говорит вам о том, где вероятнее всего находится бозон.



Вы, наверное, помните персонажа по имени Пигпен из старого комикса Peanuts. Вы редко видите Пигпена; все, что вы видите, это облако пыли, окружающее его; вы только знаете, что он находится где-то там, внутри облака. Аналогично, бозон окутан сферическим облачком, которое представляет собой совокупность концентрических оболочек вероятности, темный центр которого является наиболее вероятным местонахождением самой частицы. Этот центр является областью самой высокой вероятности – местом, где «находится» бозон, согласно привычному для нас доквантовому образу мышления – хотя всегда существует какая-то вероятность того, что он находится на самом краю такого облака.

Теперь представьте себе совокупность таких облачков, которые хаотически мечутся в трехмерном пространстве. Эта совокупность представляет собой газ бозонов. Вопрос: что произойдет с этим газом, если мы охладим его до температур, близких к абсолютному нулю? Согласно принципу неопределенности Гейзенберга, должно произойти нечто очень странное: эти размытые облачка станут еще более размытыми. Эти облачка вероятности станут шире и тоньше, а это означает, что перемещения бозонов станут большими. Чтобы понять, почему это произойдет, вспомните качели. Охлаждение бозонов замедлит их движения до такой степени, что они окажутся практически неподвижны, а это приведет к тому, что скорости их движения снизятся до какой-то определенной величины (их скорость не может оказаться ниже нуля). Но поскольку параметр «скорость» снижается, параметр «местоположение» растет: по мере того как скорости бозонов

становятся все более определенными, их позиции становятся все менее определенными. Иными словами, они становятся еще более размытыми. Их облачка вероятности становятся шире.



При достижении некой критической температуры эти облачка вероятности расширяются настолько, что начинают взаимно перекрываться, а бозоны начинают сливаться друг с другом. Как только это произойдет, говорил Эйнштейн, большая их часть должна самопроизвольно перейти в одно и то же квантовое состояние – состояние наименьшей возможной энергии. Даже сам Эйнштейн не был уверен, какой вывод следует из такого предсказания. «Это замечательная теория, – писал он своему другу Полю Эренфесту в декабре 1924 г., – но что же она означает?»^[132]

Спустя семьдесят один год после формулирования Эйнштейном этой математической концепции ее удалось воплотить – в 1995 г., в одной из лабораторий Баулдера, Колорадо. С помощью магнитных полей, охлаждения испарением и лазеров, подобных тем, которые используются в устройствах считывания и записи компакт-дисков, Эрик Корнелл и Карл Виман охладили разреженный газ атомов рубидия до менее чем миллионной доли градуса^[133] выше абсолютного нуля – температуры, которая вызывает благоговейный ужас даже у специалистов по низким температурам. В этих экстремальных условиях – которые, вполне возможно, ранее не достигались нигде во Вселенной – они наблюдали, как тысячи атомов ведут себя как один.

В 2001 г. Корнелл, Виман и Вольфганг Кеттерле из МТИ стали лауреатами Нобелевской премии по физике за создание ими этого экзотического состояния материи, известного в настоящее время как бозе-эйнштейновская конденсация^[134]. Как было написано в пресс-релизе Королевской Академии наук Швеции, этим ученым удалось заставить атомы «петь в унисон»^[135].

Феномен бозе-эйнштейновской конденсации в высшей степени необычен. Никто не может толком объяснить, что все это означает. Нередко говорят, что отдельные атомы объединяются в один гигантский «сверхатом». Другие характеризуют это новое состояние как «рагу, тщательно перемешанное до однородной массы»^[136]. Лично мне больше нравится определение, предложенное Королевской Академией наук Швеции. Аналогия с пением в унисон соответствует самому духу бозе-эйнштейновской конденсации. Подобно синусоидальной или какой-либо другой волне, квантовая волна, связанная с бозоном (или тем, что мы называем его облаком вероятностей), характеризуется амплитудой и фазой. В бозе-эйнштейновской конденсации все эти волны действуют строго синхронно. Их пики и впадины совпадают во времени; физики говорят, что они «когерентны по фазе». Аналогично, когда какая-то система связанных осцилляторов пребывает в синхронизме, все они также имеют одну и ту же фазу. Разница заключается лишь в том, что осцилляторы не сливаются в один в буквальном смысле.

Квантовая когерентность по фазе – это не просто эзотерическая диковина. Она подарила нам лазер, одно из самых важных изобретений XX столетия. Именно потому что фотоны являются неразличимыми между собой частицами, управляемыми статистикой Бозе-Эйнштейна, огромное их количество можно поместить в одно и то же квантовое состояние, чтобы они вели себя подобно единой гигантской волне света. Лазер запускается в работу, когда какой-либо источник энергии, например электрический ток или лампа-вспышка, возбуждает атомы, извлекая их из состояния наименьшей энергии, и «накачивает» некоторые из их электронов, переводя их на высокие энергетические уровни (вспомните аналогию с арбузами, которые мы поднимали на табуретки). Когда эти атомы возвращаются в спокойное состояние, они испускают свою избыточную энергию в виде фотонов, которые разлетаются в произвольных направлениях внутри полости лазера.

Большинство этих фотонов поглощается стенками полости, но те, которые движутся вдоль линии между двумя зеркалами, установленными с обоих концов лазера, будут продолжать ricoшеть от зеркал, туда и обратно, усиливая друг друга и приглашая другие фотоны присоединиться к их квантовому состоянию. С типичным для бозонов дружелюбием, каждый отразившийся от зеркал фотон рекрутирует в свою волну новые фотоны посредством процесса цепной реакции, известного как индуцированное излучение: они вызывают высвобождение других фотонов в синхронизме с собой, что еще больше усиливает эту волну, что, в свою очередь, стимулирует дальнейшее излучение и т. д. Когда эта волна становится достаточно сильной, она частично проникает через зеркало на переднем конце (которое не обеспечивает стопроцентную отражательную способность) и выходит за пределы лазера в виде интенсивного узкого пучка синхронизированного света – лазерного луча.

Квантовый синхронизм также объясняет механизм действия сверхпроводимости^[137]. Это объяснение является достаточно сложным, поскольку обсуждаемое нами коллективное поведение не распространяется автоматически на электроны. Будучи фермионами, они не столь общительны по своей природе, как бозоны. Феномен сверхпроводимости базируется на тонком механизме, который побуждает электроны объединяться в пары, после чего они становятся бозонами и утрачивают все свое взаимное неприятие. Эти спаренные электроны самопроизвольно образуют бозе-эйнштейновский конденсат, некую синхронизированную совокупность, которая не встречает никакого сопротивления при переносе электрического тока через металл.

Чтобы прийти к такому объяснению, понадобилось немало времени – свыше пятидесяти лет исследований в области квантовой теории. А само объяснение было предложено физиками Джоном Бардином, Леоном Купером и Робертом Шриффером. Самым неожиданным в этом объяснении было представление о том, что электроны могут образовывать пары. Вообще говоря, мы привыкли к тому, что электроны отталкиваются друг от друга, поскольку представляют собой отрицательно заряженные частицы.

Механизм образования пар электронов действует косвенно. Взаимодействие между электронами опосредуется пространственной решеткой положительно заряженных ионов. (Ранее мы называли эти ионы атомами. Но поскольку они совместно используют некоторые из своих электронов, они заряжены положительно и поэтому их следует называть ионами. Их положительный заряд является ключом к механизму образования пар электронов.) Когда электрон движется сквозь пространственную решетку, он несколько притягивает ее к себе (вследствие своего отрицательного заряда). Эта деформация создает в пространстве некую область с крошечным избытком положительного заряда, которая притягивает к себе второй электрон. В результате два электрона оказываются связаны между собой таким вот косвенным образом.

Существует несколько способов представить себе этот механизм. Ни один из них не может считаться полностью соответствующим действительности, но тем не менее они проливают свет на принцип действия этого механизма. Представьте себе шар, какими обычно играют в боулинг. Допустим, такой шар катится по кровати с резиновым матрацем, наполненным водой. Он создает на матраце продольную вмятину, которая втягивает в себя еще один шар для боулинга. Второй шар тоже начинает катиться по вмятине, оставленной первым шаром. В данном случае шары являются аналогами электронов, а резиновый матрац, на котором образовалась продольная вмятина, является аналогом пространственной решетки. Могу предложить еще одну аналогию: представьте себе эффект создания тяги, используемый велогонщиками во время соревнований на велотреке. Ведущий велогонщик рассекает воздух, и за его спиной образуется область пониженного давления, которая увлекает второго (ведомого) велогонщика, движущегося в кильватере ведущего. Неточность данной аналогии заключается в том, что спаренные электроны в сверхпроводнике отстоят друг от друга достаточно далеко: второй электрон не движется в кильватере первого. В этом отношении спаренные электроны больше напоминают пару подростков, которые танцуют, не прижавшись друг к другу, а на значительном расстоянии друг от друга: они совершают синхронные движения, находясь на противоположных концах танцплощадки. Несмотря на то что между этими двумя танцорами может находиться несколько других танцоров,

никто не сомневается в том, что эта пара танцует вместе. В конце концов, о них можно сказать то же самое, что физик мог бы сказать о спаренных электронах: «Они сильно коррелированы».

Важность образования таких пар заключается в том, что оно изменяет готовность электронов к «братанию». Отдельно взятый электрон является фермионом, закоренелым одиночкой. Но два электрона, после того как они образовали пару, по сути, становятся похожи на бозоны. (Это следует из квантовой теории, которая показывает, что разница между фермионами и бозонами подобна разнице между нечетными и четными числами: образование пары из двух фермионов порождает бозон; точно так же сложение двух нечетных чисел дает четное число.)

После того как электроны объединятся в эти так называемые пары Купера, у них возникает непреодолимое желание общаться с другими бозонами. Это желание столь сильно, что все они переходят в одно и то же квантовое состояние – состояние наименьшей энергии. Затем все они утрачивают свою идентичность и объединяются в бозе-эйнштейновский конденсат. Возвращаясь к метафоре с танцами подростков, можно сказать, что вся эта толпа сейчас синхронно исполняет что-то вроде танца в стиле кантри, когда танцующие выстраиваются в ряд и синхронно совершают те или иные движения.

Теория Бардина-Купера-Шриффера позволила решить ряд загадок, связанных со сверхпроводимостью. Самое главное, она объяснила, почему электрическое сопротивление падает до нуля, когда температура опускается ниже некоего критического уровня. Объяснение заключается в синхронном поведении пар Купера. В ответ на воздействие электрического поля спаренные электроны движутся через сверхпроводник строго синхронно. Любое столкновение с какой-либо примесью или вибрирующим ионом – одним словом, любое событие, которое способно породить сопротивление – вышибло бы пару из коллектива и отправило бы ее в другое квантовое состояние. Но не нужно забывать, что вероятность перехода в определенное состояние пропорциональна $n + 1$ ^[138], где n – количество бозонов, уже пребывающих в этом состоянии. Коллектив в миллиарды раз более привлекателен, чем любой другой вариант, поэтому никакая пара не нарушит солидарность по собственной инициативе. Единственным способом создать сопротивление было бы рассеять одновременно

миллиарды пар, что практически невозможно. Следовательно, сопротивление сверхпроводника равно нулю – или по крайней мере меньше той величины, которую способны измерить ученые.

Теория Бардина-Купера-Шриффера показала также, что сверхпроводимость – это не просто одно из состояний обычной проводимости. Раньше казалось парадоксальным, что даже лучшие из обычных проводников, медь и серебро, лишь с большой натяжкой можно назвать сверхпроводниками: они не обеспечивают сверхпроводимость, даже когда температура оказывается выше абсолютного нуля лишь на тысячную долю градуса. Однако в свете теории Бардина-Купера-Шриффера это не кажется столь уж парадоксальным. Хорошие проводники хороши именно потому, что электроны, обеспечивающие их проводимость, игнорируют пространственную решетку. Однако, обеспечивая непересекаемость пространственной решетки и путей, которыми движутся электроны, эти материалы никогда не обеспечивают шансов на образование пар Купера. Вспомните, что механизм образования пар основан исключительно на способности электронов деформировать пространственную решетку (подобно шару от боулинга, катящемуся по резиновому матрасу), что дает возможность второму электрону следовать по пути, проложенному первым электроном. Если же резиновый матрас оказывается настолько жестким, что первый шар не может проложить выемку в нем, то нет никаких шансов, что за первым шаром последует второй. Хорошие проводники оказываются плохими сверхпроводниками именно потому, что они не в состоянии образовывать пары Купера, обеспечивающие сверхпроводимость.

Наконец, теория Бардина-Купера-Шриффера объяснила, почему при определенной температуре сопротивление падает столь резко. Это во многом та же причина, по которой вода внезапно замерзает при температуре $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Оба эти процесса представляют собой фазовые переходы, победу самоорганизации над хаотической толкотней. В точке замерзания молекулы воды замедляют свое движение до степени, достаточной для того, чтобы силы притяжения связали их в кристалл. Аналогично, при температуре перехода в сверхпроводимость атомная пространственная решетка «успокаивается» до степени, достаточной для того, чтобы электроны могли образовывать пары Купера и объединяться в бозе-эйнштейновский конденсат. В обоих случаях для

совершения перехода достаточно снижения температуры лишь на какую-то долю градуса.

Качественный вывод из теории Бардина-Купера-Шриффера заключался в том, что никакой из материалов не должен перейти в состояние сверхпроводимости при слишком высокой температуре – например, при температуре от 20 до 50 градусов выше абсолютного нуля, – поскольку в этом случае вибрации пространственной решетки оказались бы слишком сильными. В течение долгого времени этот вывод представлялся важным следствием из теории Бардина-Купера-Шриффера. Используя разные сочетания металлов, экспериментаторы постепенно поднимали планку этого мирового рекорда на пару десятых долей градуса за раз, остановившись наконец на 23 градусах. Этот непреодолимый потолок находился именно на том уровне, на котором, по мнению многих ученых, он и должен был находиться, по меньшей мере до середины 1980-х годов.

Открытие явления высокотемпературной сверхпроводимости в 1986 г. повергло научный мир в состояние шока^[139]. Сначала появилось сообщение о некоем керамическом материале, который превратился в сверхпроводник при новом температурном рекорде – 30 градусов выше абсолютного нуля. Спустя лишь два года этот рекорд взлетел на небывалую высоту – 125 градусов. На момент написания этой книги физические основы высокотемпературной сверхпроводимости остаются для нас загадкой. Принято считать, что и в этом случае пары Купера играют важную роль, которая на сей раз, возможно, опосредована магнитными взаимодействиями, а не вибрациями пространственной решетки. Как бы то ни было, несмотря на то что теория Бардина-Купера-Шриффера прекрасно «работает» при низких температурах, она не в состоянии объяснить явление сверхпроводимости во всей его полноте.

Эти последние открытия возродили интерес к возможным практическим применениям сверхпроводимости^[140]. Даже в своем первоначальном, низкотемпературном варианте сверхпроводимость всегда обещала огромные экономические и энергетические выгоды. Поскольку провода, изготовленные из сверхпроводящего материала, имеют нулевое сопротивление и, следовательно, не нагреваются, по ним можно пропускать сверхвысокие токи, которые просто расплавили бы обычные провода. По той же причине провода, изготовленные из

сверхпроводящего материала, рассеивают гораздо меньше энергии, что позволяет существенно снизить потери. (Согласно оценкам Министерства энергетики США, свыше 7 % всей энергии, вырабатываемой в Соединенных Штатах, расходуется на электрическое сопротивление и прочие потери при ее передаче на расстояние; внедрение в электроэнергетике технологии сверхпроводимости позволило бы сократить эти потери *наполовину*.) Помимо выгод, связанных с повышением коэффициента полезного действия, использование сверхвысоких токов дало бы возможность приводить в действие мощные электромагниты, силы которых было бы достаточно для того, чтобы приподнять над рельсами целый состав, что позволило бы устранить трение между колесами и рельсами. Это служит основой поезда на магнитной подушке, или, как его еще называют, *магнитоплана*, или *маглева* (magnetic levitation – магнитная левитация), который в настоящее время эксплуатируется в Японии и Южной Корее. В 1997 г. японский министр транспорта разрешил строительство экспериментальной линии Yamanashi Maglev Test Line; спустя два года экспериментальный поезд MLX01 развил впечатляющую скорость – 343 мили в час. Сверхпроводящие магниты также представляют интерес для военных приложений, включая двигательные установки для кораблей, сверхчувствительные приборы для обнаружения подводных лодок и подводных мин, а также электромагнитные импульсные генераторы, предназначенные для выведения из строя энергосистем и электронной инфраструктуры противника.

Несмотря на свой высокий технологический потенциал, технологии сверхпроводимости внедряются очень медленно. Одним из препятствий всегда были низкие температуры, необходимые для перехода в состояние сверхпроводимости. Чтобы достичь таких температур, приходилось использовать сложные системы охлаждения, реализовать которые можно было лишь в лабораторных условиях. Это было одной из причин, почему открытие явления высокотемпературной сверхпроводимости вызвало столь сильный ажиотаж: критических температур теперь стало возможным достичь путем охлаждения жидким азотом, который не только дешев, но имеется в изобилии. Более серьезным препятствием стала трудность производства прочных и гибких проводов из новых материалов: подобно другим керамическим материалам, они очень хрупки и ломки. К тому же очень нелегко

изготовить провода требуемой длины: они теряют свои сверхпроводящие свойства из-за появления дефектов в материалах, когда провод оказывается слишком длинным. Кроме того, в самой перспективной форме сверхпроводящего провода используется серебряное покрытие, что делает такой провод в двадцать раз дороже медного, хотя ожидают, что его стоимость будет снижаться по мере увеличения спроса. И наконец, хотя технология поездов маглев уже отработана, широкому их использованию в Европе и Соединенных Штатах препятствуют как политические, так и экологические соображения.

В начале 1960-х годов никто и не помышлял о чем-то подобном. Ответвления новой теории Бардина-Купера-Шриффера лишь начинали формироваться в лабораториях и университетах по всему миру. Одним из тех, кто интересовался этими вопросами, был молодой аспирант Кембриджского университета. Этому выходцу из Уэльса – невысокого роста, с негромкой речью и в массивных очках с черной роговой оправой – вскоре предстояло обнаружить ряд замечательных следствий из квантового синхронизма, которые в конечном счете открыли человечеству новые возможности для практического применения сверхпроводимости, начиная с визуализации в медицине и заканчивая созданием самых быстродействующих суперкомпьютеров в мире. А собственная научная карьера и судьба этого молодого человека заслуживают отдельного комментария в виду их необычности.

В 1962 г. Брайан Джозефсон был 22-летним аспирантом Кембриджского университета. Его специализацией была экспериментальная физика, но впоследствии его увлек ряд теоретических идей^[141], особенно тех, о которых он узнал из курса лекций Фила Андерсона. Сотрудник Bell Laboratories Фил Андерсон, признанный специалист по сверхпроводимости и физике твердого тела, находился в то время в годичном творческом отпуске, который он решил провести в Кембриджском университете. Он почти сразу же обратил внимание на Джозефсона. «Присутствие этого студента на моих лекциях каждый раз сбивало меня с толку и приводило в замешательство, – говорил Андерсон, – поскольку все должно быть правильно. В противном случае он подходил ко мне после лекции и объяснял, как это должно быть на самом деле»^[142].

Однажды Джозефсон показал Андерсону кое-какие из выполненных им математических выкладок. Джозефсона интересовало, что произойдет, если два сверхпроводника соединить между собой посредством очень тонкого слоя оксида – толщиной не более одной или двух миллиардных долей метра. Такое соединение было бы похоже на бутерброд: роль двух ломтиков хлеба играли два сверхпроводника, а роль кусочка (очень тонкого кусочка) мяса между ними – слой оксида.

Джозефсон с трудом верил тому, о чем говорили его уравнения. А они говорили о том, что электрический ток может проходить через слой оксида, не встречая сопротивления. Согласно классической физике, так не должно было быть. Оксид является изолятором. Он полностью блокирует прохождение электронов, как если бы он создавал на их пути непроходимую кирпичную стену. Тем не менее из математических выкладок Джозефсона следовало, что изолятор способен превратиться в сверхпроводник, то есть шарахнуться из одной крайности в другую. Вместо того чтобы встретить на своем пути некое подобие кирпичной стены, электроны двигались так, словно на их пути не было ни малейших препятствий. Вместо бесконечно большого сопротивления возникала сверхпроводимость.

Предсказание Джозефсона основывалось на квантовом явлении, известном как туннельный эффект или туннельный переход^[143]. Квантовой частице, упавшей в глубокую яму, вовсе не обязательно карабкаться наверх, чтобы выбраться из этой ямы. Как по волшебству, она может проскочить сквозь стенку, даже не оставив после себя дырку!

Подобно многому в квантовой теории, туннельный переход противоречит здравому смыслу и нашим привычным представлениям об окружающем мире. Однако это явление покажется вам несколько менее парадоксальным, если вы вспомните, что квантовые частицы могут вести себя подобно волнам. Точно так же как звуковые волны, возникающие во время шумной вечеринки, могут проникать сквозь стены в соседнюю квартиру, квантовая волна способна просочиться сквозь барьер, который на первый взгляд кажется непроницаемым. Шансы невелики, но они существуют. А если речь идет о стенке бумажной толщины, подобно слою оксида в выкладках Джозефсона, то туннельный переход превращается из гипотетической возможности в реальность: он действительно имеет место! Это было подтверждено

экспериментальным путем. Вообще говоря, лишь двумя годами ранее Айвор Джайевер, в то время аспирант Политехнического института Ренсселаера в Трое, Нью-Йорк, продемонстрировал, что отдельные электроны могут совершать туннельный переход из одного сверхпроводника в другой сквозь изоляционный барьер (правда, для этого их нужно было «подтолкнуть», подав соответствующее электрическое напряжение). Однако сейчас математические выкладки Джозефсона указывали на нечто еще более странное: туннельный переход мог совершаться без помощи электрического напряжения!

Чтобы получить интуитивное представление о том, насколько парадоксально это явление, представьте поток электричества как аналог потока воды. Точно так же, как поток воды движется сверху вниз, электрический ток движется от более высокого напряжения к более низкому. Теперь представьте два ведра, причем в дне каждого ведра проделана небольшая дырочка. Ведра соединены между собой тонким шлангом, по которому вода может перетекать из одного ведра в другое (аналогично двум сверхпроводникам, соединенным между собой тонким слоем оксида). Если оба ведра наполнить одинаковым количеством воды и подвесить одно из них на крюке, закрепленном наверху лестницы, а другое – внизу лестницы, то вода будет перетекать из верхнего ведра в нижнее. Но если оба ведра подвесить на одном уровне и оставить их в таком положении, то вы не можете рассчитывать, что вода будет самопроизвольно перетекать из одного ведра в другое. Вода не вытекает в сторону. Однако именно такое поведение предсказывали уравнения Джозефсона: поток электричества между двумя сверхпроводниками, находящимися под одним и тем же напряжением.

Возможность такого потока «в сторону» обеспечивалась совершенно неизвестным нам веществом, несколько не похожим на воду, – квантовой жидкостью, идеально синхронизированной совокупностью пар Купера. Привычные нам жидкости представляют собой хаотические совокупности молекул, не сотрудничающих между собой. Даже спокойная вода в медленно текущем ручейке представляет собой – на микроскопическом уровне – беспорядочную толчею молекул. Эти молекулы постоянно сталкиваются друг с другом, скользят друг мимо друга, спотыкаются и беспрестанно покачиваются. Но движение пар Купера в сверхпроводнике настолько хорошо

организованно, что нам трудно это представить. Все спаренные электроны когерентны по фазе: вершины и впадины их квантовых волн идеально налагаются одна на другую. Если, как предполагал Джозефсон, слой оксида оказывается достаточно тонким, эти волны способны просачиваться через такой барьер и проникать в сверхпроводник по другую сторону от слоя оксида. Такое объединение в пары позволяет парам Купера совершать туннельный переход через изолятор. Другими словами, уравнения Джозефсона предсказывали существование «сверхтока туннельного перехода».

Поскольку такой вывод казался слишком необычным – даже для квантовой теории, – Джозефсон попросил профессора Андерсона взглянуть на свои выкладки. Андерсон с удовольствием исполнил эту просьбу. «К этому времени я уже настолько хорошо знал Джозефсона, что принимал на веру все, что он говорил мне. Однако мне показалось, что его самого одолевают сомнения, поэтому я потратил целый вечер, чтобы проверить один из членов уравнения, которыми выражался ток». Этим членом был сверхток туннельного перехода. Возможно ли, чтобы пары Купера не встречали противодействия, проходя через изолятор? Казалось гораздо более правдоподобным, что они должны были бы распадаться на отдельные электроны, создавая обычный ток, подобно тому, что наблюдал Айвор Джайевер в своих ранних экспериментах, – ток, который встречал сопротивление на пути своего движения.

Выражая свои сомнения по этому поводу, Брайан Пиппард, консультировавший Джозефсона по его диссертации, ранее утверждал, что туннелирование пар Купера настолько невероятно, что обнаружить это явление не представляется возможным. Грубо говоря, вероятность этого феномена примерно такая же, как вероятность попадания молнии дважды в одну и ту же точку. Как известно, вероятность туннелирования отдельно взятого электрона через изолятор очень мала, поэтому вероятность одновременного туннелирования двух электронов, равная *квадрату* вероятности туннелирования отдельно взятого электрона, вообще близка к нулю. Тем не менее математические выкладки Джозефсона показывали, что вероятность одновременного туннелирования двух электронов должна быть примерно такой же, как вероятность туннелирования отдельно взятого электрона. «Однако уже через короткое время мне удалось убедиться, что ошибки в моих вычислениях не было», – написал он через несколько лет. Дальнейшие

подтверждения его правоты поступили от Пиппарда и Андерсона, который проверил вычисления Джозефсона и не нашел в них ошибок. С математикой все было в порядке. Тем не менее все трое не испытывали полной удовлетворенности достигнутым результатом.

Другие выводы из теории Джозефсона также вызывали беспокойство^[144]. Его уравнения предсказывали, что сила сверхтока туннельного перехода должна зависеть от относительных фаз квантовых волн по обе стороны барьера. Если эти фазы в двух сверхпроводниках каким-то образом слегка рассинхронизировались, это приводило к появлению сверхтока. Дальнейшая рассинхронизация фаз приводила к увеличению сверхтока – но лишь до определенного момента. Как только эти волны оказывались рассинхронизованы на четверть цикла (на 90 градусов), сверхток достигал максимальной величины. (Вообще говоря, уравнения Джозефсона предсказывали, что сверхток должен быть пропорционален синусу разности фаз.) Чтобы вывести волны из синхронизма, Джозефсон предполагал подавать электроны в систему путем подсоединения к такой «бутербродной» структуре внешнего источника тока. Если этот подаваемый ток не слишком велик, то, согласно уравнениям Джозефсона, он должен был переноситься в форме гипотетического сверхтока. Но, очевидно, таким способом можно было передавать лишь сверхток ограниченной величины. Если же попытаться передавать более сильный сверхток, дополнительные электроны уже не смогут образовывать пары. Пары самопроизвольно распадаются, создавая сопротивление и вырабатывая разность напряжений между двумя сверхпроводниками. Затем квантовые волны по обе стороны барьера рассинхронизируются, а их фазы начинают расходиться со скоростью, пропорциональной образовавшемуся напряжению. Поскольку сверхток зависит от синуса разности фаз, а разность фаз сейчас постепенно возрастает, то, согласно теории Джозефсона, постоянное напряжение на такой «бутербродной» структуре должно вырабатывать непостоянный, то есть переменный ток.

Это предсказание также не укладывалось в рамки здравого смысла. В обычном резисторе фиксированное напряжение должно создавать устойчивый поток электронов, то есть постоянный электрический ток (точно так же как вода должна равномерно перетекать из верхнего ведра, подвешенного на лестнице, в нижнее ведро). Однако, согласно

уравнениям Джозефсона, сверхток туннельного перехода не движется в каком-то определенном направлении: он колеблется (осциллирует) на месте с частотой, пропорциональной образовавшемуся напряжению. Чтобы понять, насколько странно все это выглядит, представьте, что это означало бы в нашем случае двух ведер с водой, соединенных между собой шлангом. Если бы вместо воды эти ведра были наполнены квантовой жидкостью Джозефсона, эта жидкость противоестественным образом перетекала бы по шлангу из одного ведра в другое, туда и обратно, туда и обратно... При этом объем жидкости в каждом из ведер оставался бы неизменным. Допустим, мы подняли бы верхнее ведро еще выше, чтобы повысить давление. Это, однако, не привело бы к появлению дополнительного количества жидкости в нижнем ведре: просто жидкость стала бы еще быстрее совершать свои перетоки туда и обратно. В наши дни это явление называется эффектом переменного тока Джозефсона.

Еще одной удивительной особенностью этого явления было то, что, согласно уравнениям Джозефсона, отношение величины напряжения к частоте колебаний должно представлять собой некую универсальную константу природы. Она всегда должна оставаться одной и той же, независимо от того, какова величина осциллирующего тока или из какого металла изготовлены сверхпроводники. Это отношение задается постоянной Планка (которая представляет собой меру всех квантовых явлений), поделенной на удвоенную величину заряда электрона (фундаментальная единица электрического заряда). Эти числа предполагали, что сверхток должен чрезвычайно быстро перемещаться туда и обратно по туннелю: лишь тысячной доли вольта на «бутербродной» структуре было бы достаточно для выработки переменного тока частотой 100 миллиардов герц (то есть тока, перемещающегося туда и обратно по туннелю со скоростью 100 миллиардов раз в секунду). Для сравнения: самые быстродействующие из современных домашних компьютеров работают на частоте, в 50 раз меньшей.

Предсказания, основанные на уравнениях Джозефсона, балансировали на грани абсурда. Как относились к ним в то время ученые? Ведущий специалист того времени по теории твердого тела сомневался в их правильности.

Джон Бардин к тому времени уже получил одну из двух своих Нобелевских премий. В 1956 г. он получил Нобелевскую премию по физике вместе с Уильямом Шекли и Уолтером Браттейном за изобретение транзистора. Спустя шестнадцать лет, в 1972 г., он получил еще одну Нобелевскую премию по физике, на этот раз за решение давней загадки сверхпроводимости (вместе с Леоном Купером и Робертом Шриффером), о чем уже было сказано выше.

Джон Бардин ознакомился со статьей молодого Джозефсона. Он был уверен в ложности выводов, сделанных Джозефсоном. В комментарии к статье, опубликованной в 1962 г., Бардин отвергал возможность гипотетического сверхтока, заявляя, что «образование пар не распространяется на барьер, поэтому никакого сверхтока быть не может».

Личное выяснение отношений между нобелевским лауреатом и аспирантом произошло в сентябре 1962 г., на конференции по физике низких температур, состоявшейся в Колледже королевы Марии (Лондон)^[145]. Еще до начала лекций Айвор Джайевер познакомил двух антагонистов. Вот как вспоминает об этой исторической встрече сам Айвор Джайевер.

Я познакомил Джозефсона и Бардина в Лондоне, когда в огромном холле собралось множество участников конференции. Джозефсон попытался объяснить свою теорию Бардину. Но Бардин лишь покачал головой и сказал: «У меня другое мнение на сей счет», поскольку к тому времени он уже всесторонне обдумал этот вопрос. Я присутствовал во время их краткого разговора. Затем, когда Бардин удалился, Джозефсон выглядел совершенно подавленным. Он не мог понять, почему Бардина считают выдающимся ученым.

Председатель заседания, посвященного туннельному эффекту, посчитал разумным выслушать аргументы обеих сторон. Присутствующие в зале предвкушали острую дискуссию. Бардин устроился в задних рядах. Джозефсон выступил первым. Он прочитал заранее подготовленную лекцию, объяснив, почему он считает, что туннелирование пар Купера представляет огромный научный интерес. Затем на подиум взошел Бардин. Когда он попытался доказать, что образование пар не может распространяться на барьер, Джозефсон

прервал его. Начался взаимный обмен аргументами, причем Джозефсону удалось с блеском парировать все возражения, касающиеся его новых идей. Впрочем, обмен мнениями между оппонентами ни разу не вышел за цивилизованные рамки, поскольку оба они были по своей природе вполне уравновешенными и рациональными людьми. Тем не менее у присутствующих складывалось впечатление, что Джозефсон понимает теорию сверхпроводимости даже лучше, чем ее творец.

Между Джозефсоном и Бардиным, с одной стороны, и присутствующими в зале, с другой стороны, дискуссий не возникло, поскольку никто из слушателей не чувствовал себя настолько компетентным в данной области, чтобы открыто занять позицию одной из сторон. Правда, один из присутствующих, выдающийся физик из Стэнфордского университета, сделал для себя четкий вывод, касающийся кое-чего другого: он покинул это заседание с твердой уверенностью, что его университет должен пригласить Джозефсона на работу.

Между тем творческий отпуск Фила Андерсона подошел к концу, и он вернулся в Bell Laboratories, чувствуя, что стал «самым горячим сторонником» Джозефсона. Вместе со своим коллегой Джоном Ровеллом, опытным экспериментатором, он решил проверить на практике существование сверхтока. Для этого им понадобилось буквально пару месяцев. Выполненные ими измерения^[146] продемонстрировали эффект постоянного тока Джозефсона – синусоидальную зависимость сверхтока от фазы, – а также особое поведение сверхтока в магнитном поле, предсказанное уравнениями Джозефсона. Несколькими месяцами позже другие ученые подтвердили эффект переменного тока Джозефсона. После проведения этих более чем убедительных экспериментов Бардин великодушно признал правоту Джозефсона.

В течение следующего года стало также очевидно, что описанные выше явления не ограничиваются лишь сверхпроводимостью. Ричард Фейнман, с его умением докапываться до сути вещей, нашел элементарное доказательство, которое продемонстрировало поистине универсальный характер, присущий эффектам Джозефсона. Он ознакомил с этим доказательством своих студентов-второкурсников в конце курса лекций, прочитанных им в Калифорнийском технологическом институте в 1962–1963 гг. Впоследствии этот курс

лекций был запечатлен для будущих поколений в знаменитой книге «Фейнмановские лекции по физике».

Доказательство, предложенное Фейнманом, показывает, что эффекты Джозефсона применимы к любой паре фазо-когерентных систем, соединенных между собой любым видом слабой связи^[147]. Когерентность в данном случае означает, что каждая система характеризуется одной квантовой волной. Говоря о *слабой* связи, мы имеем в виду, что волны лишь слабо перекрываются между собой, не оказывая друг на друга никакого иного влияния. Область перекрытия относится лишь к этой слабой связи и обеспечивает туннельный переход частиц через нее, соединяя таким образом две системы. Основываясь лишь на этих двух предположениях, Фейнман повторно вывел уравнения, полученные Джозефсоном. Если средняя энергия частиц по обе стороны такой связи окажется разной, то, согласно выводам Фейнмана, они будут осциллировать туда и обратно с частотой, определяемой разностью энергий, поделенной на постоянную Планка. Этот вывод не удавалось проверить экспериментальным путем в течение многих лет (исключение составляли сверхпроводники) по причине технических трудностей, возникающих при выполнении измерений. В 1997 г., после трех десятилетий безуспешных попыток, эффект Джозефсона наконец удалось воспроизвести в другой фазо-когерентной системе – сверхтекучем гелии^[148].

Сверхтекучий гелий представляет собой практическую реализацию гипотетической квантовой жидкости, которую мы рисовали в своем воображении, проводя мысленный эксперимент с ведрами, закрепленными на лестнице. Поведение сверхтекучего гелия кажется сверхъестественным. Он вытекает из своих контейнеров и может просачиваться сквозь бесконечно малые поры. Он не обладает вязкостью, поэтому он невероятно увертлив. Допустим, вы медленно вращаете контейнер, наполненный сверхтекучим гелием, вокруг собственной оси. Контейнер будет вращаться, а гелий останется неподвижным. Теперь зачерпните чашку этой сверхтекучей жидкости и держите ее вертикально, примерно в дюйме над контейнером. Вопреки закону тяготения, капля жидкости поднимется вверх по внутренней стенке чашки, перетечет через ее край и упадет обратно в контейнер. Как только она упадет в контейнер, из чашки начнет выбираться другая капля сверхтекучей жидкости. Подобно тому, что мы видим иногда в

научно-фантастических фильмах, сверхтекучая жидкость будет самостоятельно, капля за каплей, возвращаться в контейнер, пока чашка не окажется пустой.

Столь странное поведение – не что иное, как проявление квантового синхронизма. Все жидкости становятся чрезвычайно упорядоченными, если их охладить до очень низких температур. Обычно они превращаются в кристалл. Но два изотопа гелия, гелий-3 и гелий-4, никогда не затвердевают, по крайней мере при обычном давлении. Они остаются жидкостями вплоть до абсолютного нуля. Такая жидкость упорядочивается в несколько ином смысле: она подвергается бозе-эйнштейновской конденсации и превращается в своего рода квантовый хор. В этом случае бозонами являются атомы гелия-4 (или пары атомов гелия-3, аналогичные парам Купера). При очень низких температурах все атомы замедляют свои движения, что приводит к вытягиванию их квантовых волн, согласно упоминавшемуся выше принципу Гейзенберга. При достижении некой критической температуры эти волны перекрываются между собой и самопроизвольно переходят в одно и то же квантовое состояние, синхронизируя триллионы атомов в фазо-когерентную сверхтекучую жидкость.

В 1997 г. группа физиков из Калифорнийского университета в Беркли, возглавляемая Саймусом Дэвисом и Ричардом Паккардом, реализовала на практике мысленный эксперимент с ведрами^[149]. Они взяли две крошечные емкости, наполненные сверхтекучей жидкостью при разных давлениях, и соединили их слабой связью: ультратонкой гибкой мембраной, содержащей тысячи микропор. Согласно анализу, выполненному Фейнманом, такая сверхтекучая жидкость должна осциллировать сквозь поры туда и обратно с частотой, пропорциональной разности давлений (тогда как обычная жидкость должна просто перетекать со стороны высокого давления в сторону низкого давления). Такие эксперименты чрезвычайно сложно проводить. Частично это объясняется тем, что гелий не несет с собой заряд, а это означает, что его поток невозможно измерить, как электрический ток; частично это объясняется также тем, что поры в мембране должны быть микроскопически малыми – примерно в сто раз меньше, чем какая-нибудь бактерия.

К тому времени Дэвис и Паккард потратили почти десять лет на тщетные попытки обнаружить эти осцилляции, предсказанные математическим путем. Теперь они выработали новую стратегию и располагали новой группой аспирантов, готовых выполнить этот сложный эксперимент. Их план заключался в том, чтобы буквально на мгновение отклонить мембрану, сжав жидкость с одной стороны и создав переходную разность давлений. Затем, после возврата мембраны в состояние равновесия, они должны были отследить вибрации, наведенные в ней осциллирующей сверхтекучей жидкостью. Признаком эффекта переменного тока Джозефсона служили бы колебания затухающей частоты – свист, затихающий по мере возврата разности давлений к нулю. Но даже с помощью самых совершенных осциллографов аспирантам не удавалось обнаружить что-то такое, что хотя бы отдаленно напоминало эффект переменного тока Джозефсона. Они полагали, что виной всему является слишком высокий уровень шумов в используемой ими системе. После месяца бесплодных попыток они были на грани отчаяния. Кое-кто даже предлагал отказаться от продолжения эксперимента.

Паккард, который выступал в роли научного консультанта, предложил им отключить осциллограф, достать наушники и попытаться уловить вибрации *на слух*. Аспиранты весьма скептически отнеслись к этому предложению. «Они не хотели заниматься подобной ерундой. В свое оправдание они заявили, что в лаборатории нет наушников», вспоминал впоследствии Паккард. Поэтому Паккард лично отправился в ближайший магазин радиотоваров и приобрел там наушники за полтора доллара. Аспиранты сказали, что у этих наушников неподходящий штекер. Паккард снова отправился в магазин радиотоваров и приобрел там соответствующий переходник.

С явной неохотой аспирант Сергей Переверзев подсоединил к системе наушники и включил тумблер, запустив эксперимент в очередной раз. Затем произошло невероятное – настолько невероятное, что Сергей едва не свалился со стула: его уши сразу же уловили то, что не смог обнаружить осциллограф: тонкий писк с постепенно затухающей частотой, который напоминал звук падающей авиабомбы. Это было именно тем, что предсказывала теория!

За последние 40 лет для этих выдающихся проявлений квантового синхронизма был найден ряд полезных практических применений. На основе сверхпроводящих «бутербродов» Джозефсона (в наши дни их принято называть «переходами Джозефсона») были созданы сверхчувствительные датчики. Например, в приборе, который получил название SQUID (superconducting quantum interference device – сверхпроводящий квантовый интерферометр)^[150], используется повышенная чувствительность сверхтока к магнитному полю. С помощью SQUID можно измерять величины смещения, в тысячу раз меньшие атомного ядра, или магнитное поле, в 100 миллиардов раз более слабое, чем магнитное поле Земли. Сверхпроводящие квантовые интерферометры используются в астрономии для обнаружения сверхслабых излучений от дальних галактик; при неразрушающих испытаниях – для выявления мест скрытой коррозии под алюминиевой обшивкой самолетов; и в геофизике – для обнаружения нефтяных месторождений, залегающих глубоко под землей.

SQUID состоит из двух переходов Джозефсона, соединенных параллельно друг другу контуром из сверхпроводящего материала. (Чтобы представить, как это выглядит, поднимите руки над головой и соедините ладони. В этом случае два ваших локтя являются аналогами переходов Джозефсона, а кольцо, образованное вашими руками и плечами, является аналогом сверхпроводящего контура.) Принцип действия SQUID основан на том, что изменения магнитного поля изменяют разность фаз между квантовыми волнами по обе стороны двух переходов Джозефсона и, следовательно, изменяют сверхтоки, туннелируемые через эти переходы. Точно так же, как волны на пруду при наложении друг на друга могут либо усиливаться (в случае совпадения их вершин, то есть в случае совпадения фаз этих волн), либо взаимно гасить друг друга (если вершина одной волны совпадает с впадиной другой волны, то есть в случае действия этих волн в противофазе), способ взаимодействия между собой квантовых волн в двух «руках» SQUID зависит от их фаз и, следовательно, от величины магнитного потока, проходящего через контур. Именно за счет этого SQUID преобразует даже самые незначительные изменения магнитного потока во вполне ощутимые (и поддающиеся измерению) изменения тока и напряжения на этом устройстве, что дает возможность

обнаруживать и измерять даже сверхслабые электромагнитные сигналы.

Однако некоторые из наиболее впечатляющих применений SQUID относятся к формированию изображений в медицинской практике. С помощью массива из сотен SQUID-датчиков врачи могут точно определить местоположение опухолей в мозгу и аномальные электрические пути, ассоциирующиеся с аритмией сердца и очагами эпилепсии (локализованные источники некоторых типов эпилептических припадков). С помощью массива SQUID-датчиков можно отобразить очень слабые пространственные вибрации в магнитном поле, производимые человеческим телом. Результирующая контурная карта позволяет реконструировать с помощью компьютера ту область внутри ткани, которая вырабатывает такие сигналы. Такие процедуры совершенно неинвазивны (не требуют хирургического вмешательства), в отличие от обычной хирургии, применяемой с целью обследования. Несмотря на то что высокая стоимость многоканальных устройств формирования изображений не позволяет применять их достаточно широко, в отдаленной перспективе они могут существенно снизить стоимость медицинского обследования. Например, локализация очага эпилепсии с помощью SQUID занимает примерно три часа, тогда как применение альтернативного метода (вживление электродов в мозг человека) может занять целую неделю и обойтись дополнительно в 50 тысяч долларов.

Переходы Джозефсона рассматриваются также в качестве возможных компонентов нового поколения суперкомпьютеров^[151]. Одной из привлекательных черт таких компонентов является их высокое быстродействие: их коммутацию можно осуществлять на частотах порядка нескольких сотен миллиардов циклов в секунду. Однако, возможно, еще более важным обстоятельством является то, что транзисторы, созданные на основе переходов Джозефсона, вырабатывают в тысячи раз меньше тепла, чем обычные полупроводниковые приборы, а это означает возможность еще более плотной упаковки таких транзисторов в микросхеме без риска ее перегрева и выхода из строя. Плотная упаковка желательна в любом случае, поскольку более компактные компьютеры работают быстрее. Используя меньше проводов, они в меньшей степени зависят от скорости распространения сигнала по проводам, ограниченной

скоростью света, что в конечном счете определяет время, которое требуется сигналу, чтобы добраться из одной части электрической цепи в другую ее часть.

Соблазнившись столь привлекательными свойствами электронных приборов, созданных на основе перехода Джозефсона, компания IBM потратила 15 лет и 300 тысяч долларов на реализацию высокотехнологичного проекта, связанного с созданием сверхпроводящего компьютера^[152] – сверхбыстродействующей универсальной вычислительной машины, логические микросхемы и чипы памяти которой должны быть изготовлены из электронных коммутирующих устройств на основе перехода Джозефсона^[153]. Такие планы представлялись вполне естественными, поскольку некоторым типам переходов присущи два устойчивых состояния: одно при нулевом напряжении, другое – при положительном напряжении. Любой прибор с двумя устойчивыми состояниями является потенциальным кандидатом на использование его в качестве электронного коммутатора, соответствующего двоичной логике «включен-выключен» или 0–1, используемой в компьютерах. Аналогично, отсутствие или наличие определенного бита (двоичного разряда) оперативной памяти можно было бы кодировать как отсутствие или наличие напряжения в соответствующем элементе оперативной памяти Джозефсона.

Когда в 1983 г. IBM отказалась от реализации этого проекта, она ссылалась на трудности с разработкой быстродействующей микросхемы оперативной памяти. Руководство компании рассудило, что к моменту, когда мог бы быть создан их новый компьютер, его быстродействие окажется ненамного большим, чем быстродействие традиционных полупроводниковых приборов, и что оно не сможет знаменовать собой революционных перемен в подходе к разработке компьютеров. С тех пор Hitachi, NEC, Fujitsu и другие японские компании не покидала мысль о разработке компьютера с использованием электронных приборов, созданных на основе перехода Джозефсона.

По иронии судьбы, сам Джозефсон не принимал практически никакого участия в разработках, которые проистекали из его научного открытия. После того как в 1973 г. он получил в возрасте 33 лет Нобелевскую премию, он прекратил заниматься магистральными

направлениями в физике и переключился на изучение паранормальных явлений^[154]: гомеопатии^[155], экстрасенсорного восприятия, дистанционного наблюдения и даже возможности сгибания металлических ложек силой психической энергии. Он продолжает по сей день работать над этими вопросами. Он полагает, что они заслуживают гораздо большего внимания со стороны науки и не должны «заноситься в черные списки», как, по его мнению, происходит сегодня.

Мои студенты посмеиваются, когда я рассказываю им о метаморфозе, случившейся с Джозефсоном. Такую же реакцию я наблюдаю и со стороны своих коллег: обычно они покачивают головой и сокрушаются, полагая, что он просто не понимает, что делает. Кое-кто возмущается, полагая, что Джозефсон освящает своим высоким авторитетом сомнительную деятельность, облюбованную всевозможными шарлатанами и их легковерными поклонниками. Недавно это неприятие и даже враждебность со стороны ученых стали достоянием широкой общественности благодаря скандалу, невольно спровоцированному самим Джозефсоном.

Королевская почтовая служба Британии выпустила 2 октября 2001 г. специальный набор почтовых марок к столетнему юбилею Нобелевской премии^[156]. Этот набор почтовых марок сопровождался буклетом, в котором кому-либо из британских лауреатов в каждой из шести категорий Нобелевской премии – физика, химия, медицина, мир, литература и экономика – предлагалось написать небольшую статью с изложением собственных мыслей по поводу этой премии. В качестве лауреата Нобелевской премии по физике, которому было предложено написать такую статью, выбрали Джозефсона. И вот что он написал.

ФИЗИКА И НОБЕЛЕВСКИЕ ПРЕМИИ

***Брайан Джозефсон, физический факультет
Кембриджского университета***

Физики пытаются свести всю сложность и многообразие природы к какой-то одной универсальной теории. Самая удачная и универсальная из этих теорий, квантовая теория,

ассоциируется с несколькими Нобелевскими премиями, например с премиями, которые получили Дирак и Гейзенберг. Первые попытки Макса Планка столетие тому назад объяснить точную величину энергии, испускаемой нагретыми телами, инициировали процесс представления в математическом виде таинственного, ускользающего мира, содержащего «сверхъестественные взаимодействия на расстоянии» – однако вполне реального, чтобы привести нас к таким изобретениям, как лазер и транзистор.

Квантовая теория в наши дни плодотворно сотрудничает с теориями информации и вычислений. Эти научные достижения могут привести к объяснению процессов, все еще не поддающихся объяснению в рамках традиционной науки, таких как телепатия, – области исследований, в которой Британия занимает одно из ведущих мест.

Телепатия? Которую удастся когда-нибудь объяснить в рамках квантовой механики? Реакция физиков на эту статью Джозефсона была быстрой, предсказуемой и аллергической. «Полная чепуха, – сказал Дэвид Дойч, специалист по квантовой физике из Оксфордского университета. – Телепатии просто не существует. Королевская почтовая служба Британии дала одурачить себя, поддержав совершенно бредовые идеи». «Хочу выразить свой крайний скептицизм, – сказал Герберт Крёмер из Калифорнийского университета в Санта-Барбаре, сам лауреат Нобелевской премии. – Лишь очень немногие из нас верят в телепатию. Не верим мы и в то, что физика может объяснить телепатию. Мне кажется, напрасно ваша Королевская почтовая служба впуталась в эту историю. Если бы почтовые службы США сделали нечто подобное, многие из нас, несомненно, возмутились бы». Королевская почтовая служба пыталась вяло обороняться. «Проблема в том, что в Британии есть лишь пара лауреатов Нобелевской премии по физике. Поэтому выбор у нас был невелик, и мы решили обратиться к Джозефсону», – сказал представитель Королевской почтовой службы.

Высокомерие, проявленное учеными-физиками, представляется совершенно неоправданным. Джозефсон был и остается великим ученым. Когда я знакомился с его высказываниями о паранормальных явлениях, они не казались мне такими уж безапелляционными и абсурдными. Его интерес к этим явлениям кажется мне совершенно

искренним. Ему хотелось бы, чтобы ученые повнимательнее присмотрелись к ним. Квантовая теория сама по себе достаточно странна – почти так же невероятна, как вещи, о которых он сейчас рассуждает. Сто лет тому назад никто не поверил бы, что миллиарды электронов могут синхронизироваться и просачиваться сквозь непроницаемые барьеры.

Это вовсе не значит, что я согласен с Джозефсоном. Трудно согласиться с его убежденностью в том, что «некоторым людям удастся сгибать металлические предметы в ситуациях, когда они не находятся в физическом контакте с этими предметами». Как бы то ни было, когда я размышляю над тем, что произошло с ним, меня охватывает грусть. Даже по прошествии 30 лет с тех пор, как Джозефсон ушел из «большой физики», мне кажется, что многим из нас, физиков, по-прежнему очень его не хватает.

Глава 6. Мосты

Это было время скрытых параллелей, время жизни в неосязаемом синхронизме. На календаре – 1962 г. Брайан Джозефсон начинал учебу в аспирантуре. Артур Уинфри поступал в колледж. Мишель Сиффре дрожал от холода в пещере глубоко под землей, подвергая свой организм малоизученному влиянию «жизни вне времени». Норберт Винер разъезжал по коридорам МТИ на своем уницикле, подкрепляясь арахисом, покуривая свою неизменную сигару и пытаясь отыскать аудиторию, в которой ему предстояло прочитать свою очередную лекцию^[157]. Вот уже несколько месяцев Лев Ландау лежал в одной из московских больниц, отчаянно цепляясь за жизнь после ужасной автокатастрофы. Все они либо уже сделали, либо собирались сделать серьезный вклад в науку о синхронизме. Тем не менее они работали независимо друг от друга. Лишь десятилетия спустя мы начали осознавать истинную глубину связей между ними, а также между ними и Кристианом Гюйгенсом, который ровно за триста лет до описываемого нами времени, постоянно находясь у себя дома на протяжении нескольких дней, наблюдал синхронные колебания маятников своих настольных часов. Сейчас мы рассматриваем работу этих ученых как часть некоего сложного целого. Мостом, который связывал воедино отдельные составляющие этого целого, служила математика.

Первый из замеченных учеными «математических мостов» соединял хорошо знакомый мир нашего повседневного опыта со странным миром квантов^[158]. В 1968 г. Д. Е. Маккамбер из Bell Laboratories и У. С. Стюарт из RCA Laboratories, независимо друг от друга, изыскивали способы, с помощью которых можно анализировать электрические характеристики перехода Джозефсона, как если бы он был обычным элементом электрической цепи. Точно так же как резистор подчиняется закону Ома (ток через резистор пропорционален напряжению на нем), переход Джозефсона подчиняется собственному закону, определяющему связь между током и напряжением. Этот закон формулируется так: когда ток, поступающий от внешнего источника, проходит через переход Джозефсона, он разделяется и движется по трем отдельным каналам, каждый из которых характеризуется

собственным механизмом проводимости. Часть этого тока переносится куперовскими парами электронов и представляет собой упоминавшийся мною в предыдущей главе сверхток, который, проходя сквозь изолирующий барьер, не встречает на своем пути никакого сопротивления; остальные части тока переносятся обычными, не спаренными электронами и так называемым «током смещения» (форма проводимости, связанная с изменяющимся напряжением на переходе).

Принимая во внимание все три пути прохождения тока, Маккамбер и Стюарт выяснили, что динамические характеристики перехода Джозефсона наиболее естественным путем выражаются через изменение его фазы, меру того, насколько рассинхронизированными оказываются квантовые волны при переходе с одной стороны барьера на другую. Уже в этом заключалась новизна: в обычных законах электричества нет даже малейших следов чего-нибудь такого, что носит на себе отпечаток квантовой механики. Присмотревшись повнимательнее, Маккамбер и Стюарт заметили, что уравнение для электрических осцилляций представляло собой слегка замаскировавшегося старого знакомого: уравнение, известное любому студенту-первокурснику.

Это было уравнение, описывающее колебания маятника.

Это совпадение было из тех, которые вызывают у математика благоговейный трепет. «Ты испытываешь удивительное чувство, — говорил Эйнштейн, — когда выявляешь единство целого комплекса явлений, которые при непосредственном рассмотрении кажутся совершенно не связанными между собой». На первый взгляд, маятники Гюйгенса и переходы Джозефсона кажутся полными противоположностями. Маятники привычны и понятны каждому из нас, у них, если можно так выразиться, «человеческие» размеры; маятник знаком нам так же хорошо, как детские качели или как дедушкины настенные часы. Сверхпроводящие переходы Джозефсона так же непонятны большинству из нас, как пришельцы из иных миров. Нам непривычно в них буквально все: их размеры, сопоставимые с размерами какой-нибудь бактерии, непостижимая частота электрических колебаний в этих переходах (в 100 миллиардов раз выше частоты сердцебиения), сверхъестественное проникновение электронов сквозь непроницаемые барьеры, подобно привидениям, свободно

проходящим сквозь стены. Между тем указанные различия не играют принципиальной роли. Главное же заключается в схожести динамических характеристик переходов Джозефсона и маятников. Картины их поведения во времени идентичны: две вариации на одну и ту же алгебраическую тему.

Узнав старого приятеля мы, к огромному своему сожалению, вынуждены констатировать, что в этом случае нам снова придется столкнуться с неизбежной трудностью: уравнения, описывающие колебания маятника, являются *нелинейными* уравнениями^[159].

В частности, изгибающий момент под действием силы тяжести, оказывающий воздействие на маятник, является нелинейной функцией его угла. Понять, почему это так, будет легче, если вы представите, насколько трудно держать гирию в вытянутой руке, расположенной под теми или иными углами по отношению к телу: рука опущена вертикально вниз, поднята на уровень плеч, поднята прямо над головой (вертикально вверх) и т. д. (В этом случае важно понимать разницу между весом и изгибающим моментом. В каком бы положении ни находилась гирия, сила тяжести остается одной и той же: она тянет вниз с силой, определяемой лишь весом гири. Но при некоторых значениях угла сила тяжести также *изгибает* вашу руку, выворачивая ее вниз. Изгибающий момент определяет величину этого эффекта изгибаения.) Когда ваша рука опущена вертикально вниз, изгибающий момент полностью отсутствует, то есть ваша рука не изгибается. Если вы несколько отведете вытянутую руку в сторону, создав небольшой угол между вашим телом и вытянутой рукой, сила тяжести начнет оказывать на вашу руку небольшой изгибающий момент. Поначалу этот изгибающий момент увеличивается почти пропорционально углу. При отклонении руки на 2 градуса от вертикали изгибающий момент увеличивается практически в два раза по сравнению с изгибающим моментом при отклонении, равном 1 градусу. Считается, что при столь малых углах отклонения изгибающий момент является линейной функцией угла: удваивается угол, удваивается изгибающий момент. В этом случае график зависимости изгибающего момента от угла отклонения представляет собой практически прямую линию (отсюда термин *линейная* применительно к функции).

Однако эта приблизительная линейность нарушается при увеличении угла отклонения. Изгибающий момент увеличивается

медленнее, чем можно было бы ожидать: значения изгибающего момента оказываются ниже прямолинейной экстраполяции, которой описывалась функция изгибающего момента при малых значениях угла отклонения. Максимальное значение изгибающего момента достигается, когда ваша рука вытягивается параллельно полу, под углом 90 градусов к вашему телу. Очень нелегко удерживать в таком положении гирю в течение долгого времени. Если поднять руку еще выше, над плечом, изгибающий момент начнет уменьшаться и достигнет нуля, когда ваша рука с гирей окажется вытянута вертикально вверх. Таким образом, график зависимости изгибающего момента от угла отклонения представляет собой что-то наподобие дуги: он наклоняется вниз. Этот график определенно носит нелинейный характер. На самом деле он представляет собой дугу синусоиды.

Теперь мы замечаем связь с переходом Джозефсона. Эта синусоидальная функция является точно такой же, с какой мы встречались ранее в эффекте постоянного тока Джозефсона, где сверхток демонстрировал пропорциональную зависимость от синуса фазы на переходе Джозефсона. Аналогия в данном случае заключается в том, что фаза на переходе Джозефсона ведет себя подобно углу отклонения маятника. Оказывается, что у всех остальных членов уравнения также имеются свои аналоги. Поток обычных электронов соответствует торможению маятника, вызываемому силой трения. Масса маятника подобна емкости перехода. А изгибающий момент, прикладываемый к маятнику, подобен внешнему току, управляющему переходом.

Такие механические аналогии всегда ценились в науке. Они делали незнакомое знакомым. В данном случае аналогия позволяет нам перенести наши интуитивные представления о маятниках на переходы Джозефсона. Например, когда переход Джозефсона пребывает в устойчивом состоянии, фаза постоянна. В этом случае динамические процессы отсутствуют, как отсутствует и предмет для изучения; переход Джозефсона ведет себя подобно идеальному сверхпроводнику, через который протекает только сверхток. Механическим аналогом перехода Джозефсона в устойчивом состоянии может служить маятник, изгибаемый в сторону постоянным по силе изгибающим моментом, пребывающий в неподвижности и отклоненный на угол, ниже горизонтали. Силы трения и инерции отсутствуют по причине

отсутствия движения. Прикладываемый изгибающий момент компенсируется лишь силой тяжести. Этот простой случай имеет место лишь тогда, когда мы пропускаем через переход постоянный ток, меньший некой критической величины.

Гораздо больший интерес представляет ситуация, когда мы пропускаем через переход ток, превышающий критическую величину. В этом случае фаза начинает внезапно меняться во времени достаточно сложным образом. Как только начинается изменение фазы, на переходе возникает электрическое напряжение. Затем, вследствие эффекта переменного тока Джозефсона, сверхток начинает осциллировать туда и обратно между сверхпроводниками. Тем временем электрическое напряжение, возникшее на переходе, также вызывает прохождение через этот резисторный канал обычных, неспаренных электронов, тогда как ток смещения также пытается отвоевать свою долю совокупного тока. В результате активизируются все три канала. Их взаимодействие порождает запутанную картину снижений и нарастаний тока этих трех составляющих. Первопричиной всей этой сложности является нелинейная динамика фазы на переходе Джозефсона. Если попытаться воспользоваться механической аналогией, то мы должны нарисовать в своем воображении маятник, подвешенный на оси и вращающийся вокруг нее с переменной скоростью, застывая на мгновение в своем верхнем положении, ускоряясь в нижнем положении и в течение всего этого времени компенсируя прикладываемый изгибающий момент с переменными сочетаниями силы трения, силы тяжести и силы инерции.

Если же мы еще больше усложним ситуацию и предоставим возможность самому изгибающему моменту изменяться во времени, подобно вращению барабана стиральной машины то в одну, то в другую сторону, вращение нашего маятника может стать хаотическим, он может начать вращаться то в ту, то в другую сторону, причем эти перемены направления вращения могут стать бессистемными. Подтверждение возможности возникновения соответствующих электрических «спазмов» в переходе Джозефсона оказалось одним из первых экспериментальных триумфов в теории хаоса. До того времени физики привычно рассматривали маятник как символ точной и размеренной работы часового механизма. Внезапно он оказался парадигмой хаоса^[160].

Принципиальным моментом является то, что динамика вращающегося маятника и перехода Джозефсона описывается одним и тем же уравнением и что это уравнение является нелинейным. Как подчеркивалось ранее, нелинейные задачи отличаются своей многогранностью, максимальной приближенностью к реальности и чрезвычайной сложностью. Нелинейные задачи представляют собой не только передний край математики, но и ее дальние горизонты. Важные достижения теории хаоса, которые пришлось на 1970-е и 1980-е годы (подробнее об этих достижениях рассказывается в следующей главе), расширили наши представления о динамике вращающегося маятника и перехода Джозефсона и позволили нам уяснить ее.

Связь между маятниками и переходами Джозефсона – лишь один из многих выдающихся мостов на ландшафте синхронизма. Я и мои коллеги недавно натолкнулись на еще один такой мост – возможно, еще более неожиданный. Этот мост связывает популяции биологических осцилляторов с динамикой переходов Джозефсона, соединенных между собой в большие массивы. Смысл этой связи остается для нас загадкой; тем не менее это, по-видимому, важная связь, поскольку она соединяет между собой два центральных предмета науки. Один из этих предметов касается древних наблюдений синхронизма в живой природе: деревьев, усеянных светлячками, в Таиланде и Малайзии, ночных хоров сверчков, суточных циклов растений и животных, задаваемых солнцем. Другой предмет касается изучения синхронизма в неживой природе, начиная с маятниковых часов Гюйгенса, симпатизирующих друг другу, и заканчивая (после длительного перерыва длиной в сотни лет) изобретением замечательных осцилляторов XX столетия: электрических генераторов и систем фазовой автоподстройки частоты, лазеров и транзисторов, а в последнее время – сверхпроводящих переходов Джозефсона. Несмотря на то что ученые уже давно догадались о склонности групп живых и неживых осцилляторов к самопроизвольной взаимной синхронизации, лишь в 1996 г. мы осознали, насколько могут быть схожи механизмы, лежащие в их основе. Оказалось, что эта схожесть имеет «семейственный» характер – признак одной и той же математической крови.

Эта связь была выявлена в ходе изучения массивов переходов Джозефсона^[161] – архитектуры, которая соответствует следующему

уровню в иерархии синхронизма. Мы уже обсуждали с вами низший, субатомарный уровень – тот, который рассматривал сам Джозефсон: триллионы синхронизированных куперовских пар электронов, когерентно совершающих перемещения туда и обратно через переход Джозефсона и создающих сверхток, который осциллирует сквозь изоляционный барьер перехода. Следующий этап заключается в том, чтобы объединить между собой многие из этих электронных осцилляторов в некий массив и исследовать синхронизацию между ними. Если воспользоваться одной из наших предыдущих аналогий, то куперовские пары электронов подобны отдельным скрипачам в оркестре, координирующим свои действия с целью образования хорошо сыгранной группы струнных инструментов – перехода Джозефсона. Затем несколько групп инструментов (струнные, духовые, ударные) объединяются в еще больший ансамбль – массив переходов Джозефсона. Однако в данном случае «дирижер» не предусматривается: предполагается, что массив переходов Джозефсона будет синхронизироваться самостоятельно.

Задача заключается в том, чтобы предсказать групповое поведение переходов Джозефсона с учетом того, что нам известно об индивидуальном поведении таких переходов. Этот вопрос очень важен, поскольку массивы переходов Джозефсона используются во многих современных технологиях, начиная с устройств сканирования головного мозга и других видов медицинского оборудования, применяемого для формирования изображений, и заканчивая детекторами электромагнитных излучений на длинах волн, представляющих интерес для специалистов по радиоастрономии и мониторингу загрязнений атмосферы. Так называемый стандартный вольт США (официальный стандарт напряжения, который позволяет лабораториям разных стран мира сравнивать получаемые ими результаты) поддерживается Национальным институтом стандартов и технологий США, использующим массив из 19 тысяч переходов Джозефсона, последовательно соединенных между собой. Разработчикам электронных схем хотелось бы уметь предсказывать оптимальную компоновку для массива, выполняющего какую-то определенную функцию, однако из-за «неподатливости» нелинейных уравнений, описывающих те или иные варианты массива, им

приходится полагаться либо на интуицию, либо на хорошо известный метод проб и ошибок.

Теоретики пытаются предложить определенный метод для сведения таких уравнений к линейному виду за счет существенных упрощений. Этот прокрустов подход время от времени проливает свет на большинство симметричных видов коллективного поведения, например идеально синхронизированное состояние, при котором все переходы осциллируют строго синфазно и синхронно. Но в качестве исследовательского инструмента линейная теория совершенно непригодна. Она слишком близорука, чтобы дать нам представление об огромном множестве способов, с помощью которых может произойти самоорганизация массива.

Такой степени сложности задачи соответствует лишь нелинейная динамика, с ее акцентом на геометрию, визуализацию и глобальное мышление. Разумеется, рассмотреть все возможности одновременно, исследовать динамику сотен нелинейных уравнений, соответствующую математическому потоку в абстрактном n -мерном пространстве (где n может достигать нескольких сотен) – чрезвычайно сложная задача. Но примерно в 1990 г., принимая во внимание успехи, достигнутые теорией хаоса, специалисты по нелинейным проблемам были готовы к тому, чтобы взяться за решение этой задачи. Теоретики испытывали чувство уверенности и энтузиазм. К тому времени специалисты по математической биологии уже погружались в многомерные пространства, продвигаясь там буквально наощупь, пытаясь как можно лучше понять свои идеализированные модели сообществ светлячков, нейронов и клеток сердца. Это было новым подходом, который Курт Визенфельд, молодой физик из Технологического института штата Джорджия, хотел применить для анализа массивов Джозефсона.

К 1990 г. Курт Визенфельд уже сделал себе имя в науке. В 1987 г. он стал одним из авторов статьи, которую можно рассматривать как введение в концепцию «самоорганизующегося критического состояния»^[162] – амбициозной теории, которая обещала объяснить, почему столь многие сложные системы, как кажется, постоянно балансируют на грани катастрофы. Эту теорию впоследствии применили для объяснения особых статистических картин, которые наблюдались в случаях массового вымирания, землетрясений, лесных

пожаров и других сложных процессов, в ходе которых в системе распространяются эффекты домино, обычно вызывая небольшие каскадные последовательности событий, а в отдельных случаях – катастрофические последствия. Это была смелая работа, не лишенная ряда противоречий. Большинство физиков считали ее важным достижением в нашем понимании сложных систем, хотя некоторые скептики восприняли ее лишь как плод неумеренной фантазии авторов. Один шутник назвал ее «самовозвеличивающей тривиальностью»^[163].

В описываемое нами время Курт Визенфельд был научным сотрудником с ученой степенью в Брукхейвенской национальной лаборатории. Он занимал должность младшего профессора и подумывал над тем, чтобы приступить к самостоятельной разработке какой-то темы. Его уже давно увлекали связанные нелинейные осцилляторы; еще в начале своей работы над самоорганизующимся критическим состоянием он проявлял интерес к спаренным маятникам. Поэтому уравнения, описывающие массивы переходов Джозефсона, не были для него большой новостью: он чувствовал себя вполне комфортно с ними, поскольку они напоминали столь привычные ему задачи с маятником. Его приход в эту область начался с сотрудничества с Питером Хэдли, аспирантом Стэнфордского университета, и его консультантом Маком Бисли, специалистом по сверхпроводимости, который в то время уже пришел к выводу, что в нелинейной динамике есть многое, что можно было бы использовать для анализа массивов Джозефсона. Реализация их совместного проекта началась после того, как они заручились поддержкой Визенфельда. Это была высокопрофессиональная команда исследователей. Питер Хэдли был поистине неутомимым тружеником и изобретательным специалистом, поднатворившим в вопросах компьютерного моделирования. Долговязый блондин Бисли отличался большой сообразительностью, практическим опытом и, что немаловажно, любил цитировать всевозможные афоризмы. Курт был общепризнанным авторитетом в области нелинейной динамики – на то время, пожалуй, одним из лучших специалистов в этой области.

Они решили сосредоточиться на «последовательных массивах», то есть массивах, в которых переходы Джозефсона соединены последовательно друг с другом. Архитектура такого рода была наиболее податлива с математической точки зрения; к тому же она

представляла технологический интерес для применения в системах генерирования излучения. Несмотря на то что отдельно взятый переход Джозефсона вырабатывает излучение, мощность которого составляет примерно один микроватт – что совершенно недостаточно с практической точки зрения, – вырабатываемую мощность излучения можно существенно увеличить, соединив соответствующим образом множество переходов Джозефсона. Точно так же как синхронно хлопающая в ладони публика в зале производит гораздо больший шум, чем любой отдельно взятый зритель, синхронизированный массив переходов Джозефсона оказывается гораздо более мощным источником излучения, чем отдельно взятый переход. Если бы, например, вы могли придумать способ заставить синфазно осциллировать тысячу переходов Джозефсона, то мощность, подаваемая на какое-нибудь другое устройство – «нагрузку», подключенную параллельно такому массиву переходов, – увеличилась бы в миллион раз. (Совокупная мощность пропорциональна квадрату количества переходов.) Проблема, однако, заключается в том, как синхронизировать такой массив переходов. Никто не знает, какой должна быть оптимальная архитектура соответствующей цепи и какой вид нагрузки является самым подходящим для этого. Вообще говоря, на самом деле никто не знает, почему такие массивы должны – или вообще не должны – синхронизироваться. Это было фундаментальной проблемой для данной области знаний в целом.

Курту и его сотрудникам было известно, что важнейшую роль играют электрические характеристики нагрузки – то, как она препятствует прохождению электрического тока. (В случае полного отсутствия нагрузки переходы никогда не удалось бы синхронизировать; они даже не смогли бы ощущать электрические осцилляции друг друга.) Простейший вид нагрузки должен вести себя подобно резистору, пропуская через себя ток, пропорциональный напряжению на нагрузке. Он может вести себя подобно конденсатору (который блокирует постоянный ток, но пропускает переменный ток) или катушке индуктивности (которая обладает характеристиками, обратными конденсатору: пропускает постоянный ток, но оказывает сопротивление переменному току высокой частоты). Вообще говоря, нагрузка может представлять собой то или иное сочетание трех

указанных видов сопротивления с разными весовыми коэффициентами – одним словом, выбрать было из чего.

Моделируя десятки разных вариантов на компьютере, исследователи определили характеристики устойчивости синхронизированного состояния^[164] и выяснили, какие нагрузки лучше всего синхронизируют такой массив. По ходу дела они натолкнулись на факт, который изначально не являлся предметом их исследований; этот факт невозможно было не заметить. Когда такие массивы не были синхронизированы, они обычно упорядочивали свое поведение несколько иначе: все переходы осциллировали с одним и тем же периодом, но при этом были предельно рассинхронизированы между собой – так, словно они не хотели иметь ничего общего друг с другом. Исследователи назвали этот необычный режим организации состоянием антифазы; впоследствии для него было придумано другое название: разнесенное состояние (splay state).

В случае двух переходов это разнесенное состояние похоже на то, что наблюдал Гюйгенс, когда его часы пребывали во «взаимной симпатии»: маятники раскачивались с одной и той же частотой, но разность их фаз составляла половину цикла. Когда один маятник говорил *тик*, другой говорил *так*. В случае, когда количество переходов больше двух, разнесенное состояние делит цикл на равные части^[165]. В случае 10 переходов они будут совершать идентичные движения, разнесенные между собой на десятую долю цикла. Все они движутся одинаково: одинаково совершают колебательные движения, но с определенным сдвигом по фазе друг относительно друга. Так и тянет представить это групповое поведение как изысканную хореографию: по массиву пробегает одна волна за другой. Однако такая аналогия вводила бы нас в заблуждение. Эта «волна» вовсе не обязательно пробегает строго последовательно по всему массиву переходов: они могут совершать свои «движения» в любом порядке. Если бы вместо электрических колебаний речь шла о механических колебаниях, то разнесенное состояние напоминало бы шеренгу танцующих роботов, причем все они исполняют одну и ту же последовательность колебательных движений, но упорядоченных в пространстве случайным образом: один робот совершает какое-то определенное движение, затем в дальнем конце шеренги другой робот совершает то же самое движение, затем в каком-то другом месте

шеренги третий робот выполняет то же самое движение и т. д. Разрешены любые комбинации. Роботы могут танцевать в любом порядке, причем каждый из этих вариантов является допустимым разнесенным состоянием. Эти варианты отличаются друг от друга лишь упорядоченностью в пространстве, но не совершаемыми движениями или интервалами между действиями.

Чем больше массив, тем больше количество возможных перестановок, причем это количество растет очень быстро – даже быстрее, чем при нарастании по экспоненциальному закону. В случае 5 переходов существует 24 разнесенных состояния. В случае 10 переходов – 362 880 разнесенных состояний. Визенфельд полагал, что это лавинообразное нарастание может служить основой для разработки многообещающей архитектуры оперативной памяти для будущего компьютера Джозефсона. Каждая память может храниться как особое разнесенное состояние. Вместо статического сочетания «нулей» и «единиц» память кодировалась бы как некая динамическая картина, хоровод электрических состояний в массиве. (Специалисты по нейронным сетям полагают, что примерно так функционирует наша память на запахи; в этом случае осцилляторами являются нейроны в обонятельной луковице головного мозга, а разные шаблоны возбуждения кодируют разные запахи.)

Используя буквально несколько переходов Джозефсона, вы можете создать гигантскую, сколь угодно большую память. Есть лишь одна проблема: чтобы такая схема заработала, каждое состояние должно быть устойчивым, чтобы исключить влияние случайных шумов в электронных схемах. Таким образом, главный вопрос заключается в том, устойчивы ли разнесенные состояния? И как эта устойчивость зависит от нагрузки? В то время Визенфельду не удалось решить эту задачу математически. Более того, он осознал, что ему все еще не хватает глобального понимания. Какие еще факторы, помимо синхронизированных состояний и разнесенных состояний, могут оказывать влияние на соответствующие процессы? И каково совместное влияние всех этих факторов? Визенфельд поставил перед собой амбициозную цель: уяснить все возможные виды коллективного поведения для любого количества переходов, соединенных последовательно – и параллельно любому виду нагрузки.

Когда я познакомился с Визенфельдом в 1990 г. на одной из конференций в Техасе, между нами сразу же установилось полное взаимопонимание. Мы были людьми примерно одинакового возраста, в наших биографиях было много общего, у нас были примерно одинаковые научные интересы. К тому же оказалось, что вместе мы много смеемся. После того как он рассказал мне о своем видении проблемы массивов Джозефсона, я полагал, что нам было бы интересно работать над этой проблемой вместе. Курт, который, возможно, чувствовал свою личную ответственность за то, что увлек меня этой работой, напомнил мне о ее возможных технологических применениях (это нужно было знать на тот случай, если кто-нибудь спросит у меня, почему я выбрал именно это направление исследований, а не какое-то другое). Но, честно говоря, технологические применения не были реальной причиной того, почему эти переходы так интересовали меня и Курта. Главной причиной было чистое любопытство, а также предвкушаемое нами удовольствие от создания математического описания восхитительной системы связанных осцилляторов.

Особенно заманчивыми казались нам сами уравнения. Каждый переход был связан со всеми остальными переходами, причем все эти связи были идентичны. Несмотря на то что физически они были соединены между собой последовательно, подобно звеньям длинной цепи, уравнения сделали их похожими на систему, все элементы которой соединены между собой по принципу «каждый с каждым». Это удивило и восхитило меня. Я был уже знаком с этим странным сверхсимметричным видом соединения по моей предыдущей работе над моделью клеток сердца, предложенной Пескином, а также моделями биологических осцилляторов Уинфри и Курамото. Тогда соединение по принципу «каждый с каждым» было выбрано нами исключительно из соображений целесообразности. Никто не знал, как в действительности должны выглядеть уравнения, поэтому нам представлялось вполне естественным начать с простейшего случая. Разумеется, это была, так сказать, карикатура: реальные клетки сердца и светлячки взаимодействуют сильнее со своими соседями, чем с теми, кто находится вдалеке.

Поэтому когда точно такое же соединение по принципу «каждый с каждым» появилось в уравнениях, описывающих массив Джозефсона, я понимающе ухмыльнулся. Вот она, стандартная аппроксимация. «Нет-

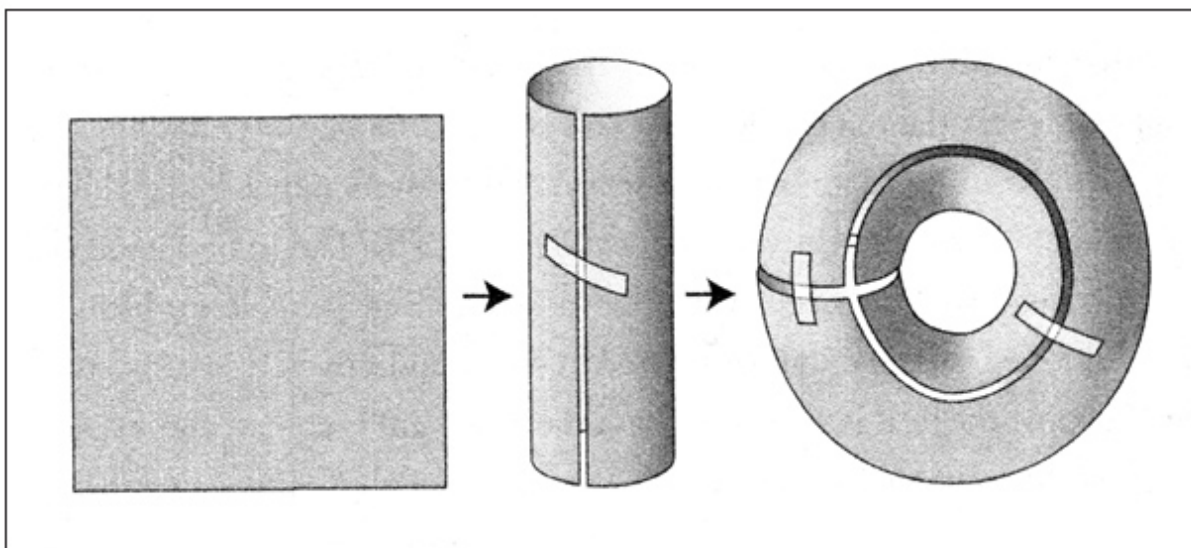
нет, – сказал мне Курт, – именно так все обстоит в действительности: в данном случае соединение по принципу “каждый с каждым” является не аппроксимацией, а реальностью». Такой принцип соединения проистекает непосредственно из уравнений цепи^[166] и является следствием того факта, что в случае, когда переходы соединены между собой последовательно, через каждый из них протекает одинаковый ток, подобно ведрам воды, которые передают по цепочке люди на пожаре. Он обещал отправить мне по завершении конференции подробное письмо с описанием процессов, происходящих в такой цепи.

Еще до того как я вскрыл конверт, по почерку, каким был написан мой адрес на конверте, я понял, что работа с Куртом доставит мне подлинное удовольствие. Курт отличался безупречным каллиграфическим почерком: каждая буква выглядела аккуратно и даже элегантно, точно по своим очертаниям и в то же время прихотливо. Принимая в течение многих лет экзамены у аспирантов, я научился делать определенные выводы о характере человека на основе особенностей его почерка и, должен сказать, что мой метод анализа почерка, пусть и непрофессиональный, ни разу не подвел меня: в тех случаях, когда аспирант выводил маленькие аккуратные буквы, что-то наподобие печатного шрифта, я почти не сомневался в высоком уровне его знаний. Это правило, между прочим, ничего не говорит о корявом почерке. Знания аспиранта, который царапает свои ответы как курица лапой, могут быть либо весьма посредственными, либо блестящими, либо какими угодно в этом диапазоне. Но каллиграфический почерк... Нет, такой почерк – всегда хороший признак.

Курт предложил начать с самого простого, идеализированного варианта: двух идентичных переходов Джозефсона, соединенных последовательно и управляемых постоянным током. Допустим, нагрузкой является резистор – опять-таки, самый простой вариант, – а вместо обычных трех каналов, по которым проходит ток в каждом из переходов Джозефсона, действуют лишь два канала: один для сверхтока, а другой для обычного тока. (В случае определенных видов переходов третьим каналом – по которому проходит ток смещения – можно пренебречь, что будет вполне допустимой аппроксимацией.)

Преимущество этих упрощений заключалось в том, что это позволяло нам визуализировать динамику системы, создавая обычные двумерные представления. В любой данный момент каждый переход

характеризовался вполне определенной фазой — точно так же, как маятник, сфотографированный в какой-то момент времени, находится под определенным углом к вертикали. Представляя в графическом виде одну фазу по горизонтальной оси, а другую — по вертикальной, мы можем изобразить все возможные сочетания в виде соответствующих точек в некоем квадрате, стороны которого соответствуют 360 градусам возможных фаз. Этот квадрат называется «пространством состояний» системы. Он обладает замечательным геометрическим свойством, навевающим воспоминания о старых видеоиграх, в которых космический корабль, уходящий за правый край экрана, чудесным образом появляется из-за левой границы, а космический корабль, ударяющийся о нижний край экрана, возникает наверху. Пространство состояний для этого массива Джозефсона должно было обладать таким же свойством, поскольку фаза, составляющая 360 градусов, физически неотличима от фазы, равной 0 градусов (точно так же как маятник, свисающий вертикально вниз, будет все так же свисать вертикально вниз, если повернуть его вокруг оси на 360 градусов). Поскольку левый и правый края квадрата соответствуют одному и тому же физическому состоянию, математики представляют их как полностью слившиеся в одну линию, как если бы вы свернули лист бумаги в цилиндр, соединив между собой его края. Кроме того, верхний и нижний края квадрата также соответствуют одному и тому же физическому состоянию, поэтому их также следует соединить между собой, а это означает, что верхний и нижний края нашего цилиндра также нужно соединить между собой, в результате чего получится что-то похожее на жареный пончик, поверхность которого представляет собой форму, называемую тором.



Таким образом, мы приходим к выводу, что пространство состояний для этого простейшего из массивов Джозефсона эквивалентно поверхности тора. Каждая точка на поверхности такого тора соответствует определенному электрическому состоянию массива, и наоборот. По мере того как с течением времени массив переходит из одного состояния в другое, точка, соответствующая электрическому состоянию массива, плавно перемещается по поверхности тора, подобно тому как увлекается плавным течением ручейка пылинка, случайно оказавшаяся на его поверхности. Картина течения этого воображаемого ручейка – со всеми его изгибами и завихрениями, его заводями и участками с ускоряющимся течением – учитывается в уравнениях цепи для нашего массива. Исходя из текущих значений фаз, эти уравнения определяют, как изменятся фазы в следующий момент времени.

Эти уравнения относятся к классу нелинейных уравнений, поэтому мы, конечно, не могли надеяться на то, что нам удастся найти для них однозначное и исчерпывающее решение, но мы полагали, что сможем выяснить качественные характеристики этого потока в целом. Например, точки стагнации (места на поверхности тора, где наша воображаемая пылинка застревает) должны соответствовать состояниям электрического равновесия для массива, когда все токи и напряжения не изменяются во времени. Устойчивость таких состояний можно оценить, вообразив, как наша пылинка могла бы покинуть такое состояние: если она всегда возвращается в него, как если бы ее

засасывало в водосток, то такое состояние равновесия является устойчивым. Можно также предположить, что картина потока содержит замкнутый контур, маленький водоворот, в котором наша пылинка может кружиться до бесконечности, каждый раз по истечении определенного времени возвращаясь в свою исходную позицию. Такой контур должен означать некую форму периодического, повторяющегося поведения – электрическую осцилляцию в массиве. Мы с Куртом были уверены, что такие контуры обязательно должны иметь место, но нам не было ничего известно об их устойчивости – о том, всасывают ли они в себя соседние состояния.

Простейшим контуром является синхронная осцилляция, при которой фазы обоих переходов все время остаются равными. Соответствующая траектория пролегает вдоль главной диагонали квадрата. Она начинается в нижнем левом углу, затем движется на северо-восток, пока не достигнет верхнего правого угла, после чего она мгновенно возвращается в нижний левый угол (поскольку 360 градусов и 0 градусов соответствуют одной и той же фазе). Если рассматривать такую траекторию на квадрате, то получается, что она все время перепрыгивает из одного угла в другой, но если ее рассматривать на поверхности тора – которая представляет собой истинное пространство состояний для нашей системы, – то никаких перепрыгиваний не наблюдается. Переход оказывается плавным и незаметным.

Когда мы проанализировали картину этого потока в целом, мы были потрясены, обнаружив, что каждая другая траектория повторяет себя подобным образом. Каждое решение является периодическим. Если же взглянуть в эту картину пристальнее, то ничего особенно удивительного в обнаруженном нами факте нет. Качающийся маятник все время повторяет свое поведение, по крайней мере в простейшем, идеализированном случае, когда в его подшипниках отсутствует сила трения и когда отсутствует сопротивление воздуха. В этом случае не имеет значения, иницилируете ли вы процесс колебаний маятника с большой или с малой дуги – в любом случае колебания будут оставаться неизменными и повторяться до бесконечности. То же самое относится ко всем другим видам «консервативных» механических систем, гипотетических идеализированных случаев, где отсутствуют какие бы то ни было формы трения и рассеяния механической энергии, а вся эта энергия полностью сохраняется («консервируется»), не

превращаясь в тепло. Однако именно по этой причине периодическое поведение массива Джозефсона оказалось для нас столь неожиданным. Этот массив был нагружен трением. С электрической точки зрения, трение – это сопротивление. Сами переходы Джозефсона заключают в себе сопротивление (соответствующее пути, по которому проходит обычный ток), а нагрузкой цепи служил обычный резистор. Тем не менее этот массив воплощал в себе консервативную систему.

Мы с Куртом хотели понять, является ли столь парадоксальное поведение результатом изучения нами лишь двух переходов. Возможно, когда мы приступим к изучению большего числа переходов, система, так сказать, расправит свои крылья и продемонстрирует более представительный диапазон поведения. Я располагал рядом старых компьютерных программ, которыми пользовался при выполнении своей предыдущей работы по биологическим осцилляторам для имитации моделей Уинфри и Курамото, с сотнями цветных точек, бегущих по окружности, а также компьютерной программой для модели клеток сердца, разработанной Пескином; напомним, что тогда нам здорово помогло стробирование системы каждый раз, когда срабатывал один из ее осцилляторов. Все эти программы можно было легко адаптировать к уравнениям, описывающим поведение массива Джозефсона. После того как Курт вернулся к работе в Технологическом институте штата Джорджия, а я – в МТИ, имело смысл разделить наши усилия. Курт вместе со своим аспирантом по имени Куок Цанг занялся математическим анализом в случае, когда число переходов больше двух, а я приступил к компьютерному моделированию^[167].

Для начала мы решили рассмотреть случай с десятью переходами. Такое количество переходов представлялось нам вполне обозримым, однако визуализировать случай со столь большим количеством переходов было очень непростым делом: вместо потока на квадрате или на поверхности тора траектории теперь пролегали в 10-мерном пространстве. Мои компьютерные программы неустрашимо ринулись в бой, продираясь сквозь нелинейные уравнения для 10-мерного пространства, продвигаясь к цели буквально крошечными шагами и отображая изменяющиеся фазы переходов в виде 10 точек, бегущих по окружности. Полученные изображения потрясли меня своей запутанностью и невразумительностью. Точки кружились и

завихрялись, оставляя ошеломительное впечатление бесконечного хоровода, на основании которого, однако, невозможно было прийти к какому-то определенному заключению. Особенно трудно было проследить какие-либо постепенные изменения в относительном позиционировании. Немного легче стало после того, как я решил прибегнуть к испытанному приему со стробированием. Когда какой-то заранее выбранный переход достигал определенной фазы, происходила воображаемая вспышка, которая высвечивала фазы остальных девяти переходов. Это, конечно, помогло справиться с кружением огромного количества точек, однако оставались 9 точек, которые нужно было отслеживать одновременно. Необходимость отслеживания 9 точек означала необходимость визуализировать 9-мерное пространство.

Человеческий мозг не в состоянии легко визуализировать более трех измерений, а плоский экран компьютера вообще ограничивал картинку лишь двумя измерениями. Мне нужно было каким-то образом расширить свое сознание, попытаться представить, что происходит в этом странном 9-мерном мире. Немного поэкспериментировав, я остановился на мультипанельном формате, характерном для фильмов 1960-х годов, где на разных участках экрана («панелях») демонстрировались изображения разных актеров, причем каждому актеру отводился свой участок экрана. На одной панели отображалась фаза перехода № 2 в функции фазы перехода № 3, причем на одной оси были представлены значения фазы перехода № 2, а на другой – значения фазы перехода № 3. На других панелях отображались аналогичные зависимости между фазами переходов 3 и 4, 5 и 6 и т. д. Переход № 1 предназначался для запуска строга: когда он пересекал некую исходную линию (определенная фаза в его цикле), компьютер отображал соответствующую точку на каждой панели, представляя одновременные фазы в данный момент. В результате компьютерный экран заполняли панели, регулярно обновляемые после каждой стробоскопической вспышки.

Прежде чем взглянуть на систему из десяти переходов этими новыми теоретическими глазами, мне нужно было подготовиться к тому, что я мог увидеть. В наихудшем случае, если решения соответствующих нелинейных уравнений окажутся невероятно сложными, точки на каждой панели будут появляться то здесь, то там, постепенно заполняя собою некое аморфное тело. Если они будут

заключать в себе некое подобие структуры, то это тело может быть похоже на кружево, испещренное бороздками. Или, если все окажется таким же на удивление простым, как в случае с двумя переходами, каждая очередная точка будет долбить в одно и то же место экрана (может, даже просверлит в нем дырку), никогда не покидая пределов пиксела, в котором она изначально появилась. Это беспрестанное повторение сигнализировало бы о том, что все траектории по-прежнему являются периодическими (поскольку в случае периодического решения каждый раз, когда переход № 1, пересекая исходную линию, запускает вспышку, переходы № 2 и № 3 всегда оказываются на своих местах – и так на любой другой панели).

Я включил компьютер и уставился на экран. Спустя какое-то время на каждой из панелей одновременно появилось по одной точке; это означало, что переход № 1 завершил один «круг» и зажег свой строб. Затем еще один круг, и еще один. На каждой из панелей точки «приземлялись» вблизи мест, где появилась первая точка, но не строго поверх первой точки. Что ж, это уже интересно! Эти неточные попадания означали, что траектории для 10 переходов не являются периодическими, а это, в свою очередь, подтверждало наши подозрения о том, что случай с двумя переходами является особым случаем, который не может служить надежным указанием на то, чего нам следует ожидать в случае большего количества переходов.

В ходе дальнейшего моделирования ситуации с 10 переходами начала вырисовываться несколько иная картина. Точки начали складываться в некую кривую, а вовсе не в ожидаемое мною аморфное тело, причем их движение казалось очень тщательно выверенным, прочерчивая траекторию, тонкую, как лезвие бритвы, удлиняя ее и заполняя в ней пустоты. Все панели показывали разные версии одной и той же базовой структуры: контур с несколько искаженной треугольной формой и скругленными углами. Я засомневался, не выбрал ли я ненароком слишком уж нехарактерную исходную точку. Поэтому я испытал много разных начальных условий. Когда я увидел результаты, моему удивлению не было границ. Каждая исходная точка приводила к появлению ее собственного треугольника со скругленными углами, причем все отдельные треугольники точно укладывались друг в друга, подобно русской матрешке.

Это была поистине невероятная структура. Она означала, что в уравнениях заключена некая тайная симметрия, скрытая регулярность, которая должна быть причиной этого порядка. Мне еще никогда не приходилось видеть чего-либо подобного. Каждая траектория предоставляла для исследования невообразимо обширный, 10-мерный ландшафт, по которому можно было перемещаться вверх и вниз, влево и вправо, а также еще в семи измерениях, для обозначения которых нам даже не хватает слов, но которые, тем не менее, существовали. Это было так же невероятно, как ходить до бесконечности по натянутому канату, никогда не рискуя упасть. Было что-то такое, что сводило эти решения к некоему срезу всех возможностей. Я мог сколь угодно наращивать количество переходов в массиве – 20, 50, 100 – это не имело никакого значения. В любом случае получалась одна и та же картина русской матрешки: вложенные друг в друга треугольники. Когда я сообщил Курту эту новость, он был изумлен не меньше моего. Либо компьютер нехорошо пошутил над нами, либо мы столкнулись с беспрецедентной ситуацией в математике массивов Джозефсона.

В течение следующих четырех лет многие из нас буквально помешались на этих чудесах. Курт вместе со своим аспирантом Стивом Николсом выполнили компьютерное моделирование более широкого класса массивов, обнаруживая каждый раз одни и те же признаки удивительного порядка. Джим Свифт, математик из университета Северной Аризоны и приятель Курта по аспирантуре, придумал весьма остроумный способ аппроксимации уравнений^[168], которые описывали динамику таким массивов, заменив их так называемыми усредненными уравнениями, которые было гораздо легче анализировать, но в которых, тем не менее, сохранялась суть исходных уравнений. (Подобно всем любителям решать загадки, математики зачастую пользуются аппроксимациями, когда рассматриваемая ими задача кажется чересчур сложной, чтобы ее можно было решить «в лоб», – по крайней мере на начальном этапе.) Упростив решение нашей задачи, Джим обеспечил возможность ее математического анализа. Следуя его примеру, мой аспирант Синья Ватанабе обнаружил признаки структуры «русской матрешки» в решениях усредненных уравнений Джима^[169]; затем, проявив свое аналитическое мастерство, он смог доказать, что примерно такая же структура скрывается в исходных, не усредненных

уравнениях цепи. Венцом всей этой истории стало открытие новой «интегрируемой системы», что является большой редкостью в математике. У нее нет каких-либо конкретных применений – по крайней мере из того, что нам известно на сегодня. Это открытие Ватанабе скорее похоже на находку какой-то красивой раковины на берегу моря.

Одной из самых замечательных особенностей исследований, проводимых исключительно из любопытства, – помимо, конечно, удовольствия, которое они доставляют самому исследователю, – является то, что нередко они приводят к неожиданным побочным результатам. Методы, разработанные Свифтом и Ватанабе, позволили нам впервые исследовать динамику массивов Джозефсона в более реалистичном случае, когда переходы не идентичны. Инженерам никогда не удавалось проанализировать неупорядоченные массивы, хотя им было хорошо известно о том, что электрические характеристики реальных переходов всегда отличаются друг от друга хотя бы на несколько процентов и что современные технологии производства переходов не позволяют обеспечить их полную идентичность. Такая вариабельность переходов ограничивает возможность их использования в массивах, поскольку она препятствует когерентному функционированию, которая является необходимым условием нормальной работы массивов Джозефсона. Когда такими массивами управляют внешние токи, поведение этих массивов отличается непостоянством: при токах ниже определенного порога они остаются некогерентными (все переходы осциллируют с произвольными фазами, что приводит к деструктивному взаимовлиянию напряжений на переходах и их взаимной компенсации), но после превышения этого порога массив самопроизвольно синхронизируется. Пытаясь уяснить такое поведение, мы с Куртом и его другом Пьером Коле воспользовались методом усреднения, предложенным Джимом, чтобы привести наши уравнения к более приемлемой для анализа форме.

Именно здесь нам на помощь пришла модель Курамото^[170], ключ к синхронизму. До того времени модель Курамото считалась не чем иным, как удобной абстракцией, простейшим способом понимания того, как – и при каких условиях – группы несхожих между собой осцилляторов могут самопроизвольно синхронизироваться. Модель

Курамото была исключительно плодом воображения, придуманным для использования в качестве весьма приблизительной модели биологических осцилляторов: сверчков, светлячков, клеток-ритмоводителей сердечного ритма. Теперь нам предстояло использовать ее для анализа динамики сверхпроводящих переходов Джозефсона. Это напомнило мне об удивительном чувстве, о котором в свое время говорил Эйнштейн: о чувстве, которое испытывает ученый, обнаружив скрытое единство явлений, которые прежде казались никак не связанными между собой.

Вскоре после того как мы опубликовали эти результаты, я получил из Киото (Япония) письмо, написанное красивым почерком. «Я испытал удивление и подлинное восхищение, – писал мне Йосики Курамото. – Я даже не мечтал о том, чтобы моя простая модель могла пригодиться для анализа реальных физических систем».

Модель Курамото была тем решением, которое терпеливо ожидало появления задачи, подходящей для себя. Она никогда не задумывалась своим создателем как буквальное описание чего бы то ни было. Она лишь представляла собой идеализированную модель, предназначенную для исследования рождения спонтанного порядка в его простейшей форме. Тем не менее обнаруженная связь ее с массивами Джозефсона тотчас же объяснила, почему эти приборы должны синхронизироваться резко, мгновенно. Этот фазовый переход был, по сути, тем же фазовым переходом, который открыл Уинфри в своей модели биологических осцилляторов и который впоследствии был столь элегантно формализован Курамото в его модели, поддающейся решению. Специалисты по переходам Джозефсона наблюдали этот переход еще раньше, в ходе компьютерного моделирования, выполнявшегося ими, однако не располагая теоретической основой для его понимания, они просто не обращали внимания на него (это еще раз напоминает нам известную истину: никогда не следует доверять какому-либо факту до тех пор, пока этот факт не будет подтвержден теорией).

После 1996 г. модель Курамото применялась для исследования других физических объектов, начиная с массивов связанных лазеров^[171] и заканчивая гипотетическими осцилляциями легчайших субатомных частиц, называемых нейтрино^[172]. Возможно, мы улавливаем первые признаки глубокого единства в природе

синхронизма. Найдутся ли какие-либо практические применения этого единства, покажет будущее. Учитывая то, сколь многие болезни человека связаны с синхронизмом и его нарушениями (эпилепсия, сердечная аритмия, хроническая бессонница) и сколь многие устройства основаны на использовании синхронизма (массивы Джозефсона и массивы связанных лазеров, электроэнергетические системы, глобальная система навигации и определения местоположения), мы можем с уверенностью утверждать, что углубленное понимание спонтанного синхронизма обязательно приведет нас к появлению его практических применений.

Широкое использование модели Курамото поднимает вопрос о причинах вездесущести этой конкретной математической структуры. По правде говоря, она, наверное, вовсе не вездесуща. Я уделил ей так много внимания лишь потому, что она является, пожалуй, единственным случаем спонтанного синхронизма, который мы понимаем достаточно хорошо. Руководствуясь теоретическими положениями, можно показать, что модель Курамото применима лишь при выполнении четырех особых условий; в противном случае эта модель неприменима. Во-первых, рассматриваемая система должна состоять из огромного количества компонентов, каждый из которых является самоподдерживающимся осциллятором.

Это само по себе является сильным ограничением. Отдельным элементам должна быть присуща чрезвычайно простая динамика: чистая ритмичность на протяжении стандартного цикла, без хаоса, турбулентности и каких-либо осложнений – просто повторяющееся движение. Во-вторых, осцилляторы должны быть слабо связанными – в том смысле, что состояние каждого из них можно охарактеризовать только его фазой. Если же связь между осцилляторами настолько сильна, что способна существенно исказить амплитуду осциллятора, то модель Курамото неприменима. Третье условие накладывает наиболее сильные ограничения: каждый из осцилляторов должен быть связан в одинаковой степени со всеми остальными. На практике лишь очень немногие системы удовлетворяют этому условию. Вообще говоря, осциллятор взаимодействует сильнее со своими соседями в пространстве (или с совокупностью виртуальных соседей, определяемой некоторой сетью взаимного влияния). Наконец, осцилляторы должны быть практически идентичны, а величина

дисперсии в их свойствах должна быть соизмерима со слабостью связи между ними.

С учетом всех этих условий динамика модели Курамото и родственных ей моделей должна становиться для вас самоочевидной. Тем не менее внезапное возникновение синхронизма по-прежнему оказывается для нас неожиданностью. Даже после того как синхронизм появляется, наше понимание его (и особенно понимание того, почему он возникает практически одномоментно и самопроизвольно) оказывается совершенно недостаточным. Последней иллюстрацией этого факта является фиаско лондонского моста Millenium Bridge.

Millenium Bridge должен был стать гордостью Лондона^[173]. Этот элегантный авангардистский пешеходный мост, строительство которого обошлось лондонской казне более чем в 27 миллионов долларов, был первым за столетие новым мостом через Темзу в Лондоне. Он связывал лондонский район Сити и собор Св. Павла, расположенный на северном берегу Темзы, с музеем современного искусства Tate Modern, расположенным на южном берегу. Этот мост отличался радикальностью своей конструкции: самый плоский в мире висячий мост, волнистая лента длиной 320 метров с низкорасположенными консольными балками и тонкими стальными тросами, протянутыми через реку. Концепция такого моста стала плодом необычного сотрудничества между строительной компанией Ove Arup, архитектором лордом Норманом Фостером и скульптором сэром Энтони Каро. «Луч света, – так окрестил этот мост лорд Фостер, находясь под впечатлением его ночного вида, когда сооружение подсветилось многочисленными электрическими фонарями. – Нечто подобное, то есть конструкцию, создающую иллюзию свободного парения в воздухе, мы и намеревались создать»^[174]. Хотя за строительство моста и его надежность отвечали инженеры компании Ove Arup, лорд Фостер и сэр Энтони были, по-видимому, также непрочь искупаться в лучах славы. Как бы то ни было, во время телетрансляции торжественного открытия моста, в котором участвовала королева, их лица сияли от удовольствия.

Открытие моста для публики состоялось в субботу, 10 июня 2000 г. Как только полиция разрешила, сотни возбужденных лондонцев ринулись на мост с обоих его концов. Однако буквально через

несколько минут мост начал угрожающе раскачиваться из стороны в сторону; 690 тонн стали и алюминия выписывали в воздухе S-образные кривые, подобно извивающейся змее. Испуганные пешеходы судорожно цеплялись за перила, пытаясь удержаться на ногах, однако мост раскачивался все сильнее и сильнее. В конце концов амплитуда достигла 20 сантиметров.

Роджер Ридсдилл-Смит, один из молодых инженеров компании Ove Arup, который предложил эту новаторскую конструкцию, растерянно наблюдал за происходящим по ту сторону кордона, образованного полицейскими. Нет, такого не должно было случиться. Мысли вихрем проносились у него в голове. Компьютерное моделирование, оценки надежности и эксперименты в аэродинамической трубе не предсказывали ничего подобного. Надежность моста не вызвала у него сомнений. Мост Millenium Bridge не должен был разрушиться, подобно мосту Tacoma Narrows Bridge, печально известной «Галопирующей Герти», предсмертная агония которой запечатлена на старых киноплёнках.^[175] На этих записях видно, как судорожно изгибается мост под напором ветра, разрушаясь под воздействием торсионных колебаний. Тем не менее что-то заставляло Millenium Bridge резонировать. Полиция перекрыла доступ на мост, но он продолжал раскачиваться. Уже в понедельник, 12 июня, то есть через два дня после открытия, растерянные и сконфуженные городские власти были вынуждены закрыть мост Millenium Bridge.

Критики первоначального проекта полагали, что «Луч света» настигло заслуженное возмездие. Лорд Фостер уже не рассчитывал на благодарность со стороны лондонцев: осаждаемый журналистами, он выдал из себя лишь несколько нелестных слов о строителях моста, с которыми ему пришлось сотрудничать. Строительная компания Ove Arup сразу же приступила к тестированию вибрационных характеристик моста в надежде понять, какая ошибка была допущена ими.^[176] Они прикрепили к мосту огромные вибромашины и начали систематические испытания на разных частотах вибрации. Когда к мосту приложили горизонтальные вибрации с частотой, равной примерно одному циклу в секунду, он начал выписывать такие же S-образные кривые, какие наблюдались в день открытия.

Это было ключом к разгадке. Один цикл в секунду – это половинная частота ходьбы человека в обычном темпе. Проектировщикам моста известно, что обычный темп ходьбы человека – это примерно два шага в секунду, но основной эффект этих повторяющихся шагов заключается в создании вертикального, а не бокового усилия, поэтому ходьба не может быть причиной поперечных раскачивания моста. Внезапно инженеров осенила догадка: люди действительно с каждым шагом создают небольшое боковое усилие: когда вы ставите на землю правую ногу, вы отталкиваетесь по-одному, а когда ставите на землю левую ногу, вы отталкиваетесь по-другому. Эти попеременные боковые усилия создают колебания, частота которых примерно равняется половинной частоте ходьбы человека, то есть одному циклу в секунду, а не двум. Никто даже не задумывался над этим фактом: это не предусматривалось стандартными инструкциями для проектировщиков мостов в Великобритании. Как бы то ни было, эти боковые усилия невелики, а поскольку люди, передвигающиеся по мосту, как правило, не шагают в ногу, все боковые усилия, направленные влево и вправо, возникают в произвольные моменты времени и, следовательно, компенсируют друг друга. Но если по какой-то причине люди начнут шагать синхронно, все боковые усилия будут суммироваться и концентрироваться. Это, конечно же, может вызвать проблемы.

Инженеры еще раз просмотрели видеозапись телевизионного репортажа с открытия моста и увидели, что произошло именно то, что и *должно* было случиться. Когда мост начал раскачиваться, пешеходы инстинктивно скорректировали темп своей ходьбы, подсознательно синхронизировав его с ритмом раскачивания моста. Это лишь усилило вибрацию, что, в свою очередь, привело к тому, что еще большее число людей начало терять равновесие и дружно смещаться то в левую, то в правую сторону, обеспечивая таким образом еще больший взаимный синхронизм и тем самым еще больше усиливая вибрацию. Это была своего рода цепная реакция – положительная обратная связь между людьми и мостом. Наступление такой цепной реакции, которая привела к опасному раскачиванию моста Millenium Bridge, никто из проектировщиков не предвидел.

Этот вид резонансного эффекта отличается от другого хорошо известного резонансного эффекта, наличие которого заставляет солдат,

вступая на мост, переходить со строевого шага на обычный, чтобы избежать создания в мосту опасных вибраций. Солдаты, проходя по мосту строевым шагом, действуют синхронно, тогда как пешеходы шагают по мосту вразнобой; во всяком случае, у проектировщиков моста не было никаких оснований предполагать, что пешеходы спонтанно начнут шагать по мосту в ногу. Они, конечно, учитывали возможность того, что какая-нибудь группа вандалов может пройти по мосту строевым шагом, и предусмотрели на этот случай определенный запас прочности, но им никогда не приходило в голову, что толпа из 2000 вполне благонамеренных пешеходов может по чистой случайности синхронизировать свое продвижение по мосту.

До сих пор неясно, что именно инициировало синхронизм в день открытия моста. Скорее всего, ядро синхронизма возникло случайно: как только толпа оказывается достаточно большой, всегда существует вероятность того, что на какой-то стадии достаточное число людей совершенно случайно начнут шагать синхронно, будет превышен определенный критический порог и мост начнет слегка раскачиваться. Как только это случится, в действие вступит эффект обратной связи, который лишь усилит раскачивание.

Дальнейшие исследования, выполненные инженерами компании Ove Arup, показали, что цепная реакция такого рода возможна лишь в случае достаточно длинного, гибкого и заполненного людьми моста – изменчивое сочетание ингредиентов, которое сложилось в тот день на Millenium Bridge. В частности, инженеры пришли к выводу, что никаких поводов для беспокойства нет, если количество людей на мосту не превышает указанного порогового значения. Так не бывает, чтобы мост слегка покачивался в случае небольшого количества людей, а по мере увеличения количества людей постепенно наращивал амплитуду своего раскачивания. Мост либо вообще не раскачивается, либо, как только будет превышен критический порог, он начинает раскачиваться угрожающе и без какого-либо предупреждения. Подобно соломинке, которая ломает хребет верблюда, начало опасного раскачивания моста представляет собой нелинейное явление.

Вообще говоря, во многом это похоже на фазовый переход, предсказанный моделями Уинфри и Курамото. Как следует из соответствующих теоретических представлений, осцилляторы (в данном случае – шаги пешеходов по мосту) некогерентны, если

критический порог не превышен. Создаваемые ими усилия взаимно компенсируются. Они остаются некогерентными, даже когда связь между ними усиливается: когерентность не нарастает постепенно. Затем, внезапно, как только сила связи превысит определенное пороговое значение (поскольку на мосту находится количество людей, способное раскачать его в достаточной степени), синхронизм наступает практически одновременно.

Здесь можно заметить еще один аспект концептуального единства. Мост Millenium Bridge представлял собой случай синхронизма, наведенного слабой связью через некоего посредника. Эта тема, пусть и в неявном виде, проходит сквозной нитью через несколько последних глав. Взаимодействия пешеходов опосредовались вибрациями, которые они наводили в мосту, примерно так же, как маятники Гюйгенса чувствовали друг друга, производя вибрации в доске, с которой они свисали. В случае сверхпроводимости куперовские пары образуются потому, что электроны несколько деформируют пространственную решетку атомов; эта деформация создает между ними слабое притяжение точно так же, как шар для игры в боулинг, катящийся по матрасу, наполненному водой, увлекает за собой, в свой «кильватер», другой такой же шар. Такой же механизм действует даже в массиве переходов Джозефсона, соединенных последовательно друг с другом: переходы взаимодействуют между собой только из-за электрических осцилляций, которые они наводят в нагрузке. Отдельные осцилляторы во всех четырех случаях являются совершенно разными – электроны, маятники, высокотехнологичные приборы, люди, – однако механизм синхронизации во всех случаях остается, по сути, одним и тем же.

Основной момент этого объяснения был подтвержден инженерами компании Ove Arup после нескольких месяцев тщательного тестирования, в котором не только были задействованы огромные установки по созданию механических вибраций, но и проводились управляемые эксперименты с людьми, переходящими другие мосты, а также лабораторные исследования отдельных людей, пытающихся передвигаться, не теряя равновесия, по шатающейся опоре. Самое удивительное, однако, заключается в том, что спустя лишь два дня после закрытия моста Millenium Bridge и еще до начала каких-либо исследований, призванных установить причину неожиданного поведения этого моста, один из читателей лондонской газеты Guardian

успел найти правильное объяснение. Четырнадцатого июня 2000 г. в редакцию газеты пришло следующее письмо.

В чем же причина раскачиваний моста?

Среда, 14 июня 2000 г.

Газета Guardian

Проблема моста Millenium Bridge (см. статью «Еще одна “ошибка 2k”?» в выпуске Guardian от 13 июня) связана вовсе не с тем, что пешеходы шагали по мосту в ногу. Она связана с действиями людей, когда они пытаются удержать равновесие при передвижении по шаткой поверхности, и подобна тому, что может произойти, если группа людей, находящихся в небольшой лодке, одновременно встанет на ноги. В том и другом случае может оказаться, что движения, производимые людьми, когда они пытаются удержать равновесие, приводят лишь к усилению раскачиваний опоры, на которой находятся эти люди, и, следовательно, к усугублению опасной ситуации.

Можно ли утверждать, что в результате такого раскачивания «мост никогда не обвалится» и ни при каких обстоятельствах не разрушится? В прошлом нам уже неоднократно приходилось слышать подобные заявления о мостах, и проектировщики данного моста, прежде чем делать подобные заявления, должны уяснить, что проблема, возникшая с этим мостом, не сводится лишь к принципам проектирования мостов.

Внизу письма красовалась подпись автора:

Профессор Брайан Джозефсон

Физический факультет

Кембриджского университета^[177]

Часть III. Исследование синхронизма

Глава 7. Синхронизированный хаос

Он не производил впечатления человека, совершившего революцию. Скромный мужчина невысокого роста, в возрасте примерно семидесяти лет и с несколько монотонной речью, Эд Лоренц не только внешностью, но и повадками был похож на типичного провинциала. Увидев его у стойки придорожного кафе где-нибудь в штате Мэн, вы наверняка приняли бы его за фермера. Я часто видел его во время обеда в кафетерии МТИ, что в Мемориале Пола Уолкера. Он входил в кафетерий своей слегка прихрамывающей походкой в сопровождении жены; они держали друг друга за руки, а в свободной руке у каждого из них была трость. Каждый год, когда я приступал к чтению студентам курса лекций по теории хаоса, мы проходили один и тот же ритуал; я настолько привык к нему, что в мельчайших подробностях рисовал его в своем воображении. Итак, я обязательно позвоню профессору Лоренцу и попрошу его прочитать моим студентам вступительную лекцию. Он, конечно же, изумится (между прочим, совершенно искренне) моему предложению и обязательно спросит: «О чем же я буду рассказывать им?» А я обязательно отвечу: «Надеюсь, вы не будете против рассказать им об уравнениях Лоренца?» Он уточнит: «О, вы имеете в виду эту маленькую модель?»^[178] А затем – так же предсказуемо, как смена времен года – он появится в аудитории, охваченной благоговением, и расскажет студентам... Нет, вовсе не об уравнениях Лоренца, а о том, над чем он работает сейчас. В конце концов, не так уж важно, о чем именно он будет рассказывать. Присутствующие в аудитории собирались в ней хотя бы для того, чтобы взглянуть на творца современной теории хаоса^[179].

«Эта маленькая модель», между прочим, совершила настоящий переворот в науке. В 1963 г., пытаясь уяснить непредсказуемость погоды, Лоренц составил систему из трех дифференциальных уравнений – нелинейных, но вовсе не таких ужасных на вид, какими они обычно бывают. Более того, математику или физику они могли показаться обманчиво простыми, похожими на стандартные примеры, которые можно найти в учебниках. Глядя на них, любой математик или физик мог подумать: «Пожалуй, я смог бы решить эту систему уравнений». Однако в том-то и дело, что не смог бы. Никто не смог бы.

Решения уравнений Лоренца вели себя так, как не снилось ни одному математику. Его уравнения генерировали хаос: на первый взгляд, случайное, непредсказуемое поведение, управляемое неслучайными, детерминистскими законами.

Поначалу никто не обратил внимания на необычность уравнений Лоренца. Статья Лоренца «Детерминированный непериодический поток», затерявшаяся на страницах 130–141 журнала *Journal of the Atmospheric Sciences*, в течение первых десяти лет своего существования цитировалась примерно один раз за год. Но как только революция хаоса развернулась во всю свою мощь (а это случилось в 1970–1980-х годах), ссылки на «эту маленькую модель» посыпались как из рога изобилия.

Первая волна поднялась, когда некоторые ученые, представляющие разные области науки, пришли к пониманию того, что все они наблюдают проявления одного и того же таинственного феномена. Экологи обнаружили хаос в простой модели, описывающей динамику популяции диких животных. Вместо того чтобы выравняться или циклически повторяться, моделируемая популяция неожиданно разрослась и неравномерно распалась на протяжении жизни буквально двух поколений, хотя в самой модели не было заложено ничего случайного. Астрономы были озадачены результатами измерений вращательного движения Гипериона^[180], небольшой картофелеобразного спутника Сатурна: вместо того чтобы вращаться вокруг собственной оси, подобно большинству планет-спутников, он хаотично шатался и кувыркался, как пьяный. Физики отвлеклись на какое-то время от размышлений над кварками и черными дырами и решили уделить внимание более прозаическим феноменам, к которым они прежде относились как к досадным помехам: прерывистым пульсациям неустойчивых лазерных лучей, хаотическим колебаниям напряжения в некоторых электрических цепях и даже протекающим водопроводным кранам. Всем этим явлениям, как оказалось, предстояло играть роль символов хаоса. По иронии судьбы, ряду «чистых» математиков, начиная с Анри Пуанкаре, уже примерно 70 лет было известно о хаосе, но почти никому, кроме них самих, не был понятен ни их особый жаргон, ни их математические абстракции, поэтому их идеи оказывали лишь весьма незначительное влияние за пределами узкого круга посвященных.

Все перечисленное выше представляет собой типичные препятствия, возникающие на пути развития любой междисциплинарной науки. Большинство ученых чувствуют себя весьма комфортно в своих узких научных областях, отгородившись от своих интеллектуальных соседей языковыми барьерами, своими особыми научными пристрастиями и спецификой своей научной культуры. Однако все это не было присуще Лоренцу. По специальности он был метеорологом, однако его первой любовью была математика. Людей, подобных Лоренцу, можно найти в любой научной области; в своих научных сообществах такие люди кажутся белыми воронами. Все эти люди хорошо чувствуют динамику, поток, общую картину, скрытые закономерности и симметрии. Особенно притягателен для них самый темный и непознанный угол теоретической науки: царство нелинейных проблем.

Математик Станислав Улам однажды сказал, что назвать какую-либо проблему нелинейной – все равно что сходить в зоопарк и рассказать обо всех интересных животных, которых вы там увидели, за исключением слона. Тем самым Улам хотел подчеркнуть, что большинство животных не являются слонами, а большинство уравнений нелинейны. Линейные уравнения описывают простые, идеализированные ситуации, когда причины пропорциональны следствиям, а прилагаемые силы пропорциональны реакциям, то есть противодействиям. Если вы согнете стальной стержень не на один миллиметр, а на два, то сила, с которой он пытается распрямиться, окажется в два раза большей. Определение «линейное» означает именно эту пропорциональность: если вы изобразите график зависимости отклонения стержня от прилагаемой силы, то этот график будет представлять собой прямую линию. (В данном случае определение «линейное» не означает *последовательное*, когда мы имеем в виду пошаговое продвижение вперед или когда мы говорим о «линейном мышлении», под которым подразумевается однонаправленное мышление, также являющееся, в некотором роде, пошаговым мышлением. То есть речь идет о разном использовании одного и того же слова.)

Линейные уравнения поддаются решению в силу своей модульной структуры: их можно расчленить на составные части. Каждую такую

часть можно анализировать и решать по отдельности, а в конце все отдельные ответы можно воссоединить – в буквальном смысле, снова сложить между собой – и получить таким образом правильный ответ для исходной задачи. В линейной системе целое в точности равняется сумме его составных частей.

Однако линейность зачастую является лишь аппроксимацией некой более сложной реальности. Большинство систем ведут себя линейно, лишь когда они близки к состоянию равновесия и лишь когда мы не оказываем на них слишком сильных воздействий. Инженер-строитель может предсказать, как будет раскачиваться многоэтажный дом под напором ветра, если сила ветра не окажется слишком большой. Электрические цепи ведут себя совершенно предсказуемо – пока в цепи не случится скачок напряжения или тока. Когда какая-либо система становится нелинейной, будучи выведена из своего обычного режима работы, она начинает вести себя непредсказуемо. В таком случае обычные, линейные уравнения, которыми описывается поведение системы, уже неприменимы.

Тем не менее у вас не должно сложиться впечатление, будто нелинейность сама по себе опасна или даже нежелательна. Более того, наша жизнь зависит от нелинейности. В любой ситуации, когда целое не равно сумме его составных частей, когда мы имеем дело с сотрудничеством или конкуренцией составных частей, а не просто с суммированием их влияний, можно быть уверенным, что мы имеем дело с проявлениями нелинейности. В биологии нелинейность наблюдается повсеместно. Наша нервная система состоит из нелинейных компонентов. Экология подчиняется нелинейным законам (в той мере, в какой они известны нам). Комбинированная терапия, которую применяют к больным СПИДом (так называемые лекарственные коктейли), эффективны именно в силу нелинейности иммунной реакции и динамики вирусной популяции: сочетание из трех лекарств оказывается гораздо более действенным, чем суммарное воздействие трех этих лекарств, если пациент принимает их по отдельности. Что же касается человеческой психологии, то она носит абсолютно нелинейный характер. Например, если вы прослушаете две свои любимые песни одновременно, то вряд ли вы получите двойное удовольствие.

Именно этот синергетический^[181] характер нелинейных систем чрезвычайно затрудняет их анализ. Такие системы невозможно расчленить на составляющие, чтобы проанализировать их по отдельности. Их приходится анализировать в целом, как когерентный объект. Как указывалось выше, такая необходимость глобального мышления является самой серьезной проблемой в уяснении того, как большие системы осцилляторов могут самопроизвольно синхронизироваться. Вообще говоря, все, что касается самоорганизации, нелинейно в принципе. Поэтому изучение синхронизма всегда неразрывно связано с изучением нелинейности.

Именно синергетический характер нелинейных систем делает их столь богатыми. Каждая из крупных нерешенных проблем в науке, начиная с природы сознания и заканчивая раком и коллективным помешательством экономики, является нелинейной. На протяжении нескольких следующих столетий наука будет биться над решением нелинейных проблем. Начиная с 1960-х и 1970-х годов все первопроходцы синхронизма – я имею в виду таких ученых, как Винер, Уинфри, Курамото, Пескин и Джозефсон, – уже прокладывали путь к этой неизведанной научной вершине, пытаясь уяснить причины самопроизвольного возникновения порядка в системах, состоящих из огромного числа осцилляторов. С возникновением теории хаоса ряды этих первопроходцев пополнились целой армией новых энтузиастов, устремившихся к той же вершине, но выбравших для этого другой путь.

Нелинейные проблемы всегда были трудны для понимания. Именно поэтому успех Лоренца в решении проблемы хаоса так вдохновил ученых. Внезапно стало очевидно, что даже простейшие нелинейные системы могут демонстрировать очень сложное поведение – гораздо более сложное, чем можно было ожидать. Такой вывод мог бы показаться пессимистическим, однако он породил надежду, что какие-то, на первый взгляд случайные, явления могут таить в себе некие скрытые закономерности.

Затем настал черед второй волны теории хаоса, которая выявила, что сам по себе хаос, вопреки собственному названию, включает в себе новый, замечательный вид порядка. Это выдающееся открытие совершил физик Митчел Фейгенбаум, который показал, что существуют определенные универсальные законы, управляющие переходом от регулярного поведения к хаотическому. Грубо говоря,

совершенно разные системы могут абсолютно одинаково становиться хаотическими. Прогнозы, сделанные Фейгенбаумом, были вскоре подтверждены в результате экспериментов с электронными цепями, закручивающимися потоками, химическими реакциями, полупроводниками и сердечными клетками. Казалось, сбывается старая пифагорова мечта: окружающий нас мир состоит не из земли, воздуха, огня и воды, а из чисел. Законы Фейгенбаума вышли за рамки поверхностных различий между сердечными клетками и кремниевыми полупроводниками. Разные материалы – одни и те же законы хаоса. Вскоре ученым предстояло открыть другие универсальные законы. Казалось, выход из тупика найден.

Для науки о нелинейных процессах наступило время эйфории. *Хаос...* Это слово само по себе звучит таинственно. Кое-кто рекламировал эту область науки как третью великую революцию в физике XX столетия, наряду с теорией относительности и квантовой механикой. Впервые она позволила разгадать некоторые из загадок нелинейности и установила связи между областями, которые ранее считались не связанными между собой. Книга Джеймса Глейка *Chaos*, опубликованная в 1987 г. и ставшая бестселлером, познакомила широкие массы читателей с теорией хаоса и с биографиями таких колоритных личностей, как Лоренц и Фейгенбаум, научный гений и заядлый курильщик с бетховенской шевелюрой, предпочитающий прогуливаться улицами Лос-Аламоса глубокой ночью и пытающийся раскрыть тайну турбулентности. А когда Джефф Голдблюм сыграл роль специалиста по теории хаоса в «Парке юрского периода», затянутого в кожу и похожего на рок-звезду, хаос действительно наступил – особенно после того как он продемонстрировал эффект бабочки на руке Лоры Дем.

Эффект бабочки^[182] стал самым известным символом этой новой науки – и это вполне объяснимо, поскольку он наиболее ярко демонстрирует сущность хаоса. Словосочетание «эффект бабочки» было заимствовано из заголовка статьи Лоренца, опубликованной в 1979 г. Статья называлась «Предсказуемость: может ли взмах крыльев бабочки в Бразилии вызвать торнадо в Техасе?». Идея заключается в том, что в любой хаотической системе даже небольшие возмущения нарастают с высокой скоростью, по экспоненциальному закону, что обуславливает невозможность долгосрочных прогнозов.

Печальный вывод из эффекта бабочки заключался в том, что две хаотические системы никогда не смогут синхронизироваться между собой (по крайней мере очень многие были склонны так думать). Даже если вы очень постараетесь одинаково запустить в действие эти две хаотические системы, их начальные состояния все равно будут различаться между собой, пусть и на бесконечно малую величину. В регулярных системах столь незначительная разница оставалась бы такой же незначительной в течение долгого времени, но в хаотической системе расхождение нарастает и запитывается от самого себя настолько быстро, что системы рассинхронизируются практически мгновенно. Казалось, что две самые актуальные отрасли науки о нелинейности – хаос и синхронизм – никогда не пересекутся между собой. Казалось, что они фундаментально несовместимы.

Утверждение о невозможности синхронизированного хаоса, каким бы убедительным оно ни казалось, в наши дни считается ошибочным. Хаос *можно* синхронизировать.

Это интереснейшее явление было открыто в начале 1990-х годов, что повлекло за собой изменение представлений о самом хаосе. Традиционно хаос рассматривался как досадная помеха, что-то такое, от чего нужно избавиться теми или иными способами. Позднее, на пике революции в науке, хаос стал знаменитой диковиной. Его повсеместность в природе получила признание; была выявлена его скрытая упорядоченность. Никто не знал, можно ли его приспособить для чего-либо, однако это было не так уж важно. Он был замечателен сам по себе. Теперь, с открытием синхронизированного хаоса, ситуация вновь поменялась. В одночасье хаос показал, что может быть полезен^[183]. Физики и инженеры мечтали о способах, с помощью которых им удастся использовать его замечательные свойства на практике, например шифровать звонки по мобильному телефону и через другие беспроводные формы связи, чтобы посторонние лица не могли прослушивать их.

Открытие синхронизированного хаоса расширило также наше понимание самого синхронизма. В прошлом синхронизм всегда ассоциировался с ритмичностью. Эти две концепции настолько тесно связаны между собой, что можно легко упустить важную разницу между ними. Ритмичность означает, что нечто повторяет свое поведение

через регулярные промежутки времени; синхронизм означает, что два процесса протекают одновременно. Путаница возникает потому, что многие синхронные явления не только синхронны, но и ритмичны. Синхронные светлячки не только мерцают в унисон – они мерцают периодически, через определенные интервалы времени. Клетки-ритмоводители сердца запускаются синхронно *и* с постоянной частотой. Луна поворачивается вокруг собственной оси один раз за то время, пока она совершает один полный оборот вокруг Земли; и ее вращение вокруг собственной оси, и ее вращение вокруг Земли следует циклам, которые регулярно повторяются.

Однако нам известно, что, по крайней мере в принципе, синхронизм может поддерживаться и в отсутствие периодичности. Вспомните о музыкантах в оркестре. Все скрипки вступают одновременно и все время поддерживают синхронизм своих действий. Однако исполняемая ими музыка вовсе не периодична: они не повторяют все время один и тот же музыкальный пассаж. Можно вспомнить и об участниках соревнований по фигурному катанию, в частности о выступлениях спортивных пар. Свои грациозные движения они совершают в тандеме, однако этим движениям отнюдь не присуща периодическая повторяемость.

Эти проявления синхронизма в отсутствие периодичности производят на нас сильное впечатление, они восхищают нас, иногда даже заставляют нас вскакивать с места. Складывается впечатление, что для этого необходимы ум и артистичность; именно поэтому открытие синхронизированного хаоса произвело на ученых столь ошеломляющее впечатление: оно продемонстрировало, что даже неодушевленные объекты способны обеспечить примитивную версию такого же «трюка». Чисто механические системы могут вести себя непредсказуемо, поддерживая в то же время идеальный синхронизм.

Чтобы понять, как работает синхронизированный хаос, нужно сначала уяснить, что представляет собою сам хаос. К сожалению, у многих из нас успели сложиться неправильные представления о хаосе. (Между прочим, это утверждение *не* относится к периодичности. Мы инстинктивно понимаем ее правильно. Все циклы вокруг нас – сокращения сердечной мышцы, тиканье настенных часов, смена времен года, нестерпимое *бип-бип-бип* грузовика, дающего задний ход –

позволяют составить точное представление о подлинном значении периодичности в нашей жизни. Вы можете даже ощущать у себя внизу живота ритмичное буханье барабана, когда мимо вас марширует военный оркестр. Теперь нам нужно выработать у себя такое же внутреннее, инстинктивное ощущение хаоса.)

Частично эта путаница объясняется самим словом *хаос*. В обыденном смысле *хаос* означает совершенный беспорядок. Однако в техническом смысле *хаос* означает состояние, которое лишь кажется случайным, но на самом деле порождается неслучайными законами. Как таковой, хаос занимает некое промежуточное (и малоизученное) положение между порядком и беспорядком. Он кажется непредсказуемым лишь на первый взгляд, поскольку в действительности он содержит в себе зашифрованные закономерности и подчиняется жестким правилам. Он достаточно предсказуем на коротком отрезке времени, но непредсказуем на длительном. К тому же он никогда не повторяется: его поведение носит неперiodический характер.

Например, хаос, описываемый уравнениями Лоренца, наглядно иллюстрируется хитроумным изобретением, странным и в то же время прекрасным – настольным водяным колесом^[184], сконструированным Виллемом Малкусом, одним из бывших коллег Лоренца в МТИ. Оно предназначалось для использования в качестве учебного пособия, которое должно было дать студентам общее представление о хаосе в действии. Первоначальный вариант такого пособия, сконструированный Малкусом и его коллегой Лу Ховардом, представлял собой вращающийся деревянный диск, к ободу которого была прикреплена примерно дюжина протекающих бумажных стаканчиков (что-то наподобие кресел на «чертовом колесе»). Как рассказывал мне Малкус, этот прототип был довольно «топорной работой»: когда в стаканчики заливалась вода, чтобы привести все колесо в движение, вода просачивалась сквозь стаканчики и выливалась на стол и пол.

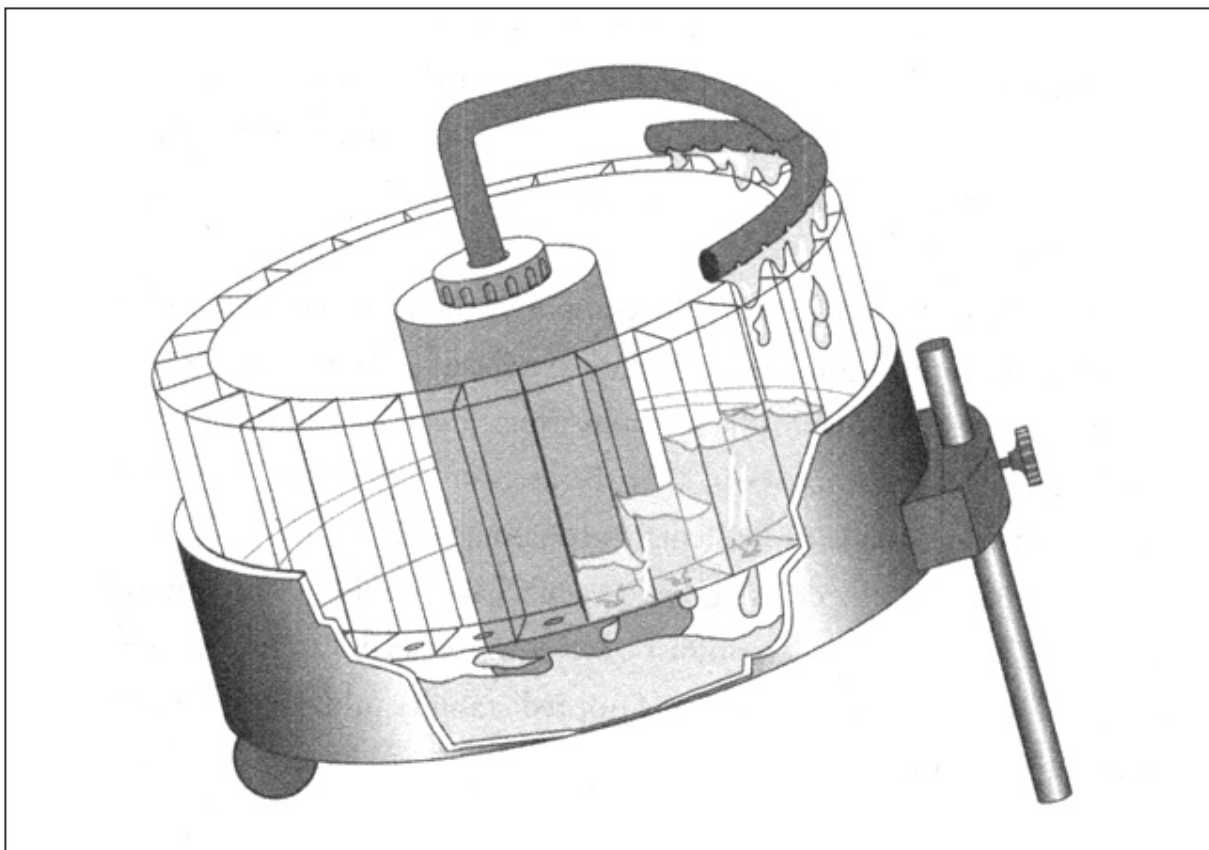
Малкус усовершенствовал свое водяное колесо. В результате усовершенствования оно превратилось в полностью автономный механизм.

Пластиковое колесо диаметром около одного фута вращается в плоскости, слегка наклоненной по отношению к горизонту (в отличие

от обычного водяного колеса, которое вращается в вертикальной плоскости). При нажатии на переключатель вода автоматически подкачивается в подвесной коллектор (перфорированный рукав), а затем выпускается через десятки маленьких отверстий в отдельные камеры, расположенные по периметру колеса (аналог бумажных стаканчиков в первоначальной версии). В нижней части каждой такой камеры вода просачивается через микроканал и собирается в резервуаре, помещенном под колесом, откуда она закачивается обратно через упомянутые выше отверстия. Такая схема рециркуляции обеспечивает устойчивый приток воды.

При включении этого агрегата поначалу не происходит ничего примечательного. Колесо остается неподвижным. По мере заполнения камер вода издает приятные булькающие звуки; между тем вода из камер понемногу просачивается (правда, просачивание происходит медленнее, чем наполнение камер). Как только камеры оказываются заполненными до предела, колесо становится неустойчивым (верхняя часть перевешивает) и начинает качаться (поворачиваться) в одном направлении подобно маятнику, который был поднят вертикально вверх, а затем отпущен. Этот поворот приводит к тому, что под отверстиями коллектора оказывается новая совокупность камер, а камеры, заполненные водой, автоматически выводятся из-под отверстий коллектора. Вскоре у вас создается ощущение, что вы наблюдаете определенную закономерность: колесо постоянно поворачивается в одном направлении (например, против часовой стрелки). Однако через какое-то время эти повороты становятся все более замедленными (колесо словно из последних сил совершает свой очередной поворот), по мере того как колесо становится все более разбалансированным в результате несимметричного размещения воды по его периметру. Наконец, колесо, пытаясь совершить свой последний поворот, останавливается, после чего начинает двигаться в противоположном направлении, на сей раз поворачиваясь по часовой стрелке. Еще через какое-то время в поведении колеса вырисовывается определенная картина: бессистемная, случайная последовательность вращений то по часовой стрелке, то против, совершаемых в непредсказуемые моменты времени. Например, колесо может повернуться три раза по часовой стрелке, затем один раз против, затем четыре раза по часовой стрелке,

после чего семь раз против часовой стрелки и т. д. Это движение никогда не затухает и никогда не повторяется.



Самое удивительное здесь заключается в том, что вращение колеса носит совершенно случайный, непредсказуемый характер, несмотря на то что в самом механизме, который приводит в движение это колесо, нет ничего случайного и непредсказуемого. Вода подается в него с постоянной скоростью. Тем не менее складывается впечатление, будто колесо не может выбрать для себя какое-то определенное поведение, и поэтому начинает вести себя бессистемно. Более того, его поведение невозможно воспроизвести, повторить. Когда вы в следующий раз запустите это колесо, картина его вращений окажется другой. Как бы вы ни старались обеспечить неизменность исходных условий от одного запуска к другому, в лучшем случае колесо будет повторять картину своего поведения лишь в течение короткого времени, а затем станет отклоняться от нее все больше и больше, и в конечном счете у этой

картины уже не останется ничего общего с предыдущим поведением колеса.

Разумеется, если бы вам удалось создать *абсолютно* идентичные начальные условия, то колесо в точности воспроизводило бы свое предыдущее поведение. В этом, собственно говоря, и заключается сущность детерминистского подхода: текущее состояние единственным образом определяет будущее состояние. Движением колеса управляют детерминированные уравнения – ньютоновские законы движения и законы механики жидкостей, – поэтому, в принципе, если вам известны вначале все переменные, вы можете предсказать будущее движение колеса. Сами по себе эти уравнения не содержат шума, элементов случайности или каких-либо других источников неопределенности. К тому же, если вы решаете эти уравнения на компьютере, используя одни те же начальные значения для всех переменных, то во всех случаях предсказанный исход будет одним и тем же. В этом смысле все можно воспроизвести и повторить.

Однако в реальном, а не компьютерном, мире переменные от случая к случаю не повторяются в точности. Даже микроскопической разницы – лишней капли воды в какой-либо из камер, оставшейся от предыдущего эксперимента, или колебания воздуха в результате выдоха, совершенного кем-либо из взволнованных наблюдателей, – будет достаточно для того, чтобы изменить движение колеса; поначалу это изменение будет незаметным, но уже очень скоро оно приведет к непредсказуемым последствиям.

Таким образом, характерные особенности хаоса таковы: бессистемное и случайное, на первый взгляд, поведение системы, которая во всех остальных отношениях является детерминированной; предсказуемость на коротком отрезке времени вследствие действия детерминистских законов; и непредсказуемость на продолжительном отрезке времени вследствие действия упоминавшегося выше «эффекта бабочки».

Феномен хаоса порождает ряд философских вопросов, которые могут поставить в тупик человека, не привыкшего задумываться над ними. Например, некоторые из моих студентов слишком легкомысленно относятся к «эффекту бабочки», считая его очевидным и не заслуживающим особого внимания. Всем нам известно, что даже какая-нибудь «мелочь» способна оказать огромное влияние на всю нашу

жизнь и даже на жизнь целой страны. Учитывая огромную сложность мира, в котором мы живем, и огромное количество переменных (о существовании многих из которых мы даже не подозреваем, а если даже нам известно об их существовании, то далеко не всегда мы оказываемся в состоянии правильно оценить их влияние), которые оказывают влияние на нашу жизнь, неудивительно, что даже малозначительные, на первый взгляд, события подчас бывают способны инициировать совершенно непропорциональные по своим масштабам цепные реакции. Вспомните старое стихотворение о разбитой армии.

Гвоздь и подкова^[185]

Не было гвоздя – подкова пропала.
Не было подковы – лошадь захромала.
Лошадь захромала – командир убит.
Конница разбита – армия бежит.
Враг вступает в город, пленных не щадя,
Оттого что в кузнице не было гвоздя^[186].

Однако до появления теории хаоса лишь очень немногие из нас понимали, что подобные каскады событий могут влиять даже на простейшие системы: водяные колеса и кувыркающиеся планеты, протекающие водопроводные вентили и механические системы, для которых известны все законы и которые характеризуются буквально несколькими переменными. Однако даже в таких простых системах скрываются зачатки хаоса; они еще не успели проявить себя, однако готовы в любой момент сделать это и преподнести нам немало сюрпризов.

Еще один нюанс: в хаосе любая точка является точкой неустойчивости. Это даже хуже, чем затруднительное положение, в котором оказался путешественник в стихотворении Роберта Фроста «Другая дорога»; жизнь, которая подчиняется законам хаоса, еще более непредсказуема^[187]. Каждый момент такой жизни является моментом истины. Каждое принимаемое решение имело бы долговременные последствия, которые изменяли бы вашу жизнь до неузнаваемости.

Застегните пуговицы своей рубашки не сверху вниз, а снизу вверх – и вы даже не представляете, насколько по-другому может сложиться ваша жизнь через несколько лет. (Это вовсе не преувеличение. Дело в том, что в своей повседневной жизни мы привыкли двигаться по определенным траекториям; между тем мы не имеем ни малейшего представления о том, как сложится наша судьба, если мы начнем двигаться по непривычным для себя траекториям. Но чтобы не повредиться рассудком, человек вынужден исходить из того, что любые мелкие нестандартные решения, принимаемые им, не повлекут за собой сколь-нибудь существенных последствий для него. Эта дилемма была исследована в фильме «Осторожно! Двери закрываются» (Sliding doors). В этом фильме представлены две принципиально разные версии жизни одной женщины в зависимости от того, успела ли она заскочить в вагон метро, перед тем как закрылись его двери.)

В отличие от хаотических систем, ритмические системы не демонстрируют столь высокой чувствительности к слабым возмущениям. Щелкните пальцем по метроному – и он на мгновение остановится, а затем возобновит свои неумолимые *тик-так*. Он, конечно, собьется с первоначального ритма, но образовавшееся отклонение не будет нарастать с течением времени. Этот феномен можно представить более отчетливо, если мы вообразим два идентичных метронома, которые поначалу работали синхронно. Ударьте слегка пальцем один из них; после того как он возобновит ход, он начнет отставать от другого метронома на некий фиксированный интервал времени, причем это отставание не будет нарастать с течением времени. Вообще говоря, если слегка воздействовать на какую-либо нехаотическую систему, то это воздействие либо совсем не будет нарастать, либо будет нарастать очень умеренно, причем это нарастание будет пропорционально времени, которое прошло с момента воздействия. В таких случаях говорят, что ошибки нарастают во времени не быстрее, чем по линейному закону.

Важным моментом здесь является количественный момент. Линейный рост ошибок предполагает, что нехаотические системы ведут себя предсказуемо, по крайней мере в принципе. Приливы и отливы, возвращение кометы Галлея, моменты наступления затмений – все эти явления строго ритмичны и, следовательно, предсказуемы, поскольку слабые возмущения не перерастают со временем в большие

ошибки прогнозирования. Чтобы предсказать поведение нехаотической системы на вдвое более продолжительном отрезке времени, вы должны в два раза точнее измерить ее начальное состояние. Чтобы ваш прогноз распространялся на отрезок времени, втрое более продолжительный, вы должны измерить начальное состояние системы в три раза точнее. Иными словами, горизонт предсказуемости также увеличивается по линейному закону, то есть прямо пропорционально точности, с которой определяется начальное состояние системы.

Хаотические системы, однако, ведут себя совершенно по-другому. Именно в хаотических системах мы начинаем ощущать по-настоящему деморализующие последствия «эффекта бабочки». Протяженность времени, которое может охватывать более или менее точный прогноз состояния хаотической системы, зависит от трех факторов: допустимой погрешности нашего прогноза, точности измерения исходного состояния хаотической системы и неподконтрольного нам масштаба времени, называемого временем Ляпунова^{[188][189]}, которое зависит от динамики, внутренне присущей самой этой системе.

Грубо говоря, наш прогноз может охватывать лишь время, соизмеримое с временем Ляпунова; после этого ошибки измерения истинного исходного состояния разрастаются до такой степени, что превышают допустимый порог погрешности. Снижая используемые стандарты или повышая точность измерения исходного состояния, мы всегда можем охватить своим прогнозом более продолжительные интервалы времени. Однако проблема заключается в жесткой зависимости «горизонта предсказуемости» от точности измерения исходного состояния: если вы хотите увеличить горизонт предсказуемости в два раза, не потеряв при этом в точности, то усилия, которые вам придется затратить для этого, должны возрасти не в два, а в десять раз. Если же вы ставите перед собой еще более амбициозные цели и хотите увеличить горизонт предсказуемости в три раза (при сохранении той же точности), то усилия, которые вам придется затратить для этого, возрастут в сто раз; четырехкратное увеличение горизонта предсказуемости будет стоить вам тысячекратных усилий и т. д. В любой хаотической системе требуемая точность начального измерения возрастает по экспоненциальному, а не линейному закону.

Необходимость выполнения подобного условия не внушает оптимизма. На практике это означает, что ваш горизонт

предсказуемости вряд ли удастся сделать большим, чем n , умноженное на время Ляпунова, причем n должно быть очень малым числом. В данном случае точность ваших измерительных приборов не имеет значения. Время Ляпунова задает горизонт, за пределами которого приемлемое предсказание становится невозможным. В случае хаотической электрической цепи такой горизонт составляет примерно тысячную долю секунды; когда речь идет о прогнозах погоды, точную величину горизонта указать невозможно, но примерно он может равняться двум-трем дням; а в случае Солнечной системы он составляет пять миллионов лет.

Столь внушительная протяженность горизонта в случае Солнечной системы^[190] обуславливает то, что сегодня мы можем с высокой точностью предсказывать движения планет; в масштабах человеческой жизни или даже истории астрономии в целом эти движения *действительно* предсказуемы. Когда мы вычисляем, какими были относительные положения планет сто лет назад или какими они будут через сто лет, наши предсказания вполне достоверны. Однако у нас нет никаких оснований доверять прогнозам, касающимся относительного положения планет 4 миллиарда лет тому назад, в момент зарождения жизни на Земле.

Последним нюансом, касающимся хаоса, является странный вид порядка, скрывающегося за этим хаосом. Хаос не есть нечто бесформенное (вопреки, как было сказано выше, обыденному смыслу этого слова). Скрытый смысл структуры, лежащей в основе хаоса, проявляется в работе действующего макета водяного колеса с его бесконечной последовательностью вращений то в ту, то в другую сторону; несмотря на то что эта последовательность никогда не повторяется в деталях, в целом ее характер остается одним и тем же. В хаосе заложена некая сущность – качество, которое никогда не изменяется.

Когда в начале 1960-х годов Лоренц анализировал свою «маленькую модель», ему удалось силой собственного воображения уловить сущность подлинного хаоса. Он принимал вид некой геометрической фигуры, чего-то необычного, не вполне поверхности, но и не твердого тела, имеющего четкие очертания. Задолго до появления современной компьютерной графики такую фигуру было не так-то просто воспроизвести и визуализировать. Даже после того как

Лоренц нарисовал ее в собственном воображении, ему было очень трудно подобрать слова, чтобы передать ее необычную геометрию. Он описывал ее как «бесконечное сочетание поверхностей». В наши дни это получило название «странного аттрактора»^{[191][192]}.

Точно так же как окружность является формой периодичности, странный аттрактор является формой хаоса. Он пребывает в некоем абстрактном математическом пространстве, называемом пространством состояний, координатные оси которого представляют все переменные в некоей физической системе. Уравнения Лоренца содержали три переменные, поэтому его пространство состояний является трехмерным. В случае водяного колеса – точного механического аналога уравнений Лоренца – одна из переменных говорит нам о том, как быстро и в каком направлении вращается это колесо, тогда как две другие переменные характеризуют два конкретных аспекта того, как распределяется вода по периметру колеса. Значения этих переменных в тот или иной момент определяют конкретную точку в пространстве состояний, соответствующую «фотографии» данной системы в этот момент времени.

В следующий момент состояние системы изменится в результате поворота колеса, а также вытекания и перераспределения воды. Увлекаемая своей собственной динамикой, система действует, переходя из состояния в состояние. Подобно схемам в уроках танцев Артура Мюррея, уравнения Лоренца – это правила, описывающие каждый ваш следующий шаг. Они определяют бесконечно малые стрелки в каждой точке пространства состояний. В какой бы точке ни оказывалось состояние системы, оно должно следовать за стрелкой в данной точке; эта стрелка сразу же переводит систему в следующую точку, где этот процесс повторяется, и т. д. Время идет, и значения переменных изменяются, точка перемещается в пространстве состояний, прочерчивая непрерывный путь, называемый траекторией, и летит, подобно комете в вымышленном мире, который существует лишь в воображении математика. Прелесть этой идеи заключается в том, что она трансформирует динамику в геометрию. Хаотическое движение становится некоей картиной – чем-то таким, что мы можем увидеть, статическим образом, который мы можем рассматривать и изучать.

На что же похож хаос? Упомянутая нами траектория бесконечно долго бороздит просторы пространства состояний. Она никогда не

завершается и не пересекает сама себя, поскольку хаос никогда не повторяется. Лоренцу удалось доказать, что его траектория никогда не выходит за пределы определенной большой сферы, поэтому она никогда не может уйти в бесконечность. Замкнутая внутри этой сферы, приговоренная бесконечно долго блуждать внутри нее, ни разу не пересекаясь сама с собой, эта траектория должна следовать очень сложным путем. Возникает соблазн представить ее в виде клубка, намотанного из бесконечно длинной нити и лишенного какой-либо структуры.

Но примитивная компьютерная графика, отображающая уравнения Лоренца, показала, что эта траектория подчинена строгой логике и замкнута лишь в крошечной части доступного ей пространства. Создается впечатление, что она натянута на некую поверхность – микроскопически тонкую мембрану, форма которой, по иронии судьбы, похожа на пару крыльев бабочки. Траектория «наматывается» вокруг одного из таких крыльев, удаляясь по спирали от центра. Затем, приблизившись к краю крыла, она устремляется к другому крылу и начинает вращение по спирали вокруг этого крыла. Переходя то к одному крылу, то к другому, траектория совершает вокруг каждого крыла непредсказуемое количество витков. Это очень похоже на то, как водяное колесо совершает непредсказуемое количество поворотов то в одном, то в другом направлении.

Пытаясь разобраться в картине, которую предоставил ему компьютер, Лоренц понял, что здесь что-то «не так». Он знал, что траектория не может быть привязана к какой-то определенной поверхности: в противном случае она обязательно должна была пересекать сама себя. Крылья бабочки могли бы быть похожи на единую поверхность, но они должны были бы состоять из бесконечно большого количества слоев, упакованных настолько тесно между собой, что их невозможно было бы отличить друг от друга, подобно пластинкам слюды.

Такое сочетание бесконечно большого множества поверхностей – этот странный аттрактор – воплощает в себе новый вид порядка. Несмотря на то что «маршрут» траектории непредсказуем в деталях, он всегда остается на аттракторе, всегда пролегает через одно и то же подмножество состояний. Такая узость репертуара представляет собой

проявление порядка, заложенного в хаосе, и объясняет, почему его сущность всегда остается неизменной.

Чтобы сделать эти абстракции более конкретными, попытайтесь представить себе странный аттрактор в виде футуристического автомобильного паркинга из фильма «Сумеречная зона» (Twilight Zone). Гараж полностью автоматизирован. Пока вы пассивно сидите за рулем автомобиля, буксирное устройство цепляет ваш автомобиль и перетаскивает его на свободное место в гараже. Подобно аттрактору Лоренца, гараж имеет два крыла; в данном случае будем называть их восточной и западной башнями, каждая из которых содержит бесконечно большое число уровней. Когда вы готовы отправиться в дорогу, вы нажимаете на кнопку, чтобы включить буксирное устройство. В течение какого-то времени вы спускаетесь и чувствуете, что спуск действительно происходит, хотя вас несколько мутит от бесконечного кружения по всем этим многочисленным уровням; внезапно у вас возникает ощущение, что вы отнюдь не приблизились к поверхности земли, оказавшись вместо этого у верхнего уровня противоположной башни. В ходе этой дьявольской езды вы продолжаете бесконечно кружить по многочисленным уровням, оказываясь в непредсказуемые моменты времени то в одной, то в другой башне. Вы обречены кружить по этим уровням до бесконечности. Хотя вам никак не удастся выбраться из этой ловушки, ваш путь ни разу не повторяется. Вы можете случайно вернуться на тот же уровень той же башни, но никогда в ту же самую точку.

Такая вот судьба у траектории на аттракторе Лоренца. Буксирное устройство – это дифференциальное уравнение; именно оно определяет траекторию: и ее скорость, и ее направление в каждый момент времени. Эти правила носят совершенно детерминированный характер: судьба траектории определяется ее начальными условиями. Вернемся к нашей аналогии с паркингом: если каждый раз начинать с одного того же парковочного места в гараже, то вас вместе с вашим автомобилем будут буксировать каждый раз по одному и тому же пути, ускоряясь и замедляясь в одних и тех же местах. *Эффект бабочки* выражается посредством высокой зависимости от начальных условий: возвращаясь к аналогии с паркингом, если вас и человека, находящегося в соседнем с вами автомобиле, попросят покинуть стоянку в один и тот же момент времени, то в течение какого-то времени буксирное устройство будет

перемещать вас обоих по одному и тому же маршруту – в чем вы оба можете легко убедиться, наблюдая друг за другом из окна своего автомобиля, – но очень скоро ваши пути и судьбы разойдутся. После этого картины вашего кружения в двух башнях окажутся совершенно некоррелированными. Тем не менее существование странного аттрактора обеспечивает некую разновидность порядка. Вы обречены на бесконечное кружение в этом гараже, повторяя до бесконечности одни и те же состояния, хотя и не в одной и той же последовательности.

Несмотря на то что описанная выше форма хаоса многим читателям покажется кошмарной, его голос звучит на удивление успокаивающе. Если его воспроизвести с помощью громкоговорителя, то окажется, что хаос звучит подобно так называемому белому шуму, подобно мягкой статике, которая помогает уснуть людям, страдающим бессонницей. Осенью 1988 г., когда у физика Лу Пекора родилась мечта^[193] об использовании хаоса для каких-либо практических целей, он уловил в звуках, издаваемых хаосом, – в звуках, которые воспринимались всеми остальными исследователями лишь как примитивное, бессмысленное шипение, – надежду на осуществление своей мечты.

По жизни Лу Пекора – беззаботный и веселый человек со скромными манерами. В середине 1980-х годов он работал в научно-исследовательской лаборатории ВМС США, что в Вашингтоне, занимаясь изучением аннигиляции позитронов в твердых телах, спиновых волн в магнитах и некоторых других проблем физики твердого тела. Подумывая о том, чтобы сменить направление своих исследований, и будучи заинтригован ажиотажем вокруг теории хаоса (в то время это было самой животрепещущей темой в физике), он попытался найти оправдание переключения своих научных интересов на столь эзотерический предмет. Он знал, что его начальство отнесется к такому поступку более благосклонно, если он сможет указать какие-либо практические применения хаоса (например, в военной или какой-либо другой области). Столь прагматический подход к теории хаоса (который задним числом представляется вполне естественным) оказался полной неожиданностью для тех, кто занимался исследованием хаоса. До того времени этим занимались чистые теоретики, которых интересовала природа хаоса как таковая и которым

не было никакого дела до того, найдутся ли какие-либо практические применения разрабатываемой ими теории.

Когда Пекора спросил у себя, можно ли поставить хаос на службу человеку, первое, о чем он вспомнил, была техника связи. Он подумал, нельзя ли упрятать в хаос секретные сообщения, осложнив таким образом противнику задачу передачи и расшифровки этих сообщений. Тот, кто пытается перехватить секретное сообщение, может даже не подозревать о том, что сообщение передано, или может испытывать немалые проблемы с выделением сообщения из шума. Пекора понимал, что сначала нужно уяснить, как синхронизировать хаотический передатчик с приемником, прежде чем можно было надеяться, что такая система шифрования сработает. Все формы беспроводной связи основаны на синхронизации. Например, в случае радио процесс настройки на определенную радиостанцию сводится к синхронизации приемника с частотой передачи соответствующего радиосигнала. После того как синхронизация будет достигнута, из принимаемого радиосигнала нужно выделить звук (для этого используется процесс так называемой демодуляции, то есть отделения звука от несущей частоты радиосигнала). В данном случае проблема заключалась в том, чтобы обобщить эту идею на хаос, когда в роли носителя выступает не периодическая, а хаотическая волна.

Пекора и Том Кэррол (в то время научный сотрудник с ученой степенью) не были специалистами в области связи. Впрочем, в теории хаоса они тоже были новичками, поэтому долго не могли решить, с чего им начать. В конце концов они решили, что получить какое-то представление об изучаемой ими проблеме лучше всего с помощью компьютерного моделирования. По крайней мере, в случае неудачи им не придется сожалеть о времени, затраченном на изготовление устройств, которые в конечном счете окажутся неработоспособными. Они немало повозились с компьютером, моделируя работу разных пар хаотических систем, связывая их между собой разными способами в надежде, что хаотические флуктуации этих систем каким-либо образом будут синхронизированы. Однако все их попытки не приводили к положительному результату. Эффект бабочки оказался слишком сильным. В течение какого-то непродолжительного времени моделируемая пара «передатчик-приемник» работала синхронно, после чего система неизменно рассинхронизировалась.

Немало разочаровавшись таким результатом, Пекора отправился в Хьюстон, на ежегодную конференцию по теории хаоса под названием Dynamics Days. Он сидел в зале, слушая лекции корифеев теории хаоса и безуспешно пытаясь сосредоточиться: его постоянно отвлекали мысли о нерешенной проблеме синхронизации. К концу конференции у него так и не появилось каких-либо конкретных идей относительно решения этой проблемы. Пекора улетел домой, едва успев на последний в тот день рейс. Он вернулся к себе домой уже после полуночи, чувствуя смертельную усталость и опустошенность. Жена и дети уже спали. Вскоре после того как он задремал, его разбудил плач семимесячной дочери Анны, которая, по-видимому, проголодалась. Жена сказала, что сама покормит дочь, но Пекора сказал, что будет лучше, если этим займется он.

Сидя в ночной тишине возле кровати своей дочери и укачивая маленькую Анну у себя на руках, Пекора чувствовал, как постепенно уходит напряжение, накопившееся в нем за последнее время. Куда-то исчезли мысли, не дававшие ему покоя. Когда он вернулся к себе в постель, в его голове внезапно созрело решение. «Хаосом нужно управлять с помощью хаоса: я должен управлять приемником с помощью сигнала, который поступает с точно такой же системы». Хотя он тревожился, что за время сна может забыть эту интересную идею, он слишком устал, чтобы еще раз подняться с постели и зафиксировать ее на бумаге.

Проснувшись на следующее утро, Пекора вспомнил идею, которая пришла ему в голову ночью. Ему не терпелось проверить ее на практике. Он хотел проверить ее на уравнениях Лоренца, но еще не освоил как следует решение дифференциальных уравнений на компьютере, поэтому решил взять за основу какую-либо хаотическую систему, которую было бы легче запрограммировать. Пекора начал свой эксперимент со случая, когда передатчик и приемник пребывают в разных состояниях, и попросил компьютер предсказать их поведение по истечении продолжительного времени. Когда компьютер начал выдавать результаты моделирования, стало очевидно, что данные указывают на апериодичность, вполне естественную для хаоса, но – и это было удивительно! – значения сближались между собой. Это означало, что передатчик и приемник синхронизировались! Управляя

приемником с помощью хаотического сигнала, передаваемого с его дубликата, вы можете заставить эту пару работать синхронно.

С технической точки зрения схему Пекора^[194] можно описать следующим образом. Берем два экземпляра одной и той же хаотической системы. Один из этих экземпляров рассматриваем как задатчик; применительно к системам связи он будет выполнять функции передатчика. Другой экземпляр принимает сигналы от задатчика, но не отправляет никаких сигналов. Связь имеет односторонний характер. (Подходящей аналогией может служить военный командный центр, отправляющий зашифрованные приказы военнослужащим в поле или на корабле.) Чтобы синхронизировать эти две системы, отправляем в приемник постоянно меняющееся численное значение одной из переменных задатчика и используем его для замены соответствующей переменной приемника – и так в каждый очередной момент времени. Пекора обнаружил, что при определенных условиях все *другие* переменные приемника – те, которые *не* были заменены – автоматически входят в синхронизм со своими аналогами в задатчике. В результате будут совпадать *все* переменные. Две системы окажутся полностью синхронизированны.

Это описание, пусть и правильное с математической точки зрения, не передает удивительный феномен синхронизированного хаоса. Чтобы оценить всю необычность этого явления, представьте переменные хаотической системы в виде современных танцоров. По аналогии с уравнениями Лоренца, назовем их x , y и z . Каждый вечер они выступают на сцене, устраивая между собой своеобразную «отработку» сигналов, поступающих от партнеров: каждый танцор отвечает даже на едва заметные сигналы двух других танцоров. Несмотря на то что их повороты и жесты кажутся тщательно отрепетированными, это вовсе не так. С другой стороны, они вовсе не импровизируют – по крайней мере не импровизируют в обычном смысле этого слова. В том, как они танцуют, нет ничего случайного, никакого намека на импровизацию. В зависимости от того, в каком именно месте сцены в данный момент находятся два других танцора, третий реагирует в соответствии с определенными правилами. Хитрость заключается в изощренности самих правил. Они гарантируют, что результирующее выступление всегда будет элегантным и никогда – монотонным; оно всегда наполнено пассажирами, которые напоминают друг друга, но никогда не

повторяют друг друга. Каждую минуту в танце появляется что-то новое (такова уж природа аperiodичности), каждый вечер выступление танцоров не похоже на их предыдущее выступление (сказывается эффект бабочки); тем не менее, по своей сущности, выступление всегда остается одним и тем же, поскольку оно всегда следует одному и тому же странному аттрактору.

До сих пор мы рассматривали метафору для одной системы Лоренца, играющей роль приемника в схеме связи, предложенной Пекорой. Теперь допустим, что время остановилось на мгновение. Приостановилось действие законов Вселенной. В этот ужасный момент x бесследно исчезает. На его месте появляется новая переменная; назовем ее x' . Эта новая переменная похожа на x , но она запрограммирована таким образом, чтобы не обращать внимания на локальные y и z . Поведение x' определяется дистанционно ее взаимодействием с y' и z' , переменными в передатчике, находящемся где-то далеко, в другой системе Лоренца, причем все они являются частью некоего невидимого задатчика.

Все это очень похоже на классический фильм ужасов «Вторжение похитителей тел» (Invasion of the Body Snatchen). С точки зрения принимающей системы, эта новая переменная x должна казаться необъяснимой. «Мы пытаемся танцевать с x , но он почему-то перестал реагировать на все наши сигналы», – думают y и z . «Никогда раньше мне не приходилось видеть подобного поведения x », – говорит один из них. «Эй, x , – шепчет другой, – это действительно ты?» Но на лице x сохраняется непроницаемое выражение. Точно так же, как в упомянутом мною фильме, x является порождением стручка, то есть стручком, принявшим вид x . Он уже не танцует вместе с y и z – теперь его партнерами являются y' и z' , невидимые призрачные двойники y и z , удаленные переменные в параллельном мире задатчика. В этой удаленной системе поведение x' представляется совершенно нормальным. Но в результате телепортации на приемник x' выглядит на удивление неотзывчивым. Это объясняется тем, что x приемника был похищен, подменен этим странным x' , возникшим словно ниоткуда. Будучи весьма чувствительными созданиями, y и z вносят соответствующие поправки в свой танец. Вскоре нормальное взаимодействие всей троицы x , y и z восстанавливается: они выделяют свои «па» совершенно непринужденно, плавно

перемещаясь по пространству состояний на аттракторе Лоренца и создавая перед нашим взором картину неповторимой «хаотической грации».

Однако самым зловещим и сверхъестественным в этой картине оказывается то, что сами y и z к этому времени уже превратились в порождения стручков. Сами о том не подозревая, они сейчас идеально синхронно танцуют со своими собственными призрачными двойниками y' и z' , переменными, с которыми они еще никогда не встречались. Каким-то образом, исключительно благодаря влиянию телепортированного x' , была также передана информация об удаленных y' и z' , причем этой информации оказалось достаточно, чтобы синхронизировать приемник с задатчиком. Теперь оказались «рекрутированными» все три переменные x , y и z . Невидимый задатчик, в полном соответствии со своим названием, «задает тон».

Компьютерное моделирование, выполненное Пекорой, показало, что его схема оказалась работоспособной применительно к уравнениям в компьютере. Теперь вопрос заключался в том, окажется ли его схема работоспособной в лабораторных условиях, то есть в условиях, когда никакие две системы не могут быть совершенно идентичны друг другу и не могут быть полностью ограждены от сторонних возмущений. Пекора рассмотрел вопрос о том, какие хаотические системы оказались бы наиболее управляемыми с экспериментальной точки зрения. Выбор сразу же пал на электронные цепи по причине их высокого быстродействия, дешевизны и удобства выполнения измерений, что позволяло получить значительный объем данных за короткое время. Кэррол согласился с этими доводами и принялся за работу, пытаясь воплотить уравнения Лоренца в электронных устройствах. Почти сразу же он зашел в тупик. Реализация этих уравнений предполагала выполнение операций умножения переменных x , y и z . Для выполнения этих операций электронным способом требовались микрочипы множителей, но Кэррол пришел к выводу, что готовые компоненты, имевшиеся в его распоряжении, не могли обеспечить требуемую точность вычислений. Более серьезная проблема заключалась в том, что в ходе функционирования системы значения переменных в уравнениях Лоренца изменялись в 100 тысяч раз. Столь широкий динамический диапазон превышал возможности типичных устройств питания

электронных устройств. Таким образом, Пекора и Кэррол были вынуждены отказаться от идеи создания электронной цепи Лоренца.

Пытаясь найти более подходящую альтернативу, Пекора и Кэррол обратились за помощью к Роберту Ньюкомбу, электроинженеру из Мэрилендского университета, который к тому времени уже разработал свой собственный вариант хаотических цепей. Ньюкомб дал полную волю своему творческому воображению. Он не видел категорической необходимости в том, чтобы разрабатывать цепи, которые моделировали бы лоренцовы водяные колеса, или лазеры, или какую-либо другую физическую систему – его просто интересовал хаос как таковой, и он хотел исследовать хаос электронным способом. Кэррол воспользовался одним из рецептов Ньюкомба и подтвердил, что полученная таким образом электронная цепь генерировала хаотические флуктуации напряжения и тока. Отображаемые на экране осциллографа, эти переменные вырисовывали странный аттрактор – не точно такой же, как крылья бабочки Лоренца, но похожий на него. Скорость работы этой цепи составляла тысячи циклов в секунду; она создавала быстрый и прекрасный хаос.

Теперь можно было приступить к тестированию схемы синхронизации. Кэррол изготовил второй экземпляр своей цепи и подсоединил его к первому экземпляру согласно правилам Пекоры. В соответствии с теорией эти две цепи должны были осциллировать нерегулярно, хаотически, но в идеальном синхронизме между собой. Чтобы протестировать их синхронизм, Кэррол настроил осциллограф на отображение графика зависимости напряжения на приемнике y от его аналога на передатчике – y' . В случае равенства этих двух переменных они должны попадать на диагональ, проходящую под углом 45 градусов (поскольку, если значения y отображаются по горизонтали, а значения y' – по вертикали, то горизонтальное смещение y должно равняться вертикальному смещению y' в случае, если их значения всегда равны между собой). А поскольку значения y и y' все время меняются, от момента к моменту, они должны бегать вдоль диагонали туда и обратно, никогда не отклоняясь от нее.

Кэррол нажал на кнопку, чтобы запустить свою систему. Понадобилось всего две миллисекунды, чтобы оба напряжения оказались на диагонали, после чего они оставались на ней до завершения эксперимента. «У меня становятся дыбом волосы на

голове, когда я думаю об этом, – рассказывал мне Пекора. – Вряд ли я еще когда-нибудь в своей жизни переживу подобный момент. Это все равно как присутствовать при рождении своего ребенка».

Декабрь 1991 г. Последний день занятий в МТИ. Только что я закончил чтение последней лекции своего курса по теории хаоса. Все слушатели, за исключением одного аспиранта, покинули аудиторию. Сияя от гордости, он протянул мне лист бумаги, испещренный формулами и теоремами, каждая из которых была обведена аккуратной прямоугольной рамкой. При подготовке к предстоящему выпускному экзамену он умудрился представить весь курс по теории хаоса на единственном листе бумаги. Оценив его каллиграфический почерк, я понял, что имею дело с неординарной личностью. Так оно и было на самом деле: Кевин Куомо оказался одним из лучших аспирантов курса.

Куомо в это время только писал диссертацию. Ее темой было исследование синхронизированного хаоса в электрических цепях и возможность их использования в системах связи. В то время я имел некоторое представление о статье Кэррола и Пекоры, опубликованной в 1990 г., но еще не успел ознакомиться с ней основательно. Куомо хотел поделиться со мной всем, что он думает по поводу этой статьи, и буквально взахлеб рассказывал мне о ней, но затем переключился на собственную работу и предложил мне ознакомиться с цепью, которую он сам сконструировал. Это было первое в мире электронное воплощение уравнений Лоренца. Он также просил меня проверить выполненное им математическое доказательство – демонстрацию новой схемы синхронизации, удовлетворяющей уравнениям Лоренца вне зависимости от способа запуска приемника и передатчика. Куомо на мгновение остановился, а затем продолжил: Пекора и Кэррол не предложили никакого подобного доказательства, и это обстоятельство беспокоит его. Логика предложенного им доказательства не была слишком сложной – лишь стандартное применение функций Ляпунова, подобное тому, которое встречалось у нас на занятиях. Эта простота настораживала его: может быть, он в чем-то ошибается, что-то упустил из виду?

Оказалось, что Куомо ни в чем не ошибся. Предложенное им доказательство было безупречным, а разработанная им цепь действительно моделировала уравнения Лоренца (впоследствии Пекора

честно признался в том, что до сих пор не представляет, как Куомо удалось додуматься до такого решения). Однако сейчас Куомо знаменит вовсе не этим. Впоследствии ему и его консультанту Элу Оппенгейму удалось впервые в мире продемонстрировать практическую возможность хаотического шифрования информации: синхронизированный хаос действительно можно использовать для повышения безопасности информации, передаваемой по каналам связи.

Их метод основан на маскировании, то есть применяется та же стратегия, которая используется (безуспешно и незабываемо) скрытной парочкой из фильма Френсиса Форд Копполы «Разговор» (The Conversation). Чувствуя, что за ними ведется слежка, мужчина и женщина бродят по многолюдной городской площади и разговаривают друг с другом шепотом, надеясь, что громкие звуки, издаваемые уличными музыкантами, помешают окружающим подслушать их разговор. В версии Куомо и Оппенгейма фоновый шум создается шипением электрического хаоса, генерируемого переменной x в цепи Лоренца. Прежде чем какое-либо сообщение будет отправлено на приемник, на него налагается x , чтобы замаскировать это сообщение. Для большей надежности x должен быть намного громче самого сообщения (точно так же, как уличная музыка должна быть намного громче разговора шепотом) во всем его диапазоне частот. Разумеется, если приемник не может отделить сообщение от маски, такая система оказывается неработоспособной. Для решения этой проблемы применяется синхронизация. Схема Куомо гарантирует, что приемник, когда на него поступает гибридный сигнал (сообщение плюс маска), синхронизируется с маской, а не с сообщением. В результате приемник регенерирует чистую версию маски. Извлекая ее из гибридного сигнала путем вычитания, мы получаем интересующее нас сообщение. Этот метод обеспечивает безопасность передаваемой информации, поскольку тому, кто попытается перехватить сообщение, будет весьма проблематично выполнить такую же декомпозицию: он не будет знать, что именно нужно вычесть, какая часть комбинированного сигнала является маской, а какая часть – сообщением.

Через год после того как Куомо прослушал мой курс, он вернулся, чтобы «вживую» продемонстрировать свою схему шифрования нынешним студентам. Сначала он показал нам схему своего передатчика – небольшую печатную плату с напаянными на нее

резисторами, конденсаторами, операционными усилителями и микросхемами аналогового умножителя. Напряжения x , y и z в трех разных точках этой схемы были пропорциональны одноименным переменным Лоренца. Когда на экране осциллографа отобразился график зависимости x от y , мы увидели хорошо знакомые нам очертания крыльев бабочки странного аттрактора. Затем, подключив к передатчику громкоговоритель, Куомо предоставил нам возможность слышать звуки хаоса. Он потрескивал, подобно разрядам статического электричества, – вполне привычный для нас фон, который мы слышим во время радиопередачи. Затем Куомо взял еще одну печатную плату – приемник, являющийся двойником передатчика, и соединил их между собой с помощью зажима типа «крокодил» в месте, специально предназначенном для этой цели. Еще раз воспользовавшись осциллографом, он продемонстрировал нам, что обе схемы, передатчик и приемник, теперь работают синхронно, о чем свидетельствовала упоминавшаяся выше диагональ, пересекающая экран осциллографа под углом 45 градусов.

Куомо произвел в аудитории настоящий фурор, когда использовал эти схемы, чтобы замаскировать сообщение, в качестве которого он выбрал необычайно популярную в то время песню «Эмоции» в исполнении Мэрайи Кэри. (Один из присутствовавших в аудитории, которому, очевидно, не очень-то нравилась эта песня, поинтересовался: «Это полезный сигнал или шум?») После воспроизведения первоначальной версии песни Куомо проиграл замаскированную версию. Слушая это шипение, было совершенно невозможно догадаться, какая песня скрывается за ним. Однако когда замаскированное сообщение было передано на приемник, сигнал на выходе оказался практически идеально синхронизирован с исходным хаосом, а после мгновенного электронного вычитания мы снова услышали пение Мэрайи Кэри. Звучание было далеким от идеального, но вполне разборчивым.

Когда статья Куомо и Оппенгейма^[195] была опубликована в 1993 г., объявленные в ней результаты ничуть не удивили Лу Пекору. К тому времени он вместе с Томом Кэрролом уже три года действовал примерно в том же направлении, но у них не было возможности опубликовать свои результаты.

Еще осенью 1989 г., после того как их хаотические цепи были успешно синхронизированы, Пекора и Кэррол приступили к решению проблемы хаотического шифрования. Обладая чрезвычайно ограниченными познаниями в области теории связи и кодирования, они выбрали весьма неуклюжий метод, предполагавший отправку двух сигналов. Один сигнал использовался для установления синхронизма между приемником и передатчиком. Второй сигнал представлял собой гибрид: маску с сообщением, добавленным к ней при очень низком уровне мощности. По сути, это та же стратегия, которую через пару лет предложили Куомо и Оппенгейм, хотя и менее элегантная в том смысле, что метод Куомо использует лишь один сигнал (x плюс сообщение), выполняющий двойную работу: он не только устанавливает синхронизм, но и переносит сообщение. Но в целом идея одна и та же.

Группа «Звездные войны» (Space Warfare) в научно-исследовательской лаборатории ВМС США заинтересовалась работой Пекоры и Кэррола, поскольку она открывала возможность использования новых способов кодирования и шифрования спутниковой связи. Они финансировали работу Кэррола в предыдущем году и теперь хотели присмотреться повнимательнее к тому, чем занимаются эти два физика. Руководитель группы предложил Пекоре помалкивать о своей работе до тех пор, пока люди из «Звездных войн» не оценят ее эффективность: они намеревались привлечь к оценке этой работы стороннего эксперта. Пекоре были даны четкие инструкции относительно того, как вести себя. Ему и Кэрролу не разрешалось задавать эксперту какие-либо вопросы: ни в какой организации он работает, ни даже выяснять его фамилию. «Как же нам обращаться к нему?» – спросил Пекора. «Зовите его Билл», – посоветовал руководитель группы. Между собой Пекора и Кэррол звали его д-р Х.

Д-р Х оказался молодым человеком, серьезным и весьма компетентным специалистом в своей области. Он таскал за собой компьютер, напичканный программами моделирования аналоговых цепей. Похоже, он не очень-то разбирался в теории хаоса, но был хорошо знаком с теорией связи. Ему удалось довольно быстро выполнить компьютерное моделирование цепей, предложенных Пекорой и Кэрролом. Впоследствии их проинформировали о том, что д-р Х пришел к выводу, что их цепи функционируют в полном соответствии с описанием, хотя он и сомневался в том, можно ли

привести эти цепи к цифровому виду, обеспечивающему достаточную степень их защищенности.

Вскоре к оцениванию схем Пекора и Кэррола подключились другие члены группы «Звездные войны». Пекора по наивности поспорил с одним из них на бутылку пива, что сможет упрятать в хаос синусоидальный сигнал, и предложил своему визави извлечь этот сигнал. Тот запустил систему в работу на минуту, измерил кривые напряжения, затем выполнил вычисление, называемое быстрым преобразованием Фурье, чтобы измерить силу каждой из составляющих частот, переданных в ходе этого быстротечного эксперимента. Синусоидальная кривая предстала на экране в виде выступа на спектре. Пекора понял, что с теорией шифрования ему следует ознакомиться более основательно.

Члены группы «Звездные войны» пришли к выводу, что эта новая схема представляет определенный интерес, однако это вовсе не то, на что могли бы рассчитывать ВМС. В конце концов Пекоре и Кэрролу разрешили опубликовать полученные ими результаты, но поскольку они хотели оформить патент на изобретение, их юрист посоветовал еще немного помолчать о выполненной ими работе. Таким образом, они приняли решение повременить с публикацией.

Кроме того, группа «Звездные войны» свела Пекору и Кэррола с одним из сотрудников Агентства национальной безопасности (АНБ), сверхсекретной государственной организации, занимающейся, в частности, вопросами кодирования и декодирования информации. Пекора посетил штаб-квартиру АНБ и ознакомил с полученными им результатами группу шифровальщиков, которые внимательно выслушали его доклад, но не ответили ни на один из его вопросов. «Мне казалось, что я общаюсь с черной дырой, – рассказывал впоследствии Пекора. – Информация входит в эту дыру, но ничего не выходит из нее». После визита в АНБ Пекора понял, что забыл сообщить им кое-что еще. Одним словом, ему понадобилось еще раз связаться с сотрудником, который организовал ему посещение штаб-квартиры АНБ. Поскольку Пекора потерял номер телефона этого сотрудника АНБ, он заглянул в телефонный справочник и, к немалому своему удивлению, обнаружил там номер этой сверхсекретной организации. Он набрал этот номер и вышел таким образом на

сотрудника справочной службы АНБ. Их общение напоминает один из скетчей известной комик-группы «Монти Пайтон»:

- Могу я узнать номер телефона полковника Y?
- Я не могу подтвердить или опровергнуть, что человек, которого вы называете полковником Y, работает здесь.
- Хорошо, а вы не против, если я сообщу вам номер своего телефона, а вы попросите полковника Y перезвонить мне?
- Я не могу подтвердить или опровергнуть, что он работает здесь.
- Это справочная служба АНБ, не так ли?
- Да. Какую информацию вы хотели бы получить?

Проделанная ранее работа над синхронизированным хаосом вселила немалый оптимизм относительно перспектив хаотического шифрования, особенно в физиков, имеющих лишь весьма приблизительное представление о криптографии. В начале 1990-х годов в физических журналах можно было встретить немало статей, заголовки которых будили в читателях надежду на скорое наступление эры «безопасной» связи. Впрочем, специалистам было виднее, как в действительности обстоит дело. С самого начала Эл Оппенгейм предостерегал Куомо и меня от чрезмерной эйфории по поводу достигнутых результатов. «Этот метод ни в коем случае нельзя назвать безопасным, – предупреждал нас Оппенгейм. – Безопасный – значит такой, который невозможно взломать. Нам не известно наверняка, безопасен ли этот метод. Возможно, он обеспечивает какой-то – достаточно невысокий – уровень безопасности, но это, пожалуй, и все, на что он способен. Схемы маскирования взломать не так уж сложно».

Для тех, кто пользуется мобильными телефонами, даже минимальный уровень безопасности является большим благом^[196]. Такой уровень безопасности оказался бы вполне достаточным для принцессы Дианы, когда журналисты перехватили разговор с ее любовником Джеймсом Гилби, впоследствии опубликованный под названием Squidgy («Мягкий»). В 1989 г. журналисты перехватили еще более интимный телефонный разговор принца Чарльза с Камиллой Паркер Боулз. Когда Ньют Гингрич обсуждал вместе со своими юристами выдвинутое против него обвинение в нарушении этических

норм, их переговоры по мобильной связи были перехвачены и записаны сторонниками Демократической партии с помощью полицейского сканера. Устройства шифрования разговоров по мобильной связи существуют и в наши дни, однако их стоимость составляет несколько сотен долларов. Хаотическое маскирование могло бы оказаться более дешевой альтернативой для борьбы с потенциальными любителями перехватывать информацию, передаваемую по мобильной связи.

Что же касается применения в военной и финансовой сферах, то для этого требуется гораздо более безопасное шифрование. На данный момент методы шифрования, основанные на теории хаоса, оказались обескураживающе слабыми. Кевин Шорт^[197], математик из университета штата Нью-Гэмпшир, продемонстрировал, насколько легко взломать практически любой хаотический код из тех, которые предложены на сегодняшний день. Когда он размаскировал лоренцов хаос Куомо и Оппенгейма, полученные им результаты инициировали своего рода «гонку вооружений» между специалистами, занимавшимися проблемами нелинейности, которые пытались разработать еще более сложные системы шифрования информации. Однако в конечном счете победа осталась за взломщиками кодов.

Одной из самых многообещающих разработок стал проект 1998 г. Его авторами были Грегори Ванвиггерен и Раджаршри Рой, физики из Технологического института штата Джорджия. Они провели первую экспериментальную демонстрацию хаотической связи^[198], реализованной с помощью лазеров и волоконно-оптической линии связи, вместо обычных электронных генераторов сигналов и проводных линий связи. В оптической системе связи Ванвиггерена и Роя хаотические волны света служили носителями скрытых в них сообщений, передавая информацию от одного лазера к другому со скоростью 150 миллионов бит в секунду, то есть в тысячи раз быстрее, чем передают информацию обычные электронные устройства. При этом не существует каких-либо препятствий, по крайней мере на теоретическом уровне, для достижения еще больших скоростей.

Еще одно преимущество передачи информации с помощью хаотических лазеров заключается в том, что генерируемый ими хаос оказывается гораздо более сложным, что существенно усложняет взлом кодов. Степень сложности определяется числом, которое получило название «размерности странного аттрактора»^[199] и представляет собой

естественное обобщение обычной концепции размерности пространства. Однако в отличие от прямой линии (одномерный случай) или плоскости (двумерный случай), размерность странного аттрактора обычно представляет собой дробное число. Например, лоренцов аттрактор состоит из бесконечно большого числа двумерных (плоских) листов, из чего следует, что он обладает бесконечно большой поверхностью, но не имеет объема. Как бы загадочно это ни звучало, он представляет собой нечто большее, чем поверхность, но вместе с тем нечто меньшее, чем объемное тело, а его размерность, соответственно, больше 2, но меньше 3. Для волоконно-оптических систем передачи информации Ванвиггерена и Роя, построенных на основе лазеров, легированных эрбием, размерность странного аттрактора неизвестна, но почти наверняка она представляет собой дробное число и, что еще важнее, она огромна. Вполне вероятно, что она является числом, не меньшим 50, то есть соответствует чрезвычайно сложной форме хаоса. Остается лишь убедиться в том, что эта новая форма кодирования окажется более безопасной, чем ее предшественники.

Если же оставить в стороне шифрование, то наиболее важное значение синхронизированного хаоса для нас может заключаться в том, как он углубил наше понимание синхронизма как такового. Теперь синхронизм уже не будет ассоциироваться у нас лишь с ритмичностью, цикличностью и повторяемостью. Синхронизированный хаос поставил нас лицом к лицу с совершенно новым видом порядка во Вселенной или, по крайней мере, с порядком, который не встречался нам ранее: некой формой преходящего артистизма, который, как нам когда-то казалось, присущ лишь человеку. Это свидетельствует о том, что синхронизм представляет собой еще более распространенное и еще более утонченное явление, чем нам когда-то казалось.

Глава 8. Синхронизм в трех измерениях

Моя первая встреча с синхронизмом произошла совершенно случайно, в один из ничем не примечательных дней 1981 г. в Кембридже, Англия. В то время я, окончив колледж в США и получая стипендию Маршалла (Marshall Scholarship), углублял свои познания в математике, чувствуя себя совершенно потерянным в непривычной обстановке. Английские девушки не понимали моих шуток, брюссельская капуста была бесцветной и безвкусной, вечно морозящий дождик наводил на меня беспросветную тоску, а туалетная бумага казалась воценой. Даже моя курсовая работа была какой-то тусклой: нам предлагались на выбор старомодные темы по классической физике (например, динамика вращающихся волчков). Это был сложный, но отнюдь не вдохновляющий материал.

В надежде пробудить в душе свое прежнее увлечение наукой, я наведаясь в книжный магазин, что напротив университета, чтобы подыскать что-нибудь подходящее для себя по биологической математике. (На последнем курсе колледжа я написал дипломную работу по геометрии ДНК, и опыт, полученный мною при подготовке этой дипломной работы, – выполнение оригинальных исследований под руководством биохимика с мировым именем, использование кое-какого математического аппарата, который я осваивал и применял к одной нерешенной проблеме, касающейся структуры хромосом, – произвел на меня столь глубокое впечатление, что у меня появилась мечта стать биологом с математическим уклоном.) Просматривая книги на полках магазина, я обратил внимание на книгу с интригующим названием «Геометрия биологического времени» (The Geometry of Biological Time) [200]. Какое совпадение! Подзаголовок моей дипломной работы в колледже звучал так: «Эссе по геометрической биологии». Я считал, что именно мне принадлежит авторство этого необычного словосочетания: «геометрическая биология». Однако было похоже на то, что пальма первенства в изобретении этого словосочетания по праву принадлежит автору заинтересовавшей меня книги, некому Артуру Уинфри, сотруднику биологического факультета университета Пардью.

Краткая аннотация к книге выглядела многообещающе: «Начиная с деления клеток и заканчивая сердцебиением, ритмы, подобные тиканью

часового механизма, пронизывают деятельность любого живого организма. Механизм жизненных циклов имеет, в конечном счете, биохимический характер, однако многие из принципов, которые играют ведущую роль в их координировании, являются, по сути, математическими». Я внимательно ознакомился с оглавлением книги и сразу же пришел к выводу, что это работа необычного ученого. Нет, не просто необычного. Артур Уинфри был из тех ученых, для кого никакие правила не являются священными и неприкосновенными. Главное, мне понравился живой и непринужденный стиль автора. В главе, посвященной математике менструального цикла, он использовал данные, полученные от своей собственной матери^[201]. Другие главы отличались не меньшей живостью изложения (например, мне в глаза бросилась фраза «Именно на этой неделе Никсон решил вторгнуться в Камбоджу»^[202]). Многочисленные шутки автора заставили меня усомниться в научной ценности его книги: не прикалывается ли этот Артур Т. Уинфри, не водит ли он за нос своих читателей? Одним словом, я вернул книгу на полку и ушел из магазина.

Через несколько дней я почувствовал, что меня тянет в книжный магазин, где я обнаружил книгу Артура Уинфри. Книга покоилась на той же полке, где я обнаружил ее. Я решил полистать ее. Чтобы получить какое-то представление о научных заслугах ее автора, я изучил библиографию: 36 статей за период с 1967 по 1979 гг., опубликованных в столь авторитетных научных журналах, как Science, Nature и Scientific American. Это должно было показаться вполне убедительным, но я снова вернул книгу на полку, однако через несколько дней опять вернулся в этот же магазин. Меня разбирало любопытство – и господь Бог позаботился о том, чтобы никто из покупателей не приобрел этот единственный экземпляр. В конце концов я капитулировал и купил эту книгу.

Ежедневное чтение этой книги стало для меня подлинным наслаждением. Картина, изложенная Уинфри, была по-настоящему великолепна и чрезвычайно оригинальна. Глава за главой он выстраивал математическую конструкцию, которая демонстрировала принципиальную схожесть работы разнообразных биологических осцилляторов. Уинфри применял свои идеи к сердечным ритмам, мозговым волнам, менструальным циклам, циркадным ритмам, циклу деления клеток и даже к волнам в желудке. Однако его идеи не

ограничивались лишь этим. Идеи Уинфри позволяли делать прогнозы – и эти прогнозы подтвердились в ходе соответствующих экспериментов. Некоторые из них касались вопросов жизни и смерти.

Впервые в жизни у меня начали четко вырисовываться контуры моей дальнейшей научной карьеры. В порыве волнения я написал Уинфри письмо, в котором просил посоветовать мне, куда поступить в аспирантуру для продолжения работы в области математической биологии. (В то время мне ничего не было известно о программах последипломного обучения в области математической биологии. Тогда это было новое научное направление, так сказать «передний край науки».) Недели через две я просматривал почту, и мой пульс резко участился, когда я обнаружил письмо, на котором значился обратный адрес университета Пардью. Внутри конверта содержался ответ от *самого Уинфри*, написанный красными чернилами на обычном разлинованном листке из школьной тетради. Начиналось письмо следующими скупыми фразами:

Стивен Строгац:

Хорошо, конечно же, Вам следует приехать ко мне.

Следующие две страницы представляли собой щедрую россыпь полезных советов. Завершалось письмо такими словами:

Будем поддерживать связь. Вы показались мне интересным человеком.

Арт Уинфри

Моя мечта начинала сбываться! Уинфри уже успел стать для меня настоящим героем. Но он работал на биологическом факультете, а получение научной степени в области биологии не входило в мои планы – моим призванием была математика. А как насчет того, чтобы поработать с Уинфри летом? Я робко поинтересовался мнением Уинфри насчет этой возможности. Через две недели пришел ответ:

12-10-81

5 минут после получения Вашего письма от 12-1-81

Дорогой Стивен –

На этой неделе на меня свалилась куча денег, так что мой ответ будет положительным. На летние месяцы я могу обеспечивать Вам желованье в размере [...]. В моей лаборатории есть много свободного места и 2 компьютера Apple, не говоря уж о всевозможных прибабусах. [...] Я буду работать над топологическими загадками, касающимися трехмерных скрученных + заузленных волн в «супе Жаботинского», + приложения (по совместительству) к сердечной мышце (ознакомиться с этой темой вы можете весной, прочитав мою статью в Scientific American, посвященную смерти от внезапного сердечного приступа). Буду весьма рад, если мы вместе с Вами поработаем над этими проблемами.

Я не буду рекомендовать [...], или [...], или кому-либо еще предлагать Вам работу до тех пор, пока Вы не отклоните это мое предложение. Надеюсь, что не отклоните.

Импульсивно,

Арт Уинфри

* * *

Программа исследований Уинфри, изложенная в этом письме в столь характерном для Уинфри стиле, касалась того, о чем другие исследователи в то время даже не помышляли. Разумеется, он совершенно не вписывался в мейнстрим «нормальной» науки с ее тенденцией к узкой специализации и акцентом на редукционизм, то есть сведение явлений высшего порядка к явлениям низшего порядка; другими словами, Уинфри не думал лишь о генах, или кварках, или нейронных каналах. Более того, он не заикливался даже на революции, порожденной теорией хаоса, которая, по мнению всех его аспирантов, была на тот момент передовым краем науки, хотя на самом деле эта отрасль науки к тому времени уже достигла своей зрелости и была готова уступить пальму первенства очередной великой тенденции: изучению нелинейных систем, состоящих из огромного множества элементов. Это движение, впоследствии получившее название «теории сложности», следовало представлять себе как естественное ответвление

теории хаоса, в каком-то смысле ее обратную сторону. Вместо того чтобы сосредоточиться на странном и «сумасбродном» поведении малых систем, специалисты по теории сложности были увлечены организованным поведением больших систем. Одна из самых ранних работ Уинфри по самопроизвольной синхронизации биологических осцилляторов уже касалась этой темы. К описываемому мною времени она уже достигла стадии зрелости, причем ее созревание происходило разными путями.

Например, в своем письме он упоминал о том, что собирается работать над «трехмерными скрученными + заузленными волнами». Ключевое слово здесь – *трехмерные*. Никто прежде не занимался изучением поведения самоподдерживающихся осцилляторов, взаимодействующих в трехмерном пространстве. Как было показано выше, когда теоретики впервые приступили к анализу динамики популяций осцилляторов, они полностью игнорировали пространство, полностью сосредоточившись лишь на времени, на синхронности ритмов, безотносительно взаимного расположения этих осцилляторов. Открытия, которые совершили Винер, Курамото, Пескин и даже сам Уинфри, ограничивались простейшим из возможных случаев, соединением по принципу «каждый с каждым», когда каждый осциллятор оказывает совершенно одинаковое влияние на все остальные осцилляторы. Такая глобальная связь всегда рассматривалась лишь как целесообразный первый шаг – она была кратчайшим путем сквозь джунгли многоосцилляторной динамики. Не было никакой нужды задумываться о пространственной структуре, поскольку каждый осциллятор является соседом всех остальных осцилляторов. После рассмотрения этого простейшего случая можно было ступить на следующую ступеньку теоретической лестницы и рассмотреть осцилляторы, упорядоченные в виде одномерной цепи или кольца. Можно было ожидать, что в этом случае произойдет что-то новое, что-то помимо чистого синхронизма: волны действия могли устойчиво распространяться от одного осциллятора к следующему. Вообще говоря, в осцилляторных моделях с локальными связями более типичным явлением оказывались волны, а не синхронизм. Интуиция, основанная на опыте футбольного болельщика, подсказывает мне следующую аналогию: «запустить волну» и поддерживать ее движение на огромном стадионе бывает гораздо легче, чем заставить всех

присутствующих на стадионе одновременно вставать и садиться. Когда кое-кто из математиков попытался подняться по теоретической лестнице еще выше, к двумерным листам осцилляторов, у них попросту закружилась голова: анализ таких систем осложнился до предела. Поэтому когда Уинфри решил продолжить восхождение по этой лестнице и выйти на уровень трехмерных систем, желающих составить ему компанию не нашлось.

Подобные вопросы возникают, конечно же, потому что большинство реальных осцилляторов соединены между собой локально, а не глобально. Кишечник представляет собой длинную трубку осциллирующих нервных и мышечных клеток, разделенную на ритмично сокращающиеся кольца, однако порядок этих сокращений таков, что волны пищеварения движутся в нужном направлении, от желудка к анусу^[203]. Каждое кольцо осцилляторной ткани соединено электрически с его ближайшими соседями по обе стороны, превращая кишечник, по сути, в одномерную цепочку осцилляторов. Желудок несколько напоминает двумерную сумку нейро-мышечных осцилляторов в том смысле, что его клетки ритмично перемешивают содержимое желудка и взаимодействуют главным образом со своими соседями на поверхности стенок желудка^[204]. А сердце представляет собой толстую, трехмерную совокупность задающих осцилляторных клеток (ритмоводителей в синусно-предсердном узле и их подчиненных) и «возбудимых» клеток, которые подчиняются командам задающих осцилляторных клеток^[205]; в случае их запуска с помощью достаточно сильного электрического воздействия они однократно «срабатывают» и возвращаются в состояние покоя, ожидая следующего импульса для запуска. Когда сердце функционирует нормально, такой задатчик ритма генерирует волну электрического возбуждения, которая распространяется вдоль специализированных проводящих волокон к насосным камерам (желудочкам сердца), заставляя их сжиматься и качать кровь к остальным частям тела.

Однако в патологических случаях возбудимые клетки могут взбунтоваться и создать свою собственную волну, вращающийся электрический торнадо, который парирует сигналы, поступающие от задатчика ритма. Кардиологам уже давно известно о том, что такие «вращающиеся потенциалы действия», или «круговые волны возбуждения»^[206], могут приводить к тахикардии (повышенная частота

сердцебиения), а затем вырождаться в летальную аритмию, называемую вентрикулярной фибрилляцией, когда сердечная мышца беспомощно корчится, дергается и дрожит, отказываясь качать кровь^[207]. Ежегодно сотни тысяч здоровых на первый взгляд людей – людей, которые никогда прежде не жаловались на проблемы с сердцем – внезапно умирают^[208], когда их сердце переходит в этот разрушительный режим функционирования. Когда Уинфри упомянул в своем письме о «приложениях (по совместительству) к сердечной мышце», он имел в виду именно эти странные электрические торнадо. Он хотел выяснить причины их начала, картину их поведения и возможные способы их предотвращения. Он надеялся, что после того как удастся выяснить причины возникновения этих электрических торнадо и картину их поведения, появится возможность сконструировать дефибрилляторы, действующие на сердце более мягко, чем нынешние грубые устройства, которые сжигают сердце для того, чтобы спасти его.

В 1981 г. нелинейная динамика не достигла того уровня, на котором она могла бы предсказывать поведение таких вращающихся волн в трех измерениях. Не было никакой надежды на то, чтобы просчитать их эволюцию во времени, их удары, их вихревые картины электрической турбулентности. Даже если бы соответствующие вычисления были возможны (например, с помощью какого-нибудь суперкомпьютера), любая такая попытка оказалась бы преждевременной, поскольку никто не знал бы, как интерпретировать полученные результаты. Вообще говоря, никто даже не знал, как могла бы выглядеть фотография одного из этих призрачных злодеев. (Во всяком случае, никому из кардиологов не удавалось наблюдать их воочию.) Поэтому Уинфри считал, что первым делом нужно научиться распознавать их, предсказывать, хотя бы умозрительно, их особенности; в дальнейшем можно будет заняться разгадкой их «модус операнди» (или, образно выражаясь, способа совершения преступления).

Для изучения форм в трех измерениях требовался более примитивный математический аппарат, учитывающий лишь пространство, но не принимающий во внимание время. Упомянув в своем письме о «топологических загадках», Уинфри имел в виду отрасль математики, называемую топологией и занимающуюся

изучением непрерывной формы, своего рода обобщенную геометрию, в которой жесткость заменена эластичностью, как если бы все было изготовлено из резины. Формы могут непрерывно деформироваться, сгибаться или скручиваться – но ни в коем случае не разрезаться. Квадрат топологически эквивалентен окружности, поскольку вы можете скруглить его углы. С другой стороны, окружность отличается от формы цифры «8», поскольку вы не можете избавиться от точки пересечения, не прибегнув к помощи ножниц. В этом смысле топология идеально подходит для сортировки форм на обширные классы, основываясь исключительно на их топологических свойствах. План Уинфри заключался в использовании топологии для классификации видов волн, которые могут встретиться в трехмерных полях возбудимых клеток. Зная все возможные варианты, он понимал бы, что именно нужно искать в последующих экспериментах; таким образом, у него появилась бы надежда распознать то, что в противном случае казалось бы просто причудливыми непонятными структурами.

Когда в один из душных июньских дней 1982 г. я прибыл в лабораторию Уинфри, я застал его погруженным в ворох бумаг; он сидел на скамье, его рубашка была широко распахнута (очевидно, таким способом он пытался спастись от удушающей жары). Я был несколько смущен столь «неформальным» видом этого великого ученого – я добирался из Коннектикута в Индиану на автомобиле вместе со своим отцом, который никогда ранее не видел моего нового кумира, – но Уинфри обезоружил нас своим искренним дружелюбием. Вскоре отец уехал, и мы с Уинфри остались наедине в лаборатории, которая была уставлена разнокалиберными мензурками, бунзеновскими горелками и прочими приспособлениями, назначение которых я пока не понимал. (Между прочим, на столах я заметил множество лезвий для безопасной бритвы. Как оказалось впоследствии, эти лезвия были любимым инструментом Уинфри, когда ему нужно было что-нибудь разрезать или отрезать. Он с довольным видом вскрикивал «Вжжжик!» каждый раз, когда использовал одно из таких лезвий, чтобы отрезать кусок провода или микропористой фильтровальной бумаги.)

В лаборатории было тихо. Я не заметил там ни одного аспиранта или младшего научного сотрудника. Впрочем, я был готов к этому: в одном из первых писем ко мне, после того как я спросил у Уинфри,

кто еще будет работать с нами, он ответил: «Сейчас я *мог бы* сочинить историю о других аспирантах + сотрудниках. Но, по правде говоря, у меня нет ни тех, ни других. Возможно, дело в том, что я плохо схожусь с людьми, возможно, от меня неприятно пахнет, не знаю... но плотность населения в моей лаборатории = 1. Вы станете единичным событием в жизни моей лаборатории. Не подрывает ли этот факт Ваше доверие ко мне?»

На совместную работу нам было отведено лишь три месяца. Поэтому мне нужно было как можно быстрее входить в курс дела. Уинфри полагал, что мне следует «немного замарать руки», то есть на какое-то время отставить в сторону математику и компьютеры. Моим первым проектом был эксперимент с материалом, который сам Уинфри называл «супом Жаботинского»^[209]: химическая реакция, которая поддерживает волны возбуждения, чрезвычайно похожие на электрические волны, которые запускают сердцебиение. Однако в этом эксперименте все должно было оказаться значительно проще, чем с реальным сердцебиением, во всяком случае я не собирался экспериментировать с настоящим сердцем, с его мышцами и сокращениями. Речь шла о некоем идеализированном объекте для исследования распространения волн возбуждения в его самой «чистой» форме. В этом смысле эксперименты с пресловутым супом Жаботинского играют такую же роль в исследовании волн сердца, какую играют мушки-дрозофилы в генетике: удобный для изучения упрощенный вариант, в котором заключена сущность более сложных явлений.

Обычно самым занимательным результатом, которого можно ожидать при выполнении какого-либо химического эксперимента, является возникновение облачка дыма или отвратительного запаха. В отличие от этих, вообще говоря, тривиальных случаев, эксперимент с супом Жаботинского позволяет исследователю удовлетворять свое интеллектуальное любопытство в течение очень долгого времени. Если этот суп приготовить в соответствии с оригинальным рецептом, то он ведет себя подобно самопроизвольному осциллятору и является химическим аналогом клеток задатчика сердечного ритма. Он ритмично изменяет свой цвет десятки раз, туда и обратно, становясь попеременно то небесно-голубым, то ржаво-красным, приходя в конце концов (примерно через час после начала химической реакции) в

состояние равновесия. На молекулярном уровне такие проявления могли бы выглядеть еще более впечатляюще, если бы, конечно, мы могли наблюдать их: триллионы связанных осцилляторов, пританцовывающих в идеальном синхронизме – самый массовый танец в стиле кантри из тех, которые когда-либо удавалось организовать.

При использовании нового, более утонченного рецепта эта химическая реакция является возбудимой. Поначалу она выглядит обескураживающе инертной. Осцилляции практически отсутствуют. Но если налить тонкий слой этого красного супа в чашку Петри, а затем проколоть этот слой серебряной проволокой или горячей иглой, он внезапно запускает голубую круговую волну, которая распространяется, подобно огню на сухой траве. Это химическая волна: импульс запускает реакцию, при которой вещество в чашке Петри окисляется. После того как эта волна пройдет, вещество переходит в состояние покоя и снова приобретает красный цвет, точно так же как трава, выгоревшая в результате пожара, со временем снова начинает расти. (Конечно же, предложенная мною аналогия с травой не идеальна. Химические вещества восстанавливаются гораздо быстрее, чем выгоревшая трава; следом за первой волной может двигаться вторая волна.)

Химические волны совершенно не похожи на волны, изучаемые в традиционных курсах физики (например, звуковые волны или рябь на поверхности пруда). Когда химическая волна распространяется путем диффузии, поверхность жидкости не поднимается и не опускается. Она остается неподвижной. Подвижной оказывается картина возбуждения, своего рода «химическое заражение». Еще одно отличие от обычных волн заключается в том, что химические волны не ослабевают, подобно звуковым волнам или ряби на поверхности пруда, по мере распространения в стороны от места их зарождения. Каждый клочок этой среды служит новым источником энергии, которая подпитывает волну, не давая ей угаснуть.

Допустим теперь, что вы создадите две химические волны в двух разных точках чашки Петри. Голубые круги начнут шириться и приближаться друг к другу. Когда они столкнутся, они не начнут проникать друг в друга или складываться между собой: они взаимно уничтожатся. Это произойдет в силу той же самой причины, по которой горение сухой травы прекращается в результате запуска встречного

огня: два пожара – один естественный, а другой искусственный – взаимно уничтожаются, поскольку по обе стороны огня не остается ничего, кроме золы, которая не может гореть. В использованной мною метафоре зола соответствует области истощения, «мертвой» зоне, образующейся позади волны. Химической среде требуется какое-то время для восстановления, прежде чем она снова сможет стать возбужденной.

Во многих отношениях эта химическая среда ведет себя подобно сексуальной реакции человека. Сексуальное возбуждение и возвращение к норме зависят от свойств нервной ткани, которая, подобно супу Жаботинского, принадлежит к общему классу систем, называемых возбудимыми средами. Нейрон может пребывать в трех состояниях: покой, возбуждение и резистентность (абсолютная невозбудимость).

Обычно нейрон пребывает в покое. При недостаточно сильном воздействии он демонстрирует слабую реакцию и возвращается в состояние покоя. Но при достаточно сильном воздействии нейрон возбуждается и приводится в действие. Затем нейрон становится резистентным (в течение какого-то времени его невозможно возбудить) и наконец возвращается в состояние покоя. Параллели с химическими волнами распространяются на потенциалы действия – электрические волны, которые движутся вдоль нервных аксонов. Они также перемещаются, не ослабляясь, а когда две такие волны сталкиваются между собой, они взаимно уничтожаются. Вообще говоря, все эти утверждения относятся в равной мере к электрическим волнам в другой возбудимой среде – сердце. В этом и заключается прелесть данной абстракции: качественные свойства одной возбудимой среды распространяются на все возбудимые среды. Все эти возбудимые среды можно изучать одним махом. Родственная схожесть между супом Жаботинского, нервной тканью и сердечной мышцей сохраняется вплоть до структуры математических уравнений, которые управляют их нелинейной динамикой, – весьма глубокая аналогия.

Однако суп Жаботинского обеспечивает ряд преимуществ, особенно важных для начинающего экспериментатора. Не требуется приносить в жертву животных. Не приходится иметь дело с анатомическими сложностями, наподобие запутанного клубка нейронных сетей или архитектуры сердечной мышцы со скрученными

волокнами. Самое главное – эти волны можно наблюдать невооруженным глазом, причем движутся они довольно медленно, а потому отпадает необходимость использования сложного записывающего оборудования. Напротив, визуализация волн на сердце сопряжена с колоссальными техническими проблемами (по крайней мере на сегодняшний день) даже для лабораторий, располагающих внушительным бюджетом, поскольку для этого требуются потенциалочувствительные красители, многоэлектродные системы и прочие новейшие технологии.

С помощью супа Жаботинского ученые начали раскрывать тайны распространения волн в возбудимых средах. В частности, именно с помощью супа Жаботинского удалось открыть новый вид волн – вращающуюся самоподдерживающуюся волну, имеющую форму спирали. Хотя ее геометрия выглядит весьма элегантно, ее последствия носят деструктивный характер. Вращающиеся спиральные волны на сердце – это причина тахикардии и, в самом плохом случае, вентрикулярной фибрилляции, сопровождаемой внезапной смертью от сердечного приступа.

Открытие супа Жаботинского и его впечатляющих спиральных волн – это история догмы, разочарования и окончательного обоснования^[210]. Разумеется, термин «суп Жаботинского» – это название, которым предпочитал пользоваться сам Уинфри. В наши дни суп Жаботинского называют «BZ-реакцией» в честь Белоусова и Жаботинского, российских ученых, которые, соответственно, изобрели и усовершенствовали его.

В начале 1950-х годов Борис Белоусов пытался воссоздать в пробирке модель цикла Кребса – метаболический процесс, который происходит в живых клетках. Когда он смешал лимонную кислоту и ионы бромата в растворе серной кислоты (в присутствии цериевого катализатора), он, к немалому своему удивлению, наблюдал, как эта смесь сначала пожелтела, затем, примерно через минуту, стала бесцветной, затем, еще через минуту, снова стала желтой, затем снова бесцветной и т. д. Эти осцилляции повторились несколько десятков раз, пока наконец (примерно через час) не было достигнуто состояние равновесия.

Сегодня уже никого не удивляет тот факт, что химические реакции могут самопроизвольно осциллировать; такие реакции стали стандартной демонстрацией на лекциях по химии. Но во времена, когда Белоусов сделал свое открытие, самопроизвольная осцилляция химических реакций оказалась такой неожиданностью, что в ее возможность отказывались верить. В то время считалось, что, вследствие действия законов термодинамики, все растворы химических реагентов должны монотонно продвигаться к состоянию равновесия. Научные журналы один за другим отмахивались от статьи Белоусова. В письме с отказом опубликовать статью Белоусова один из редакторов даже не удержался от ехидного высказывания в адрес автора, который «вполне возможно, открыл открытие».

Удрученный таким отношением к своему открытию, Белоусов решил никогда не упоминать о нем в разговорах со своими коллегами. Все же он опубликовал краткое резюме своей статьи в материалах одной из медицинских конференций Советского Союза. Впрочем, поначалу никто в научном мире не обратил внимания на эту публикацию. Тем не менее в конце 1950-х годов слухи о его открытии упорно циркулировали среди московских химиков, а в 1961 г. научный руководитель аспиранта, которого звали Анатолий Жаботинский, посоветовал ему ознакомиться с этой статьей. Жаботинский подтвердил, что в эксперименте, поставленном Белоусовым, нет никакой ошибки и что дело обстоит именно так, как изложено в резюме к его статье. Более того, Жаботинский ознакомил с работой Белоусова участников международной конференции, состоявшейся в Праге в 1968 г. и оказавшейся одной из тех редких возможностей, когда западные и советские ученые имели шанс непосредственно пообщаться друг с другом. В то время ученые проявляли повышенный интерес к биологическим и биохимическим осцилляциям, а BZ-реакция рассматривалась как весьма перспективная модель для изучения более сложных систем.

Аналогия с биологией оказалась на удивление тесной. В начале 1970 г. Альберт Николаевич Заикин и Жаботинский обнаружили распространяющиеся волны возбуждения в тонких, невзболтанных слоях BZ-реакции. Эти волны напоминали концентрические окружности; при столкновении такие волны взаимно гасились, подобно электрическим волнам в нейронной или сердечной ткани. Казалось

даже, что они возникают из чего-то похожего на задатчики ритма, разбросанные в произвольном порядке точки, которые самопроизвольно порождали волны.

Изучив эту работу, Уинфри отправил Жаботинскому (с которым он познакомился на пражской конференции двумя годами ранее) письмо, чтобы выяснить, встречались ли ему какие-либо другие картины волн, помимо концентрических колец. В своих собственных лабораторных экспериментах с некоторыми видами плесени Уинфри наблюдал спиральные волны^[211], но это была гораздо более сложная система, состоящая из живых организмов, которым были присущи циркадные циклы. Уинфри хотел выяснить, наблюдались ли спирали в гораздо более простой химической системе Жаботинского. Он сомневался в этом, исходя из ряда математических соображений; он полагал, что мог бы доказать, что волны должны иметь форму именно замкнутых колец. Однако ответа от Жаботинского ждать пришлось очень долго. Почта из Советского Союза, особенно переписка между учеными, в то время шла очень долго (наверное, службы безопасности с обеих сторон усердно занимались перлюстрацией). Вынужденная приостановка работы выводила Уинфри из терпения. Он самостоятельно состряпал какое-то подобие рецепта, которым пользовались Заикин и Жаботинский, и рецепт, придуманный Уинфри, оказался удачным: спирали появлялись повсюду. Уинфри не знал об этом, но Жаботинский тоже наблюдал эти волны в 1970 г. при подготовке своей диссертации, а Валентин Кринский из г. Пушкино полагал, что такие волны должны возникать в любой возбудимой среде, в том числе и в сердечной мышце. В настоящее время является общепризнанным фактом то, что спиральные волны присущи всем химическим, биологическим и физическим возбудимым средам.

Борису Белоусову было бы, наверное, приятно осознавать, что он является первооткрывателем столь важного феномена.

В 1980 г. он, Жаботинский и трое других ученых стали лауреатами Ленинской премии, высшей государственной награды в Советском Союзе, за их открытия, связанные с осциллирующими реакциями. Впрочем, для Бориса Белоусова это оказалось слабым утешением – он умер десятью годами ранее.

Самым удивительным в спиральных волнах является то, что они кажутся живыми. Это самоподдерживающееся явление. Они не нуждаются в задатчиках ритма: спиральная волна является своим собственным задатчиком ритма. Если вы наблюдаете спиральную волну в тонком слое возбудимой BZ-реакции, она похожа на непрерывное завихрение, гоняющееся за своим собственным хвостом и беспрестанно регенерирующее себя.

Вообще говоря, ее вращение является второстепенным делом. Более существенным для нас является то, что она распространяется в направлении, перпендикулярном себе в каждой точке вдоль фронта волны. В связи с этим возникает путаница, обусловленная спецификой геометрии спирали: распространение спиральной волны выглядит как вращение. (Вспомните оптическую иллюзию, наблюдаемую на вращающихся столбах с нанесенной на них винтовой линией, которые устанавливали в прежние времена возле парикмахерских. Если смотреть на винтовую линию, нанесенную на такой вращающийся столб, то кажется, будто она движется вверх. Разумеется, никакого такого движения нет, просто эта винтовая линия вращается вместе со столбом. В этом случае вращение создает впечатление движения вверх. Примерно с такой же оптической иллюзией мы сталкиваемся, когда наблюдаем за спиральными волнами.)

Тем не менее в каком-то смысле вращение спиральной волны является реальным. Каждая точка в окружающей среде периодически осциллирует: она повторно возбуждается каждый раз, когда через нее проходит волна. Таким образом, каждая точка в чашке Петри проходит циклически через знакомые нам стадии возбуждения, резистентности и покоя, а затем повторного возбуждения. Новым здесь является то, что спиральная волна создала осцилляцию, которая структурирована в пространстве, а также во времени. Вместо жесткой синхронизации – пространственной однородности, которую наблюдал Белоусов в самых ранних своих экспериментах, когда вся мензурка изменила свой цвет одновременно – осцилляция теперь похожа на «волну», запускаемую на трибунах стадиона болельщиками во время футбольного матча и циркулирующую по трибунам в результате того, что люди встают и садятся в нужные моменты времени.

Рассмотрим еще более тесную аналогию. Вообразите кольцо, составленное на полу из тысячи костяшек домино. Допустим, что мы

решили воспользоваться услугами проворного помощника, который берется быстро восстанавливать каждую из костяшек сразу же после того, как она упадет. Мы ударяем первую костяшку, и волна падений начинает быстро распространяться по кольцу костяшек. Наш помощник четко отслеживает распространение этой волны, с трудом успевая восстанавливать на прежнем месте каждую из упавших костяшек. В данном случае удар по костяшке соответствует возбужденному состоянию, упавшая костяшка соответствует состоянию резистентности, а восстановленная костяшка соответствует состоянию покоя. Такая волна будет циркулировать до бесконечности – или до тех пор, пока наш помощник не свалится с ног от изнеможения.

Биологическая версия того же самого эксперимента была выполнена физиологом А. Г. Майером в 1906 г. с помощью медузы^[212]. Он соорудил кольцо нейромышечной ткани из обода зонтикообразного купола медузы, а затем воздействовал импульсом электрического тока на одну точку этого кольца, заранее позаботившись о том, чтобы волна распространялась по кольцу только в одном направлении. Нейроимпульс циркулировал по кольцу в течение шести суток, совершив при этом около полумиллиона циклов.

Таким образом, должно быть ясно, что волны могут очень долго циркулировать по одномерным контурам возбудимых сред. Однако при попытке перенести те же идеи на два измерения (важный случай спиральных волн) возникают определенные проблемы. В приведенном выше обсуждении молчаливо предполагалось, что к моменту возвращения волны среда успевает восстановиться из своего периода резистентности. Это вполне допустимое предположение, если контур достаточно велик или если скорость волны не очень высока. Но вблизи центра спиральной волны это предположение не соблюдается: контур, по которому прошло возбуждение, становится слишком маленьким.

В конечном счете ядро спирали не осциллирует подобно остальной части этой среды. Мы не видим на нем ритмических изменений цвета, оно не демонстрирует пиков и падений интенсивности свечения или каких-либо других признаков осцилляции. Амплитуда цикла падает до нуля. Такая точка называется сингулярностью фазы, что означает, что здесь невозможно точно определить фазу окружающей осцилляции. Фаза становится неоднозначной. Эта загадочная ситуация аналогична тому, что происходит на Северном и Южном полюсах. В таких

сингулярных точках на поверхности нашей планеты сходятся все временные пояса, а цикл дня и ночи распадается. Солнце никогда не поднимается и не садится: оно просто кружит над горизонтом. На Северном и Южном полюсах вопрос «который час?» лишен всякого смысла. Вы можете жить здесь по любому времени – или вообще вне времени.

Но для спиральной волны сингулярность фазы – это нечто большее, чем точка на нашей планете, где нога человека ступает лишь в очень редких случаях. Для спиральной волны сингулярность фазы – это двигатель, который приводит волну в действие. Поразительно, но пока это ядро остается в неприкосновенности, спиральная волна в целом может регенерировать себя независимо от того, каким повреждениям подверглись ее наружные витки. К тому же спиральные волны нелегко уничтожить еще по одной причине: они испускают волны почти с такой же скоростью, какую допускает соответствующая среда. Поэтому они способны «парировать» другие входящие волны, например концентрические окружности, запускаемые удаленными задатчиками ритма. Эти вторгающиеся волны уничтожаются при столкновениях со спиральными витками. Они не могут продвинуться дальше. Напротив, более быстрые спиральные волны неумолимо надвигаются на более медленные задатчики ритма, захватывая их территорию и постепенно уничтожая их. Именно поэтому на достаточно продолжительном отрезке времени картина BZ-реакции всегда становится похожа на рисунок «пейсли»^[213], заполненный спиралями, причем круговые волны вообще не видны. Спираль способна противостоять только другая спираль.

Здесь мы наблюдаем случай самопроизвольного порядка в его чистом и простом виде. Начинаем с «супа» химических веществ, который обладает свойством возбудимости. Затем прикасаемся к нему серебряной проволокой и шлепаем этой проволокой по поверхности «супа», чтобы создать таким образом произвольный рисунок возбуждения. Нет никакой структуры, совершеннейший беспорядок, но все же из этого беспорядка возникает рисунок «пейсли». Между тем во всем, что происходит, нет ничего мистического. Такой рисунок является результатом действия законов возбудимой среды, а эти законы, в свою очередь, являются следствием нелинейной динамики.



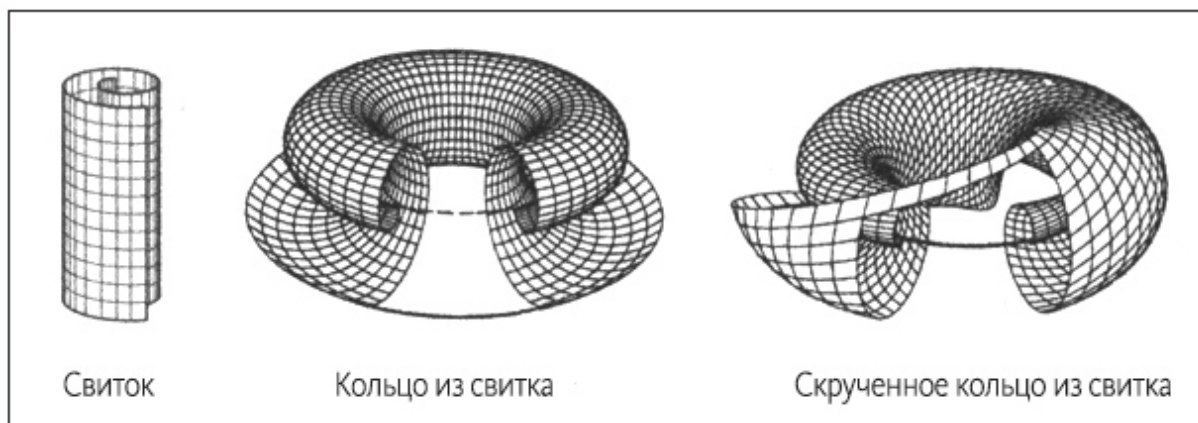
Поэкспериментировав в лаборатории Уинфри с супом Жаботинского в течение нескольких дней, я смог собрать основные факты, касающиеся спиральных волн. Затем Уинфри поставил передо мной следующую задачу: попытаться воспроизвести эксперимент, касающийся нового вида спиральной волны^[214], сообщение о котором недавно появилось в журнале Nature. После пары недель неудач Уинфри стало понятно, что экспериментатор из меня никудышный. Разумеется, для меня это не было новостью; чтобы стать хорошим экспериментатором, требуются годы упорного труда.

К счастью, главная цель Уинфри на те летние месяцы заключалась совсем в другом. Как он упоминал в письме ко мне, он намеревался работать над «загадками, касающимися трехмерных скрученных + заузленных волн в “супе Жаботинского”». Вопрос заключался в следующем: что представляют собой трехмерные обобщения спиральных волн? Как они выглядят? Можем ли мы визуализировать их каким-либо способом? Какие математические законы управляют их допустимыми формами?

К тому времени у Уинфри уже был создан неплохой задел. Вскоре после открытия им в 1970 г. двумерных спиральных волн он размышлял над тем, что может произойти, если взять тонкий слой BZ-реакции, содержащий плоскую спираль, а затем постепенно утолщать этот слой. Подобно барельефу, эта спираль постепенно приобретала бы третье измерение. В результате такого процесса формировалась бы поверхность, похожая на свиток.

Между тем сингулярная точка в ядре постепенно удлинялась бы, превращаясь в нить на краю свитка. И точно так же, как спиральная волна вращается вокруг своего ядра, свиткообразная волна^[215] должна вращаться вокруг своей нити.

Вращающаяся свиткообразная волна... До того времени наука не знала ничего подобного. Подходящие аналогии найти было нелегко. Свиткообразная волна – это химический торнадо. Одно существенное различие: жидкость остается неподвижной. Перемещается лишь волна химической активности, трехмерный водоворот расширяющегося возбуждения. Кроме того, торнадо тянется от облаков до поверхности земли, а где заканчиваются свиткообразные волны? Уинфри убедил себя, что они не могут просто остановиться в каком-то определенном месте в середине жидкости. Они либо затухали бы на границе (то есть на стенках мензурки или вверху, на границе «воздух-жидкость»), либо вообще нигде не заканчивались бы. Иными словами, свиткообразная волна могла бы кусать свой собственный хвост и замыкаться на самой себе. В таком случае она была бы похожа не столько на торнадо, сколько на колечко дыма.



Этот образ пленил Уинфри. Действительно ли существуют такие «кольца из свитка»? В 1973 г. ему удалось доказать, что такие «кольца из свитка» действительно существуют. Поставленный им эксперимент был весьма остроумным. Вместо использования обычной мензурки, заполненной жидкой BZ-реакцией, он приготовил высокую стопку фильтровальной бумаги из пористой нитроцеллюлозы, пропитанной теми же химическими веществами. После создания подходящих условий, которые требовались, по его мнению, для воспроизведения

«кольца из свитка», он предоставил возможность реакции начаться, а затем внезапно затормозил ее химическим способом, зафиксировав характерный рисунок «кольца из свитка» в состоянии приостановленной анимации. Пытаясь проанализировать полученный образец, он разделил эту стопку фильтровальной бумаги на тонкие слои, подобно экспериментатору, подготавливающему для исследования под микроскопом срезы какого-нибудь экзотического организма, а затем реконструировал его, срез за срезом, на листах неотражающего стекла. Образец оказался именно таким, как ожидалось: волна в форме бублика с поперечным сечением в виде спирали.

Но Уинфри хотел понять, существуют ли другие виды «колец из свитка»^[216]. Возможно ли скручивание свиткообразных волн на целое число оборотов, прежде чем они замкнутся сами на себя? Пояс можно скрутить таким способом; почему же это невозможно в случае «колец из свитка»? Или их можно завязывать в узлы? Можно ли связывать между собой кольца друг через друга, подобно браслетам или кольчуге? Изучая весь этот спектр бесконечного множества «колец из свитка», связанных между собой, скрученных и соединенных с помощью узлов самыми разнообразными способами, Уинфри вскоре обнаружил, что один из гипотетических элементов этого множества находится под запретом.

Используя одну из теорем топологии, Уинфри доказал невозможность скрученного кольца из свитка, по крайней мере в виде отдельно взятого объекта. Его структура заключала в себе внутреннее противоречие. Если бы такое кольцо было скрученным, оно автоматически должно было бы переплетаться с какой-то другой сингулярной нитью, а это означало бы, что исходное кольцо не было одиночным. Эта топологическая теорема указала на существование второго свитка, непредвиденного, но обязательно связанного посредством первого. В результате дальнейшего анализа Уинфри смог показать, что, хотя отдельно взятое скрученное кольцо из свитка существовать не может, существованию взаимно связанной пары ничто не препятствует. Такая структура представлялась идеально жизнеспособной.

Из этого следовал весьма впечатляющий вывод: геометрия «колец из свитка» была вполне законной. Некоторые конфигурации были

допустимыми, тогда как другие – нет. Соответствующие правила еще предстояло выяснить.

Делом первостепенной важности было представить, как выглядят скрученные кольца из свитка. Абстрактная топологическая аргументация Уинфри предполагала, что скрученное кольцо из свитка должно быть переплетено с какой-то другой сингулярной нитью, но ни Уинфри, ни я не могли представить, как складывается воедино такая структура в целом: скрученный свиток плюс дополнительная сингулярность переплетения. Вообще говоря, когда за несколько лет до описываемого мною времени Уинфри попытался изобразить такую структуру, у него получилась фантастическая картинка в стиле Маурица Корнелиса Эшера^[217], представителя так называемого имп-арта, который исследовал пластические аспекты понятий бесконечности и симметрии, а также особенности психологического восприятия сложных трехмерных объектов.

Но теперь все должно было быть по-другому. На дворе был 1982 г., а в нашем распоряжении были компьютеры Apple. Компьютер мог изобразить поверхность за нас; от нас требовалось лишь рассказать ему, *что* он должен изобразить. Моя задача заключалась в том, чтобы написать компьютерную программу, которая вычисляла бы эту поверхность что называется «в лоб». Идея была проста: скрученный свиток – это лишь окружность из ребер спирали, каждое из которых слегка повернуто по отношению к своим соседям. Таким образом, я попросил компьютер вычислить некоторую совокупность точек на спирали, затем скопировать и повернуть всю спираль на один шаг по окружности – и одновременно с этим скрутить ее на один шаг. Эту последовательность действий нужно было повторять снова и снова, пока спираль не вернется в свое исходное положение, совершив один полный оборот по окружности и одно полное скручивание. Невыясненным оставался лишь один вопрос: какой должна быть длина каждого ребра спирали? То есть сколько витков должно быть в ней? Ответ в этом случае дает нам химия: спиральная волна движется до тех пор, пока не столкнется с другой спиральной волной. Части столкнувшихся спиралей, оказавшиеся за этой границей, нужно стереть, поскольку они взаимно уничтожили друг друга (подобно тому, что происходит со столкнувшимися волнами в возбудимой среде).

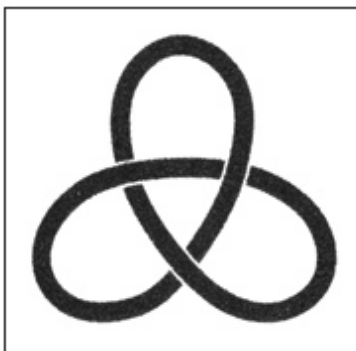
Как и требовалось, Apple II распечатал таблицу с несколькими сотнями чисел, представляющих точки на поверхности скрученного свитка. Теперь все, что нам оставалось сделать, это ввести полученные таким образом числа в графическую программу, результаты работы которой раскроют наконец загадку скрученного свитка. Я запустил на выполнение графическую программу Bill Budge 3D Graphics System, приобретенную Уинфри, и мы, затаив дыхание, стали ждать завершения ее работы. Хм-м-м... Картинка получилась слишком грубой: количества заданных мною точек оказалось явно недостаточным. К сожалению, программа Bill Budge 3D Graphics System оказалась не в состоянии обработать большее количество точек – она с огромным трудом справилась даже с тем, которое я ей задал. Итак, наши надежды на компьютер не вполне оправдались, поэтому нам пришлось дотраивать поверхность от руки. Мы распечатали грубую картинку, полученную с помощью Bill Budge 3D Graphics System, и, вооружившись цветными карандашами, начали «украшать» распечатку, надеясь увидеть нечто более вразумительное. Увы! Мы поняли, что с разгадкой придется подождать.

Тем временем мы с Уинфри приступили к рассмотрению более теоретических вопросов, пытаясь найти правила для топологии свиткообразной волны. Не имея четкого представления о том, в каком именно направлении следует двигаться, мы решили положиться на интуицию. В лаборатории Уинфри хранились изрядные запасы красного и зеленого стоматологического воска, а также оранжевой формовочной глины и превеликое множество ершиков для прочистки трубок. Все это были совершенно необходимые вещи для изготовления моделей узлов, связей и скрученных поверхностей.

Наша работа была организована следующим образом. Пока я сидел за компьютером или за рабочим столом в лаборатории, вылепливая те или иные фигуры из стоматологического воска и пытаясь визуализировать невиданные ранее формы, Уинфри пытался изображать картины свиткообразной волны в блокноте для рисования. Особено понравившиеся ему варианты он вырезал с помощью лезвия для безопасной бритвы (не забывая при этом вскрикнуть «Вжжжик!») и клеил их в лабораторный журнал. Шел час за часом. Время от времени один из нас, когда ему в голову приходила интересная мысль, нарушал молчание. После этого мы пытались совместно обсудить эту

мысль, прояснить ее и проверить ее рациональность, каждый раз с трудом подбирая нужные слова, поскольку трехмерная геометрия – вообще говоря, весьма труднопередаваемая и неуловимая материя. Но в конечном счете нам всегда удавалось понять друг друга, после чего мы пытались совместными усилиями втиснуть эти новые идеи в рамки какой-то теории. Эти математические обсуждения были весьма бурными, но доброжелательными. Мне вообще казалось, что у меня появился еще один мозг – правда, гораздо лучший, чем мой первый мозг. Так проходили дни, один за другим. Обычно мы обедали вместе, а в солнечные дни мы предпочитали сидеть у фонтана возле его дома: он делал наброски в своем блокноте, а я рисовал разные варианты поверхности в своем воображении. К десяти часам вечера у кого-нибудь из нас начинала раскалываться голова, после чего мы расставались до следующего утра.

К августу мы выяснили правила для всех возможных конфигураций связанных и скрученных колец. С узлами возникли проблемы^[218]. Нам не удалось выяснить ни одного правила относительно узлов. Поэтому мы решили начать с простейшего случая: отдельно взятого кольца из свитка, в котором завязан узел в виде трилистника. (Чтобы завязать узел в виде трилистника, возьмите шнурок для ботинок, завяжите на нем узел «клеверный лист», как если бы вы завязывали узел на шнурках своих ботинок, а затем соедините вместе концы шнурка. Результирующая кривая представляет собой петлю с узлом, которая напоминает своим видом клевер-трехлистник.)



Нас интересовало, имеет ли какой-либо математический и химический смысл кольцо из свитка в форме трилистника. А если бы такое кольцо в действительности присутствовало в мензурке BZ-

реакции, то должно ли оно всегда быть связано с другими кольцами или оно может существовать само по себе? А если да, то какой должна быть надлежащая степень скручивания? И как должны были бы выглядеть волны, исходящие от него?

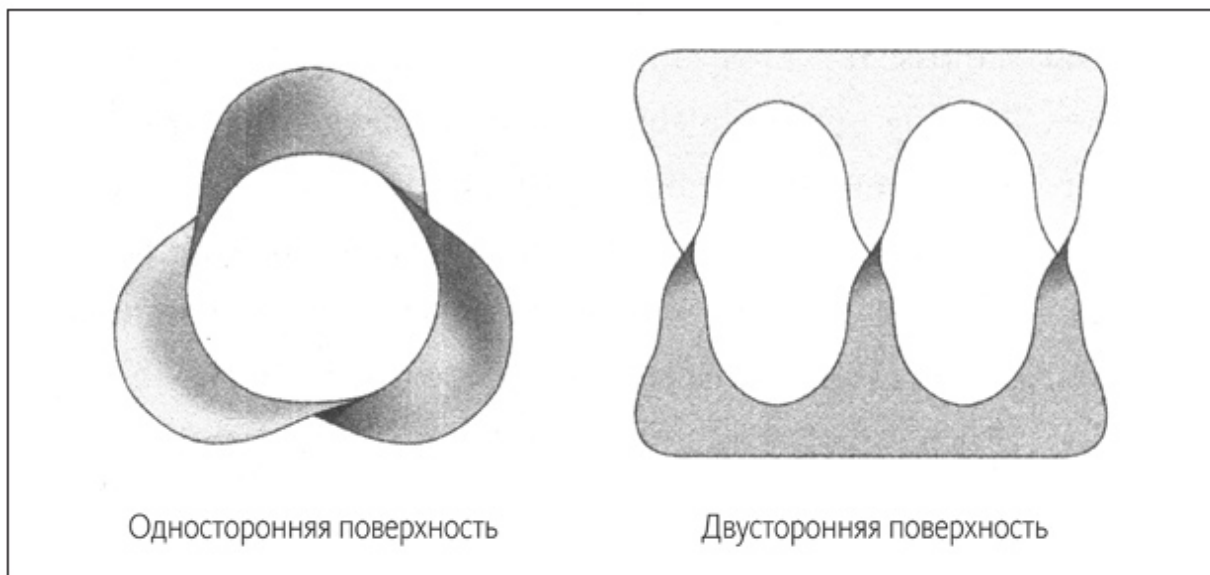
Чтобы сделать эти абстракции более осязаемыми, я скатал из стоматологического воска длинные шнуры, а затем согнул их и слепил их концы между собой таким образом, чтобы получилось некое подобие трилистника. Полученная геометрическая фигура должна была представлять собою сингулярную нить – источник и внутренний край свиткообразной волны. Затем мне предстояло изготовить восковую модель самой поверхности свиткообразной волны. Если сингулярная нить похожа на длинный тонкий деревянный штырь свитка, то сама волна похожа на пергамент, который раскручивается с этого штыря. Она представляет собой поверхность, которая начинается и заканчивается на таких штырях, в то же время плотно наворачиваясь на них. К счастью, это наворачивание было для нас в математическом смысле несущественно: от него всегда можно было избавиться, туго растянув свиткообразную волну (представьте, что волна изготовлена из эластичной ткани). Принципиально важным для нас в свиткообразной волне было то, что она начинается и заканчивается на нити. Других границ у такой поверхности нет. Воспользовавшись воском другого цвета, я приступил к конструированию поверхности волны, кусок за куском, каждый раз начиная вдоль нити и продвигаясь дальше, пока все такие куски не сложились в один сплошной лист.

После этого нужно было уяснить, сколько сторон у такого листа: одна или две? На первый взгляд, этот вопрос звучит странно: разве бывают односторонние поверхности? Самым знаменитым примером является так называемый лист (лента, петля) Мебиуса: полоска бумаги, скрученная наполоборота и замкнутая в виде кольца. Если провести пальцем по поверхности такого контура, начиная с любой его точки, то в конце концов ваш палец вернется в ту же точку – но на другой стороне бумаги (правда, такое утверждение было бы неправильным, поскольку никакой «другой» стороны нет: передняя и задняя стороны являются одним и тем же). В этом смысле у листа Мебиуса есть только одна сторона.

Если бы мои восковые поверхности представляли собой нечто подобное, это было бы плохо. С точки зрения химических законов,

свиткообразная волна должна представлять собой двустороннюю поверхность из-за непреложного факта, касающегося возбудимой среды: волны распространяются перпендикулярно самим себе, вторгаясь на неактивные территории и оставляя позади себя резистентную «выжженную пустыню». Это означает, что у такой волны есть передняя и задняя сторона, тогда как у листа Мебиуса есть только одна сторона. Это можно сформулировать по-другому. Представьте, что вы закрасили одну сторону листа Мебиуса красным цветом (сторону, которая движется вперед), а другую его сторону вы закрасили черным цветом (сторону, за которой остается «выжженная пустыня»). Но то и другое является одной и той же стороной, и в конце концов вам придется красить черным цветом поверх красного. Все концепция распространения волны вперед утрачивает смысл, если волна оказывается односторонней.

Трилистник можно изображать разными способами. Интересно отметить, что некоторые из них ведут к односторонним поверхностям (и, следовательно, неприемлемы), тогда как другие дают желаемые двусторонние поверхности, то есть являются подходящими кандидатами на форму волнового фронта. Поэкспериментировав еще немного, я пришел к выводу, что все приемлемые поверхности топологически эквивалентны, то есть обладают подходящим изгибом и растяжением, причем каждую из них можно непрерывно деформировать, превращая в любую другую. Таким образом, существовал лишь один правильный ответ, и этот ответ уже был известен нам. Вот как должна была выглядеть поверхность свиткообразной волны для трилистника.



Нам предстояло ответить на следующий вопрос: должен ли результирующий свиток быть скрученным, и если да, то в какой степени. Чтобы измерить это скручивание экспериментальным путем, я укладывал кусок нити вдоль поверхности из воска так, чтобы он всегда пролегал параллельно ее наружному краю, оказываясь лишь на миллиметр внутри ее, и продолжал укладывать эту нить вдоль всей поверхности, пока она не соединялась со своим началом, то есть пока не замкнется контур. Этот контур также образовывал трилистный узел – в точности такой, как первоначальная нить, а вместе они определяли два края воображаемой ленты.

Эта лента напоминала мне что-то из моей дипломной работы в колледже, в которой рассматривалась топология сверхспиральных молекул ДНК. Ключевой концепцией в том случае была математическая величина, называемая числом зацеплений в двухцепочечной сверхспиральной ДНК^[219], которая, грубо говоря, показывает, сколько раз одна нить ДНК обвивается вокруг другой нити ДНК, помимо обвивания, предполагаемого самой двойной спиралью. Эта величина зависит как от скручивания в ДНК, так и от ее трехмерного пути в пространстве. Теперь, в случае свиткообразной волны, число зацеплений ленты должно заключать в себе всю важную информацию о скручивании волны, а также о форме ее заузленной нити. Когда я вычислил число зацеплений, оказалось, что оно равняется нулю. Замечательно! Все оказалось так просто. Свиткообразные волны в

форме трилистника могут существовать, а число зацеплений у них всегда равняется нулю. Позже нам удалось доказать, что то же самое должно быть справедливо для любого узла, а не только для трилистного узла.

По окончании лета я перебрался в Бостон, чтобы поступить в магистратуру в Гарвардском университете. Впрочем, я продолжал поддерживать контакты с Уинфри. Нам предстояло написать несколько статей; к тому же нам нужно было найти ответы на две давние загадки. Зимой того же года я навестил Уинфри в доме его родителей, в городке Лонгбоут-Ки, Флорида, где нам наконец-то удалось решить проблему топологии свиткообразной волны в ее наиболее общей форме. Нам удалось доказать, что произвольное количество колец из свитка могут быть разнообразными способами связаны, скручены и заузлены между собой при условии, что они удовлетворяют единственному уравнению: число зацеплений ленты каждого кольца плюс все его взаимные связи с другими кольцами должно в сумме равняться нулю. В противном случае соответствующая структура оказывалась недопустимой. С некоторой долей иронии мы называли это принципом исключения^[220], по аналогии с принципом исключения Паули в химии, который ограничивает атомную структуру элементов и дает начало картинам, которые мы наблюдаем в периодической таблице элементов. Для нас «элементами» были разрешенные конфигурации колец из свитка и узлов, расположенные в порядке возрастания сложности. «Водородом» было для нас отдельно взятое кольцо из свитка, в котором не было ни узлов, ни скручиваний. «Гелием» было два кольца, связанные друг с другом и скрученные однократно.

Спустя несколько месяцев мы провели лето в Лос-Аламосской национальной лаборатории, работая на самом быстродействующем суперкомпьютере в мире. (Это был Cray-1, но местные творцы атомной бомбы называли его более зловещим именем «Х-машина».) С помощью Мела ПрUITта, местного специалиста по компьютерной графике, мы наконец-то построили картины скрученного кольца из свитка, которые позволили нам раскрыть секреты неуступчивой сингулярности, которая, как нам было известно на основе абстрактных математических рассуждений, должна проходить через его центр. Увидев эти картины, мы с Уинфри раскрыли рты от удивления. Это было все равно что встретить давнего друга по переписке из какой-то другой страны,

которого мы никогда не видели, но образ которого пытались нарисовать в своем воображении.

На протяжении двадцати лет, которые прошли с того времени, в научном мире отмечался всплеск интереса к спиральным и свиткообразным волнам. За это время химики выполнили с помощью компьютерной видеозаписи гораздо более тщательные измерения VZ-реакции и обнаружили, что спирали не всегда вращаются вокруг одной точки – зачастую они отклоняются в стороны^[221]. Внутренний кончик спиральной волны может вращаться по кругу, или вырисовывать картины цветков, или даже хаотически блуждать. Математики с жадностью накнулись на эти результаты, объясняя их как нестабильности, являющиеся следствием нелинейной динамики.

Роль Священного Грааля во всем этом продолжает оставаться за сердечными аритмиями^[222]. Многие кардиологи и физиологи экспериментальным путем подтвердили, что спиральные и свиткообразные волны могут вызывать тахикардию, хотя путь к вентрикулярной фибрилляции остается противоречивым. Наиболее вероятными подозреваемыми являются блуждающая спиральная волна, разделение одной спирали на несколько и возрастание нестабильности трехмерной свиткообразной волны. Несколько групп кардиологов и математиков упорно работают над решением этой проблемы, и истинный виновник этих опасных недугов вскоре может быть выявлен.

В течение всего этого времени Уинфри неустанно занимался свиткообразными волнами и пытался выяснить их возможную роль в возникновении сердечных аритмий. Его воображение по-прежнему будоражили образы узлов и связей; но теперь его в большей степени интересовала динамика узлов и связей, а не их фиксированная геометрия, которую мы исследовали вместе. Опираясь на огромную мощь современных суперкомпьютеров, он вместе со своими студентами смоделировал движение связанных и заузленных свиткообразных волн^[223]. Их нити неистово болтаются из стороны в сторону и скручиваются между собой, когда волны от части одной нити ударяют друг о друга. Тем не менее, многие из этих структур оказываются на удивление устойчивыми: у них не наблюдается самопроизвольное развязывание. В этом смысле они фундаментальны, подобно элементарным частицам в квантовой физике. Они представляют собой базовые локализованные решения уравнений поля

для возбудимой среды^[224]. Они *должны* иметь важное значение для нас. Именно поэтому Уинфри никогда не откажется от их изучения.

Он также пытался найти (но еще не нашел) простой закон, который мог бы объяснить, как именно эти нити плавно скользят и скручиваются. Даже если бы удалось найти элегантный ответ на этот вопрос, никто не знает, имеет ли он какое-то значение для выявления причин аритмии. До сих пор в сердечной мышце удалось обнаружить только самую элементарную из свиткообразных волн: прямой свиток без узлов и связей. Не теряя надежды на получение снимка своих неуловимых частиц, Уинфри вернулся в лабораторию и изобрел новый вид оптической томографии^[225] для VZ-реакции. Его работы получили заслуженное признание в научном мире: в 1984 г. он получил премию Фонда Макатура, присуждаемую за гениальные научные открытия; в 1989 г. – премию по кардиологии Einthoven Award; а в 2000 г. – премию имени Норберта Винера по прикладной математике. Его сын Эрик – компьютерный вундеркинд подросткового возраста во времена, когда я познакомился с ним – также недавно получил премию Фонда Макатура (между прочим, они стали первой в истории парой «отец и сын», ставшей лауреатами этой престижной премии). Что же касается вклада Уинфри в изучение связанных осцилляторов и синхронизма, то именно он продемонстрировал нам чудеса, которые случаются, когда осцилляторам предоставляется возможность свободно взаимодействовать между собой в пространстве; именно он показал нам, как они самоорганизуются вокруг точек, в которых отсутствует время, продуцируя спирали в двух измерениях и свиткообразные волны в трех измерениях. В предстоящие годы ученые приступят к изучению еще более общей формы соединения, когда осцилляторы оказываются связаны не только со своими соседями в обычном пространстве, но и со своими соседями в одном загадочном и мощном виде сети – виде, который соединяет всех нас лишь шестью степенями связности.

Глава 9. Сети тесного мира

В пьесе «Шесть степеней отчуждения»^[226], написанной Джоном Гуэйром в 1990 г., персонаж по имени Уиза размышляет о загадках жизни в тесном мире:

Я прочитала где-то, что всех жителей этой планеты отделяют друг от друга, в смысле взаимного родства, лишь шестеро других людей. Шесть степеней отчуждения. Например, между мною и любым другим жителем этой планеты. Им может быть президент США. Гондольер в Венеции. Можно назвать имя любого другого человека. Я пришла к выводу, что А) такая близость чрезвычайно приятна мне и В) такая близость сродни пресловутой китайской пытке водой. Поскольку, чтобы установить родственную связь с кем-либо из людей, мне нужно всего-навсего найти именно тех шестерых, через кого осуществляется эта связь. Ими вовсе не обязательно должны быть какие-то знаменитости. Это может быть *кто угодно*. Индеец из бразильских джунглей. Коренной житель архипелага Тьерра Дель Фуего. Эскимос. Одним словом, я связана родственными узами с любым человеком на этой планете посредством цепочки из шести людей. Потрясающая мысль: каждый человек – это новая дверь, которая открывает вам путь в другие миры.

Через несколько лет, одним хмурым зимним днем в Ридинге, Пенсильвания, трое не вполне трезвых студентов колледжа Allbright College, считавших себя побратимами, пришли примерно к такому же заключению поистине космического масштаба^[227]: каждый американский киноактер может быть связан с Кевином Бейконом (снимавшимся в таких фильмах, как Footloose («Свободные») и Tremors («Дрожь земли»)) посредством не более четырех «рукопожатий». Например, Чарли Чаплин связан с Кевином Бейконом через три «рукопожатия». Чарли Чаплин был режиссером фильма «Графиня из Гонконга», в котором снимался Марлон Брандо^[228], который снимался в фильме «Апокалипсис сегодня» с Лоуренсом Фишберном (в

роли Тайрона «Чистого» Миллера), который, в свою очередь, снимался в фильме «Брокер» с Кевином Бейконом в роли Джека Кэйси. Решив, что им пришла в голову гениальная идея, студенты-побратимы обратились к организаторам популярного в то время на MTV ток-шоу Jon Stewart Show с предложением провести соответствующую игру в прямом эфире. Их идея показалась организаторам ток-шоу интересной, и они получили приглашение провести один раунд такой игры. Игра вызвала большой интерес публики и впоследствии перекинулась на интернет. Особый ажиотаж она вызвала у студентов колледжей. Сайт Oracle of Bacon, который автоматически вычисляет кратчайшую возможную цепочку киноактеров между Кевином Бейконом и каким-либо другим киноактером, был выбран журналом Time как один из десяти лучших сайтов 1996 г. На пике своей популярности он получал до 20 тысяч обращений в сутки.

Вскоре последовали другие салонные игры. В 1999 г. в Германии «шесть степеней Марлона Брандо» породили неожиданное увлечение у немцев, когда читатели еженедельной газеты Die Zeit попытались установить связь между одним из поставщиков фалафели в Берлине и его любимым киноактером посредством самой короткой цепочки их общих знакомых. А когда разгорелся скандал с Моникой Левински, газета The New York Times опубликовала схему знаменитых людей, укладывающуюся в «шесть степеней Моника»^[229]; в этой схеме фигурировали Билл Клинтон, Саддам Хусейн, О. Джей Симпсон и, конечно же, Кевин Бейкон.

Какой бы глупостью это ни казалось, за всем этим скрывается кое-что серьезное. Представляя собою некое сообщество людей, мы увлеклись выявлением связей между отдельными людьми в этом сообществе. Мы пытаемся извлечь какой-то смысл из сложных сетевых структур, которые в последнее время начали все больше проникать в нашу жизнь. Охват этих сетей поистине огромен, однако мы имеем лишь весьма приблизительное представление об их структуре, а их функционирование приводит нас в замешательство. Мы с трудом представляем себе возможные последствия глобализации, нас сбивает с толку интернет, нас беспокоит непредсказуемое поведение финансовых рынков, на нас наводит ужас деятельность террористической группировки Аль-Каида. Иногда наши страхи, к счастью, оказываются несостоятельными: пресловутая «проблема 2000-го года» не вызвала

катастрофических последствий, которые предрекали пессимисты. Однако 10 августа 1996 г. сбой двух линий электропередачи в штате Орегон привел к отсутствию электричества в 11 штатах и двух канадских провинциях^[230]; это стало следствием возникновения целой последовательности сбоев, когда один сбой автоматически вызывал другой, который, в свою очередь, вызывал третий сбой и т. д. В результате примерно 7 миллионов человек, проживающих на этих территориях, в течение 16 часов были лишены возможности пользоваться электричеством. Компьютерный «червь» Love Bug – на сегодняшний день одна из самых тяжелых по своим последствиям компьютерных атак – в течение всего дня 4 мая 2000 г. «гулял» по интернету и причинил ущерб на сумму несколько миллиардов долларов.

Сама наука все больше внимания уделяет изучению сложных сетевых структур. Например, с завершением проекта «геном человека» основное внимание молекулярной биологии переключилось с открытия новых генов на анализ генных структур^[231]. Традиционно геном рассматривался как образец, или шаблон для конструирования белков, которые, в свою очередь, исполняют роль строительных блоков для клеточных структур и молекулярных машин, важных для жизни. Но сегодня мы рассматриваем эту метафору как слишком статичную и слишком линейную, как пережиток ментальности «сборочных конвейеров» предыдущей эпохи. Некоторые из самых важных генов (так называемые регуляторные гены) служат кодом для белков, которые влияют на деятельность других генов, включая или выключая их, формируя цепи и контуры обратной связи. Сейчас геном все меньше напоминает нам шаблон и все больше – компьютер. Функционирование такого компьютера – и его неправильную работу в случае перерождения клеток – мы не сможем расшифровать до тех пор, пока не уясним логику генных сетей.

Аналогично, во всех остальных областях науки исследователи лишь сейчас начинают выявлять структуру сложных сетей, начиная с нервных систем простых организмов и заканчивая взаимно перекрывающимися составами советов директоров крупнейших компаний в Соединенных Штатах. Величина таких сетей поражает воображение: 30 тысяч генов в геноме, миллионы видов в наземной экосистеме, миллиарды людей на Земле, и в один прекрасный день –

10 миллиардов страниц в интернете. Однако проблема оказывается еще более запутанной, чем та, которую я только что изобразил. Даже если бы в нашем распоряжении оказалась исчерпывающая схема структуры любой из этих систем – перечень всех ее узлов (генов, видов, людей) и соединений между ними, – мы все равно не знали бы, что именно нам нужно вычислить. Вся эта масса данных оказалась бы просто неподъемной для нас. До тех пор пока мы не поймем, что именно мы хотим найти, мы не сможем раскрыть секреты сложных сетей.

Сейчас мы нуждаемся главным образом в новых идеях: простых организующих принципах, которые помогали бы нам ориентироваться в этой трясине данных. Если исходить из того, что универсальным ориентиром нам может служить история, то самые проникающие идеи можно позаимствовать из математики. В силу самой своей природы математическое изучение сетей позволяет преодолеть обычные границы между разными дисциплинами. Теория сетей занимается изучением связей между отдельными элементами сетей, картин их взаимодействия. Конкретная природа этих элементов игнорируется в расчете на то, что таким путем удастся выявить более глубокие закономерности. Рассматривая любую систему взаимосвязанных компонентов, специалист по теории сетей должен видеть абстрактную картину точек, соединенных линиями. Для него имеет значение лишь эта картина, архитектура взаимосвязей, а не особенности точек как таковых. Если рассматривать сети именно с такой точки зрения, то многие из них, не имеющие, на первый взгляд, ничего общего между собой, начинают выглядеть одинаково.

В 1998 г. мы вместе с моим бывшим студентом Дунканом Уоттсом опубликовали результаты первого сравнительного изучения сложных сетей именно с такой точки зрения^[232]. Выполненный нами анализ показал, что какой бы ни была подлинная природа узлов в сети – идет ли речь о соединенных в сеть нейронах или компьютерах, людях или электростанциях, – каждый элемент сети соединяется со всеми остальными элементами короткой цепочкой посредников. Иными словами, феномен под названием «тесный мир» представляет собой нечто гораздо большее, чем особенность социальной жизни людей: это объединяющая характеристика разнообразных сетей, встречающихся как в природе, так и в технологии. С тех пор не только мы, но и многие другие ученые начали изучать влияние взаимосвязей, существующих в

тесном мире, на распространение инфекционных заболеваний, устойчивость интернета к сбоям в отдельных его частях, устойчивость экосистем, а также влияние этих взаимосвязей на множество других явлений.

Изучение сложных сетей является лишь очередным логическим шагом в движении к более отдаленной цели: созданию теории самообразующегося порядка^[233]. На пути к этой цели мы уже добились определенных успехов, перейдя от изучения самой примитивной формы координированного поведения – пары идентичных ритмов в синхронизме – к попыткам описания гораздо более сложных «хореографий» во времени и пространстве: от двух осцилляторов к большим совокупностям осцилляторов, от идентичных осцилляторов к разнообразным осцилляторам, от ритмов к хаосу, от глобальной связности к локальным взаимодействиям в пространстве. Следующий шаг заключается в переходе к более общим видам организации соединений в сети, когда соседство элементов сети определяется в некоем абстрактном смысле, то есть вовсе не обязательно в географическом смысле. Точно так же как пространственная связность между нелинейными системами породила новую форму коллективного поведения – самоподдерживающиеся спиральные и свиткообразные волны, – которая не может возникнуть в более простых геометриях, сложные сети порождают еще более сложные формы самоорганизации. Вообще говоря, сложные сети являются естественной средой обитания для самых загадочных форм группового поведения, известных науке в наши дни. Если когда-нибудь наступит день, когда нам станет понятен механизм возникновения жизни в результате сложного взаимодействия неживых элементов (химических веществ) или механизм возникновения сознания в результате сложного взаимодействия миллиардов нейронов, каждый из которых не обладает сознанием, то такое понимание, несомненно, будет основываться на всесторонне проработанной теории сложных сетей. Пока же такая теория остается для нас тайной за семью печатями. Хорошо, однако, уже то, что нам известно, с чего следует начинать. Нам нужно уяснить принципы сетевой архитектуры и понять, как природа сплетает свои запутанные сети. Неудивительно, что в ходе нашего первого посещения этой территории мы продвигались по маршруту синхронизма, начав с истории изучения сверчков, стрекочущих в унисон.

Начав осенью 1994 г. свою преподавательскую деятельность в Корнельском университете, в качестве одной из своих первых служебных обязанностей я должен был организовывать проведение ритуала, известного как квалификационный экзамен. Четверо профессоров сидели бок о бок в аудитории, где, кроме них, находился лишь экзаменуемый студент, который стоял у доски, вооружившись кусочком мела. В течение получаса мы донимали беднягу вопросами по математике. Предполагалось, что экзаменуемый отвечает на вопросы с ходу, без предварительного обдумывания. Если у экзаменаторов складывалось впечатление, что ответ на очередной вопрос не вызывает у студента затруднений, его прерывали и задавали следующий вопрос. Вопросы задавались в порядке возрастания их сложности. Задавая вопросы, профессора пытались нащупать «слабые места» экзаменуемого.

Я задавал вопросы по прикладной математике. За день нам предстояло проэкзаменовать четырех или пятерых студентов. Одним из экзаменуемых был Дункан Уоттс, долговязый австралиец с уверенной улыбкой и развитой мускулатурой, что делало его похожим на «зеленый берет». Он поступил в Корнельский университет из-за своего увлечения теорией хаоса. У себя дома, в Австралии, он считался весьма авторитетным физиком. Он был одним из лучших студентов во время учебы в Академии вооруженных сил и претендентом на получение стипендии, учрежденной фондом Rhodes Scholarship (эта стипендия считается одной из самых престижных в мире).

Председатель экзаменационной комиссии кивнул головой в мою сторону: «Профессор Строгац задаст первый вопрос». Я попросил Дункана решить уравнение Лапласа в серповидной области, воспользовавшись методом конформного отображения. Другие профессора с недоумением воззрились на меня. Им было очевидно, что эта тема не изучается в университетских курсах математики (будучи начинающим преподавателем, я не знал этого). Дункан несколько секунд бормотал что-то себе под нос (с трудом разобрав несколько слов, я понял, что во время учебы в колледже он не изучал конформные отображения). Осознав свою оплошность, я предложил ему ответить на другой вопрос, но одному из моих коллег, по-видимому, понравилось,

как накаляется атмосфера в аудитории, и он предложил Дункану ответить именно на первый вопрос.

Шаг за шагом, Дункан нащупывал свой путь к решению этой задачи (разумеется, ему не был известен стандартный способ ее решения). Тем не менее, непонятно как, но он все же нашел путь к правильному ответу (возможно, это удалось ему исключительно за счет огромного волевого усилия). Думаю, он сильно волновался, но каких-либо внешних проявлений волнения не было заметно. Более того, он производил впечатление человека, которого увлекает сам процесс поиска решения.

Такая реакция Дункана на необычную ситуацию сыграла для меня решающую роль несколько месяцев спустя, когда я обратил внимание на его фотографию, прикрепленную к двери его кабинета. На этой фотографии Дункан был запечатлен висящим на кончиках пальцев на краю Пойнт-Перпендикуляр, морской скалы высотой около 70 метров в Австралии. Я сразу же понял, что нашел для себя еще одного достойного аспиранта.

Мы начали с подбора подходящей темы для написания диссертации. Может быть, остановиться на какой-либо проблеме, связанной с использованием хаотических лазеров для обеспечения информационной безопасности в системах связи, проблеме, связанной с осцилляциями в сосудах лимфатической системы? Но ни лазеры, ни лимфатическая система не вызывали у нас прилива энтузиазма. После полугодового пребывания в состоянии неопределенности мы оба испытывали большое разочарование.

Однажды весной 1995 г. я читал на факультете нейробиологии и поведения лекцию по синхронизации светлячков; на этом факультете мой коллега Рон Хой вместе со своими студентами занимался изучением системы связи у сверчков. В ходе лекции я подчеркнул, сколь незначительно до сих пор поле соприкосновения между теорией синхронизации и какими-либо реальными биологическими примерами, и поинтересовался, не могут ли они оказать нам какую-либо помощь в этом отношении, организовав, например, проведение ряда экспериментов по коллективному поведению сверчков. Один из младших научных работников, Тим Форрест, проявил интерес к моему предложению. Во время учебы в колледже он считался одним из

лучших знатоков математики, а сейчас слыл экспертом по биоакустике. Он сказал мне, что охотно занялся бы изучением того, как в местах большого скопления сверчков самцы сверчков синхронизируют свое стрекотание, стремясь обратить на себя внимание самок^[234]. Он предложил изловить некоторое количество этих «животных» (именно так он называл их) и вызвался организовать проведение ряда экспериментов с целью проверки наших математических моделей и, возможно, даже поиска каких-то новых моделей.

Дункану понравилась идея такого проекта, и он начал регулярно общаться с Тимом по вопросам подготовки к реализации этого проекта. Между тем мы размышляли над экспериментами, которые нам хотелось бы провести. Мы мечтали о том, чтобы «измерить» одновременно трели всех сверчков и отследить, буквально секунда за секундой, их продвижение в сторону синхронизма: ничего подобного еще не было сделано в отношении светлячков, клеток-задатчиков циркадных ритмов или какой-либо другой совокупности биологических осцилляторов. Еще одной нашей мечтой было протестировать фазовый переход, существование которого было уже давно предсказано моделями Уинфри и Курамото, но никогда еще не проверялось эмпирическим путем. Наш план в этом отношении заключался в том, чтобы систематически изменять связь между сверчками. При низком уровне связи, когда они практически не способны услышать друг друга, разница в их естественных частотах стрекотания должна мешать установлению синхронизма между ними. Подобно бегунам на дорожке стадиона, которые не могут все время бежать плотной группой, поскольку их физические способности слишком различны, быстрые сверчки должны опережать медленных в случае, если уровень связи очень низок. В таком случае стрекотание большого сообщества сверчков будет напоминать какофонию. С другой стороны, если бы нам удалось постепенно повышать степень взаимного влияния сверчков (все больше повышая громкость их стрекотания или каким-либо образом повышая чувствительность сверчков), то, согласно теории Уинфри – Курамото, мы смогли бы выявить критический уровень связи, при котором наблюдается резкий переход сверчков к синхронному стрекотанию.

Даже если бы нам не удалось обнаружить фазовый переход, в любом случае мы надеялись зафиксировать, как возникает взаимная

синхронизация в реальной популяции сверчков. Эксперименты, которые проводил когда-то один из бывших консультантов Тима, показали, что отдельно взятый сверчок приспосабливается к сигналам, выдаваемым другими сверчками. Таким образом, если он услышит такой сигнал непосредственно перед тем, как он собрался застрекотать, он переводит стрелку своих внутренних часов вперед. Или, если он услышит стрекотание сразу же после своего собственного стрекотания (а это указывает на то, что он несколько поторопился со своим стрекотанием), его нервная система автоматически скорректирует его внутренние часы таким образом, чтобы в следующий раз он начал стрекотать несколько позже. (В этом отношении нервная система сверчка действует во многом подобно маятниковым часам Гюйгенса, когда отрицательная обратная связь вносит такие коррективы, которые способствуют достижению синхронизма.) Если бы мы могли оценить количественно ритм стрекотания многих отдельных сверчков в изоляции и описать, каким образом каждый отдельный сверчок изменяет свой ритм в ответ на стрекотание других сверчков, наши математики наверняка смогли бы предсказать коллективное поведение сверчков в достаточно широком диапазоне условий.

Тим сконструировал весьма оригинальные маленькие звукоизолированные коробочки, в каждую из которых предполагалось поместить одного сверчка. Каждая такая коробочка была снабжена миниатюрным микрофоном для передачи стрекотания обитателя данной коробочки другим сверчкам, а также миниатюрным громкоговорителем, чтобы было слышно сигналы, поступающие извне. Эта весьма изошренная экспериментальная конструкция позволяла нам управлять степенью взаимодействия между сверчками: мы могли усиливать стрекотание или ослаблять его до уровня едва слышного шепота. Более того, мы могли даже устанавливать связи между конкретными сверчками, то есть определять, какой сверчок какого слышит, соединяя коробочки между собой в те или иные конфигурации.

Размышляя над теми или иными возможностями, Дункан начал обдумывать вопрос связей в более общем плане. В полевых условиях было невозможно утверждать наверняка, какие сверчки каких слышат. Сторонний наблюдатель мог лишь сказать, что сверчки расселись по деревьям, но в том, как именно они расселись, невозможно было бы

уловить какую-то закономерность. Например, самец мог бы обращать внимание лишь на ближайших своих соперников. Возможно, он прислушивался бы ко всем остальным сверчкам. Невозможно было бы даже понять, какую роль в этом случае играет система связей между сверчками; может быть, они синхронизировали бы свое стрекотание в любом случае.

Однажды в январе 1996 г. Дункан заглянул ко мне в кабинет и высказал оригинальную идею, которая касалась еще одного изменения направления его исследований. Размышляя над вопросом связей между сверчками, он внезапно вспомнил о том, что однажды сказал его отец: о том, что лишь шесть рукопожатий отделяют каждого из нас от президента Соединенных Штатов. Дункан подумал: если теория шести рукопожатий действительно верна, то что она может означать с точки зрения связей, существующих в нашем мире в целом?

Я ответил ему, что, конечно же, слышал о шести степенях отчуждения. Шесть степеней отчуждения – это скрытая математическая проблема, которую еще предстоит сформулировать.

Но это еще не все, продолжал Дункан. Эти шесть степеней отчуждения связаны с тем, что мы пытаемся выяснить в отношении сверчков. Допустим, некая сеть биологических осцилляторов связана между собой таким образом, что каждый из них находится на расстоянии пары-тройки рукопожатий от остальных. Влияет ли такая система связей на то, как именно такая группа будет достигать синхронизации? Будет ли она синхронизироваться очень быстро и очень легко по причине наличия столь тесных связей в этой группе? Будет ли в такой системе по-прежнему наблюдаться фазовый переход по мере увеличения степени связности, подобно тому, как это происходит в модели Курамото?

Вряд ли кто-либо сможет сейчас ответить на эти вопросы, сказал я ему. Ведь мы никогда не занимались изучением таких видов сетей. В том-то и дело, ответил Дункан. Специалисты по теории осцилляторов всегда исходили из того, что их сети являются идеально регулярными и столь же замечательно упорядоченными, как атомы в кристаллической решетке. Уинфри, Пескин и Курамото строили модели с максимальной связностью, когда каждый осциллятор связан со всеми остальными осцилляторами. Более высокая степень связности в сетях вообще недостижима, и нет сетевой архитектуры, более простой, чем эта. В

последующих усовершенствованиях этих моделей математики укладывали осцилляторы рядом друг с другом, формируя длинную цепь, или размещали их симметрично по углам квадратной сетки или трехмерной решетки. Использование регулярных геометрий, подобных этим, представлялось вполне оправданным для задач, проистекающих из физики и техники: например, в массивах переходов Джозефсона сверхпроводящие осцилляторы намеренно укладываются аккуратными рядами и столбцами. Даже в сплошной среде, наподобие мензурки с реакцией Белоусова-Жаботинского, система связей по-прежнему остается регулярной: химические вещества диффундируют в первую очередь в своих ближайших соседей.

С другой стороны, для сложного переплетения нейронов в мозге, где клетки в значительной степени связаны со своими ближайшими соседями, но, помимо этого, связаны длинными волокнами с клетками, находящимися на другом конце того же полушария мозга, использование структур, наподобие сетки и пространственной решетки, заведомо неприемлемо. Более подходящая модель геометрии должна предусматривать использование более свободного типа структуры, некоторого сочетания порядка и случайности, с местными соединениями, объединенными в кластеры, и хаотическими глобальными соединениями. Возможно, то же самое относится и к сверчкам. Возможно, существует целый новый класс осцилляторных сетей, которые еще предстоит проанализировать.

Идея Дункана поначалу не вызвала во мне энтузиазма. Связанные осцилляторы на регулярных сетках уже представляли собой задачу огромной сложности; эти же новые, гибридные сети были бы просто безнадежны. Впрочем, мне не хотелось с ходу отвергать инициативу Дункана.

Когда мы приступили к детальному обсуждению его идеи, я уловил ее глубинный, более универсальный смысл. Те же соображения обязательно должны были возникнуть при рассмотрении других видов динамических систем, а не только связанных осцилляторов. Когда нелинейные элементы оказываются связанными в гигантские сети, схема соединений элементов в таких сетях обязательно имеет значение. Вот базовый принцип: структура всегда влияет на функцию. Структура социальных сетей влияет на степень распространения информации и заболеваний; структура электросетей влияет на устойчивость систем

передачи электроэнергии. То же самое относится к видам в экосистемах, компаниям на глобальном рынке, каскадам реакций ферментов в живых клетках. Структура сети должна оказывать огромное влияние на ее динамику.

Тем не менее, теоретики, как правило, предпочитали уклоняться от изучения проблемы связей, бросаясь из одной крайности в другую. Они принимали за основу либо нереалистично регулярную структуру, либо совершенно хаотичную систему связей. Например, в 1969 г. биолог-теоретик Стюарт Кауффман предложил идеализированную модель генных сетей^[235], в которой каждый ген регулировался продуктами двух других, выбранных произвольно из остального генома, причем это объяснялось не тем, что он полагал, будто его модель соответствует действительности, а тем, что в 1969 г. никто не знал, как именно организованы связи в генных сетях. Предположение о произвольности связей равноценно гаданию на кофейной гуще: принятие нулевой гипотезы в отсутствие какой-либо информации. Эпидемиологи-математики зачастую прибегали к такой же аппроксимации: они предполагали, что инфицированные люди взаимодействовали случайным образом с людьми, восприимчивыми к инфекции, несмотря на то что в случае определенных видов заболеваний (особенно в случае заболеваний, передаваемых половым путем) сеть контактов никоим образом не может носить случайный характер. Подобно регулярным сетям, произвольные сети являются весьма соблазнительными идеализациями. Теоретикам они кажутся привлекательными не из-за их правдоподобия, а потому, что анализировать такие сети проще всего.

К 1996 г. осталось не так уж много ученых, готовых верить в правдоподобие регулярных и произвольных сетей. У каждого, кто пользовался интернетом, возникало ощущение, что интернет – это, с одной стороны, некая упорядоченная структура, а с другой стороны, некий запутанный лабиринт, где веб-страницы связаны главным образом с другими веб-страницами по той же теме, но время от времени способны вывести вас на маршруты, не имеющие ничего общего с вашими первоначальными намерениями. СПИД и вирус Эбола продемонстрировали, что инфекционные заболевания распространяются главным образом в изолированных и сплоченных сообществах, но также разносятся по всему миру на самолетах. Таким образом, не было ничего удивительного в том, что Дункан предложил

отправиться на эту неизведанную территорию, в мир, находящийся на грани порядка и случайности.

Мы приступили к попыткам представить в наглядном виде сеть, находящуюся посреди порядка и случайности. Простейший подход заключался в том, чтобы взять регулярную сеть и плавно преобразовать ее в произвольную (что-то наподобие голливудского спецэффекта плавного преобразования одного лица в другое, как в известном видеоклипе Майкла Джексона «Черное или белое» (Black or White)). Например, выполнив такое преобразование примерно наполовину, мы могли бы выбрать половину первоначальных связей в какой-либо сети, удалить их и заменить их одинаковым количеством связей, разбросанных между произвольными парами узлов. В результирующей сети будет такое же количество связей, что и в исходной, однако теперь сеть будет наполовину произвольной и наполовину регулярной. Или, вместо того чтобы переустанавливать половину связей, мы могли бы выбрать любое другое соотношение между регулярными и произвольными связями. Задавая любую желаемую нами долю переустанавливаемых связей, мы могли бы постепенно настраивать свою сеть от 0 (первоначальная, исходная сеть, в которой количество переустановленных связей равняется 0) до 1 (полностью переустановленные, произвольные связи). Все, что находится между этими полюсами, представляло бы собой настраиваемое сочетание того и другого.

В качестве конкретного примера рассмотрим 6 миллиардов узлов, расположенных по окружности. Эти узлы могут представлять компьютеры, нейроны, людей – то есть компоненты, из которых состоит рассматриваемая нами сеть. Предположим, что каждый узел сети соединяется с 1000 соседних узлов: 500 узлов слева и 500 узлов справа. Это чрезвычайно упорядоченная сеть, идеально симметричная кольцевая структура. На этой стадии коэффициент настройки равен 0 (регулярный край спектра). Теперь начнем выполнять преобразование, медленно поворачивая ручку настройки от 0 в сторону 1. Несколько связей оторвутся от мест своего крепления и переустановятся случайным образом в других местах. По мере продолжения этой метаморфозы все большее и большее количество связей будет переустанавливаться случайным образом в других местах, нарушая

таким образом симметрию исходной кольцевой структуры, в то же время оставляя неизменной какую-то ее часть.

Для количественной оценки изменяющейся архитектуры этой сети мы ввели два статистических показателя. Один из них, «средняя длина пути», формализует интуитивное представление о степенях отчуждения. Чтобы вычислить этот показатель, нужно взять какую-либо пару узлов и подсчитать количество связей в кратчайшей цепочке между ними, а затем повторить эту процедуру для всех остальных пар узлов и усреднить результирующие длины цепочек.

В случае первоначальной кольцевой структуры такое вычисление не представляет серьезной проблемы, особенно если вообразить такую сеть как некое общество, где каждый узел представляет какого-то человека, а связи представляют дружеские отношения между людьми. Этот воображаемый мир («кольцевой мир») несколько похож на наш реальный мир в том отношении, что количество элементов в том и другом случае равняется 6 миллиардам. Однако во всех остальных отношениях эти два мира совершенно непохожи. Обитатели нашего воображаемого мира вынуждены жить в условиях очень жестких ограничений: они должны стоять плечом к плечу, расположившись по огромному кругу. Допустим, каждый человек обязан дружить с 500 людьми, расположенными по правую руку от него, и с 500 людьми, расположенными по левую руку, – и ни с кем больше. В таком мире не было бы шести степеней отчуждения – в нем было бы целых 3 миллиона степеней отчуждения!

Чтобы понять, почему так, рассмотрим длину пути между вами и самым отдаленным от вас («диаметрально противоположным») человеком в кольце. Чтобы добраться до него по кратчайшей цепочке, вы должны послать какой-то сигнал своему 500-му другу (то есть ближайшему к «диаметрально противоположному» вам человеку в кольце). Кратчайшим путем от него до интересующего вас человека опять-таки будет *его* 500-й друг, и так далее, каждый раз совершая прыжок длиной в очередные 500 человек. Таким образом, чтобы совершить все это путешествие, придется выполнить 6 миллионов «прыжков» (3 миллиарда, поделенные на 500 шагов). Впрочем, в данном случае речь идет о самом удаленном от вас человеке. Когда же вам нужно добраться до самой близкой цели – человека, стоящего рядом с вами, – требуется лишь один шаг. Таким образом, в среднем

расстояние между вами и «типичным» человеком составляет примерно 3 миллиона рукопожатий, 3 миллиона степеней отчуждения.

На другом конце этого спектра, когда наше преобразование завершено и сеть стала совершенно произвольной, вычисление оказывается столь же простым. Теперь – и это удивительно! – каждый расположен на расстоянии лишь четырех шагов от каждого. Этот удивительный результат объясняется экспоненциальным ростом. В мире случайности, если вам известно 1000 человек (в среднем), а каждому из них также известно 1000 человек, это означает, что существует 1 миллион ($= 1000 \times 1000$) человек, находящихся на расстоянии двух шагов от вас, 1 миллиард человек, находящихся на расстоянии трех шагов от вас, и 1 триллион – что гораздо больше населения нашей планеты – на расстоянии четырех шагов.

Возникает соблазн экстраполировать такой метод рассуждений на наш реальный мир, объяснив таким образом пресловутые «шесть степеней отчуждения». Но нельзя, поскольку здесь не учитывается то обстоятельство, что реальные отношения дружбы перекрываются между собой: многие из друзей ваших друзей являются также вашими друзьями и поэтому учитываются дважды.

Однако в случае гипотетической сети, которую можно охарактеризовать и как рассеянную (разбросанную), и как совершенно произвольную, указанное вычисление было бы справедливо, поскольку перекрытием отношений дружбы в данном случае можно было бы пренебречь. Когда вы выбираете случайным образом 1000 человек из огромного множества, составляющего 6 миллиардов человек, и то же самое делают все ваши друзья, вероятность перекрытия отношений дружбы составляет лишь 1 шанс из 6 миллионов. Таким образом, двойной счет в данном случае весьма маловероятен. Разумеется, это был бы довольно странный мир, в котором вероятность вашего знакомства с каким-нибудь крестьянином из Гималаев, принцем Уэльским или человеком, проживающим по соседству с вами, была бы одинаковой. Ваши друзья были бы разбросаны по всем континентам и по всем классам общества; они могли бы принадлежать к любой расе и исповедовать любую религию. В мире без перекрывающихся отношений дружбы существование какой-либо социальной структуры, семей или местных сообществ было бы просто невозможно.

Такие доводы подчеркивают важность понимания концепции перекрытия в более общем плане. Средняя величина перекрытия в сети оценивается с помощью второго статистического показателя. Этот статистический показатель – он называется «кластеринг» – определяется как вероятность того, что два узла, связанные с каким-либо общим для них узлом, также окажутся связаны друг с другом (или, возвращаясь к нашему примеру с отношениями дружбы между людьми, вероятность того, что друзья некоего третьего лица также дружат между собой). Применительно к двум крайним ситуациям, обсуждавшимся выше, можно показать, что кластеринг изменяется от 0,75 (максимально возможная величина) в случае первоначального кольца до исчезающе малой величины, составляющей 1 к 6 миллионам, в случае произвольной сети.

Например, чтобы прийти к случаю, когда кластеринг равняется 0,75, вам нужно исходить из того, что у вас есть практически все те же друзья, что и у человека, являющегося вашим непосредственным соседом в кольце (точнее говоря, 998 из 1000), в результате чего ваше перекрытие с этим, *ближайшим к вам* человеком, по сути, равняется 1. С другой стороны, с самым *отдаленным* вашим другом, находящимся от вас на расстоянии 500 шагов в кольце, у вас есть только половина общих друзей (это 499 человек, находящихся между вами и самым отдаленным вашим другом), в результате чего ваше перекрытие с этим самым отдаленным вашим другом равняется $499/1000$, или примерно $\frac{1}{2}$. Для всех остальных ваших друзей, находящихся между ближайшим и самым отдаленным другом, перекрытие плавно изменяется от $\frac{1}{2}$ до 1, что составляет, в среднем, $\frac{3}{4}$, или 0,75 – упоминавшееся выше значение кластеринга. Далее примерно такие же, но несколько более простые рассуждения мы можем применить для вычисления кластеринга в случае произвольных связей: в этом случае кластеринг равнялся бы 1 к 6 миллионам (попытайтесь доказать это сами). Здесь важно лишь не запутаться в деталях. Принципиальным моментом здесь является то, что, подобно средней длине пути, кластеринг изменяется почти в миллион раз, когда мы преобразуем сеть, переводя ее с одного края спектра в другой.

Несмотря на то что эти два статистических показателя снижаются примерно на один и тот же коэффициент, они отражают принципиально разные аспекты архитектуры сети. Средняя длина пути отражает

глобальную структуру; она зависит от способа соединения сети в целом, и ее невозможно оценить с помощью какого-либо локального измерения. Кластеринг отражает локальную структуру; он зависит лишь от способа соединений в типичной «близкой окрестности», междоусловных связей среди узлов, соединенных с каким-то общим для них центром. Грубо говоря, средняя длина пути измеряет величину (масштаб) сети. Кластеринг измеряет близость родственных отношений (фигурально выражаясь, степень «кровосмесительности») в сети.

До сих пор основное внимание мы уделяли традиционным краям спектра сетей. Но мы по-прежнему пребываем в неведении относительно того, что происходит в середине этого спектра. Сами по себе края спектра говорят нам лишь о том, что преобразование сети каким-то образом сильно сжимает кольцо и разрушает его кластеры. Нам по-прежнему неизвестно, является ли этот переход постепенным или резким. Ни Дункану, ни мне не было понятно, как решить эту проблему чисто математическими средствами, поэтому мы воспользовались компьютером для моделирования такого преобразования на сетях достаточно большой, но все же вполне обозримой величины, начиная с исходных колец, содержащих 1000 узлов, по 10 связей на каждый узел. Чтобы отобразить в графическом виде структурные изменения на этом среднем уровне, мы представили зависимость средней длины пути и кластеринга от доли связей, которые были произвольно переустановлены.

Полученный результат удивил нас. Даже самая ничтожная доля случайности приводила к колоссальному сокращению сети. Сначала резко снижалась средняя длина пути: при увеличении количества произвольно переустановленных связей лишь на 1 % (это означало, что стала случайной лишь одна из каждых 100 связей) кривая снижалась на 85 % по сравнению со своим первоначальным уровнем. Дальнейшая переустановка связей оказывала лишь минимальное влияние: кривая превращалась практически в горизонтальную линию, пролегающую на низком уровне; это указывало на то, что сеть уже сократилась до минимально возможного размера, как если бы она была полностью произвольной. Между тем изменение кластеринга было весьма несущественным. При увеличении количества произвольно переустановленных связей на 1 % кластеринг снижался лишь на 3 %.

Связи изымались из хорошо упорядоченных окружений, однако это не оказывало существенного влияния на кластеринг. Лишь на гораздо более поздней стадии преобразования, гораздо позже резкого сокращения средней длины пути, кластеринг начинал существенно снижаться.

У таких результатов есть интуитивное объяснение. В начале преобразования первые несколько произвольных связей действуют как перемычки – мосты между частями сети, которые в противном случае были бы слишком удалены друг от друга. Их непропорционально сильное влияние является следствием мощного нелинейного эффекта: они не только соединяют друг с другом два узла – они соединяют друг с другом целые миры. Например, мне нравится играть в шахматы в режиме он-лайн в Шахматном клубе интернета, где я подружился с Эмилио, редактором одного из голландских журналов. Благодаря возникновению этой «перемычки» я, конечно, очень сблизился с Эмилио – однако не только с ним, но и с тысячами других граждан Голландии: всеми его друзьями и друзьями этих друзей. И хотя мои собственные друзья даже не подозревают об этом, все они сейчас сблизились с Эмилио и его друзьями – и все это благодаря единственной «перемычке», созданной мною и Эмилио. Один этот мост играет очень важную роль.

В проведенном нами моделировании первые несколько «перемычек» резко сократили величину мира, но оказали весьма незначительное влияние на кластеринг. Из этого следует, что переход к тесному миру практически невозможно заметить на локальном уровне. Если бы вы сами проживали в мире, подвергающемся такому преобразованию, то ничто в вашем ближайшем окружении не говорило бы вам о том, что ваш мир стал маленьким. Количество ваших друзей осталось бы неизменным, а вы сами, возможно, даже не подозревали бы о том, что они могут быть связаны с более широким кругом людей. Человеку, проживающему в таком мире, могло бы казаться, что ему совершенно не угрожает опасность такого тяжелого заболевания, как СПИД – поскольку, например, никто из его половых партнеров не входит в группы повышенного риска, – хотя в действительности такая опасность вполне может подстерегать его в случае появления одной или двух «перемычек».

Самый важный результат такого моделирования заключался в том, что в достаточно широком промежуточном диапазоне переустановленных связей модельные сети были очень кластерированы и, вместе с тем, очень малы. Столь специфическое сочетание было новостью для математики. В традиционных сетях размер и кластеринг идут рука об руку. Произвольные сети малы и плохо кластерированы; напротив, регулярные сети велики и сильно кластерированы. Сети с переустановленными связями умудрялись быть и малыми, и сильно кластерированными одновременно.

Сети с такой парой взаимно противоречивых, на первый взгляд, свойств мы называли «сетями тесного мира», отдавая дань такому же дуализму, который кажется столь парадоксальным, в связях между людьми: мы движемся в компактных кругах, но в то же время все мы связаны друг с другом на удивление короткими цепочками. Теперь вопрос заключался в следующем: встречается ли столь странная форма сетевой архитектуры в природе, а если встречается, то для чего она может понадобиться?

Наше моделирование показало, что «сети тесного мира» должны иметь широкое распространение в природе, поскольку для этого хватило бы даже очень малой доли «перемычек». Чтобы проверить этот вывод, нам были нужны эмпирические примеры. Найти их оказалось не так-то легко. На любого кандидата нужно было получить исчерпывающую характеристику, схема его связей должна быть известна до последней детали, каждый узел и каждая связь должны быть задокументированы. В противном случае мы не могли бы вычислить кластеринг и среднюю длину пути.

Тогда я вспомнил, что Кьени Бей, одна из студенток, которым я в прошлом году читал курс лекций по теории хаоса, выполнила проект, касающийся энергосистемы западных штатов США. Эта энергосистема представляла собой совокупность из примерно 5000 электростанций, связанных между собой высоковольтными линиями электропередачи, охватывающими штаты к западу от Скалистых гор, а также западные провинции Канады. Кьени и ее консультант Джим Торп поделились своими данными с Дунканом. Эти данные содержали огромный объем подробнейшей информации, которая была очень важна с инженерной точки зрения — максимально допустимое напряжение на линиях

электропередачи, классификация узлов как трансформаторов, подстанций или генераторов, – однако мы проигнорировали все за исключением схемы соединений между узлами этой сети. Таким образом, эта сеть превратилась в абстрактную схему из точек, соединенных линиями. Чтобы проверить, является ли такая схема сетью тесного мира, мы сравнили ее кластеринг и среднюю длину пути с соответствующими показателями для произвольной сети с таким же количеством узлов и связей. Как и предполагалось, реальная сеть оказалась почти так же мала, как произвольная, но гораздо сильнее кластерирована. В частности, ее длина пути оказалась лишь в полтора раза больше, чем у произвольной сети, тогда как ее кластеринг оказался в 16 раз большим.

Решив не ограничивать свои исследования лишь технологическими сетями, мы обратили свои взоры к нервной системе крошечного червя под названием *C. elegans*^[236]. Об этом скромном создании – прозрачная нематода длиной около 1 миллиметра, обитающая в почве – нам известно гораздо больше, чем о каком-либо другом животном, в том числе о мушке-дрозофиле (любимый объект исследований генетиков) и мыши (любимый объект исследований онкологов). Каждая из 959 клеток этого червя исследована на каждой стадии своего развития, начиная с момента ее зарождения и заканчивая смертью. Последовательность всего генома этого червя была установлена еще в 1998 г. Каким бы сложным этот организм ни показался вам, его исследование позволило выявить несколько фундаментальных клеточных процессов, начиная с отмирания клетки и заканчивая выработкой сигналов клетками и управлением нервными путями, причем все эти процессы поначалу были открыты биологами, специализирующимися на изучении червей, а впоследствии оказалось, что исследование этих процессов важно и для человека. Именно поэтому червя *C. elegans* уделяется столь большое внимание. Возможно, это именно тот простейший организм, многие биологические процессы в котором очень важны для жизни человека.

С точки зрения нашего исследования, привлекательность червя *C. elegans* заключалась в том, что его нервная система была полностью представлена в схематическом виде^[237] – достоинство, которым не обладал ни один другой организм. Вообще говоря, схема соединений его 302 нейронов имела на дискете в цифровом виде^[238]. Как и в

случае с энергосистемой, мы пренебрегли подробностями, которые могли показаться самыми существенными специалисту по изучению червей. Мы рассматривали все нейроны как идентичные друг другу (хотя биологи различают 118 разных классов нейронов) и считали два нейрона соединенными между собой, если они были связаны друг с другом либо синапсом (химическое соединение), либо нексусом (электрическое соединение).

Результирующая абстрактная сеть опять-таки оказалась сетью тесного мира. Средняя длина пути в ней оказалась лишь на 18 % большей, чем средняя длина пути соответствующей произвольной сети, тогда как ее кластеринг оказался в шесть раз большим. Неясно было, *что* все это означает. Вполне могло быть, что столь короткая средняя длина пути облегчает быструю передачу сигналов в организме этого существа, тогда как высокий кластеринг, возможно, отражает наличие контуров обратной связи и модульной структуры в его нервной системе.

Две радикально разные сети, энергосистема и нервная система: одна из них создана человеком, а другая – результат долгой эволюции. Одна из них относится к числу крупнейших технологических систем в мире и представляет собой обширную сеть синхронизированных электрогенераторов, связанных электрическими кабелями, общая протяженность которых составляет сотни тысяч миль. Другая сеть – микроскопическая ажурная ткань, результат миллионов лет естественного отбора, тончайшее кружево, вплетенное в организм червя. Тем не менее, несмотря на указанные различия, их архитектуры на удивление схожи между собой. Обе эти сети почти так же малы, как это только возможно. Обе чрезвычайно структурированы и, несомненно, не произвольны. Правда, наши аппроксимации не позволяли правильно трактовать эти результаты: архитектура обеих этих сетей тесного мира могла не иметь никакого отношения к выполняемым ими функциям и, следовательно, могла не иметь в данном случае никакого значения. Только время могло бы дать ответ на этот вопрос. Но на тот момент совпадение казалось весьма соблазнительным.

Социальные сети также представлялись нам похожими на тесные миры, хотя нам не были известны какие-либо свидетельства, помимо ряда разрозненных фактов, которые подтверждали бы это впечатление. В частности, нас интересовало, основывается ли высказывание

о «шести степенях отчуждения» на надежных данных, которые можно было бы проверить. Возможно, это было не чем иным, как досужим вымыслом. (Сам Джон Гуэйр не мог вспомнить, что – или кто – является источником такого высказывания^[239]. Он полагал, что оно могло исходить от Гульельмо Маркони, изобретателя беспроводного телеграфа, который еще в конце XIX столетия выдвинул идею радиосвязи, позволившую создать на нашей планете сеть телеграфных станций. Эта сеть обеспечила жителей Земли надежной беспроводной связью.) Не располагая реальными данными, мы, разумеется, не могли быть уверены в широкой применимости нашей теории (хотя очень надеялись на это). Применима ли она к сетям, состоящим из живых людей, а не только к энергосистемам и нервным системам?

Одна из первых подсказок появилась в результате нашего общения с Джоэлом Коэном, биологом-математиком из университета Рокфеллера, который использовал теорию сетей для моделирования структуры сетей экологического питания. Когда в разговоре с ним я упомянул о том, что мы пытаемся получить какую-то дополнительную информацию об эмпирической основе представлений о «шести степенях отчуждения», он сказал: «Вы, наверное, имеете в виду задачу тесного мира»^[240] и посоветовал нам ознакомиться с классической работой Стенли Милгрэма^[241].

В 1967 г. Милгрэм, специалист по социальной психологии из Гарвардского университета, разработал эксперимент, цель которого заключалась в том, чтобы выяснить, на что в большей степени похоже американское общество: на некий массив разобщенных островков или на единую гигантскую взаимосвязанную паутину. Этот эксперимент был призван проследить линию общих знакомых между двумя случайно выбранными людьми в Соединенных Штатах. Милгрэм вручил папку (красиво оформленный буклет, что-то наподобие паспорта с поставленной на нем печатью Гарвардского университета) некому человеку, который должен был стать первым звеном в цепочке знакомств, и попросил его отправить эту папку определенному человеку (так называемому «целевому лицу»), но с одним условием: «Если вы лично не знакомы с этим человеком, не пытайтесь обратиться к нему напрямую. Вместо этого отправьте эту папку по почте кому-то из своих личных знакомых, вероятность знакомства которого с целевым лицом, как вам кажется, должна быть выше, чем у вас. Подчеркиваю,

это должен быть лично знакомый вам человек». Именно таким образом эта папка должна была проделать свой путь через всю страну, от одного знакомого к другому, оказавшись в конечном счете у целевого лица. Чтобы привести в действие всю эту цепочку знакомств, Милгрэм решил воспользоваться услугами волонтеров из Среднего Запада США по причинам, которые впоследствии он объяснил так: «В качестве первого приближения мы полагали, что лучше всего было бы выбрать первое звено в наших цепочках из какого-либо отдаленного города, например Уичито, Канзас, или Омаха, Небраска (для человека, проживающего в Кэмбридже, эти города казались очень далекими от него, расположенными где-то на Великих равнинах или бог знает где еще)». Исследование, проводившееся в штате Небраска, охватило 160 человек, которые играли роль начального звена в соответствующих цепочках, причем все они пытались выйти в конечном счете на одно и то же целевое лицо, некое биржевого брокера, проживавшего в Шарон, Массачусетс, и работавшего в Бостоне. В то время Милгрэм не был уверен в том, что хотя бы какая-то из таких цепочек будет пройдена от начала до конца, а если и будет пройдена, то сколько шагов понадобится для этого. «Когда я спросил у одного из своих приятелей – между прочим, весьма неглупого человека, – сколько, на его взгляд, шагов понадобится для этого, он ответил, что для того, чтобы папка Милгрэма смогла добраться из Небраски до Шарона, понадобится не менее 100 промежуточных лиц», – написал Милгрэм.

Результат эксперимента оказался таким: после прохождения через руки лишь 2–10 промежуточных знакомых 44 папки успешно добрались до целевого лица. Среднее количество «посредников» составило 5, что соответствует 6 звеньям в цепочке. В поп-культуре именно это число сейчас называют «шестью степенями отчуждения». (Другие цепочки, использовавшиеся в ходе эксперимента, оказались незавершенными, что объясняется нежеланием людей, оказавшихся волей случая участниками этого эксперимента, заниматься подобными «пустяками».)

Какими бы интригующими ни казались эти результаты, они считаются неубедительными^[242]. Цепочки, задействованные в ходе этого эксперимента, вполне могли быть не самыми короткими из возможных, поэтому оценить истинную среднюю длину пути не представляется возможным. Она даже могла бы оказаться бесконечной:

в Соединенных Штатах вполне можно найти пары людей, которые обитают в «социальных вселенных», между которыми отсутствуют какие бы то ни было социальные связи. А в отсутствие дополнительной информации о локальной связности в такой сети невозможно вычислить ее кластеринг. Чтобы получить ответы на эти, более детальные вопросы, нам нужно было найти социальную сеть, все характеристики которой – буквально каждый узел и каждая связь – были бы известны нам.

Сами математики в шутку инициировали такое перечисление, поставив в центр своей вселенной Пала Эрдёша, выдающегося венгерского математика^[243], который был до невероятности беспомощен во всех аспектах повседневной жизни – поговаривают, он не умел даже намазать масло на кусок хлеба. Тем не менее Эрдэш был одним из самых плодовитых и изобретательных математических умов XX столетия. Злоупотребляя крепким кофе и амфетаминами, бесконечно странствуя по миру со своим неизменным, выдавшим виды чемоданчиком, он появлялся у вас на пороге и заявлял: «Я открыт для любых идей». Это означало, что он готов работать вместе с вами над любой нерешенной математической проблемой.

Эрдэш сотрудничал со столь многими людьми, что большой популярностью среди математиков пользовалась игра на вычисление вашего «числа Эрдёша»^[244]. Если вы принадлежите к числу немногих избранных, кто опубликовал статьи в соавторстве с Эрдэшем (а таковых насчитывалось 507 человек), то ваше число Эрдёша равняется 1. Если вы не опубликовали ни одной статьи в соавторстве с самим Эрдэшем, но опубликовали статьи в соавторстве с тем, кому приходилось публиковать статьи в соавторстве с самим Эрдэшем, то ваше число Эрдёша равняется 2. Математики шутили, что если вы чего-то стоите как математик, то ваше число Эрдёша не должно быть меньше 2. Существует даже сайт, на котором перечислены все, кому посчастливилось иметь число Эрдёша, равное 1 или 2. Для лиц, у которых число Эрдёша равно 3, списка не существует. Если бы кто-то смог составить такой список, то он оказался бы чрезвычайно большим. (Я тоже попал бы в него.) К сожалению, не располагая полным списком, мы не могли бы вычислить среднюю длину пути или кластеринг для этой социальной сети. Человеческие сети оказались дьявольски неуловимы.

Каждый раз, когда мы пытались описать свою работу людям, далеким от науки, они неизменно вспоминали игру «в Кевина Бейкона». Мы всегда высмеивали ее как нечто, не достойное серьезного обсуждения. Но теперь мы увидели в этом интересную возможность, выход из нашего затруднительного положения. Такая сеть из киноактеров могла служить суррогатом социальной сети. Вместо людей, которых соединяют друг с другом отношения дружбы, такая сеть состояла бы из киноактеров, которых соединяют друг с другом фильмы, в которых они снимались. Считается, что два актера, которые снимались в одном и том же фильме, «отчуждены» друг от друга на один шаг, и т. д. Такая сеть, хоть и кажется несколько эксцентричной, обладает тем преимуществом, что ее характеристики могут быть известны нам во всей их полноте. В интернет-базе данных фильмов (Internet Movie Database) содержатся сведения об исполнителях ролей практически всех художественных фильмов, которые когда-либо выходили на экраны. С другой стороны, величина этой базы данных сама по себе может стать серьезной проблемой: по состоянию на апрель 1997 г. она содержала сведения почти о четверти миллиона актеров, поэтому объем соответствующей вычислительной работы оказался бы поистине гигантским. Даже суперкомпьютер Корнельского университета, один из крупнейших в мире, столкнулся бы с серьезными проблемами, если бы всю эту информацию ему пришлось хранить в своей памяти.

К счастью, Бретт Тьяден (он же «Оракул Бейкона»^[245]), ученый-компьютерщик в университете Вирджинии, уже потратил несколько недель на вычисление кратчайшей цепочки фильмов между любой парой актеров. В ходе этих вычислений он выяснил, что такая сеть обладает интересной глобальной структурой. В ней доминирует одна огромная взаимосвязанная область (получившая название «гигантский компонент»), заключающая в себе 90 % всех актеров, в том числе Кевина Бейкона и всех остальных киноактеров, о которых вам приходилось слышать. Но она также содержит небольшое количество крошечных островков, групп малоизвестных киноактеров, отрезанных от остальной «актерской вселенной» (это могли быть, например, люди, игравшие в одном фильме, который они снимали в актерской школе вместе со своими друзьями, причем ни один из них больше не снимался ни в каком другом фильме).

Воспользовавшись данными, полученными Тяденом, Дункан подсчитал, что любые два произвольно выбранные киноактера в «гигантском компоненте» отчуждены в среднем 3,65 фильмами – впечатляюще малая величина, если учесть, что в этих фильмах участвуют актеры из многих стран, а сами фильмы относятся к разным жанрам и эпохам, начиная с эпохи немого кино и до настоящего времени. Если бы сеть была полностью произвольной, соответствующее число было бы меньшим, не ненамного: 2,99. Кластеринг, с другой стороны, оказался чрезвычайно большим: 0,79, то есть примерно в 3000 раз больше, чем в случае произвольной сети.

Таким образом, снова проявилась такая же дуальность: короткие цепи и высокий кластеринг, что является признаком сети тесного мира. По какой-то причине – может быть, в силу счастливого стечения обстоятельств, а может быть, в силу каких-то более глубоких причин – все три сети оказались именно тем, что нам требовалось. Каждая из сетей, на которые мы сразу же обратили внимание (а они не были специально отобраны), оказались сетями тесного мира. Такая схожесть была особенно удивительна в свете несопоставимости их размеров и научного происхождения. У нас начало складываться впечатление, что архитектура тесного мира встречается повсеместно.

Между прочим, этот анализ низвел Кевина Бейкона с его пьедестала. Он оказался лишь 669-м в списке киноактеров, имеющих самые многочисленные связи. (Этот показатель измерялся средним отчуждением киноактера от всех остальных в этом «гигантском компоненте»). Согласно этому показателю, центром голливудской «вселенной» является Род Стайгер. Как ни странно, вторым и третьим номерами оказались Кристофер Ли и Дональд Плисенз, известные главным образом своими ролями во второсортных фильмах ужасов.

После того как мы продемонстрировали, что сети тесного мира не только существуют в реальности, но даже могут встречаться повсеместно, нам оставалось ответить на исходный вопрос Дункана: будут ли осцилляторы, связанные между собой по типу сети тесного мира, синхронизироваться с большей или меньшей готовностью, чем они синхронизировались бы в традиционной регулярной сети? На этот вопрос можно было бы в конце концов ответить, по крайней мере теоретически, с помощью разработанной ранее модели преобразования.

Каждый узел в такой сети теперь представлял бы некий самоподдерживающийся осциллятор – которым мог бы быть стрекочущий сверчок, мерцающий светлячок, нейрон-задатчик ритма, – а связи в такой сети отражали бы соответствующую картину взаимодействий.

Одна из простейших моделей такого рода была к тому времени уже изучена Курамото и его коллегами Хидецугу Сакагути и Сигеру Синомото^[246]. Они рассматривали те же виды осцилляторов, что и в оригинальной модели Курамото: фазовые осцилляторы с распределенными естественными частотами, связанные между собой силой притяжения синусоидальной формы. (Представьте себе помещение, в котором собралось множество людей. Каждый из присутствующих пытается аплодировать в унисон, то ускоряя, то замедляя свое хлопанье в зависимости от временного сдвига между его собственным хлопаньем и коллективными аплодисментами. Поскольку скорость коллективного хлопанья постоянно меняется в диапазоне от размеренного до неистового, людям, собравшимся в этом помещении, все время приходится подравнивать скорости своего хлопанья к текущей скорости коллективных аплодисментов.) Но, в отличие от первоначальной модели Курамото, которая предполагала, что осцилляторы соединены между собой по принципу «каждый с каждым», на этот раз японские физики предполагали кольцевой принцип соединения осцилляторов, согласно которому каждый осциллятор соединялся с фиксированным количеством соседей по обе стороны от себя. (Представьте себе арену, наподобие футбольного стадиона, где каждый болельщик слышит лишь тех, кто сидит рядом с ним.) Курамото и его коллеги обнаружили, что кольцо разнородных осцилляторов с трудом достигает всеобщего синхронизма; вообще говоря, такое кольцо фрагментируется на множество небольших групп соседей, причем члены одной группы осциллируют с одной и той же средней скоростью, однако в разных группах эта скорость оказывается разной. Разные сектора стадиона в этом случае хлопали бы с разными скоростями.

Мы хотели выяснить, приведет ли переустановка связей в кольце к повышению его способности синхронизироваться. Как и в ходе предыдущих сеансов моделирования, мы преобразовывали кольцевую структуру в сторону произвольной сети, превращая некоторые из ее

первоначальных соединений в произвольные. (Это подобно тому, как если бы у некоторых из болельщиков были мобильные телефоны, с помощью которых они могли бы слышать аплодисменты, раздающиеся в других секторах стадиона, но неслышные для их соседей по сектору.) Мы обнаружили, что крошечный процент таких «перемычек»^[247] – порядка 1–2 процентов в кольце из 1000 осцилляторов – резко изменял динамику системы в целом. Система самопроизвольно переходила от локального несовпадения к глобальному консенсусу. Теперь все осцилляторы приводили свои ритмы к единой компромиссной частоте.

Хотя нам не удавалось объяснить эти результаты с математической точки зрения, напрашивалось интуитивное объяснение: «перемычки» создавали каналы быстрого действия связи, благодаря чему взаимное влияние быстро распространялось по всей популяции. Разумеется, такого же эффекта можно было достичь путем непосредственного соединения осцилляторов по принципу «каждый с каждым», но при этом существенно возрастало бы количество соединений. Совершенно очевидно, что архитектура тесного мира позволяла добиться глобальной координации гораздо эффективнее.

К тому же архитектура тесного мира, возможно, оказалась бы предпочтительным вариантом в других случаях, когда приходится обеспечивать быстрое продвижение информации по чрезвычайно сложной системе. Следующий случай, который мы решили изучить, представляет собой классическую задачу компьютерной науки, которая называется «проблемой классификации плотности для одномерных двоичных автоматов»^[248]. Попробуем сформулировать ее более простым языком. Представьте себе кольцо из 1000 лампочек. Каждая из этих лампочек может быть либо включена, либо выключена. На очередном временном шаге каждая из этих лампочек смотрит на трех своих соседей по обе стороны от себя и с помощью некоторого правила (которое еще предстоит определить) решает, в каком состоянии (включена или выключена) ей нужно пребывать в следующем цикле. Задача заключается в том, чтобы разработать правило, которое позволит такой сети решить определенное вычислительное задание. Поначалу это задание кажется до смешного простым: решить, было ли большинство этих лампочек поначалу включено или выключено. Если более половины лампочек было поначалу включено, то предполагается, что повторное выполнение этого правила приведет всю сеть к

конечному состоянию, в котором все лампочки включены (и наоборот, если поначалу большинство этих лампочек было выключено, то предполагается, что конечное состояние соответствует всем выключенным лампочкам).

Эта задача оказывается тривиальной при наличии центрального процессора – «всевидящего ока», которое способно контролировать такую систему в целом и определять, было ли большинство лампочек поначалу включено или выключено. Однако нужно учитывать, что в данном случае речь идет о децентрализованной системе. «Всевидящего ока», которое обладало бы глобальным знанием, в этой системе нет. Лампочки страдают близорукостью: по определению, каждая из них может видеть лишь трех своих соседей по левую и по правую сторону от себя. Именно это и делает нашу задачу столь непростой: как может такая система, пользуясь неким локальным правилом, решить задачу, которая по своему характеру является фундаментально глобальной?

В этой задаче ухвачена суть того, что называют коллективным вычислением. Представьте себе колонию муравьев, строящих муравьиную кучу. Каждый из отдельно взятых муравьев не знает, в чем заключается цель работы, выполняемой колонией, но в своей совокупности они ведут себя так, будто обладают разумом. Вспомните концепцию «невидимой руки рынка», принадлежащую Адаму Смиту. Согласно этой концепции, если каждый, выполнив свое «локальное вычисление», решает действовать в своих собственных интересах, то экономика в целом будет двигаться к состоянию, которое оказывается полезным для всех. В нашем случае, то есть в случае «проблемы классификации плотности для одномерных двоичных автоматов», подобные (но гораздо более простые) вопросы могут быть решены в некоем идеализированном, хорошо контролируемом окружении. Проблема заключается в том, чтобы придумать правило, которое позволит сети решить, было ли большинство лампочек поначалу включено или выключено, при любой первоначальной конфигурации. Такой сети предоставляется возможность действовать в течение времени, равного ее удвоенной длине. Таким образом, если наша сеть содержит 1000 лампочек, то такой системе предоставляется возможность выполнять свое локальное правило в течение 2000 шагов, после чего она должна принять решение (вынести свой вердикт).

Никому до сих пор не удалось найти правило, которое срабатывало бы каждый раз. Мировой рекорд поставило правило, которое позволяло получить правильный результат примерно в 82 % случаев – то есть оно правильно классифицировало примерно 82 % всех исходных условий как «большинство лампочек включено» или «большинство лампочек выключено», уложившись в заданное время. Первое правило, которое могло бы показаться вам подходящим для проверки – «правило большинства», согласно которому каждая лампочка подражает тому, что делает большинство ее соседей, – совершенно неработоспособно. Сеть замыкается в некоем «полосатом» состоянии, в котором блоки включенных смежных лампочек перемежаются с блоками выключенных лампочек. Такой результат совершенно неприемлем для нас, как неприемлемо жюри суда присяжных, которое неспособно вынести вердикт по причине разделения мнений. Предполагается, что такая сеть должна сойтись к единодушному вердикту, когда все лампочки либо включены, либо выключены.

Мы с Дунканом предположили, что сеть тесного мира, составленная из лампочек^[249], должна решить эту задачу более эффективно, чем первоначальная кольцевая структура. Превращение небольшого числа связей в произвольные «перемычки» должно предоставить возможность удаленным лампочкам быстрее общаться между собой, что, вероятно, предотвратит застревание в «полосатом» состоянии. Мы изучили действие «правила большинства» в кольцевых сетях с разными объемами произвольной переустановки связей. Как и ожидалось, когда объем произвольной переустановки связей был очень незначительным, «правило большинства» по-прежнему не срабатывало: полученная система была неотличима от первоначального кольца и в очередной раз скатывалась в тупиковое «полосатое» состояние. Когда мы увеличили объем переустановленных связей, какое-то время функционирование сети оставалось плохим, но затем, после достижения определенного порога, резко улучшалось. Это происходило примерно на том этапе, когда от каждой лампочки исходила одна «перемычка», в среднем. В этом режиме «правило большинства» начало работать блестяще, правильно классифицируя примерно 88 % всех первоначальных конфигураций. Другими словами, довольно примитивное правило («правило большинства») в случае его

применения к эффективной архитектуре (тесный мир) позволило достичь результатов, которые превзошли мировой рекорд.

В такой сети самопроизвольно вырабатывалась способность к вычислению после внесения даже незначительных изменений в схему соединений этой сети. Это позволяет сделать вывод о том, что использование архитектуры тесного мира может оказаться весьма эффективным способом решения других задач коллективного вычисления – способом, который придает огромную дополнительную силу даже простейшим локальным правилам. Возникает даже соблазн предположить, что процесс эволюции мог использовать эту архитектуру при формировании нервных систем живых организмов.

Важность системы связей тесного мира оказывается еще более очевидной при рассмотрении процессов распространения инфекций. Все, что может распространяться – инфекционные заболевания^[250], компьютерные вирусы, идеи, слухи и т. п., – будет распространяться гораздо эффективнее и быстрее в тесном мире. Менее очевидным моментом является то, что буквально нескольких «перемычек» может оказаться достаточно для того, чтобы создать тесный мир.

Необычайная эффективность «перемычек» была трагически проиллюстрирована распространением СПИД^[251] в Северной Америке, подстегнутым, как полагают, так называемым «нулевым пациентом», неразборчивым в своих половых связях франкоговорящим канадским стюардом, который летал в самолетах по всему миру и был завсегдатаем саун в Сан-Франциско, Лос-Анджелесе, Ванкувере, Торонто и Нью-Йорке. По меньшей мере 40 из 248 мужчин, у которых был диагностирован СПИД, вступали в половые связи с ним или с одним из его предыдущих партнеров.

Аналогично, эпидемиологи из Великобритании обратили внимание на новую, и весьма тревожную, картину распространения ящура в ходе самой последней вспышки этого опасного заболевания. Ящур – вирус, характеризующийся высокой вероятностью заражения; этому инфекционному заболеванию подвержены коровы, свиньи, овцы и прочие парнокопытные животные^[252]. Распространение этого заболевания влечет за собой катастрофические последствия для промышленного животноводства. Во время последней вспышки, которая случилась в 1967 г., вирус распространялся главным образом

воздушно-капельным путем (хотя его переносчиками могут также быть птицы и животные; более того, он может переноситься даже на обуви и одежде). Из примерно 2000 случаев заболевания ящуrom свыше 95 % было локализовано в радиусе 100 км от источника вспышки. Однако нынешняя эпидемия в Великобритании уже охватывает область в радиусе 500 км от источника. Полагают, что столь существенная разница объясняется изменениями, которые в последнее время имели место в сельском хозяйстве, особенно возросшими перевозками скота между разными регионами, достаточно удаленными друг от друга, что в данном случае послужило механизмом образования «перемычек». Вирус ящура уже перекинулся с Англии на Ирландию, Францию и Голландию; лишь с 2000 г. вспышки этого заболевания отмечались в 34 странах. Хотя эпидемия ящура еще не добралась до Соединенных Штатов (по крайней мере на момент написания этой книги) и вообще вирус не появлялся на территории Соединенных Штатов с 1929 г., это не может быть поводом для самоуспокоенности. Острословы заметили недавно по этому поводу, что «мы живем не просто в “глобальной деревне” – мы живем на “глобальной ферме”».

Распространение по интернету компьютерных вирусов и компьютерных червей также демонстрирует действенность системы соединений в тесном мире. Рассмотрим пример компьютерного червя Love Bug, который автоматически передавался каждому, кто оказывался в списке контактов пользователя, ставшего жертвой этого червя. С учетом того, что онлайн-сообщество, по-видимому, кластеризовано в виде достаточно узких кругов друзей и знакомых, которые практически не общаются с теми, кто не входит в их кластер, кажется несколько странным, что червя Love Bug удалось буквально за несколько дней инфицировать столь большое количество компьютеров в глобальном масштабе: ведь можно было ожидать, что он будет бесконечно циркулировать в каком-то узком сообществе (кластере). Предполагают, что в сети существовало несколько соединений большого радиуса действия, которые позволяли червя переходить из одного социального мира в другой. К счастью, следует отметить, что «перемычки» играют не только отрицательную роль в нашей повседневной жизни. В конце 1960-х годов социолог Марк Грановеттер провел опрос сотен специалистов и технических работников на предмет того, как они

нашли свое нынешнее место работы^[253]. Вот что он вспоминал об этом в ходе интервью на радио.

Когда я приступил к интервьюированию людей относительно того, как они нашли свое нынешнее место работы, я, конечно же, понимал, что зачастую люди находят работу посредством своих личных контактов, и мне было интересно, кем именно являются эти личные знакомые, каковы пути продвижения информации и почему она движется именно такими путями, а не какими-то другими. Зачастую я спрашивал у этих людей: «Вы получили эту информацию от кого-то из своих приятелей?», а они каждый раз поправляли меня: «Нет-нет, это был один из моих знакомых». Спустя какое-то время, после того как я из раза в раз слышал такой ответ, я понял, что здесь присутствует какая-то закономерность. Короче говоря, фундаментальная идея заключается в том, что ваши близкие друзья хороши в очень многих отношениях – они готовы помочь вам, утешить вас в несчастье, оказать вам те или иные услуги, которые вряд ли оказали бы вам другие люди, – но они не очень-то хороши как источники полезной информации, поскольку ваши близкие друзья, как правило, общаются с теми же людьми, что и вы сами. Тогда как люди, являющиеся просто вашими знакомыми – которые вряд ли помогут вам в беде, – тем не менее являются более ценными источниками информации, поскольку они знают многих из тех, кого не знаете вы. Образно выражаясь, такие люди – ваше окно в мир, поскольку они связаны с кругами, на которые у вас нет непосредственного выхода.

В частности, Марк Грановеттер обнаружил, что из 56 % тех, кто нашел работу посредством личных контактов, лишь 17 % считали такой контакт «частым» (иными словами, считали такого человека своим приятелем), тогда как 55 % считали такой контакт «эпизодическим», а 28 % считали такой контакт «редким». Чтобы описать жизненно важную функцию таких отношений за пределами обычного круга общения человека, Грановеттер даже придумал запоминающуюся

фразу: его статья на эту тему, получившая впоследствии широкую известность, называется «Сила слабых связей».

Пока мы с Дунканом исследовали сети тесного мира, их преимущества и возможные применения, другая группа ученых, независимо от нас, размышляла над такими же вопросами.

В университете Нотр-Дам Ласло Барабаши и его студенты Река Альберт и Хавонг-Ционг исследовали анатомию «всемирной паутины»^[254], пытаясь выявить регулярности в этой чащобе из миллиарда страниц, соединенных гиперссылками. То, что им удалось выявить, оказалось еще одним организующим принципом для широкого класса природных и рукотворных сетей. Ласло Барабаши – энергичный молодой физик с очаровательным трансильванским акцентом и умением ставить правильные вопросы. Будучи по своему формальному образованию специалистом по статистической механике (отрасль физики, которая изучает огромные системы атомов и другие совокупности частиц), он использовал оригинальный инструментарий для решения задачи, не относящейся к сфере интересов традиционной физики. Вместе со своей группой исследователей он показал, что «всемирная паутина» – это не только тесный мир, но и яркая иллюстрация особой картины в его анатомии. Некоторые страницы обладают гораздо большей совокупностью связей, чем другие: количество входящих и исходящих связей у таких страниц оказывается гораздо большим, чем в среднем по сети. Этот вывод не был слишком уж неожиданным: на краях спектра любой популяции всегда можно встретить экстремальные объекты. Неожиданной оказалась форма распределения. Это не была хорошо знакомая нам колоколообразная кривая, наподобие распределения роста людей. Она была в большей степени похожа на распределение доходов, с чрезвычайно длинным «хвостом», тянущимся вправо. (Что означает эта необычная структура, подробно рассматривается в недавно опубликованной книге Барабаши, которая называется *Linked*.)

В распределениях, которые изучались в традиционных курсах статистики, среднее значение задает характерный масштаб, типичный размер для членов соответствующей популяции в целом. Рассмотрим, например, распределение роста людей. Рост почти всех взрослых людей находится в диапазоне от двух до девяти футов. Вы никогда не встретите взрослого человека, рост которого равнялся бы одному

дюйму или ста футам. Характерный масштаб роста людей составляет примерно пять футов и, несомненно, не отклоняется от этого значения более чем на порядок величины (коэффициент «десять») по обе стороны от среднего значения. Напротив, распределение доходов охватывает много порядков величины, начиная с годового дохода, близкого к нулю, вплоть до миллиардов долларов, которые Билл Гейтс получает лишь в виде процентов. Такое распределение иногда называют «безмасштабным», подчеркивая тем самым, что в нем не доминирует какой-то один, репрезентативный масштаб.

Барабаши и его коллеги выяснили, что распределение ссылок во «всемирной паутине» является безмасштабным, причем по той же причине, что и в случае распределения доходов, и характеризуется чрезвычайно длинным «хвостом». В частности, этот «хвост» затухает гораздо медленнее, чем в случае обычной колоколообразной кривой. Вместо того чтобы это затухание происходило, как обычно, по экспоненциальному закону, оно подчиняется «степенному» закону^[255], причем показатель степени равняется 2,2. В алгебраическом смысле этот закон утверждает, что десятикратное снижение количества входящих ссылок сопровождается увеличением количества страниц, имеющих такое количество ссылок, в среднем в $10^{2,2}$ раза, что равняется приблизительно 158. Иными словами, вероятность появления страниц, количество ссылок у которых в 10 раз больше, будет в 158 раз меньшей.

Эта загадочная картина наблюдается во всей «всемирной паутине», начиная со сравнительно небольшого числа гигантских хабов, наподобие CNN и Yahoo, каждый из которых содержит тысячи входящих ссылок, до сотен миллиардов почти никому не известных страниц, у которых входящих ссылок нет вообще. С чисто математической точки зрения, степенной закон ничего особенного не означает — это лишь один из множества возможных видов алгебраических соотношений. Но когда со степенным законом сталкивается физик, у него сразу же загорается взор. Поскольку, с точки зрения физика, степенной закон означает, что, возможно, речь идет о самоорганизующейся системе. Степенной закон действует в фазовых переходах, когда система находится на грани, балансируя между порядком и хаосом. Степенной закон действует во фракталах, когда произвольно малый фрагмент некой сложной формы представляет

собой микрокосм целого. Степенной закон действует в статистике опасных природных явлений – лавин и землетрясений, наводнений и лесных пожаров, – масштабы которых колеблются в столь широких пределах от одного случая к другому, что среднее значение оказывается не в состоянии охарактеризовать соответствующее распределение в целом. Но несмотря на то что степенной закон активно изучается на протяжении последних 20 лет, причины его появления все еще остаются не вполне понятными для нас^[256].

Именно поэтому обнаружение степенного закона во «всемирной паутине» оказалось столь неожиданным. Интернет – нерегулируемый и неконтролируемый лабиринт, где каждый может выложить тот или иной документ и связать его с любой другой страницей по собственному желанию. Нет никакой причины ожидать появления во «всемирной паутине» какой-либо внятной картины связей (ссылок). Тем не менее интернет, несомненно, является весьма утонченно и загадочно упорядоченной сетью, подчиняясь все тому же степенному закону, действие которого мы обнаруживаем то здесь, то там.

Барабаши и его коллеги предложили интересное объяснение этому феномену^[257]. На их взгляд, степенной закон является естественным результатом разрастания интернета. Интернет не статичен. Новые страницы появляются в интернете буквально каждый день, добавляются все новые и новые гиперссылки, а уже существующие гиперссылки либо перенаправляются, либо удаляются; старые страницы со временем полностью перестают интересовать пользователей и удаляются. Допустим, в грубом приближении, что можно игнорировать все эти процессы, за исключением добавления новых страниц, и что новые страницы связываются произвольным образом с уже существующими страницами – правда, предпочтение отдается страницам, пользующимся популярностью. В таком случае узлы с большим количеством гиперссылок приобретают еще большее количество гиперссылок, а математический анализ показывает, что автоматически вступает в действие степенной закон с показателем степени 3, что оказывается достаточно близко к наблюдавшемуся значению 2,2. Более совершенные модели, появившиеся с тех пор, уменьшили зазор между этими значениями.

Новые представления о сетях тесного мира и безмасштабных сетях, сформировавшиеся за последние пять лет, вызвали бурный рост эмпирических исследований^[258], имеющих своей целью анализ структуры сложных сетей. Эти исследования позволили выявить схожесть скелетных структур в сетях, которые, на первый взгляд, должны иметь не так уж много общего между собой. Магистральная сеть интернета и мозг примата являются тесными мирами. То же можно сказать о сетях питания (то есть системах взаимосвязанных и взаимозависимых цепочек питания в животном мире) видов, поедающих друг друга, сетчатой структуре метаболических реакций в клетке, взаимосвязанных и взаимно пересекающихся советах директоров компаний, входящих в перечень 1000 ведущих компаний мира по версии журнала Fortune, и даже о структуре английского языка как такового. Большинство таких сетей (хотя и не все они) также являются безмасштабными (то есть, в большей степени похожими на распределение доходов и в меньшей степени – на распределение роста взрослых людей).

На анатомическом уровне – то есть на уровне чистой, абстрактной системы соединений – мы, по-видимому, натолкнулись на некую универсальную картину сложности. Несопоставимые сети демонстрируют три одинаковые тенденции: короткие цепочки, высокий кластеринг и безмасштабное распределение связей. Эти совпадения выглядят весьма загадочно, их невозможно интерпретировать.

Например, чтобы построить сеть для английского языка^[259], физики Рамон Феррер-и-Канчо и Райкард Соле рассмотрели два слова, которые нужно связать, если они оказываются вблизи друг друга (либо рядом друг с другом, либо разделены лишь одним словом) в предложениях, встречающихся в British National Corpus, собрании (включающем приблизительно 100 миллионов слов) примеров письменного и разговорного языка из широкого круга источников, которое призвано представить некий срез современного английского языка (его британской версии). Канчо и Соле пришли к выводу, что перейти от какого-либо слова к какому-либо другому слову можно таким образом лишь за 2,67 шага (в среднем). Поначалу складывается впечатление, что случиться может все, что угодно (поскольку осмысленным предложениям на английском языке присуще бесконечное разнообразие), однако лингвистическая сеть оказалась

чрезвычайно организованной и отнюдь не произвольной, причем кластеринг ассоциаций слов оказался примерно в 4000 раз большим, чем кластеринг эквивалентной произвольной сети. Схема ассоциаций слов оказалась безмасштабной с двумя разными режимами: широко распространенные слова (то есть слова, содержащие более 1000 связей) подчиняются степенному закону с показателем степени 2,7, тогда как для сравнительно редко употребляемых слов показатель степени составил 1,5.

В подобных случаях не вполне ясно, являются ли такие картины действительно значимыми или они больше похожи на нумерологию. Учитывая ажиотаж и шумиху, поднятые в последнее время вокруг сложных сетей, наблюдается явная тенденция к громким заявлениям. Один мой знакомый физик, решив подшутить надо мной, заявил о своем мнимом открытии: он утверждал, что если слой сахарной глазури на кусочке яблочного штруделя представляет собой картину тесного мира, то такой кусочек оказывается не только вкуснее, но и содержит меньше калорий^[260].

Сейчас проблема заключается в том, чтобы расшифровать потайной смысл тесного мира и безмасштабной архитектуры, если таковая действительно существует. В ходе недавно проведенного эксперимента Райкард Соле обратил внимание на тенденцию к формированию системы соединений в электронных схемах в стиле тесного мира^[261], причем он утверждает, что понял, в чем тут дело. Когда он анализировал и новейшие цифровые микросхемы, и безнадежно устаревшие схемы, применявшиеся в старых телевизорах, он замечал, что все компоненты этих схем находились друг от друга на расстоянии буквально двух-трех «электрических шагов»; вместе с тем они были гораздо более кластеризованы, чем если бы они были в составе эквивалентной произвольной схемы, благодаря модульной конструкции, которую предпочитают разработчики электронных схем. Соле утверждает, что такой способ компоновки электронных схем вполне мог возникнуть в результате естественного отбора, в ходе которого альтернативные подходы к конструированию электронных схем конкурировали между собой за выживание. Другими словами, разработчики чисто интуитивно конструировали свои схемы в соответствии с принципами тесного мира, пытаясь найти идеальный

компромисс между сокращением затрат и обеспечением высокой надежности.

Барабаши и его коллеги указывали, что безмасштабные сети также воплощают некий компромисс, который носит на себе печать естественного отбора: они обладают внутренне присущей им устойчивостью к случайным сбоям^[262], оставаясь при этом уязвимыми к преднамеренной атаке против их хабов. Учитывая то обстоятельство, что мутации случаются в непредсказуемые моменты времени, естественный отбор отдает предпочтение конструкциям, устойчивым к внезапным сбоям. В силу самой своей геометрии безмасштабные сети устойчивы по отношению к внезапным сбоям, поскольку заведомое большинство их узлов имеет небольшое число связей и, следовательно, используется достаточно редко. К сожалению, эта эволюционная конструкция имеет и обратную сторону. Когда хабы целенаправленно выбираются хакерами в качестве мишеней для атаки (что совершенно невозможно, когда речь идет о случайной мутации), целостность сети быстро снижается – размер гигантского компонента сокращается, а средняя длина пути, наоборот, увеличивается, по мере того как узлы оказываются изолированными, брошенными на произвол судьбы на их собственных маленьких островках.

Свидетельством этого предполагаемого сочетания устойчивости и уязвимости является гибкость живых клеток. Исследуя сеть белковых взаимодействий в дрожжах^[263], Барабаши и его коллеги обнаружили, что большинство белков, обладающих множеством связей, играют, вообще говоря, самую важную роль в выживаемости клетки. Они пришли к этому выводу, сопоставив информацию из двух разных баз данных. Сначала они проанализировали данные о связях, где два белка считаются связанными между собой, если известно, что один из них «приклеен» к другому. Такая сеть взаимодействий соответствует чрезвычайно неоднородной, безмасштабной архитектуре с небольшим количеством главных белков, опосредующих взаимодействия «рядовых» белков, имеющих гораздо более слабую систему связей. Затем Барабаши и его коллеги сопоставили данные о системе связей с результатами экспериментов по систематической мутации, в которых биологи предварительно удалили определенные белки, чтобы выяснить, будет ли их удаление иметь летальные последствия для клетки. Они обнаружили, что удаление любого их «рядовых» белков (93 % всех

белков, имеющих менее 5 связей) оказалось фатальным лишь в 21 % случаев. Другими словами, клетка защищена от потери большинства своих индивидуальных белков точно так же, как безмасштабная сеть защищена от случайных сбоях большинства своих индивидуальных узлов. Напротив, удаление любого из главных белков (которые составляют 1 % от всех белков; у каждого из таких белков имеется не менее 15 соединений) оказалось смертельным в 62 % случаев.

Вскоре после того как мы с Дунканом опубликовали в журнале Nature свою статью о тесном мире, на нас обрушился шквал информации из разных СМИ, начиная с The New York Times и CBS News и заканчивая венгерской ежедневной газетой Magyar Hirlap. Люди, представляющие разные профессии и занимающие разное положение в обществе, делились с нами своими собственными мыслями и соображениями. Автор статьи, опубликованной в Business Week^[264], предлагал использовать идеи тесного мира для «переформатирования» организаций путем добавления небольшого числа «перемычек» для улучшения каналов коммуникации между разными уровнями организационной иерархии. Нам позвонил некто из приемной сенатора Пола Веллстоуна с предложением провести сеанс «мозгового штурма» с целью изыскания наиболее эффективного способа распространения сведений об этом сенаторе-либерале из Миннесоты, который хотел выдвинуть свою кандидатуру на пост президента США во время президентских выборов в 2000 г. Самым запоминающимся обращением было таинственное письмо, полученное по электронной почте, от одного ученого, работающего в судебной системе ФБР^[265]. Он требовал, чтобы я немедленно связался с ним. Томимый мрачным предчувствием, я перезвонил ему. «Волосы и волокна», – ответил мне голос в трубке. Его вопрос касался так называемого вторичного переноса волокон. Если, например, какое-либо волокно, найденное на теле жертвы, совпадает с тканью футболки, в которую был одет подозреваемый, прокурор трактует такое совпадение как явную улику. Естественно, адвокат станет уверять, что в прошлом году были проданы тысячи таких футболок; возможно, жертва просто подцепила на брюки кусочек волокна такой футболки, оставленный человеком, который ранее сидел на том же месте в автобусе. Вопрос заключался в следующем: можно ли – учитывая вероятность таких

вторичных переносов, количество изготовленных футболок, систему связей в американских социальных сетях, а также любые другие подобные данные – вычислить вероятность того, что обнаруженное волокно действительно принадлежало подозреваемому.

К сожалению, я ничем не смог помочь этому сотруднику ФБР.

На пути к пониманию причин самопроизвольного возникновения порядка – пути, который начался с Кристиана Гюйгенса и его симпатизирующих друг другу маятниковых часов, – эта теория сложных сетей, пока еще пребывающая в младенческом возрасте, является, тем не менее, очень важным шагом. После столетий размышлений о чисто ритмичных объектах – осцилляторах, связанных попарно друг с другом, затем по принципу «каждый с каждым», затем соединенных в пространстве в регулярные сети, в наши дни математики и ученые лишь приступают к рассмотрению более сложной динамики (например, хаоса и возбудимости) и более сложных архитектур (например, тесных миров и безмасштабных сетей).

На этой начальной стадии наши модели являются лишь жалкими имитациями реальности. Мы делаем вид, будто сети состоят из обезличенных, статичных, идентичных друг другу узлов, соединенных связями, не имеющими определенной направленности и одинаковыми по своей силе и характеру. Нам еще много предстоит узнать собственно о *возможности* тех или иных соединений. Правда, уже сейчас можно пытаться рассматривать более реалистичные варианты сетей: например, можно задействовать в сетях нелинейную динамику, не ограничиваться лишь минималистскими схемами соединений. Узлы в наших моделях должны стать осцилляторами, или нейронами, или электростанциями. Сами по себе соединения должны быть разнообразными и динамичными. Мы все еще почти ничего не знаем о законах, которым подчиняются взаимодействия между генами, или белками, или людьми.

Глава 10. Гуманитарный аспект синхронизма

Одним весенним днем 1994 г. я сидел в своем кабинете в МТИ, погрузившись в вычисления. Внезапный телефонный звонок вернул меня к действительности. Приятным женским голосом телефон сообщил мне: «Вас беспокоит Джин из офиса Алана Альды. Не кладите, пожалуйста, трубку. С вами будет разговаривать мистер Альда».

Через несколько секунд я услышал голос, который, как мне показалось, я уже где-то слышал: «Привет! Меня зовут Алан Альда^[266]. Не уверен, знаете ли вы меня. Я – актер».

«В самом деле?» – озадаченно пробормотал я.

«Я тут читаю вашу статью в Scientific American про синхронизацию и хотел бы поговорить с вами о ней».

Он рассказал мне, что его всегда занимали всевозможные модные увлечения людей, и он хотел бы понять, нельзя ли объяснить эти увлечения как некую разновидность поведенческого синхронизма людей. Это предположение показалось мне весьма спорным, однако я был заинтригован. Мы договорились о встрече, и я рассказал ему, как добраться до моего офиса: войти в центральное здание под куполом, пройти по «Бесконечному коридору», повернуть направо в том месте, где на стене висит портрет Норберта Винера, и перейти в корпус 2.

Когда он явился ко мне, он начал излагать свою идею еще до того, как уселся в кресло. Он вспомнил такие модные увлечения, как хулахуп и так называемые pet rocks (стилизованные «домашние животные», изготовленные из крупной морской гальки). Эти увлечения возникали словно ниоткуда и распространялись по миру со скоростью инфекций. Буквально в течение нескольких недель миллионы людей увлеченно вертели вокруг талии обруч и пытались создать из крупных кусков морской гальки какие-то подобия домашних животных. Эти модные увлечения проходили так же быстро, как и возникали. Каков механизм этого процесса? И почему некоторые идеи быстро овладевают массами, тогда как другие не вызывают у людей практически никакого отклика? Что это: вопрос везения и удачи? Может быть, это просто разновидность массовой истерии? Может быть, в этих внезапных появлениях тех или иных увлечений кроется какая-то внутренняя

логика? Если такая внутренняя логика действительно существует, то, как полагал мой гость, нам следовало бы уяснить ее, поскольку «социальные инфекции» такого рода можно было бы поставить на службу каким-то полезным вещам. Например, примерно миллион детей каждый год умирают от обезвоживания, причем это происходит даже в тех местах, где налажена регидратация (восполнение жидкости в организме) у детей. А что, если мы каким-то образом сможем создать среди матерей этих детей «моду» на регидратацию? Когда представители органов здравоохранения пытались побудить людей к использованию презервативов на Филиппинах или побудить африканских девочек учиться в школе, то, чтобы донести соответствующие меседжи до широких масс населения, они использовали популярные песни и комиксы, надеясь запустить своего рода «эпидемию» требуемых социальных перемен. Несмотря на то что таким способом удалось достичь каких-то реальных успехов, эти меры приносили, как правило, лишь временный эффект. Возможно, более глубокое понимание модных увлечений помогло бы нам обеспечить более продолжительный эффект.

Алан Альда всесторонне исследовал этот вопрос: прочитал все классические труды социологов, посвященные поведению толпы и психологии толпы, ознакомился с работами известных специалистов по маркетингу и рекламе; он даже ознакомился с работами биолога-эволюциониста Ричарда Доукинса, который выдвинул гипотезу о том, что «мемы» – это психологический эквивалент генов, заразные идеи, конкурирующие за выживание, причем победители в этой конкурентной борьбе распространяются в ходе некоего культурного варианта естественного отбора. Сколь бы интересными ни казались эти гипотезы, Алан чувствовал, что ни одна из них не докопалась до самых корней проблемы и что загадка модных увлечений так же далека от своего разрешения, как и прежде. Алан чувствовал, что не хватает подробной, поддающейся проверке теории, которая объясняла бы динамику модных увлечений. Поэтому, когда он прочитал статью о связанных осцилляторах и математической теории таких осцилляторов, у него возник вопрос: не является ли внезапное возникновение очередного модного увлечения неким аналогом того, как светлячки внезапно начинают мерцать в унисон?

Его предположение казалось правдоподобным, однако его было бы нелегко сформулировать математически. Существующая теория синхронизации сводилась главным образом к *ритмичному* синхронизму, когда все элементы являются осцилляторами, всегда повторяющими один и тот же цикл, предсказуемый, как цикл маятника. Поведение людей не укладывается в столь жесткие рамки. К тому же единственным поддающимся описанию вариантом представления таких систем были глобальные сети, соединения элементов которых построены по принципу «каждый с каждым». Вряд ли такие сети имели много общего с социальными сетями, по которым распространяются модные увлечения. Однако самым обескураживающим было то, что правила, которым подчиняются взаимодействия между людьми – аналог связи между осцилляторами, – не только неизвестны нам, но и, возможно, вообще непознаваемы. Я с большим сожалением был вынужден сообщить ему об этом, так как не знал, чем могу помочь ему.

После этого мы беседовали с Аланом еще три часа. Диапазон обсуждавшихся нами тем был внушительным: начиная с проблем эволюции и психологии и заканчивая теорией хаоса и квантовой механикой. Когда наш разговор подошел к концу, я предложил Алану пообедать вместе в кафетерии МТИ, что в «Мемориале Уолкера». Мы взяли кое-какие блюда, уселись за свободный столик и продолжили разговор о науке. Несколько студентов устремили свои взоры на наш столик и начали перешептываться о чем-то, а один из моих коллег подошел к нам, делая вид, будто хочет спросить у меня что-то. Через какое-то время стало невозможно игнорировать молодого человека, расхаживающего мимо нашего столика туда и обратно. В конце концов он отважился остановиться и подождал, пока мы не взглянули на него.

– Гм, извините за беспокойство.

– Слушаем вас.

– Извините еще раз. Я просто хотел спросить: вы – профессор Строгац?

– Да, это я.

– О, я просто хотел сказать, что читал вашу книгу о хаосе и она очень понравилась мне.

Когда он отошел, мы с Аланом взглянули друг на друга и рассмеялись.

Такое могло случиться только в МТИ...

Вопрос Алана о модных увлечениях, которым так часто бывают подвержены люди, показал, как мало мы знаем о гуманитарном аспекте синхронизма. В прошлом специалисты по теории связанных осцилляторов уклонялись от рассмотрения вопросов психологии и группового поведения. Тем не менее, от признаков существования синхронизма в человеческом обществе отмахнуться невозможно: стадный менталитет биржевых маклеров и порождаемые им взлеты и падения фондовой биржи; brutальная тупость больших скоплений людей; политические и экономические просчеты, вызванные так называемым «групповым мышлением»; и даже такие безвредные курьезы, как возникновение неловкого момента на какой-нибудь вечеринке с коктейлем, когда все одновременно замолкают на какое-то время. Все перечисленное является примерами синхронизма на уровне группы. Психологические измерения синхронизма также проявляются на индивидуальном уровне. Что можно сказать, например, по поводу музыки, которая так волнует нас, или по поводу проявлений синхронизма в живой природе, грациозных движений птичьих стай или косяков рыбы? А что можно сказать по поводу доставляющих нам огромное удовольствие коллективных танцев? Почему нас приводит в восхищение синхронизм и, в более широком аспекте, совпадения как таковые?

Когда Алан высказывал мне свои соображения по поводу модных увлечений, математический аппарат, описывающий групповое поведение людей, был развит еще очень слабо. Если не считать ряд новаторских исследований, выполненных в 1950-е годы Анатолием Рапопортом^[267], а также более поздних работ таких математиков-социологов и экономистов, как Томас Шеллинг – первооткрыватель так называемого «переломного момента», или «поворотного пункта»^[268], – развитие этой области науки затруднялось отсутствием эмпирических исследований и соответствующего математического инструментария, а также тем обстоятельством, что компьютерное моделирование в ту пору пребывало лишь на эмбриональной стадии своего развития. Однако в последние несколько лет эта область науки переживает свое второе рождение. Социологи используют методы теории сетей для анализа простых моделей мятежей, модных увлечений и распространения инноваций. Физики недавно исследовали, как во время концертов

восточноевропейские зрители переходят от разрозненных и хаотических аплодисментов к громким, синхронизированным хлопкам в ладоши. Специалисты по теории сложности вырабатывают новые представления о потоке дорожного движения, объясняя, почему «пробки» на дорогах могут не рассасываться часами – даже в отсутствие автомобильных аварий или каких-либо других очевидных причин – или каким образом популяция водителей-эгоистов может самопроизвольно и непреднамеренно сформировать «кооперативную» картину потока, когда все транспортные средства движутся синхронно, подобно движению густой однородной массы.

Результаты, полученные в ходе таких исследований, как правило, кажутся парадоксальными и нелогичными. Возникают непредвиденные формы коллективного поведения, которые вовсе не вытекают из свойств отдельных индивидуумов, составляющих такой коллектив. Конечно, все эти модели являются крайне упрощенными, но дело вовсе не в этом. Несмотря на то что их идеализированное поведение оказывается для нас неожиданным, это позволяет нам сделать выводы относительно того, *что* следует ожидать в реальной ситуации.

Недавние исследования, касающиеся модных увлечений, строятся на классической модели, разработанной в 1970-е годы социологом Марком Грановеттером^[269]. Он проиллюстрировал свои результаты историей о гипотетической толпе из 100 человек, которые, возможно, пребывают на стадии зарождения мятежа. Грановеттер предположил, что решение каждого из этих людей о том, участвовать ли ему в мятеже, зависит от действий всех остальных членов этой толпы. Зачинщики начнут мятеж, даже если остальные не присоединятся к ним. Другим людям, чтобы присоединиться к мятежу, нужно увидеть некое критическое количество других, уже присоединившихся к мятежу. Считается, что это критическое количество – порог принятия решения о собственном участии – распределено по популяции согласно некоторому распределению вероятности.

Самый известный пример Грановеттера относится к случаю толпы с равномерным распределением порогов, находящихся в диапазоне от 0 до 99. Другими словами, у одного из участников этой толпы порог равняется 0, у другого – 1, и т. д. Легко предсказать, как будут развиваться события в такой толпе. Человек с нулевым порогом готов

присоединиться к мятежу, даже если пока еще никто, кроме него самого, не изъявил такого желания. Этот человек является зачинщиком мятежа. Затем к участникам мятежа присоединяется человек с порогом 1, поскольку он уже видит одного участника мятежа (зачинщика). Теперь, когда в мятеже уже готовы участвовать два человека, к ним присоединяется человек с порогом 2. Одним словом, начинает действовать хорошо известный «эффект домино»: мятеж рекрутирует все новых и новых людей до тех пор, пока его участниками не станут все 100 человек. Все это вполне очевидно, за исключением одного нюанса. Допустим, говорит Грановеттер, что в исходный состав толпы вносится небольшое изменение. Допустим, что вместо человека с порогом 1 там появляется человек с порогом 2. Теперь, после появления зачинщика не оказывается ни одного желающего присоединиться к нему, поскольку порог всех остальных членов толпы больше единицы. Иными словами, мятеж подавляется на корню.

Самым удивительным здесь является то, что две описанные гипотетические ситуации почти неразличимы между собой – по крайней мере, если пользоваться обычными социологическими показателями. В среднем картина толпы почти не изменилась; распределения порогов в том и другом случае также почти идентичны. Тем не менее, исходы в том и другом случае диаметрально противоположны: в первом случае в мятеже участвуют все, а во втором все ограничивается одним маньяком-зачинщиком. Сторонний наблюдатель мог бы описать первую толпу как сборище головорезов, а вторую – как мирную демонстрацию, в которую затесалась одна-единственная «паршивая овца», зачинщик, хотя на самом деле обе эти толпы являются практически точными копиями друг друга. Вывод из этого примера заключается в том, что коллективная динамика толпы может оказаться чрезвычайно чувствительной к ее составу, что может быть одной из причин столь непредсказуемого поведения больших толп.

Среди многих упрощений, заложенных в модели Грановеттера, самым серьезным, возможно, является предположение о том, что все члены толпы очень хорошо знают друг друга. Такая аппроксимация является социологическим аналогом системы связей по принципу «каждый с каждым», с которой мы уже сталкивались в простейших моделях осцилляторов, где каждый светлячок мог видеть всех

остальных светлячков. Дункан Уоттс (который в настоящее время уже является профессором социологии в Колумбийском университете) недавно разработал математический аппарат для более реалистичного случая, когда каждый оказывается в сфере влияния определенного подмножества друзей и близких знакомых^[270]. Его модель мотивирована ситуациями, когда доминирующей формой взаимодействия является молва (так называемое «сарафанное радио») или общение посредством определенной социальной сети (в отличие от «всеобщего оповещения» или «глобальной видимости»). В таких децентрализованных сетях спонтанные вспышки координированного поведения могут казаться особенно загадочными и необъяснимыми. Эту загадку Уоттс формулирует следующим образом.

Почему некоторые книги, фильмы и музыкальные альбомы возникают словно ниоткуда, при использовании весьма незначительных маркетинговых бюджетов, быстро приобретая огромную популярность, тогда как в других случаях примерно такие же по своему качеству книги, фильмы и музыкальные альбомы не выделяются на фоне общего шума, даже если на их «раскрутку» затрачиваются немалые средства? Почему на фондовой бирже время от времени наблюдаются значительные скачки то в ту, то в другую сторону, которые невозможно объяснить появлением более или менее значимой информации, способной вызвать эти скачки? Каким образом зарождаются крупные низовые социальные движения в отсутствие организующей силы или публичных коммуникаций?

Все эти общественные явления связаны со стадным поведением, когда каждый человек руководствуется в своих собственных действиях решениями других людей. Рассмотрим это на более абстрактном уровне. Представьте себе сеть, состоящую из узлов любого рода – компаний, людей, стран или других субъектов принятия решений, причем каждый узел такой сети должен сделать один и тот же бинарный выбор: принять какую-то новую технологию или нет, поднять мятеж или нет, подписать Киотский протокол или нет. Как и в модели Грановеттера, решение о приеме новой технологии, поднятии мятежа или подписании Киотского протокола определяется тем, какое

количество других узлов уже приняли соответствующее решение, — правда, на этот раз каждый узел обращает внимание лишь на решения определенной совокупности своих «соседей», то есть узлов, решения которых влияют на его собственное решение. (Например, решение некой компании о покупке аппарата факсимильной связи в 1985 г., когда такие устройства были большой редкостью, в значительной мере зависело от того, приобрели ли такие устройства бизнес-партнеры этой компании, поскольку полезность такого устройства в значительной мере зависела от количества партнеров, с которыми данная компания могла обмениваться информацией.) Порог каждого узла определяется как та часть соседей, которая должна выполнить соответствующее действие, прежде чем это действие выполнит данный узел. Чтобы обеспечить известное разнообразие в популяции, Дункан предположил, что некоторые узлы в большей степени склонны к риску, чем другие; кроме того, он предположил, что некоторые узлы располагают более обширной системой связей. С математической точки зрения это означает, что как пороги, так и количества соседей распределены по всей популяции. Наконец, исходя из количества соседей, которые оказывают влияние на решения, принимаемые тем или иным узлом, каждый узел устанавливает соответствующие связи с членами популяции, выбирая их произвольным образом (хотя такой вариант представляется не очень-то реалистичным, даже при таком допущении анализ оказывается весьма непростым).

Процесс начинается, когда один из узлов выбирается (произвольным образом) в качестве инициатора, совершающего первый шаг — запуск процесса. Это можно представлять себе как падение первой костяшки домино. Затем, один за другим, в произвольном порядке, каждый узел смотрит на своих соседей и определяет, какая часть их уже «упала». Если к этому моменту порог данного конкретного узла уже превзойден, он «опрокидывается». В противном случае он продолжает стоять. После того как обход всех узлов завершится, процесс проверок и «падений» начинается вновь. Какие-то из костяшек домино упадут уже в первом раунде (те соседи инициатора, пороги которых оказались достаточно низкими, чтобы упасть после того, как упадет инициатор). Они, в свою очередь, могут инициировать вторичные волны падений. Но если инициатор обладает слабой системой связей или если его соседи представляют собой

консервативную совокупность с высокими порогами, то процесс может затухнуть, едва начавшись.

В этой идеализированной вселенной Дункану удалось определить, при каких именно условиях единственная костяшка домино запустит сильный лавинообразный процесс. Ему также удалось вычислить вероятность и масштаб таких каскадов, а также факторы риска, которые делают сеть в большей или меньшей степени предрасположенной к возникновению таких каскадов. Эти выводы с неизбежностью носят статистический характер; ничего нельзя сказать заранее о конкретных результатах каждого сеанса моделирования на компьютере: подробности исхода меняются от одного сеанса моделирования к другому. Эти подробности зависят от местоположения инициатора, от распределения порогов по популяции, от того, какой системой связей располагает каждый из узлов. Тем не менее проявляется ряд интересных тенденций, которые невозможно было бы предвидеть, опираясь лишь на доводы здравого смысла.

Основной результат заключается в том, что такая модель отображает два разных фазовых перехода, широко известных как переломный момент, или поворотный пункт. Если сеть располагает очень разреженной системой связей, она превращается, по сути, в совокупность небольших островков, и каскады не могут распространяться за пределы любого из этих островков. На более высоком, критическом уровне системы связей сети – первый переломный момент – островки внезапно связываются между собой в гигантскую сеть, в результате чего становятся возможными глобальные каскады. Теперь узел-инициатор может запустить «эпидемию» изменений, которая в конечном счете заражает большую часть популяции. По мере дальнейшего наращивания системы связей сети масштаб каскадов поначалу становится еще большим, а их возникновение становится еще более вероятным (впрочем, это нетрудно было предвидеть), но затем – и это уже оказывается неожиданным – масштаб каскадов становится еще большим, но возникают они *реже* и внезапно вообще прекращаются, когда сеть превышает некий критический порог системы связей сети. Этот второй переломный момент возникает вследствие эффекта разжижения: когда у какого-либо узла появляется слишком много соседей, каждый из них оказывает слишком малое влияние, чтобы самостоятельно запустить

процесс падений. (Вспомните, что каждый узел сравнивает свой порог с *частью* своих соседей, которые уже упали, а не со всеми ними. Чем больше соседей у узла, тем меньшее влияние оказывает каждый из них – в «частичном» смысле.)

Непосредственно перед наступлением этого второго переломного момента исход оказывается чрезвычайно непредсказуемым – во многом так же, как это бывает с реальными модными увлечениями. На сеть могут воздействовать тысячи перспективных инициаторов, каждый из которых провоцирует в лучшем случае обманчивую «рябь», которая быстро затухает. С этой точки зрения сеть представляется весьма стабильной и устойчивой к внешним воздействиям. Затем появляется инициатор – на первый взгляд неотличимый от тех, кто вступал в действие до него – тем не менее именно этому инициатору удастся запустить массивный каскад. Иными словами, вблизи этого второго переломного момента модные увлечения возникают редко, но если уж они возникают, то принимают гигантские масштабы.

Вот что происходит в этом случае (на интуитивном уровне). Внутри сети скрывается некое подмножество узлов, которое Дункан называет уязвимым кластером. Определяющим здесь является геометрическая структура этого кластера – способ, посредством которого он «просачивается» через остальную сеть. Выражаясь языком маркетинга, уязвимый кластер состоит из так называемых ранних последователей («энтузиастов», «первопроходцев»): это не инициаторы, а узлы, готовые к тому, чтобы опрокинуться, как только опрокинется хотя бы кто-нибудь из их соседей^[271]. Вблизи второго переломного момента уязвимый кластер очень узок и почти незаметен – он занимает очень малый процент сети в целом, – поэтому шансы активизировать его с помощью случайного инициатора весьма невелики. Но после того как он оказывается активизирован, «пожар» с него постепенно перебрасывается на соседей, которые, в свою очередь, распространяют этот пожар на своих собственных соседей; этот процесс неумолимо продолжается до тех пор, пока весь этот гигантский компонент (обширная, взаимосвязанная сетчатая структура узлов, которая занимает доминирующее положение в системе) не оказывается объят пламенем. Самым удивительным здесь оказывается то, что почти все узлы в этом гигантском компоненте не являются ранними последователями: они представляют собой более консервативную

совокупность с более высокими порогами (в литературе по маркетингу их называют «ранним и поздним большинством»). Однако поскольку сеть оказывается столь плотно связанной вблизи второго переломного момента, искра, которой удалось активизировать уязвимый кластер, способна создать достаточный импульс для активизации практически всех остальных узлов.

Очевидно, что модель Дункана является весьма упрощенной: она оставляет за скобками все богатство реальной структуры общества, приписывает всем отношениям дружбы между людьми одинаковый вес и исходит из того, что все инициаторы одинаково «заразительны» – но даже в этом случае она успешно моделирует особенности реальных модных увлечений, которые кажутся нам наиболее загадочными: их непредсказуемость, сравнительную редкость их появления и капризность их поведения. В частности, ползучее распространение какого-нибудь немыслимого каскада вблизи второго переломного момента очень напоминает малобюджетный хит, который неспешно начинает завоевывать популярность в массах, раскручиваясь за счет молвы.

Эта модель позволяет также делать поддающиеся проверке прогнозы, которые касаются не отдельно взятых модных увлечений (которые, как гласит теория, непредсказуемы по своей природе), а статистики многих из них, рассматриваемых в совокупности. Эти статистические выводы позволяют понять, какие вмешательства вероятнее всего способны вызвать каскады. Например, анализ показывает, что неоднородность популяции может иметь разнонаправленные последствия. Расширение диапазона порогов дестабилизирует систему, делая ее более восприимчивой к модным увлечениям (главным образом из-за наличия большего числа ранних последователей, обеспечивающих «разжигание»), тогда как расширение диапазона связности сети (увеличение количества соседей в расчете на один узел) способствует стабилизации системы. К тому же каскады обычно начинаются в разных местах вблизи двух переломных моментов этой модели. Вблизи первого переломного момента, когда сеть все еще остается разреженной и слабо связанной, каскады легче всего инициируются в хабах – узлах с наибольшим количеством связей. Вблизи второго переломного момента те немногие каскады, которые действительно возникают, обычно инициируются в

среднестатистических узлах, ничем особенным не выдающихся, просто потому, что таких узлов появилось очень много.

В отличие от модных увлечений, существует по меньшей мере одна форма группового поведения людей, с которой подавляющее большинство из нас сталкивается почти каждый день: дорожные пробки, образующиеся в часы пик. Согласно большинству прогнозов, ситуация с дорожным движением будет только ухудшаться^[272]. К 2020 г. среднестатистический житель Лос-Анджелеса будет тратить в два раза больше времени на дорогу к месту работы и обратно домой, чем в 1990-е годы, а средняя скорость дорожного движения к тому времени будет составлять 24 мили в час. Изучаются разные предложения по разгрузке автомагистралей, например введение платы за проезд, совершенствование систем массовых перевозок и использование отдельных магистралей для легковых автомобилей и грузового транспорта. Между тем физики и специалисты по теории сложности применяют новые подходы к исследованию динамики образования заторов на дорогах. Их новые модели исходят из того, что дорожный трафик представляет собой более сложное и непредсказуемое явление, чем принято считать, главным образом по причине нелинейных взаимодействий между водителями.

Несмотря на то что обычно мы не рассуждаем о дорожном движении в этих терминах, оно представляет собой общественное явление в том смысле, что поведение одного водителя оказывает влияние на соседних с ним водителей. Если кто-то из них внезапно вырывается перед вами, вам приходится побыстрее жать на тормоза, причем ваша реакция может вызвать целую волну нажатий на тормоза позади вас, что в худшем случае может привести к катастрофическому наезжанию автомобилей друг на друга. Даже в менее драматических ситуациях у каждого водителя есть возможность покуражиться над своими соседями по дороге, слишком опасно сближаясь с другими транспортными средствами, агрессивно маневрируя или беспричинно сигналивая. В этом смысле напряженный дорожный трафик порождает конфликт, который встречается во всех социальных дилеммах: конфликт между личным интересом и общественным благом. У каждого из нас есть те или иные основания для того, чтобы вести себя эгоистически: водители-альтруисты далеко не всегда добираются в

пункт назначения быстрее остальных. С другой стороны, безудержный эгоизм делает вождение автомобиля малоприятным для всех нас, как бывает, например, в случае, когда какой-нибудь шут гороховый пытается неспешно преодолеть перекресток с напряженным движением и внезапно застревает посреди этого перекрестка, полностью блокируя движение на нем.

Поэтому столь неожиданными оказались недавние результаты моделирования дорожного трафика, которые предсказали, что повсеместное распространение такого водительского эгоизма может, при определенных обстоятельствах, приводить к идеальной гармонии всех участников дорожного движения^[273]. Это самоорганизующееся состояние было открыто в 1998 г. Дирком Хелбингом, лидером в новой области, которая называется физикой трафика, и Бернардо Хуберманом, специалистом по теории сложности, который обычно тратит свое время на размышления об интернете. Эти двое ученых моделировали динамику реалистичного комплекса из сотен виртуальных легковых автомобилей и грузовиков, движущихся по двухполосной автомагистрали. Каждый из автомобилей подчинялся определенным (и вполне разумным) правилам: разгоняться лишь до оптимальной безопасной скорости, замедлять скорость, чтобы избежать опасного сближения и столкновения с движущимся впереди транспортным средством, переходить с одной полосы на другую, чтобы обогнать автомобиль, движущийся впереди (если позволяет окружающая обстановка), и т. п. Виртуальные водители даже наделялись некоторыми «сумасбродными» человеческими качествами (например, перейдя с одной полосы на другую, водитель ни с того ни с сего может сбросить скорость).

Хелбинг и Хуберман вычислили долговременные картины дорожного трафика при самых разных условиях. Когда на дороге находилось лишь несколько легковых автомобилей, все они без проблем обгоняли медленно движущиеся грузовики, даже не прибавляя скорость, в то время как сами эти грузовики тащились на безопасной для себя максимальной скорости порядка 55 миль в час. При более высоких, но все еще весьма умеренных плотностях трафика находились и такие водители легковых автомобилей, которым не повезло: им приходилось достаточно долгое время плестись позади грузовиков,

поскольку окружающая обстановка не позволяла им совершить обгон или перейти на другую полосу.

При достижении некой критической плотности трафика – приблизительно 35 транспортных средств на каждой полосе в расчете на каждую милю трассы – все легковые автомобили и грузовики самопроизвольно синхронизировались, продвигаясь по автомагистрали, подобно монолитному телу. Примечательно, что, повинувшись исключительно чувству конкуренции и не располагая каким-либо координирующим органом или центральным руководством, большая группа водителей-эгоистов вошла в состояние сотрудничества, которое оказалось оптимальным для всех них. (Адам Смит аплодирует стоя.) Это состояние оказалось оптимальным в том смысле, что плотность потока оказалась настолько высокой, насколько было возможно в подобной ситуации: количество легковых автомобилей и грузовиков, проходящих данный отрезок автомагистрали за час, было максимизировано. К тому же это был самый безопасный способ езды, поскольку у водителей не было возможностей менять полосы движения или обгонять друг друга (между тем именно такие маневры приводят в большинстве случаев к дорожным происшествиям). Хелбинг и Хуберман сверили результаты работы своей модели с данными, характеризующими движение на одной из голландских двухполосных автомагистралей, и обнаружили свидетельства того, что состояние, предсказанное их моделью, было реализовано на практике. При достижении критической плотности потока скорости автомобилей достигли самой высокой стабильности (которая измерялась флуктуациями скоростей автомобилей), а переходы с одной полосы на другую и обгоны – минимизировались. К сожалению – и это также было предсказано моделью Хелбинга и Хубермана, – такое идеальное состояние оказалось очень неустойчивым. Когда плотность потока оказывалась чуть больше критической, возникало дезорганизованное «жидкое» состояние, которое вновь создавало возможности для обгона, что, в свою очередь, приводило к неустойчивому, дерганому движению по принципу «двигайся-останавливайся».

Хелбинг и Хуберман предложили использовать на въездах на автомагистраль светофоры, управляемые компьютером, чтобы можно было все время поддерживать состояние, при котором движение по автомагистрали всего множества транспортных средств подобно

монолитному телу. Этими светофорами должны управлять мгновенные данные, собираемые с проводных электронных датчиков, которые пересекаются транспортными средствами в процессе их движения по автомагистрали. Если эти датчики обнаруживают какой-то зазор после прохождения некоторым блоком машин границы въезда на автомагистраль, светофор должен сменить свой цвет на зеленый, чтобы позволить большему числу автомобилей въехать на автомагистраль и заполнить таким образом зазор с целью поддержания потока в состоянии синхронизма; когда же возникает угроза распада монолитного блока, в результате чего движение будет осуществляться по принципу «двигайся-останавливайся», светофор снова должен сменить свой цвет на красный. Такая стратегия отличалась бы от той, которая в настоящее время применяется, например, на автомагистрали Long Island Expressway, где сигналы светофора на въезде на эту автомагистраль меняются по заранее установленному расписанию. Этот новый подход, к сожалению, не решит проблему образования пробок в часы пик, но при средних плотностях трафика он мог бы помочь более безопасному и бесперебойному движению на автомагистрали.

Другая форма синхронизированного трафика^[274] была открыта двумя годами ранее Борисом Кернером и Хубертом Реборном, физиками компании DaimlerChrysler в Штутгарте, где они анализировали данные, собранные с датчиков, встроенных в автобаны Германии. Для диапазона плотностей, простирающихся от беспрепятственного движения до практически неподвижных пробок, они обнаружили странное, очень перегруженное состояние, в котором все автомобили резко снижали скорость своего движения до одного и того же значения и оставались на своих полосах, продвигаясь вперед, подобно некой однородной и монолитной массе. Однако в отличие от синхронизированного состояния, обнаруженного Хелбингом и Хуберманом, это состояние не разделялось медленно движущимися грузовиками. Оно возникало само по себе и охватывало лишь легковые автомобили. Создавалось впечатление, что самопроизвольное замедление возникало вблизи въездов на автомагистрали, когда необычайно много легковых автомобилей втискивалось на уже переполненную дорогу в утренний час пик. Этот внезапный приток

машин каким-то образом конденсировал соседний трафик примерно так же, как пылинки помогают водяному пару сконденсироваться в каплю.

Однако по-настоящему особенным в этом состоянии было то, что оно поддерживалось на протяжении двух часов, то есть по прошествии значительного времени с момента нормализации притока машин на автомагистраль. Другими словами, эта картина способна поддерживаться самостоятельно. Она даже посылает волны заторов в обратную сторону по автомагистрали. Тем из водителей, кто въехал на дорогу позже и столкнулся с этими волнами «двигайся-останавливайся», они кажутся загадочными. Задержки движения возникают периодически без каких-либо видимых причин.

Последующее компьютерное моделирование показало, что такая картина не поддерживается перегруженностью самой по себе^[275]. После того как скачок трафика на въезде на автомагистраль рассосется, последующее движение могло бы осуществляться так же беспрепятственно – даже при той же совокупности водителей и при той же плотности трафика. Такая, более приятная, альтернатива является столь же стабильной и самоподдерживающейся. Но водители не могут коллективно достичь ее. Они оказываются вовлеченными в один стабильный режим и не могут перейти в более благоприятный. В этом отношении синхронизированный трафик подобен спиральным и свиткообразным волнам в VZ-реакции или разрушительным вращающимся волнам, которые являются причиной сердечной аритмии. После того как эти волны сформируются, их очень трудно погасить. Чтобы добиться немедленного облегчения, к трафику нужно применить дефибрилляцию.

К сожалению, подобной технологии пока не существует. В действительности в тот день, когда на этом конкретном германском автобане были собраны такие данные, произошло следующее: эта пульсирующая перегруженность трассы продолжалась вплоть до 9:30 утра. К этому времени движение на въезде на автомагистраль разределось настолько, что самоподдержание этой картины стало невозможным. Синхронизированное состояние самопроизвольно рассосалось, и движение снова стало беспрепятственным.

Несмотря на то что синхронизация трафика происходит непреднамеренно, большинство форм массового синхронизма у людей

являются преднамеренными. Нам очень нравится петь и танцевать вместе, дружно топтать ногами, «пускать волну» на трибунах во время футбольного матча. Однако когда все пытаются действовать дружно, групповое поведение, возникающее при этом, может заключать в себе ряд неожиданностей. Рассмотрим, например, зрителей, хлопающих в унисон^[276]. На первый взгляд, это явление не нуждается в дополнительных пояснениях, и именно поэтому мы неоднократно использовали его в качестве метафоры для других видов синхронизма. Но когда ученые наконец взяли на себя труд измерить его, результат этих измерений привел их в изумление.

В 1999 г. несколько физиков из восточноевропейских стран посетили концертные залы в Румынии и Венгрии и записали аплодисменты нескольких зрительских аудиторий по окончании оперных и театральных представлений. Выполненные ими записи показали, что поначалу зрители бурно аплодировали, затем спонтанно переходили к громоподобным ритмическим хлопкам в более медленном темпе, затем аплодисменты вновь переходили в какофонию; таким образом зрительская аудитория шесть или семь раз совершала переходы от хаоса к синхронизму и обратно. Чтобы исследовать этот процесс более подробно, Золтан Неда и его аспирант Эржебет Раваш предлагали отдельным учащимся старших классов школы остаться в одиночестве в какой-нибудь комнате и хлопать в ладоши двумя разными способами. Сначала каждому из учащихся предлагалось хлопать в ладоши так, словно они только что прослушали выдающееся выступление. Этот стиль аплодисментов оказался быстрым и нерегулярным: в среднем по четыре хлопка в секунду, но с широкими вариациями как у отдельных участников эксперимента, так и по популяции участников эксперимента в целом. Затем экспериментаторы попросили учащихся представить, будто они хлопают в ладоши синхронно с некой воображаемой зрительской аудиторией. Теперь хлопки замедлились до размеренных двух хлопков в секунду, то есть стали в два раза медленнее, чем в предыдущем случае, – так, словно человек пропускал каждый второй хлопок, – в то же время становясь гораздо более точными, как если бы возникало устойчивое совместное понимание того, каким должен быть правильный темп.

Поведение зрительской аудитории в целом теперь можно было объяснить именно с этой точки зрения. Вследствие наличия у людей

определенных культурных ожиданий все члены зрительской аудитории знают, что они хотят хлопать в унисон. Но каждому из членов зрительской аудитории присущ свой собственный, характерный именно для него темп совершения хлопков. Чтобы добиться синхронизма, каждый из членов зрительской аудитории замедляет свой собственный темп совершения хлопков примерно в два раза, в результате чего дисперсия частот совершения хлопков уменьшается (как показали эксперименты с учащимися старших классов). Теперь, как в случае моделей связанных осцилляторов Уинфри и Курамото, когда дисперсия частот совершения хлопков сокращается в достаточной степени, система совершает резкий фазовый переход, после чего спонтанно возникает синхронизм. Хитрость – и это не приходило в голову ни одному из теоретиков – здесь заключается в том, что за синхронизм приходится платить определенную психологическую цену. Несмотря на то что коллективные аплодисменты действительно звучат очень громко, хлопки совершаются в два раза реже, чем в случае более быстрых, бурных и несинхронных аплодисментов, неизбежным следствием чего является то, что совокупное «количество шума», просуммированное по времени, оказывается меньшим, чем в случае разобщенного, хаотического хлопанья в ладоши. Каким-то образом зрительская аудитория это чувствует, кумулятивный уровень шума оказывается не в состоянии передать их возбуждение, поэтому они производят больше шума единственным доступным им способом – ускоряя свои хлопки. Однако при этом расширяется распределение их частот (поскольку более быстрые хлопки, как показывают измерения, становятся более хаотическими). Поэтому фазовый переход происходит в обратном направлении, а зрительская аудитория в целом снова скатывается в хаос. В каком-то смысле зрительская аудитория недовольна компромиссом между оптимальной синхронизацией и оптимальной интенсивностью шума: она не может одновременно оптимизировать и то, и другое.

Авторы исследования иронически замечают, что эти колебания между хаосом и синхронизмом никогда не наблюдались во время коммунистического правления, при котором им приходилось жить в годы их молодости. Люди, слушавшие выступления «великого вождя», покорно хлопали в апатичном синхронизме, не испытывая никакого

желания ускорить аплодисменты и перейти в хаотическое выражение своих чувств.

Даже в столь автоматической форме группового поведения, как хлопанье в ладоши, можно обнаружить присутствие человеческой психологии. Однако – по крайней мере до настоящего времени – все модели пренебрегали капризами человеческого волеизъявления. Они намеренно исходили из того, что все люди ведут себя подобно роботам, и пытались понять, *что* можно объяснить хотя бы на этой основе. В модели модных увлечений, предложенной Дунканом Уоттсом, человек поддается модному увлечению, как только будет превзойден порог, присущий этому человеку. В моделях дорожного движения водитель ускоряется или замедляется по мере изменения окружающей обстановки, как если бы он представлял собой одушевленную версию круиз-контроля (то есть устройства, поддерживающего оптимальную скорость движения автомобиля). В моделях искусственных сообществ люди, склонные к систематическому уничтожению своих соплеменников, стараются не высовываться, пока за ними присматривают миротворцы ООН, но как только миротворческие войска покидают страну, в ней разворачивается вакханалия убийств^[277].

Это происходит потому, что указанные модели упрощены до такой степени, что их достоверность вызывает большие сомнения. Во многих формах группового поведения люди не склонны полагаться на собственный разум. «Умопомешательство у каждого из людей в отдельности встречается довольно редко, – утверждал Ницше, – но в группах, партиях, странах и эпохах оно является скорее правилом, чем исключением». Возможно, это является частью того, что кажется нам столь ужасающим, когда мы видим колонны марширующих нацистов. В руках тоталитарных режимов синхронизм становится символом всего, что недостойно человека. «Тот, кто бодро марширует под звуки военного марша, уже заслуживает моего презрения, – говорил Эйнштейн. – Господь наделил его головным мозгом по ошибке, поскольку такой индивид вполне мог бы обойтись спинным мозгом».

Ирония судьбы заключается, однако, в том, что синхронизм также является неотъемлемой частью наиболее прекрасных форм самовыражения человека в балете, в музыке и даже во взаимной любви двух людей, чьи сердца стучат в унисон. Разница в том, что эти формы

синхронизма являются более гибкими и мягкими, в отличие от упоминавшихся выше – бездумных, косных и брутально монотонных. Они воплощают в себе качества, которые, как принято считать, присущи только человеку: ум, способность к тонким переживаниям и чувство духовной близости с другими людьми, которое возникает лишь как высшая форма сочувствия и сопереживания.

Наряду с синхронизацией друг с другом мы подчас испытываем ощущение синхронизма с окружающим миром. Самым ярким примером в этом отношении является наша вовлеченность во вращение Земли вокруг собственной оси, в суточный цикл света и темноты. Но помимо циркадных ритмов существует не так уж много хорошо задокументированных случаев человеческого синхронизма с окружающей средой.

Например, фазам луны уже давно приписывают всевозможные зловещие эффекты. Согласно поверьям, в периоды полнолуния совершается больше опасных преступлений (а также больше самоубийств, обращений за психиатрической помощью, передозировок лекарств и покусаний собаками)^[278]. Существуют даже научные статьи, авторы которых приводят статистические данные, призванные подтвердить наличие таких «лунных эффектов». Но если со статистическими данными обращаться аккуратно, то корреляция с фазами луны бесследно исчезает. Приведу лишь один пример недобросовестных исследований в этой области. Некоторые авторы заявляют, что в периоды полнолуния происходит больше автокатастроф. Правда, они забывают отслеживать недельные или сезонные колебания числа автокатастроф. Автокатастрофы чаще всего происходят вечером в пятницу или в субботу, в новогоднюю ночь и в другие праздничные дни, а также летом (в силу множества вполне очевидных причин). Поэтому если полнолуние совпадет с одним из указанных периодов, неминуемо произойдет соответствующее искажение статистических данных. Статистики, которые вносили поправку на подобные календарные эффекты, пришли к выводу, что полнолуние не оказывает существенного влияния на частоту автокатастроф. В целом, идет ли речь об уровне рождаемости или частоте убийств, квартирных кражах или природных катаклизмах, заслуживающие доверия исследования показывают, что полнолуние не

оказывает существенного влияния на людские дела. Тем не менее, многие из тех, кто обладает повышенной чувствительностью – в том числе полицейские чины и персонал служб экстренной медицинской помощи, – продолжают верить в обратное.

Этот «лунный миф» служит примером наивной стороны нашего желания обнаружить порядок во Вселенной и, особенно, связать ритмы собственной жизни с ритмами других обитателей космоса. Тот же побудительный мотив заставляет людей верить в астрологию и «биоритмы»^[279] – несколько подзабытую псевдонауку, пользовавшуюся большой популярностью в 1970-е годы. (В то время можно было купить наручные часы Casio, снабженные стильным калькулятором биоритмов, чтобы у вас была возможность заранее вычислить так называемые «неблагоприятные дни».) Соответствующая теория гласила, что в организме человека в предсказуемые моменты времени (с периодичностью, составляющей в точности 23, 28 и 33 дня) наблюдаются подъемы и спады физических способностей, эмоционального состояния и интеллектуальных сил, причем это относится к каждому из нас, независимо от нашего возраста, пола, состояния здоровья или генетической изменчивости. Десятки строго научных независимых исследований, выполнявшихся в 1970-е годы разными ведомствами (в том числе по заказу военных и авиакомпаний), не обнаружили каких-либо свидетельств существования биоритмов. Не удалось также обнаружить подтверждений идеи «синхронизма»^[280], принадлежащей Карлу Юнгу (он заявлял, что значимые совпадения в жизни человека случаются чаще, чем это можно было бы объяснить чистой случайностью^[281]). Тем не менее, как хотелось бы верить в подобные чудеса! Взять хотя бы пример из моей собственной жизни. Я не раз спрашивал себя, *что* заставило меня в тот дождливый день в Англии заглянуть в книжный магазин Хеффера, где на одной из полок мне бросился в глаза интересный заголовок: *The Geometry of Biological Time*. Лично для меня он был интересен тем, что буквально за год до того я написал дипломную работу, подзаголовок которой поразительно походил на название этой книги: «Эссе по геометрической биологии». Если бы не эта случайная встреча с книгой Арта Уинфри и если бы не случайное совпадение слов в названии этой книги и моей дипломной работы, то, вполне возможно, я никогда не познакомился бы с Артом

Уинфри, никогда не заинтересовался бы синхронизмом и никогда не написал бы книгу, которую вы держите сейчас в руках.

Проблема с подобной аргументацией заключается в том, что любого человека – в том числе и профессионального математика – легко сбить с толку, когда требуется оценить вероятность какого-либо редко случающегося события. Даже правильная постановка вопроса может вызвать затруднения. В статье о совпадениях статистики Перси Диаконис и Фредерик Мостеллер обсуждают удивительный, на первый взгляд, случай, когда некая женщина дважды выигрывала лотерею штата Нью-Джерси. Передовая статья в *The New York Times* описала это совпадение как практически невероятное, оценив вероятность повторного выигрыша как 1 к 17 триллионам. Однако я бы назвал это правильным ответом на неправильно поставленный вопрос. Такая вероятность предполагает, что женщина купила по одному билету на два розыгрыша лотереи – и оба эти билета оказались выигрышными. На самом же деле она часто играла в лотерею, покупая каждый раз по несколько билетов. Правильный вопрос должен был бы звучать так: при условии, что каждый день, год за годом, миллионы людей покупают лотерейные билеты, какова вероятность того, что кому-либо из них удастся дважды в жизни стать победителем лотереи? Если вопрос сформулировать именно таким образом, то событие, которое казалось практически невероятным, теперь представляется вполне правдоподобным: шансы на то, что в течение семи лет кто-то где-то в Соединенных Штатах дважды станет победителем лотереи, оказываются выше, чем 50 на 50. По правде говоря, женщине из Нью-Джерси повезло еще больше: ей удалось сорвать куш дважды в течение четырех месяцев. Даже в этом случае шансы на то, что где-то с кем-то может случиться нечто подобное, оказываются выше, чем 1 к 30 – маловероятно, однако вполне возможно!

В лучшем случае достижению определенного синхронизма человека с окружающей средой (помимо вовлеченности в циркадные ритмы) может способствовать влияние тех или иных внешних сигналов на электрические ритмы в нашем мозге. Например, Норберт Винер описал ужасный эксперимент^[282], проведенный в Германии в 1950-е годы, когда некие неназванные ученые пытались синхронизировать мозговые волны человека, подвергая его воздействию мощного электромагнитного излучения. Как повествует об этом Винер, к потолку

был подвешен тонкий лист жести, подсоединенный к одному терминалу генератора, вырабатывающего напряжение 400 вольт с частотой 10 Герц, что соответствует частоте альфа-ритма головного мозга. Винер пишет, что такая установка «способна создавать электростатическую индукцию буквально всего, что находится в помещении» и что «она способна оказывать физическое воздействие на мозг, вызывая у человека весьма неприятные ощущения».

Эти ощущения могут быть похожи на то, что испытали на себе сотни японских детей, смотревших вечером 16 декабря 1997 г. очередную серию «Покемонов» (карманных монстров)^[283]. Этот гиперкинетический мультфильм, пользовавшийся огромной популярностью у детей, содержал сцену, в которой один из персонажей уничтожал компьютерный вирус, приводя в действие «вакцинную бомбу». Зрители подвергались воздействию чрезвычайно яркой вспышки и мощного звука, имитирующего звук взрыва, сопровождавшихся ярко-красными, белыми и синими вспышками, действовавшими подобно стробу, 12 вспышек в секунду на протяжении пяти секунд. Дети по всей стране сразу же начали испытывать болезненные ощущения. У некоторых из них началась рвота. У некоторых начались припадки. У кого-то на короткое время остановилось дыхание. Встревоженные родители начали звонить в службы экстренной медицинской помощи, более 600 детей были доставлены в больницы каретами скорой помощи. Столь сильное воздействие мультфильма усугублялось спецификой японского жилья, площадь которого во многих случаях невелика, в то время как японцы предпочитают устанавливать у себя дома крупноформатные телевизоры. (Просмотр телевизионных программ в типичной японской квартире напоминает просмотр фильма в кинотеатре, когда вы сидите в первом ряду.) Один четырнадцатилетний мальчик, сидевший в менее чем трех футах от крупноформатного телевизора, потерял сознание и очнулся лишь через полчаса. В числе пострадавших оказалось еще большее количество людей, когда тем же вечером, несколько позже, японские новостные программы, поступив совершенно безответственно, повторили самые «впечатляющие» отрывки из мультфильма.

Сильное оптическое воздействие, вызываемое пульсирующими, калейдоскопическими вспышками света, стало очевидной причиной

припадков так называемой фоточувствительной эпилепсии – редкого заболевания, которое стало встречаться все чаще и чаще с распространением телевизионных игр и видеоигр. Точная причина фоточувствительной эпилепсии по-прежнему остается неизвестной, но полагают, что ею может быть нарушение синхронизации, возникающее вследствие того, что мозговые волны «увлекаются» вспышками света, что заставляет нейроны мозга срабатывать в несвойственном для них ритме и вызывать эпилептический припадок. Эта гипотеза согласуется с результатами клинических наблюдений, которые свидетельствуют о том, что самыми опасными являются частоты в диапазоне от 15 до 20 Герц, то есть лишь незначительно превышающие частоту альфа-ритма головного мозга. Таким образом, здесь мы имеем дело со случаем, когда быстрый периодический сигнал, поступающий из окружающей среды, оказывал сильное воздействие на биологию человека.

Более быстротечный вид синхронизма, по-видимому, фигурирует в одной из величайших нерешенных проблем человеческой психологии, а именно: каким образом мозг рождает сознание. Несмотря на то что ученым до сих пор не удалось уяснить нейронную основу человеческих мыслей и чувств, недавно стало возможным приоткрыть завесу над тем, как мозг распознает лицо человека, запоминает слово или сосредоточивается на чем-либо. Нейробиологи выяснили, что такие акты распознавания связаны с кратковременным всплеском нейронного синхронизма^[284], в ходе которого миллионы далеко отстоящих друг от друга клеток мозга внезапно начинают включаться и выключаться в идеальном синхронизме с частотой примерно 40 раз в секунду, после чего так же быстро рассинхронизируются, позволяя возникнуть очередной мысли или очередному чувству. Если такое представление соответствует действительности, то сверкнувшая в нашем мозгу догадка является не чем иным, как всплеском электрического синхронизма – моментом, когда отдельные участки мозга начинают действовать во взаимной гармонии.

Первые шаги в этом направлении исследований были сделаны в начале 1980-х годов, когда Кристоф фон дер Мальсбург из университета Южной Каролины высказал предположение о том, что нейронный синхронизм может послужить механизмом для решения «проблемы связывания»^[285] – давней загадки в науке о мозге. Чтобы

проиллюстрировать эту проблему, представьте, что вы сидите в переполненном душном кафе, потягивая кофе и слушая рок-музыку. Тем временем возле вашего столика теснятся люди, громко разговаривают и приветствуют друг друга. Без каких-либо заметных усилий вы внезапно осознаете, что держите в руке чашку кофе. Но как именно вам удалось осознать это? На первый взгляд, ничего сложного в этом нет. Между тем осознание того, что вы держите в руке чашку кофе, ассоциируется с множеством ощущений. Когда ваш взгляд падает на чашку кофе, свет отражается от ее поверхности и попадает на сетчатку вашего глаза, выявляя округлую форму чашки, ее гладкую текстуру и белый цвет. Каждая из этих визуальных характеристик передается затем на разные участки вашего мозга для последующей обработки и интерпретации. В то же время молекулы испаряющегося кофе попадают на рецепторы в вашем носу и инициируют ритмические всплески нейронной активности в ваших обонятельных центрах (плюс дополнительный всплеск удовольствия в вашей лимбической системе, связанный с роскошным ароматом свежемолотых зерен кофе). Между тем у вас возникают другие, менее желательные ощущения: запах сигаретного дыма, суeta людей, толкающих время от времени ваш столик. Эти ощущения возбуждают свои собственные совокупности нейронов. Итак, возникает следующий вопрос: каким образом вашему мозгу удастся разобраться во всей этой нейронной суматохе? В частности, какой физический процесс «склеивает» требуемые характеристики вместе, формируя у вас целостное восприятие чашки, отличающее ее от звуков рок-музыки, сотрясений столика, за которым вы сидите, и всех прочих посторонних ощущений, которые возникают одновременно, но не имеют никакого отношения к образу чашки?

Кристоф фон дер Мальсбург выдвинул гипотезу о том, что разные совокупности нейронов (нейронные кластеры), обрабатывающие разные характеристики чашки, должны на какую-то долю секунды колебаться строго синхронно. Именно за счет этого временного синхронизма мозгу удастся связать их вместе и определить, что все они относятся к одному и тому же объекту. Но фон дер Мальсбург отчаялся проверить правильность своей гипотезы экспериментальным путем. Он предполагал, что даже если нейронные кластеры действительно колеблются во взаимном синхронизме, их заглушит непрерывный «дребезг», создаваемый другой электрической активностью мозга. «У

экспериментатора нет возможности выделить полезный сигнал на фоне этого шума, – сказал он однажды. – Мысль останется невидимой»^[286].

Пессимизм фон дер Мальсбурга не оправдался. К 1989 г. проблески синхронизма начали проявляться в экспериментах на животных. Группа нейробиологов, возглавляемая Чарльзом Греем и Вольфом Сингером, продемонстрировала кошке, находящейся под наркозом, изображение движущегося прямоугольника и обнаружила, что нейроны, реагирующие на прямоугольник, начали вырабатывать ритмические разряды с частотой от 30 до 60 циклов в секунду^[287]. Эта «стрельба» была непродолжительной, примерно треть секунды, но очень синхронизированной, в ходе которой нейроны выдавали серию соответствующих электрических пиков и впадин.

Самым удивительным, возможно, является то, что даже клеткам, которые разделены огромными с анатомической точки зрения расстояниями, что соответствует примерно половине площади, занимаемой зрительной зоной коры головного мозга, удавалось осциллировать практически синхронно. Чтобы выяснить, означает ли эта скоординированная осцилляция, что кошка воспринимала этот прямоугольник как единое целое, Грей и Сингер удалили середину прямоугольника и двигали оба оставшихся фрагмента, придавая им вид двух независимых объектов. Те же самые клетки мозга продолжали вырабатывать разряды, но на этот раз несинхронно, как и предсказывал фон дер Мальсбург.

В то время результаты, полученные Греем и Сингером, вызвали острую дискуссию. Звучали обычные утверждения, которые, как всегда в подобных случаях, отрицали доводы, свидетельствующие в пользу важной роли синхронизма, сколь бы убедительными эти доводы ни были. Самые закоренелые скептики отрицали существование явления, обнаруженного Греем и Сингером. Одни заявляли об ошибочности статистического анализа, выполненного учеными, или утверждали, что кратковременная корреляция между нейронами, находящимися на значительном удалении друг от друга, могла возникнуть чисто случайно. Другие рассуждали об отсутствии какого-либо известного механизма, который позволял бы нейронам, находящимся на значительном удалении друг от друга, синхронизироваться настолько точно, как об этом заявляли Грей и Сингер. (Было трудно понять, каким образом многочисленные клетки могут приводиться в действие

практически одномоментно, с разницей во времени, не превышающей тысячной доли секунды^[288].) Однако в течение нескольких последующих лет были опровергнуты эти и многие другие возражения, за исключением одного, которое заключалось в том, что синхронизм действительно мог иметь место, однако не играл никакой роли и представлял собой бесполезный побочный продукт электрической активности в мозге кошки, свидетельствующий о глубинных процессах в мозге не больше, чем электромагнитное излучение частотой 50 Гц, вызванное прохождением электрического тока питания настольного компьютера.

В 1990-е годы появились более убедительные доказательства связи между синхронизмом и распознаванием. В ходе экспериментов с разными животными, начиная с цикад и заканчивая обезьянами, исследователи обнаружили, что синхронизированная нейронная активность неизменно оказывается связанной с примитивными формами распознавания, запоминания и восприятия (например, умение различать два запаха или обнаруживать изменение в ориентации некоторой формы). Но поскольку мы не можем точно знать, что именно воспринимает животное, убедить скептиков так и не удалось. Они желали видеть неоспоримые доказательства того, что синхронизм действительно необходим для распознавания, а не просто связан с ним. Например, в эксперименте Грея и Сингера скептики не нашли неоспоримых доказательств того, что кошка воспринимает прямоугольник как единое целое в одном случае и как два прямоугольника в другом случае, хотя человек воспринимал бы эти два случая именно так. Единственным способом получить однозначный ответ на этот вопрос было бы проведение экспериментов с людьми.

Одно из таких исследований, о результатах которого в 2001 г. было доложено Юргеном Феллом и его коллегами из Боннского университета в Германии, выявило интересную связь между нейронным синхронизмом и кратковременной памятью^[289]. Исследователи попросили добровольцев запомнить списки слов, затем на короткое время отвлекли их выполнением другой задачи, после чего проверили, как испытуемые запомнили предложенные им списки слов. Между тем на фазе запоминания информации исследователи оценивали картины активизации нейронов в гиппокампе испытуемых, а также в участке их коры головного мозга, ответственном за обоняние (известно, что эти

два соседних участка коры головного мозга задействованы в запоминании информации). (Этот эксперимент был весьма примечателен в техническом отношении: в ходе этого эксперимента нейронная активность измерялась непосредственно, а не опосредованно, путем анализа мозговых волн. Испытуемые были эпилептиками, в мозг которых ранее уже вживлялись электроды, что было одним из этапов подготовки к предстоящим нейрохирургическим процедурам. Это предоставляло исследователям уникальную возможность осуществлять запись непосредственно из клеток головного мозга человека в процесс запоминания им информации.)

Вполне естественно, что каждый из испытуемых какую-то часть слов запоминал, а какую-то забывал. Однако самое интересное заключалось в том, что в этих двух случаях их нейроны вели себя по-разному в момент, когда человек впервые видел слова. Спустя четверть секунды после того как испытуемые видели слова, которые им удалось хорошо запомнить, в их мозге возникал синхронизм между гиппокампом и участком коры головного мозга, ответственным за обоняние, однако такой синхронизм не возникал, когда они впервые видели слова, которые впоследствии быстро забывали. Если выразить ту же самую мысль несколько по-иному, это означает, что, наблюдая картину электрической активности в мозге человека, когда он пытается запомнить какое-либо слово, исследователь может предсказать, насколько успешным окажется процесс запоминания в данном случае. Исследователь может увидеть, смог ли мозг в нужный момент мобилизоваться в достаточной степени.

Неясно, что означает такой всплеск синхронизма. Он может означать не что иное, как отголосок запоминания, формируемого другими, более важными, но еще не открытыми процессами – точно так же, как гром представляет собой последствие молнии, а не ее причину. С другой стороны, не исключено, что синхронизм играет важнейшую роль в самом процессе запоминания, как это могло бы быть, если бы соответствующие химические и электрические события, связанные с ним, каким-то образом готовили гиппокамп к запоминанию новой порции информации или облегчали поиск и извлечение этой информации. Такое предположение выглядит вполне правдоподобно с биологической точки зрения: известно, что связи между нейронами укрепляются, когда нейроны активизируются одновременно (зачастую

этот принцип формулируется так: «нейроны, которые вместе активизируются, лучше связаны между собой»). Упрочняя связи между нейронами в критических областях мозга, синхронизм, возможно, облегчает процесс краткосрочного запоминания. Еще одна возможность — которая всегда появляется, когда возникает синхронизм — заключается в том, что, активизируясь в унисон, соответствующие нейроны возвышают свой голос на фоне общего «электрического шума» в мозге точно так же, как люди, начинающие петь в унисон, привлекают всеобщее внимание во время шумной вечеринки. Координируя свою электрическую активность, синхронные нейроны усиливали бы свое «послание», делая его более заметным для других нейронов.

Еще более интересный эксперимент недавно пролил свет на загадку восприятия: каким образом формируется картина мира в нашем сознании, без каких-либо видимых усилий объединяя разнообразные ощущения в единое целое. Есть люди, страдающие определенными расстройствами нервной системы, которым такое объединение не удается. Это приводит к необычным патологиям, подобным той, которая была описана Оливером Саксом в его книге *The Man Who Mistook His Wife for a Hat* («Человек, который принял свою жену за шляпу»^[290]). Этот человек мог распознать ее глаза, нос, рот и остальные части ее лица, но не мог сложить все эти элементы в единую картину, то есть воспринять ее лицо как единое целое. Узнать в лицо какого-либо человека было для него почти неразрешимой проблемой. Чтобы узнать кого-либо, ему приходилось прикладывать невероятные усилия, тогда как большинству из нас это удается легко и практически мгновенно; по крайней мере это не требует от нас сознательных усилий. Вопрос формулируется так: что происходит в нашем мозгу, когда мы распознаем чье-либо лицо именно как лицо, а не как совокупность не связанных между собой фрагментов?

В ходе одного из исследований, выполненных в 1999 г., группа нейробиологов, возглавляемая Франциско Варелой, предложила добровольцам взглянуть на так называемые «лица Муни», смутные черно-белые изображения, похожие на лица, если рассматривать их прямо, но превращающиеся в бессмысленные кляксы, если рассматривать их вверх ногами^[291].

Экспериментаторы выводили одно из таких изображений на экран компьютера и просили испытуемого нажать как можно быстрее одну из двух кнопок в зависимости от того, воспринимал ли испытуемый это изображение как лицо. Тем временем мозговые волны испытуемого отслеживались посредством массива из 30 электродов, прикрепленных к разным участкам его головы.

Примерно через четверть секунды после изучения изображения мозговые волны испытуемого демонстрировали шквал «гамма-осцилляций», вызываемых миллионами нейронов, ритмично активизирующихся с частотой около 40 циклов в секунду на разных участках коры головного мозга, связанных с обработкой визуальных образов. Эти коллективные осцилляции происходили в обоих случаях – и когда изображение на экране выглядело как лицо, и когда оно выглядело как клякса. Было очевидно, что эти коллективные осцилляции возникают в момент восприятия, момент бессознательного *Aha!*, когда мозг уясняет, что именно он видит. Но несмотря на то что частоты осцилляции были примерно одинаковыми в обоих случаях, степень синхронизма существенно различалась. Лишь когда испытуемый видел изображение лица, электрические разряды синхронизировались на участках мозга, далеко отстоящих друг от друга.



Разница здесь такая же, как между какофонией и хоровым пением. Воспринимая кляксу, все нейроны, расположенные в разных визуальных центрах, осциллировали с одной и той же частотой, составляющей 40 циклов в секунду, однако все они осциллировали вразнобой, в результате чего создавался бессмысленный шум, свидетельствующий о неспособности мозга уяснить форму, воспринимаемую нейронами. С другой стороны, воспринимая изображение лица на экране, нейроны не только осциллировали с одной и той же частотой, но делали это строго синхронно, а это свидетельствовало о том, что разнородные характеристики складывались в совокупное восприятие лица, представленного на экране.

Последующие события в мозге были не менее впечатляющими. Еще до того как у испытуемого появлялась возможность проявить осознанную реакцию и нажать соответствующую кнопку, всплеск синхронизма затухал. Электрическая согласованность между нейронами быстро пропадала подобно тому, как осознанно переходят на нестройный шаг солдаты, перед тем как вступить на мост. Франциско Варела и его коллеги утверждают, что эта активная рассинхронизация

может представлять собой способ, с помощью которого мозг стирает информацию, записанную на «грифельной доске» (мозге человека), чтобы предоставить возможность сформироваться следующему нейронному хору, который будет играть роль основы для появления очередной мысли или действия. В данном эксперименте очередное действие заключалось в выработке двигательной реакции – нажатии определенной кнопки на компьютерной клавиатуре. И, как и следовало ожидать, в течение примерно трех четвертей секунды после того как изображение было показано на экране компьютера (что очень близко к времени реагирования типичного человека), в мозге отмечался второй всплеск синхронизма – на сей раз между участками, отвечающими за двигательную реакцию. Неудивительно, что этот второй раунд синхронизма наступал независимо от того, воспринял испытуемый лицо, показанное на экране, или нет, поскольку ту или иную кнопку необходимо было нажать в любом случае.

Эти исследования рисуют картину человеческого существования, способную привести нас в замешательство. Когда мы занимаемся своими повседневными делами, чувствуя себя ответственными за свою жизнь, мы ведем себя подобно роботам даже в большей степени, чем могло бы показаться на первый взгляд, переходя из одного нейронного состояния в другое, ощущая голод, узнавая лицо кого-то из своих друзей, вспоминая о необходимости купить пакет молока по пути домой, – причем все это зависит от того, какие именно совокупности нейронов синхронизируются в тот или иной момент времени. Кто-то из ученых утверждает, что сознание может представлять собой субъективное восприятие этих состояний синхронизма, возникающих в нашем мозге^[292]. Другие ученые идут в этом отношении еще дальше, заявляя, что синхронизм лежит в основе самого сознания. В одной из недавних статей, озаглавленной «Зомби внутри нас»^[293], нейробиолог Кристоф Кох из Калифорнийского технологического института и его сотрудник Френсис Крик (один из ученых, открывших двойную спираль ДНК; в настоящее время занимается исследованиями мозга в Салковском институте биологических исследований [Salk Institute for Biological Studies]) утверждают, что «сознание предполагает синхронизированную активизацию нейронов на миллисекундном уровне, тогда как некоррелированная активизация может влиять на поведение, не вырабатывая этого особого “жужжания” в голове».

В самых необычных своих проявлениях это особое жужжание способно вызывать неопишимо странные ощущения. Если вы сами не испытывали подобных ощущений, эти слова могут показаться вам смешными, но если все же испытывали, то наверняка понимаете, что именно я имею в виду. Поверьте, это потрясающие ощущения! Лично со мной это случается один-два раза в году, причем случается совершенно неожиданно. Например, я могу стоять в ванной перед зеркалом, чистить зубы и, взглянув на себя, внезапно подумать: «Кого я вижу?» или «Кто это?»

Сейчас я безуспешно пытаюсь подобрать слова, которыми мог бы выразить, насколько это странно – размышлять о своем собственном сознании, о своем собственном самосознании. В эти необычные моменты перед зеркалом я чувствую, как это странно – обладать сознанием. Я вижу перед собой некое нагромождение атомов, похожее на меня, но я-то знаю, что это лишь совокупность молекул воды, белков, липидов и всего остального в этом роде, скомпонованного определенным образом; однако эта конструкция осознает себя и смотрит на меня из зеркала. Какова роль химии во всем этом, во мне и в моем ощущении себя как личности? Иными словами, какова физическая основа сознания? Никто не может ответить на эти вопросы, но было бы верхом справедливости, если бы Кох и Крик оказались правы, поскольку, если сознание представляет собою побочный продукт какой-то разновидности нейронного синхронизма, то сами по себе размышления о синхронизме – чем я, собственно говоря, занимаюсь уже на протяжении трехсот с лишним страниц этой книги, – колоссальный по своей значимости акт синхронизма как такового.

Эпилог

Надеюсь, я дал вам почувствовать, насколько это увлекательно – заниматься наукой в наше время. Мне кажется, что сейчас все мы являемся свидетелями наступления новой эры. После столетий изучения природы на все более тонких уровнях, исследования все более мелких частиц материи, мы начинаем размышлять над тем, как из этих частиц составить цельную и стройную картину мира.

Прочитав эти слова, бывалые люди усмехнутся и скажут, что уже не раз слышали подобные фразы. Примерно каждые десять лет появляется очередная грандиозная теория, претендующая на то, чтобы явить нам цельную и стройную картину мира, и имеющая название, которое нередко начинается с латинской буквы «с» и призвано внушать людям благоговейный трепет. В 1960-е годы такой универсальной теорией была кибернетика (cybernetics). В 1970-е годы ее роль играла теория катастроф (catastrophe theory). В 1980-е годы появилась теория хаоса (chaos theory), а в 1990-е годы – теория сложности (complexity theory). В каждом из этих случаев скептики ворчали, что значимость всех этих теорий сильно преувеличена и что следующие из них выводы либо ошибочны, либо самоочевидны. После этого все дружно смеялись и расходились по своим лабораториям заниматься более приземленной, «реалистической» наукой, отгородившись глухими стенами от своих коллег, которые занимались смежными дисциплинами и сами копошились в своих собственных крошечных уголках вселенной.

Сейчас ситуация изменилась, и в воздухе носится принципиально новая идея. Даже самые закоренелые консерваторы среди ученых, представители «мейнстрима», начинают признавать, что, опираясь на редукционизм, то есть учение о сведении явлений высшего порядка к явлениям низшего порядка, уже невозможно разрешить такие великие загадки нашего времени, как раковые заболевания, механизм сознания, происхождение жизни, устойчивость экосистемы, СПИД, глобальное потепление, функционирование клетки, взлеты и падения экономики. Знаком времени является, например, то, что при каждом крупном исследовательском университете создаются институты с такими названиями, как функциональная геномика и интегративная биология, где биологи объединяются с учеными-компьютерщиками и

математиками, пытаясь разгадать тайну возникновения жизни на молекулярном уровне. Определение последовательности генома человека дало нам в руки огромный перечень частей: 30 тысяч отдельных генов и закодированных ими белков. Но нам по-прежнему остается лишь догадываться, каким образом взаимосвязанная деятельность этих генов и белков координируется в живой клетке.

Главной причиной чрезвычайной сложности всех этих нерешенных проблем является их децентрализованный и нелинейный характер: огромные количества компонентов меняют свои состояния от одного момента к другому, образуя между собой замкнутые, кольцевые структуры, причем способ формирования этих кольцевых структур таков, что не позволяет изучать составные их части по отдельности. В таких случаях целое, конечно же, не равняется сумме его составных частей. Эти явления, подобно большинству других явлений нашей Вселенной, носят фундаментально *нелинейный* характер.

Именно поэтому нелинейная динамика играет главную роль в будущем науки. Теория хаоса выявила, что даже простые нелинейные системы могут вести себя чрезвычайно сложно; она также показала нам, что уяснить механизмы таких систем с помощью картинок бывает проще, чем посредством математических уравнений. Теория сложности научила нас тому, что многие простые элементы, взаимодействующие между собой согласно простым правилам, могут создавать неожиданный порядок. Однако главный недостаток теории сложности заключался в том, что ей так и не удалось объяснить, *откуда* берется порядок (в глубоком математическом смысле), и не удалось убедительным образом связать теорию с реальными явлениями. Именно поэтому теория сложности оказала лишь незначительное влияние на мышление большинства математиков и ученых.

Именно в этом, как мне кажется, проявились уникальные способности синхронизма. Будучи одним из старейших и самых элементарных разделов науки о нелинейных процессах (поскольку имеет дело с чисто ритмическими элементами), синхронизм позволяет достичь глубокого понимания многих явлений, начиная с сердечной аритмии и заканчивая сверхпроводимостью, начиная с циклов сна и заканчивая устойчивостью единой энергосистемы. Синхронизм основывается на строгих математических представлениях; он прошел испытание экспериментом; он описывает и объединяет очень широкий

спектр «поведения сотрудничества» в живой и неживой природе и на любой шкале расстояний, начиная с субатомных и заканчивая космическими. Даже если оставить в стороне важную роль, которую играет синхронизм, а также внутренне присущие ему привлекательность и очарование, я считаю, что он станет решающим первым шагом на пути к более глубокому изучению сложных нелинейных систем, когда на смену осцилляторам придут гены и клетки, компании и люди.

С другой стороны, я не хотел бы, чтобы у моих читателей сложилось ложное представление. Синхронизм – это лишь малая часть научной мысли в целом. Его отнюдь нельзя рассматривать как единственно правильный подход к изучению сложных систем. Химик Илья Пригожин и его коллеги считают, что ключом к разгадке тайн самоорганизации является более глубокое понимание термодинамики. Они рассматривают возникновение порядка как результат победоносного сражения против энтропии, когда сложная система подпитывается энергией, поступающей из ее окружения. Физики, изучающие вопросы образования структур, рассматривают механику жидкостей как парадигму образования структур, когда течение турбулентной жидкости время от времени рождает когерентные структуры, подобные спиралям и перьям, вместо того чтобы вырождаться в примитивный однородный поток. Физик Германн Хакен и его коллеги рассматривают мир как некое подобие лазера, в котором элементы случайности и положительной обратной связи, сговариваясь между собой, вырабатывают организованные формы, которые то тут, то там возникают вокруг нас. Исследователей из института Санта-Фе приводит в восхищение повсеместность эволюции, совершающейся посредством естественного отбора не только в биологических популяциях, но и в иммунных системах, экономических системах и на фондовых биржах. Другие ученые рассматривают Вселенную как гигантский компьютер, выполняющий некую таинственную программу, открытие которой будет знаменовать собой конец науки как таковой.

Но на сегодняшний день все это лишь несбыточные мечты, «воздушные замки». Мы все еще пребываем в ожидании грандиозного научного прорыва, но никто не знает, когда именно этот прорыв состоится. Не исключено, что мы нуждаемся в концептуальном эквиваленте исчисления математического анализа, в способе, который

давал бы нам возможность видеть последствия мириад взаимодействий, которые определяют ту или иную сложную систему. Вполне возможно, что такое ультраисчисление, если бы кто-то подарил его нам, выходило бы далеко за пределы человеческого понимания. Я, во всяком случае, затрудняюсь сказать о нем что-либо определенное.

Между тем наука о синхронизме продолжает развиваться, шаг за шагом. Чарли Пескин положил начало изучению механизма полета насекомых, совершаемого за счет маховых движений крыльями. Сейчас он вместе со своим коллегой Дэвидом Маккуином занимается усовершенствованием своих компьютерных моделей потока крови в сердце. Использование этих моделей уже помогло врачам разработать более совершенные искусственные клапаны сердца.

Йосики Курамото вскоре выйдет на пенсию, но он все так же энергично продолжает свои исследования. Он упорно работает над совершенствованием математического аппарата, описывающего осцилляторы, связанные между собой опосредованно, а не глобально, как в его классической модели, но также не чисто локально.

Чак Чейзлер, как и всегда, внимательно следит за результатами последних исследований, касающихся сна и циркадных ритмов человека. Вместе со своими коллегами он недавно опроверг одно из прежних исследований, вызвавшее в свое время большой ажиотаж в научном мире. Это исследование имело своей целью показать, что яркий свет, направленный на тыльную сторону колена, может сбить задатчик циркадного ритма человека. За год или два до того НАСА попросило его исследовать циркадные ритмы астронавта Джона Гленна во время его ностальгического полета на космическом «челноке», чтобы получить информацию о том, как возраст человека влияет на цикл сна и бодрствования.

Брайан Джозефсон по-прежнему сторонится физического «истеблишмента» и регулярно обновляет свой сайт, пополняя его самыми свежими новостями о гомеопатии и паранормальных явлениях. Его бывший учитель Филип Андерсон, который уже вышел на пенсию, но по-прежнему ведет активный образ жизни, потратил более десяти лет, пытаясь разгадать тайну высокотемпературной сверхпроводимости.

Курт Визенфельд вместе со своими коллегами произвел сенсацию, повторив эксперимент Гюйгенса с маятниковыми часами, но с использованием современного оборудования. С помощью нелинейной

динамики он попытался объяснить, почему маятники в конце концов всегда колеблются в идеальной противофазе друг с другом.

Эда Лоренца чествовали на большой международной конференции по сложным системам, которая состоялась весной 2002 г., и, как обычно, в своей лекции он ничего не сказал о своей основополагающей работе 1963 г. «Эта маленькая модель» по-прежнему осталась в тени того, над чем он работает в настоящее время, на девятом десятке лет своей жизни.

Лу Пекора занимается изучением синхронизации в массивах хаотических систем. Недавно, скооперировавшись с одним из моих бывших учеников, Маурицио Барахоной, он решил показать, что сети тесного мира оказываются необычайно эффективными в деле синхронизации хаоса, превосходя практически все другие виды архитектур.

Дункан Уоттс выполняет e-mail-версию эксперимента тесного мира Милгрэма, а Ласло Барабаши занимается исследованием значимости безмасштабных сетей в биологии.

Печальная новость: Арт Уинфри умер 5 ноября 2002 г. в возрасте 60 лет, спустя семь месяцев после того, как у него был диагностирован рак мозга. Он оказывал мне помощь на ранних стадиях подготовки этой книги, даже когда он приходил в сознание лишь на несколько часов в сутки. Хотя Арт не дожил до выхода этой книги из печати, он знал, что она будет посвящена ему.

В силу многих причин я не знаю, чем стану заниматься в будущем. В моем распоряжении богатый выбор еще не решенных проблем. Вместе со своими студентами я, несомненно, займусь изучением какого-либо вида группового поведения в какой-либо сложной нелинейной системе, возможно, в связи с генными сетями, которые регулируют рост и деление клеток и которые разрушаются при заболевании раком. Время для этого, возможно, уже настало, учитывая быстрое расширение наших познаний в области биохимических сетей, появление новых технологий, позволяющих выяснить, какие гены активизируются в тот или иной момент времени, бурное развитие компьютерной техники и последние достижения теории сетей. Еще слишком рано говорить, окажется ли мой излюбленный инструментарий (идеализированные математические модели и их качественный анализ) чересчур грубым, чтобы пролить свет на этот

чрезвычайно сложный и важный комплекс вопросов. Однако практический опыт свидетельствует о том, что значительную помощь исследователю может оказать его последовательное стремление к простоте. Особенно это относится к тем случаям, когда речь идет о проблемах, применение к которым более реалистических подходов приводит к тому, что исследователь окончательно запутывается в огромном множестве данных. Возможно даже, что в таких случаях пользу принесут идеи, заимствованные из синхронизма, поскольку клетки ведут себя во многом подобно осцилляторам: их рост и деление происходят с достаточно регулярной цикличностью.

В любом случае я уверен, что на протяжении своей дальнейшей карьеры я буду время от времени возвращаться к синхронизму – в той или иной его форме. Синхронизм кажется мне прекрасным и таинственным явлением, он глубоко волнует меня. Мое отношение к синхронизму можно описать как религиозное. И я знаю, что такое отношение к синхронизму присуще не только одному мне. Когда я читаю старые путевые заметки, написанные людьми, совершавшими в XVI веке путешествия в Малайзию и Таиланд, – *первыми* представителями Западного мира, которые оставили нам свои описания восхитительного представления светлячков, мерцающих в унисон на обширных пространствах вдоль берегов рек, – я улавливаю в этих заметках такое же чувство восхищения. Все они описывают эти представления с таким неподдельным восторгом, что современные им ученые, посчитав эти описания чересчур эмоциональными, а потому не заслуживающими доверия, просто игнорировали их.

По причинам, которые мне хотелось бы понять, такие «спектакли синхронизма» не могут оставить нас равнодушными и затрагивают особые струны в глубине нашей души. Это удивительное и завораживающее зрелище способно внушать людям благоговейный трепет. В отличие от многих других явлений, наблюдение за этим зрелищем трогает людей на первобытном уровне, несмотря на сотни тысяч лет эволюции человека. Возможно, мы инстинктивно догадываемся, что если бы мы нашли источник и первопричину этого самопроизвольного порядка, то нам удалось бы открыть главную тайну мироздания.

Эту книгу хорошо дополняют:

[Удовольствие от х](#)

Стивен Строгац

[13,8. В поисках истинного возраста Вселенной и теории всего](#)

Джон Гриббин

[Квантовая вселенная](#)

Брайан Кокс, Джефф Форшоу

[Почему \$E=mc^2\$?](#)

Брайан Кокс, Джефф Форшоу

notes

Сноски

Philip Laurent, “The supposed synchronal flashing of fireflies,” *Science* 45 (1917), p. 44.

Одно из первых упоминаний встречается в бортовом журнале экспедиции сэра Френсиса Дрейка в 1577 г.: «Наш генерал побывал на небольшом островке к югу от Целебеса (Целебес, ныне Сулавеси, – остров в Индонезии. – *Прим. перев.*), покрытом непроходимыми зарослями. Каждую ночь вся земля среди этих зарослей и сами заросли бывают усеяны огромным множеством насекомых (размером не больше обычной мухи), светящихся во тьме. Они испускают столь сильный свет, что каждый куст или дерево становятся похожи на пылающую свечу» [R. Hatduyt, 1589. *A Selection of the Principal Voyages, Traffiques and Discoveries of the English Nation*. Edited by Laurence Irving (New York; Knopf, 1926), p. 151]. Синхронный аспект этого свечения был описан гораздо подробнее в 1680 г. голландским физиком Энгельбертом Кемпфером после его путешествия по реке Мейнам, от Бангкока к морю: «Эти светящиеся насекомые, рассевшись на деревьях, создают впечатление огненного облака. Самым удивительным, однако, является то, что, рассевшись на ветвях дерева, они все вдруг одновременно потухают, а спустя секунду-другую, так же дружно зажигаются. И такие дружные и ритмичные мерцания могут длиться часами, словно мы наблюдаем бесконечное чередование систолы и диастолы». [Engelbert Kaempfer, 1727. *The History of Japan (With a Description of the Kingdom of Siam)*. Translated by J. G. Scheuchzer. London: Hans Sloane. Два тома в одном. См. том 1, p. 45, или pp. 78–79 тома 1 повторного издания от 1906 г., выполненного издательством J. McLehose and Sons, Glasgow.]

Многие из них цитируются в статье John B. Buck, “Synchronous rhythmic flashing of fireflies,” *Quarterly Review of Biology* 13 (1938), pp. 301–314. Эта статья является лучшим из справочников по ранней литературе, в которой освещается этот вопрос.

George H. Hudson, “Concerted flashing of fireflies,” *Science* 48 (1918), pp. 573–575.

Hugh M. Smith, “Synchronous flashing of fireflies,” *Science* 82 (1935), pp. 151–152. В этой краткой, но заслуживающей доверия статье Смит также дает одно из самых подробных описаний данного явления: «Представьте себе дерево высотой от тридцати пяти до сорока футов, плотно покрытое маленькими овальными листьями, причем на каждом листе сидит по светлячку и все листья мерцают идеально в унисон с частотой примерно три раза за две секунды, а в промежутке между вспышками дерево пребывает в полной темноте. Представьте себе берег реки протяженностью около десятой доли мили, густо поросший мангровым лесом. На каждом листке каждого дерева в этом лесу строго синхронно зажигаются и гаснут светлячки. Насекомые на деревьях, растущих на дальнем конце этого леса, мерцают идеально в унисон со светлячками, усеявшими ближние к вам деревья. Если у вас богатое воображение, то вы можете составить некоторое представление об этом восхитительном и завораживающем зрелище».

Joy Adamson, *Living Free* (London: Collins and Harvill, 1961). Цитата со стр. 29.

Дополнительную информацию о биохимических процессах, обуславливающих ритм мерцания, можно почерпнуть в статье Barry A. Trimmer et al., “Nitric oxide and the control of firefly flashing,” *Science* 292 (2001), pp. 2486–2488.

John Buck and Elisabeth Buck, “Mechanism of rhythmic synchronous flashing of fireflies,” *Science* 159 (1968), pp. 1319–1327.

Frank E. Hanson, James F. Case, Elisabeth Buck, and John Buck, "Synchrony and flash entrainment in a New Guinea firefly," *Science* 174 (1971), pp. 161–164. Популярное изложение этой и других связанных с ней работ можно найти в статье John Buck and Elisabeth Buck, "Synchronous fireflies," *Scientific American* 234 (May 1976), pp. 74–85.

Идея перенастраиваемого осциллятора подробно обсуждается в статье John Buck, “Synchronous rhythmic flashing of fireflies. II,” *Quarterly Review of Biology* 63 (1988), pp. 265–289, которая появилась в том же журнале и под таким же названием ровно через 50 лет после того, как был опубликован его первый обзор литературы по данному вопросу. Этот второй обзор по-прежнему представляет собой исчерпывающую подборку всего, что известно науке о синхронизации светлячков.

С превосходным современным обзором научной и математической литературы по синхронизации можно ознакомиться в книге Arkady Pikovsky, Michael Rosenblum, and Jergen Kurths, *Synchronization: A Universal Concept in Nonlinear Science* (Cambridge, England: Cambridge University Press, 2002).

Одно из первых упоминаний о синхронных движениях сперматозоидов на их пути к яйцеклетке появляется в книге James Gray, *Ciliary Movement* (New York: Macmillan, 1928); см. так же рис. 78 на стр. 119. См. также G.I. Taylor, “Analysis of the swimming of microscopic organisms,” *Proceedings of the Royal Society of London, Series A* 209 (1951), pp. 447–461. Самой последней работой, в которой объясняется, как возникает синхронизм посредством механических сил, передаваемых через жидкость, является статья S. Gueron and K. Levit-Gurevich, “Computation of the internal forces in cilia: Application to ciliary motion, the effects of viscosity, and cilia interactions,” *Biophysical Journal* 74 (1998), pp. 1658–1676.

Charles S. Peskin, *Mathematical Aspects of Heart Physiology* (New York: Courant Institute of Mathematical Sciences Publication, 1975), pp. 268–278. В настоящее время кардиологи по-другому смотрят на то, как синхронизируются клетки-здатчики ритма. Правомерность модели Пескина доказывалась на основании предположения о том, что химическую связь между клетками-здатчиками ритма обеспечивают синапсы, тогда как в наши дни принято считать, что клетки-здатчики ритма связаны между собой электрически через нексусы (щелевые контакты), которые действуют подобно резисторам. Как таковые, клетки-здатчики ритма пребывают в постоянной электрической связи между собой и взаимодействуют в течение всего своего цикла активности, а не только в момент активизации, как предполагал Пескин. Описание более современной модели можно найти в статье D. C. Michaels, E. P. Matyas, and J. Jalife, “Mechanisms of sinoatrial pacemaker synchronization: A new hypothesis,” *Circulation Research* 61 (1987), pp. 704–714.

Arthur T. Winfree, *The Geometry of Biological Time* (New York: Springer-Verlag, 1980). Указанную цитату о работе Пескина можно найти на стр. 119. Недавно Уинфри внес в свой шедевр ряд исправлений и дополнений (второе издание этой книги было опубликовано в 2001 г.), используя формат, до которого мог додуматься только он. Цель применения этого формата заключалась в том, чтобы подчеркнуть все превратности научного прогресса. Вместо того чтобы воспользоваться хорошо известными преимуществами рассуждения «задним числом», то есть спустя 20 лет после выхода первого издания, и исправить ошибки, вкравшиеся в текст первого издания, а также убрать свои собственные ложные предположения и прогнозы, он оставил оригинальный текст неизменным и поместил новый материал в рамки, внутренняя область которых залита серым фоном, подробно комментируя те из своих старых идей, которые нуждаются в корректировке или в дополнительном разъяснении (и во многих случаях демонстрируя, насколько дальновидными оказались его выводы). Хотя временами такой формат затрудняет чтение книги, он подчеркивает, что наука представляет собой сложный, живой и развивающийся организм. (Этот эффект напомнил мне превосходную серию документальных фильмов Майкла Аптеда под общим названием “7 Up” («Спустя семь лет»). В этих фильмах у группы людей берут интервью через каждые 7 лет на протяжении всей их жизни, начиная с семилетнего возраста. Таким образом, зрителям предоставляется возможность наблюдать развитие человека на всех стадиях его жизни.)

Renato E. Mirollo and Steven H. Strogatz, “Synchronization of pulse-coupled biological oscillators,” *SIAM (Society for Industrial and Applied Mathematics) Journal on Applied Mathematics* 50 (1990), pp. 1645–1662.

Экспериментальные свидетельства разных стратегий перенастройки, используемых светлячками, изложены в статье Frank E. Hanson, “Comparative studies of firefly pacemakers,” *Federation Proceedings* 37 (1978), 2158–2164. Цель нашей математической модели никогда не заключалась в том, чтобы обеспечить большую реалистичность в этом отношении. Мы лишь хотели доказать правильность гипотезы Пескина и ссылались на светлячков как на самый наглядный пример этой абстракции, концепцию импульсно-связанных осцилляторов. Описание гораздо более достоверной с биологической точки зрения модели синхронизма светлячков можно найти в статье G. Bard Ermentrout, “An adaptive model for synchrony in the firefly *Pteroptyx malacca*,” *Journal of Mathematical Biology* 29 (1991), pp. 571–585.

Одной из ранних работ, посвященных этому вопросу, была статья L. F. Abbott and C. van Vreeswijk, “Asynchronous states in neural networks of pulse-coupled oscillators,” *Physical Review E* 48 (1993), pp. 1483–1490.

John J. Hopfield, “Neurons, dynamics, and computation,” *Physics Today* 47 (1994), pp. 40–46; A. V. M. Herz and J. J. Hopfield, “Earthquake cycles and neural reverberations: Collective oscillations in systems with pulse-coupled threshold elements,” *Physical Review Letters* 75 (1995), pp. 1222–1225.

Сведения о самоорганизующейся критичности можно найти в книгах Per Bak, *How Nature Works: The Science of Self-Organized Criticality* (New York; Copernicus Books, 1999) и Mark Buchanan, *Ubiquity: The Science of History... or Why the World Is Simpler Than We Think* (New York: Crown, 2001).

С обзором литературы, которая увязывает самоорганизующуюся критичность с синхронизацией, можно ознакомиться в статье С. J. Perez, A. Corral, A. Didz-Guilera, K. Christensen, and A. Arenas, “On self-organized criticality and synchronization in lattice models of coupled dynamical systems,” *International Journal of Modern Physics B* 10 (1996), pp. 1111–1151.

См., например: Ivors Peterson, "Step in time," *Science News* 140 (August 31, 1991), pp. 136–137; Ian Stewart, "All together now," *Nature* 350 (1991), p. 557; Walter Sullivan, "A mystery of nature: Mangroves full of fireflies blinking in unison," *New York Times* (August 13, 1991), p. C4.

Об истории открытия, совершенного Линн Фост, рассказывается в статье Carl Zimmer, “Fireflies in lockstep,” *Discover* 15 (June 1994), pp. 30–31, и в статье Susan Milius, “U.S. fireflies flashing in unison,” *Science News* 155 (March 13, 1999), pp. 168–170. Прекрасный материал в пересказе самих очевидцев опубликован в газете *The Tennessee Conservationist*: Lynn Faust, Andrew Moiseff, and Jonathan Copeland, “The night lights of Elkmont,” *The Tennessee Conservationist* (May/June 1998), pp. 12–15. Научный материал на эту тему можно найти в статье Andrew Moiseff and Jonathan Copeland, “Mechanisms of synchrony in the North American firefly *Photinus carolinus* (Coleoptera: Lampyridae),” *Journal of Insect Behaviors* (.1995), p. 395.

Dick Milne, "Govt. blows your tax \$\$ to study fireflies in Borneo: Not a bright idea!" *National Enquirer* (May 18, 1993), p. 23.

Sally Floyd and Van Jacobson, “The synchronization of periodic routing messages,” *IEEE-ACM Transactions on Networking* 2 (1994), pp. 122–136.

Анонимный автор, "Lighting the way. Tuberculosis sufferers are getting glowing help from the firefly," *Time* (May 17, 1993), p. 25. Эта статья базируется на исследовании W. R. Jacobs et al., "Rapid assessment of drug susceptibilities of mycobacterium-tuberculosis by means of luciferase reporter phages," *Science* 260 (1993), pp. 819–822.

Разные гипотезы относительно адаптивного значения синхронизма светлячков перечислены в статье John Buck, "Synchronous rhythmic flashing of fireflies. II," *Quarterly Review of Biology* 63 (1988), pp. 265–289.

M. D. Greenfield and I. Roizen, “Katydid synchronous chorusing is an evolutionarily stable outcome of female choice,” *Nature* 364 (1993), pp. 618–620. Мысль о том, что синхронизм является отражением конкуренции, была высказана здесь применительно к кузнечикам углокрылым. Но она может относиться также к светлячкам, манящим крабам и другим живым существам.

Американская цикада (лат. *Magicicada septendecim*, семейство *Cicadidae*, подотряд *Homoptera*), личинки которой появляются в больших количествах с периодичностью, составляющей семнадцать лет (на юге – с периодичностью, составляющей тринадцать лет). *Прим. перев.*

Susan Milius, “Cicada subtleties: What part of 10,000 cicadas screeching don’t you understand?” *Science News* 157 (June 24, 2000), pp. 408–410. Высказывалось множество любопытных предположений относительно того, почему репродуктивные циклы цикад зачастую составляют 13 или 17 лет, но никогда 12, 14, 15, 16 или 18 лет. Объяснение, возможно, каким-то образом связано с теорией чисел. И 13, и 17 являются простыми числами (делятся только сами на себя и на 1), тогда как другие – нет. Если жизненные циклы потенциальных врагов периодических цикад составляют от 2 до 5 лет – что, по-видимому, имеет место в действительности, – то такая нумерология помогает периодическим цикадам избегать попадания в синхронизм со своими врагами. См. главу под названием “Of bamboos, cicadas, and the economy of Adam Smith” в книге Stephen Jay Gould, *Ever Since Darwin: Reflections in Natural History* (Penguin Books, 1977). Альтернативную теорию, а также обзор последней литературы по «проблеме цикад» можно найти в статье Eric Goles, Oliver Schulz, and Mario Markus, “Prime number selection of cycles in a predator-prey model,” *Complexity* 6 (2001), pp. 33–38.

P. R. Y. Backwell, M. D. Jenmons, N. I. Passnsore, and J. H. Christy, "Synchronous waving in a fiddler crab," *Nature* 391 (1998), pp. 31–32. Популярный материал на эту тему был опубликован в газете *New York Times*: Malcolm W. Browne, "Flirting male crabs found to wave claws in unison," *New York Times* (January 6, 1998), p. C4.

Основополагающий материал по этой теме можно найти в статье Martha K. McClintock, “Menstrual synchrony and suppression,” *Nature* 229 (1971), pp. 244–245.

Анонимный автор, "Olfactory synchrony of menstrual cycles," *Science News* 112 (July 2, 1977), p. 5. Оригинальный материал был опубликован спустя три года; см. статью M. J. Russell, G. M. Switz, and K. Thompson, "Olfactory influences on the human menstrual cycle," *Pharmacology Biochemistry and Behavior* 13 (1980), pp. 737–738.

Kathleen Stern and Martha K. McClintock, "Regulation of ovulation by human pheromones," *Nature* 392 (1998), pp. 177–179. Работа Макклинток, касающаяся менструального синхронизма и феромонов человека, остается весьма спорной. В статье Martha K. McClintock, "Whither menstrual synchrony?" *Annual Review of Sexual Research* 9 (1998), pp. 77–95, Макклинток выступает с энергичной защитой своего мнения. См. также увлекательный и познавательный материал на эту тему в популярной книге Natalie Angier, *Woman: An Intimate Geography* (New York: Houghton Mifflin, 1999), pp. 170–175. Автор этой книги характеризует Макклинток как «женщину, которая носит яркие шарфы поверх кашемировых свитеров, необычные украшения, сизо-серые носки с изображениями черных рыб и излучает неизбывный энтузиазм».

Norbert Wiener, *Cybernetics*, 2nd edition (Cambridge, Massachusetts: MIT Press, 1961). (Русский перевод: Н. Винер. Управление и связь в животном и машине. Новые главы кибернетики. М.: Советское радио, 1963.)

Обзор научных достижений Винера и небольшую подборку забавных случаев из его жизни можно найти в книге Pest R. Masani, *Norbert Wiener 1894–1964* (Vita Mathematics, vol. 5), (New York Springer-Verlag, 1990).

В последней главе книги *Cybernetics* излагаются представления Норберта Винера об альфа-ритме мозговых волн и приводятся его рассуждения о самоорганизации в других системах связанных осцилляторов. (Он полагал, что это имеет какое-то отношение к вирусам, генам и раковым заболеваниям.) Более раннее изложение этих проблем, имеющее более технический характер, можно найти в книге Norbert Wiener, *Nonlinear Problems in Random Theory* (Cambridge, Massachusetts: MIT Press, 1958). (Русский перевод: Н. Винер. Нелинейные задачи в теории случайных процессов. М.: ИЛ, 1961.)

Спектр с двойным «проседанием» воспроизведен по диаграмме на стр. 69 книги Norbert Wiener, *Nonlinear Problems in Random Theory* (Cambridge, Massachusetts: MIT Press, 1958).

«Не отваживаясь высказываться...» *Cybernetics*, стр. 201

Самая ранняя его работа по групповому синхронизму, опубликованная в 1965 г., основывалась на эксперименте с массивом из 71 мигающей неоновой лампочки, которые электрически были соединены друг с другом. Уинфри называл такое приспособление «светлячковой машиной». Он писал, что его цель заключается в том, чтобы «просто посмотреть, как все это будет происходить»; см. главу 11, *The Geometry of Biological Time*. Вскоре он понял, что компьютерное моделирование обеспечивает гораздо большую гибкость, контроль и удобство интерпретации. Результаты этих исследований описаны в статье Arthur T. Winfree, “Biological rhythms and the behavior of populations of coupled oscillators,” *Journal of Theoretical Biology* 16 (1967), pp. 15–42, на которой базируется остальной материал этого раздела.

Для читателей, сведущих в математике или физике: возможно, вас интересует, что нового и необычного было в задаче, которую сформулировал для себя Уинфри; в частности, чем она отличается от всего того, что нам рассказывали в университетах о связанных осцилляторах. Нужно помнить, что задачи, излагаемые в учебниках, исходят из того, что осцилляторы *линейны* (то есть они являются простыми гармоническими осцилляторами) и связаны между собой *линейными* взаимодействиями (например, с помощью пружин, которые подчиняются закону Гука). В этом простом случае динамические характеристики определяются в явном виде по методу нормальных режимов. Однако Уинфри понимал, что такой подход был бы неприменим к данной биологической задаче, поскольку биологические осцилляторы не линейны. В отличие от своих линейных аналогов, которые могут совершать колебания с *любой* амплитудой, большинство биологических осцилляторов обязательно регулируют свою амплитуду; следовательно, лучше всего моделировать их как нелинейные самоподдерживающиеся осцилляторы с устойчивым предельным циклом. В середине 60-х годов наличная математическая теория таких объектов заканчивалась на системах из двух или трех связанных осцилляторов с предельным циклом. Никто не имел ни малейшего понятия об их *популяциях*, особенно если их частоты были распределены случайным образом по всей популяции. К тому же нужно понимать, что такие осцилляторы не следует путать с консервативными нелинейными осцилляторами (например, ангармоническими осцилляторами, используемыми в молекулярной динамике). Такие осцилляторы запасают энергию и могут иметь любую амплитуду – что, опять-таки, является недопустимым предположением, когда речь идет о моделировании биологических самоподдерживающихся осцилляторов.

На языке статистической физики, Уинфри выполнял аппроксимацию «среднего поля».

Введение в нелинейные дифференциальные уравнения можно найти в книге Steven H. Strogatz, *Nonlinear Dynamics and Chaos: With Applications to Physics, Biology, Chemistry, and Engineering* (Cambridge, Massachusetts. Perseus Boob, 1994).

Оригинальным материалом – предельно краткой заметкой – является статья Y. Kuramoto, “Self-entrainment of a population of coupled nonlinear oscillators,” опубликованная в материалах международного симпозиума *International Symposium on Mathematical Problems in Theoretical Physics*, под ред. H. Araki (Springer-Verlag: Lecture Notes in Physics, vol. 39, 1975), pp. 420–422. Более полезная интерпретация приведена в книге Y. Kuramoto, *Chemical Oscillations, Waves, and Turbulence* (Berlin: Springer-Verlag, 1984). Обзор этой модели и ее математический анализ, который будет полезен преподавателям, приведен в статье Steven H. Strogatz, “From Kuramoto to Crawford: Exploring the onset of synchronization in populations of coupled oscillators,” *Physica D* 143 (2000), pp. 1–20.

Введение в ее труды, посвященные связанным осцилляторам в применении к нейробиологии, можно найти в статье Nancy Kopell, “Toward a theory of modelling central pattern generators,” помещенной в сборнике *Neural Control of Rhythmic Movement in Mrtebrates*, под ред. А. Н. Cohen, S. Rossignol, and S. Griilner (New York: John Wiley, 1988), pp. 369–413.

Steven H. Strogatz and Renato E. Mirollo, “Stability of incoherence in a population of coupled oscillators,” *Journal of Statistical Physics* 63 (1991), pp. 613–635.

Steven H. Strogatz, Renato E. Mirollo, and Paul C. Matthews, “Coupled nonlinear oscillators below the synchronization threshold: Relaxation by generalized Landau damping,” *Physical Review Letters* 68 (1992), pp. 2730–2733.

Lev Landau, “On the vibrations of the electronic plasma,” *Journal of Physics USSR* 10 (1946), pp. 25–34. (То же на русском языке: Л. Ландау, О колебаниях электронной плазмы // ЖЭТФ 16, 574 (1946).) Элементарное введение в демпфирование Ландау можно найти в статье David Sagan, “On the physics of Landau damping,” *American Journal of Physics* 62 (1994), pp. 450–462.

Isaac Asimov, *Asimov's Biographical Encyclopedia of Science and Technology* (Garden City, New York: Doubleday, 1972), p. 723.

Джон Дэвид Кроуфорд – блестящий ученый, занимающийся прикладной математикой. Причиной его ранней смерти стало заболевание раком. Составить некоторое представление о его выдающихся работах по связанным осцилляторам и плазме можно, ознакомившись, например, с такими статьями: John David Crawford, “Amplitude expansions for instabilities in populations of globally-coupled oscillators,” *Journal of Statistical Physics* 74 (1994), pp. 1047–1084, и “Amplitude equations for electrostatic waves: Universal singular behavior in the limit of weak instability,” *Physics of Plasmas* 2 (1995), pp. 97–128.

Недавно было объявлено о первом экспериментальном тестировании модели Курамото в системе связанных химических осцилляторов; см. Istvan Z. Kiss, Yumei Zhai, and John L. Hudson, “Emerging coherence in a population of chemical oscillators,” *Science* 296 (2002), pp. 1676–1678. Хадсон и его коллеги подтвердили существование фазового перехода, предсказанного Уинфри и Курамото: синхронизация внезапно наступала, как только сила связи между осцилляторами становилась выше определенного порога. Они также обнаружили, что параметр порядка (показатель степени синхронизации осцилляторов) возрастает по мере увеличения силы связи между осцилляторами, причем Курамото точно предсказал математическую зависимость между параметром порядка и силой связи. Однако о столь же точном тестировании применительно к *биологическим* осцилляторам еще не сообщалось.

В русском переводе книга вышла в 1961 году. *Прим. ред.*

В русском переводе книга вышла в 1963 году. *Прим. ред.*

Cybernetics, pp. 190–191.

У всех млекопитающих главные циркадные часы локализованы в крошечной паре нейронных кластеров, расположенных непосредственно над перекрестом зрительных нервов – местом, где происходит перекрещивание зрительных нервов на их пути к мозгу. Эти кластеры-близнецы, известные как сверх-хиазматические ядра, в совокупности содержат тысячи специализированных нейронов, которые коллективно вырабатывают электрический сигнал, который то возрастает, то снижается на протяжении суточного цикла, «оркеструя» ткани и органы в теле животного и координируя их суточные функции. Дэвид Уэлш и Стив Репперт обнаружили, что индивидуальные клетки способны к самопроизвольной осцилляции; даже когда их удаляли из мозга крысы и изолировали друг от друга, они на протяжении нескольких недель продолжали инициировать электрические разряды. В какие-то периоды суток они замолкали; в другие периоды они демонстрировали чрезвычайную активность. Изъятые из организма клетки продолжали вести себя подобно маленьким ответственным будильникам, непреклонно подавая сигнал к пробуждению животному, которое уже не нуждалось в этом. К тому же, разные клетки характеризовались разными естественными периодами, диапазон которых простирался от 20 до 25 часов. Распределение периодов имело форму, близкую к колоколообразной, хотя какой именно вид должно иметь это распределение, до сих пор неизвестно. См. D. K. Welsh, D. E. Logothetis, M. Mesker, and S. M. Reppert, “Individual neurons dissociated from rat suprachiasmatic nucleus express independently phased circadian firing rhythms,” *Neuron* 14 (1995), pp. 697–706.

К тому же в 1997 г. Репперт и его коллеги показали, что хомяки-мутанты с быстрыми «часовыми» клетками (например, со средним периодом, составляющим 20 часов) имеют соответствующие быстрые ритмы активности: они запрыгивают в беличье колесо, установленное в их клетках, каждые 20 часов, а не раз в сутки, как обычно. Попросту говоря, если ваши «часовые» клетки работают быстро, то вы тоже будете быстро работать. Аналогичные эксперименты с мышами показали, что периоды «часовых» клеток животного распределены более широко, чем периоды их поведенческих ритмов. Иными словами,

неточные «часы» сговариваются между собой, чтобы обеспечить большую точность организма. Это наблюдение согласуется с представлением Винера о том, что в таком сочетании обеспечивается усреднение по широкому разбросу периодов отдельных составляющих этого сочетания, в результате чего достигается большая точность часов этого сочетания по сравнению с часами любой из его составляющих; см. Chen Liu, David R. Weaver, Steven H. Strogatz, and Steven M. Reppert, “Cellular construction of a circadian clock: Period determination in the suprachiasmatic nuclei,” *Cell* 91 (1997), pp. 855–860, а также соответствующий отчет Erik D. Herzog, Joseph S. Takahashi, and Gene D. Block, “Clock controls circadian period in isolated suprachiasmatic nucleus neurons,” *Nature Neuroscience* 1 (1998), pp. 708–713.

Хорошим справочным материалом общего характера о сне человека и циркадных ритмах может служить следующая литература: Martin C. Moore-Ede, Frank M. Sulzman, and Charles A. Fuller, *The Clocks That Time Us: Physiology of the Human Circadian Timing System* (Cambridge, Massachusetts: Harvard University Press, 1982); Richard M. Coieman, *Wide Awake at 3:00 AM.: By Choice or By Chance?* (New York: W.H. Freeman, 1986); Arthur T. Winfree, *The Timing of Biological Clocks* (New York Scientific American Press, 1987).

«Быть слепым не так уж страшно...» Цитируется по статье Lynne Lamberg, “Blind people often sleep poorly: Research shines light on therapy,” *Journal of the American Medical Association* 280 (October 7, 1998), p. 1123.

После 40 лет сплошных разочарований биологи, исследующие циркадные ритмы, наконец начинают догадываться, как вырабатываются циркадные ритмы на молекулярном уровне. Хороший, хоть и несколько устаревший, обзор этих научных достижений приведен в статье Steven M. Reppert, “A clockwork explosion!” *Neuron* 21 (1998), pp. 1–4. С более современным обзором можно ознакомиться в статье Steven M. Reppert and David R. Weaver, “Molecular analysis of mammalian circadian rhythms,” *Annual Review of Physiology* 63 (2001), pp. 647–676.

Kai-Florian Storch et al., “Extensive and divergent circadian gene expression in liver and heart,” *Nature* 417 (2002), pp. 78–83.

Shin Yamazaki et al., “Resetting central and peripheral circadian oscillators in transgenic rats,” *Science* 288 (2000), pp. 682–685.

Steven H. Strogatz, *The Mathematical Structure of the Human Sleep-Wake Cycle* (Lecture Notes in Biomathematics, vol. 69) (New York; Springer-Verlag, 1986).

Камень Розетта – плита с текстом на двух языках (древнеегипетском и древнегреческом) с использованием трех разных шрифтов: иероглифического, демотического (который представляет собой упрощенную форму иероглифического письма в Древнем Египте) и греческого. Ученые считают, что надпись на этой плите была сделана в 196 г. до н. э. Камень Розетта был найден в 1799 г. в небольшой деревушке Розетта (Rashid), расположенной в дельте Нила. В тексте на этом камне перечисляются великие деяния одного из египетских фараонов. Над расшифровкой этого текста, которая завершилась лишь в 1822 г., работал Жан-Франсуа Шампольон. *Прим. перев.*

Arthur T. Winfree, "The tides of human consciousness: Descriptions and questions," *American Journal of Physiology* 245 (1982), pp. R163–R166.

Michel Siffre, "Six months alone in a cave," *National Geographic* 147 (March 1975), pp. 426–435.

Примерно 21 °C. *Прим. ред.*

37 °C. Прим. ред.

J. W. Ogle, “On the diurnal variations in the temperature of the human body in health,” *St. George’s Hospital Reports* 1 (1866), pp. 220–245. Цитируется в Moore-Ede et al. (1982), p. 14.

внутренняя рассинхронизация... J. Aschoff, "Circadian rhythms in man," *Science* 148 (1965), pp. 1427–1432. Краткое изложение этой новаторской работы Юргена Ашоффа и его сотрудника Рутгера Уивера приведен в монографии Уивера *The Circadian System of Man* (Berlin: Springer-Verlag, 1979).

Siffre (1975), p. 435.

Цитата из Coleman (1986), p. 10. Коулман приводит также другие интересные подробности, которые позволяют нам лучше понять, каково приходилось участникам эксперимента по изоляции человека от времени в больнице Монтефьоре.

Из первых 12 «подопытных кроликов»... С. А. Czeisler, E. D. Weitzman, M. C. Moore-Ede, J. C. Zimmerman, and R. S. Knauer, “Human sleep: Its duration and organization depend on its circadian phase,” *Science* 210 (1980), pp. 1264–1267.

В оригинальной публикации Czeisler et al. (1980) об этой асимметричности не было сказано ничего вразумительного. Авторы усреднили данные по каждой фазе, прежде чем представить их в графическом виде. В результате был сделан ошибочный вывод о том, что соответствующая кривая имеет синусоидальную форму. Представленные здесь исходные данные были собраны с более крупной выборки участников эксперимента; см. Steven H. Strogatz, Richard E. Kronauer, and Charles A. Czeisler, "Circadian regulation dominates homeostatic control of sleep length and prior wake length in humans," *Sleep* 9 (1986), pp. 353–364.

J. Foret and G. Lantin, “The sleep of train drivers: An example of the effects of irregular work schedules on sleep,” в сборнике *Aspects of Human Efficiency*, под редакцией W. P. Colquhoun (London: English University Press, 1972), pp. 273–282. Такой же парадоксальный эффект (если вы уснули позже, то спите меньше) был также задокументирован у испытуемых, которые жили по нормальному графику, то есть были вовлечены в обычные 24-часовые сутки: T. Akerstedt and M. Gillberg, “The circadian variation of experimentally displaced sleep,” *Sleep* 4 (1981), pp. 159–169.

Термин из психологии: алертность – это состояние максимальной готовности к действию на фоне внутреннего спокойствия. *Прим. ред.*

Разлив нефти с танкера «Эксон Вальдес» в 1989 году, случившийся из-за того, что танкер врезался в риф. Причинен значительный ущерб экологии залива Принца Уильяма на Аляске. *Прим. ред.*

Moore-Ede et al. (1982), pp. 332–334.

C. A. Czeisler, J. C. Zimmerman, J. Ronda, M. C. Moore-Ede, and E. D. Weitzman, "Timing of REM sleep is coupled to the circadian rhythm of body temperature in man," *Sleep* 2 (1980), pp. 329–346. См. также Czeisler et al. (1980); Moore-Ede et al. (1982), pp. 205–215; Coleman (1986), pp. 104–130.

Не знаю, кому первому пришла в голову эта аналогия. Сейчас исследователи сна широко пользуются этой аналогией. Филиппа Гандер использовала ее в своей лекции Cawthron Memorial Lecture, October 1997, “Sleep, Health, and Safety: Challenges in a 24-hour Society,” available on-line at <http://www.cawthron.org.nz/publication/annual-lecture/cawthron-lecture-55-sleep-health-and-safety-challenges-24-hour-society-professor-phillipa-h-gander/>.

Обзор ранних исследований в этой области можно найти у Moore-Ede et al. (1982), pp. 134–139. С более современными достижениями в этой быстро развивающейся отрасли биологии циркадных ритмов можно ознакомиться у Yamazaki et al. (2000); Storch et al. (2002); P. McNamara et al., “Regulation of CLOCK and MOP4 by nuclear hormone receptors in the vasculature: A humoral mechanism to reset a peripheral clock,” *Cell* 105 (2001), pp. 877–889; C. Schubert, “Vitamin A calibrates a heart clock, 24–7,” *Science News* 160 (July 14, 2001), p. 22; и Michael H. Hastings, “A gut feeling for rime,” *Nature* 417 (2002), pp. 391–392.

Обзор работ Рихтера, а также последующих работ, которые локализовали главные часы в сверх-хиазматических ядрах, можно найти у Moore-Ede et al. (1982), pp. 152–157.

Steven M. Reppert and David R. Weaver, "Molecular analysis of mammalian circadian rhythms," *Annual Review of Physiology* 63 (2001), pp. 647–676.

Chen Liu and Steven M. Reppert, “GABA synchronizes clock cells within the suprachiasmatic circadian clock,” *Neuron* 25 (2000), pp. 123–128.

F. Levi, "From circadian rhythms to cancer chronotherapeutics," *Chronobiology International* 19 (2002), pp. 1–19; W. J. M. Hrushesky, "Circadian timing of cancer chemotherapy," *Science* 228 (1985), pp. 73–75; W. J. M. Hrushesky, "Tumor chronobiology," *Journal of Controlled Release* 74 (2001), pp. 27–30.

J. A. Panza, S. E. Epstein, and A. A. Quyyumi, "Circadian variation in vascular tone and its relation to alpha-sympaiheric vasoconstrictor activity," *New England Journal of Medicine* 325 (1991), pp. 986–990; P. M. Ridket et al., "Circadian variation of acute myocardiat-infarction and the effect of low-dose aspirin in a randomized trial of physicians," *Circulation* 82 (1990), pp. 897–902.

Moore-Ede et al. (1982), p. 348.

A. T. Winfree, "Human body clocks and the timing of sleep," *Nature* 297 (1982), pp. 23–27.

Arthur T. Winfree, "Circadian timing of sleepiness in man and woman,"
American Journal of Physiology 243 (1982), pp. R193–R204.

Strogatz (1986), Chapter 3.

Steven H. Strogatz, Richard E. Kronauer, and Charles A Czeisler, "Circadian pacemaker interferes with sleep onset at specific times each day; Role in insomnia," *American Journal of Physiology* 253 (1987), pp. R172–R178. Израильский исследователь сна Перец Лавие примерно в то же время открыл существование запретных зон независимо от остальных ученых; см. Peretz Lavie, "Ultrashort sleep-waking schedule. 3. Gates and forbidden zones for sleep," *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology* 63 (1986), pp. 414–425. Дальнейшее их исследование можно найти, например, у L.C. Lack and K. Lushington, "The rhythms of human sleep propensity and core body temperature," *Journal of Sleep Research* 5 (1996), pp. 1–11.

Одно из первых предположений о том, что склонность к послеобеденному сну может быть встроена в биологию человека, содержится в статье Roger Broughton, “Biorhythmic variations in consciousness and psychological functions,” *Canadian Psychological Review* 16 (1975), pp. 217–239.

P. M. Lavie, M. Wollman, and I. Pollack, "Frequency of sleep-related traffic accidents and hour of the day," *Sleep Research* 15 (1986), p. 275. Тем, кто желает получить более широкое представление об этой проблеме, рекомендую статью M. M. Miller et al., "Catastrophes, sleep and public policy: Consensus report," *Sleep* 11 (1988), pp. 100–109.

Обзор данных, полученных Мэри Карскадон и касающихся непреднамеренных микроснов во время выполнения некой регулярно совершаемой работы, можно найти в Strogatz (1986), pp. 97–98.

M. A. Carskadon and W. C. Dement, "Sleep studies on a 90-minute day," *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology* 39 (1975), pp. 145–155; M. A. Carskadon and W. C. Dement, "Distribution of REM sleep on a 90-minute sleep-wake schedule," *Sleep* 2 (1980), pp. 309–317.

J. E. Fookson et al., “Induction of insomnia on non-24 hour sleep-wake schedules,” *Sleep Research* 13 (1984), p. 220. С фактическими данными можно ознакомиться в Strogatz (1986), pp. 100–101.

C. A. Czeisler et al., “Chronotherapy: Resetting the circadian clocks of patients with delayed sleep phase insomnia,” *Sleep* 4 (1981), pp. 1–21.

Martin Moore-Ede, *The Twenty-Four-Hour Society; Understanding Human Limits in a World That Never Stops* (Reading, Massachusetts: Addison-Wesley, 1993).

T. L. Kelly et al., “Nonentrained circadian rhythms of melatonin in submariners scheduled to an 18-hour day,” *Journal of Biological Rhythms* 14 (1999), pp. 190–196. Обзор данных о текучести кадров на ядерных подводных лодках ВМС США за 70-е годы можно найти у Moore-Ede et al. (1982), pp. 336–337.

Первую оценку влияния дневного света на задатчик циркадных ритмов у человека см. в статье С. А Czeisler et al., “Bright light induction of strong (type 0) resetting of the human arcadian pacemaker,” *Science* 244 (1989), pp. 1328–1333. С обзором этих и последующих результатов можно ознакомиться в статье С. А. Czeisler, “The effect of light on the human circadian pacemaker,” *CIBA Foundation Symposia* 183 (1995), pp. 254–290.

M. Freedman et al., “Non-rod, non-cone photoreceptors regulate the photoentrainment of locomotor behavior,” *Science* 284 (1999). pp. 502–504; R. J. Lucas et al., “Non-rod, non-cone photoreceptors regulate the acute inhibition of pineal melatonin,” *Science* 284 (1999), pp. 505–507.

C. A. Czeisler et al., "Suppression of melatonin secretion in some blind patients by exposure to bright light," *New England Journal of Medicine* 332 (1995), pp. 6–11; E. B. Klerman et al., "Nonphotic entrainment of the human circadian pacemaker," *American Journal of Physiology* 43 (1998), pp. R991–R996.

K. L. Toh et al., “An hPer2 phos-phorylation site mutation in familial advanced sleep phase syndrome,” *Science* 291 (2001), pp. 1040–1043.

H. Bretzl, *Botamsche Forschungen des Alexanderzuges* (Leipzig: B. G. Teubner, 1903); процитировано в книге Martin C. Moore-Ede, Frank M. Suizman, and Charles A. Fuller, *The Clocks That Time Us; Physiology of the Human Circadian Timing System* (Cambridge, Massachusetts: Harvard University Press, 1982), p. 5.

Глаза на это обстоятельство мне по-настоящему открыло замечательное эссе R. S. Root-Bernstein “Setting the stage for discovery; Breakthroughs depend on more than luck,” *The Sciences* 28 (1988), pp. 26–34. Другие соображения по поводу творческого процесса можно найти в книге Robert Root-Bernstein and Midiele Root-Bernstein. *Sparks of Genius: The Thirteen Thinking Took of the World’s Most Creative People* (Boston: Mariner Books/Houghton Mifflin, 1999).

К. Гюйгенс, письмо к Р. Морэю, датированное 27 февраля 1665 г., в *Oeuvres Completes des Christian Huygens*, под редакцией М. Nijhoff (The Hague: Societe Hollandaise des Sciences, 1893), vol. 5, pp. 246–249. Описывая Р. Морэю феномен взаимной симпатии часов, Гюйгенс с трудом сдерживал свой восторг: «Это открытие буквально ошеломило меня...»

C. Huygens, *The Pendulum Clock: Geometrical Demonstrations Concerning the Motion of Pendula as Applied to Clocks*, в переводе R. J. Blackwell (Ames: Iowa State University Press, 1986). С онлайн-версией биографии К. Гюйгенса можно ознакомиться, обратившись по адресу <http://www.history.mcs.st-and.ac.uk/history/Mathematicians/Huygens.html>.

Тем, кто интересуется всеми аспектами проблемы долголетия, начиная с научного ее аспекта и заканчивая политической историей и биографиями, рекомендую книгу Dava Sobel, *Longitude: The True Story of a Lone Genius Who Solved the Greatest Scientific Problem of His Time* (New-York: Walker Publishing Company, 1995).

К. Гюйгенс, письмо к отцу, датированное 26 февраля 1665 г., в *Oeuvres Completes des Christian Huygens*, под редакцией М. Nijhoff (The Hague: Societe Hollandaise des Sciences, 1893), vol. 5, p. 243.

К. Гюйгенс, *Oeuvres Completes*, vol. 5, p. 241.

Описание недавнего повторения экспериментов Гюйгенса и первое объяснение самопроизвольного синхронизма с точки зрения нелинейной динамики приведено в статье M. Bennett, M. F. Schatz, H. Rockwood, and K. Wiesenfeld, “Huygens’s clocks,” *Proceedings of the Royal Society of London, Series A: Mathematical, Physical, and Engineering Sciences* 458 (2002), pp. 563–579. Популярный обзор этой работы можно найти в статье Erica Kiarreich, “Huygens’s clocks revisited,” *American Scientist* 90 (July/August 2002), pp. 322–323. Это исследование позволило выявить еще один уровень интуитивной прозорливости в работе Гюйгенса. Выбранная им конструкция предусматривала использование в основании часов свинцового утяжелителя весом от 80 до 90 фунтов, который поддерживал бы часы в вертикальном положении даже в условиях сильного волнения на море. Анализ, выполненный в наши дни, показал, что в случае, если бы вес свинцового утяжелителя оказался несколько большим, связь между часами стала бы слишком слабой: колебания деревянной распорки между ними оказались бы недостаточными, чтобы подталкивать друг друга, в результате чего им не удалось бы синхронизироваться. С другой стороны, если бы вес свинцового утяжелителя оказался несколько меньшим, часы подталкивали бы друг друга так энергично, что один из часовых механизмов вообще остановился бы (поскольку в какой-то момент своего изменчивого движения амплитуда раскачиваний этого маятника снизилась бы до столь малой величины, что анкерный механизм часов не смог бы выполнять свою функцию, в результате чего прекратилась бы подача энергии, необходимой для поддержания хода часов). Другими словами, Гюйгенсу удалось найти ту золотую середину, которая обеспечивала возникновения синхронизма, что является еще одним свидетельством интуитивной прозорливости этого выдающегося ученого.

Peter W. Milonni and Joseph H. Eberly, *Lasers* (New York: Wiley-Interscience, 1988). Хорошим введением в лазерную хирургию может служить статья М. W. Berns, “Laser surgery,” *Scientific American* 264 (June 1991), pp. 84–90.

Цитату Артура Шавлова можно найти на сайте <http://www.bell-labs.com/history/laser/today/sockhop7.html>.

Очень кратко: состояние с инверсией (обращением) населенностей энергетических уровней – это состояние вещества, в котором число атомов на одном из уровней с более высокой энергией больше числа атомов на уровне с меньшей энергией. *Прим. ред.*

В истории изобретения лазера еще остается много неясного и противоречивого, в том числе и того, что связано с ожесточенным противоборством между нобелевским лауреатом (Чарльз Таунз) и бывшим аспирантом по имени Гордон Гоулд, который недавно выиграл дело в суде, что обеспечило ему право на получение патента. Таунз – уважаемое имя в науке: он первым понял, как применить на практике идеи Эйнштейна, касающиеся индуцированного излучения, в результате чего он создал в 1954 г. устройство под названием мазер (предшественник лазера, в котором вместо видимого света использовались сверхвысокочастотные колебания). В книге Charles Townes, *How the Laser Happened: Adventures of a Scientist* (Oxford, England: Oxford University Press, 1999) Таунз излагает собственную версию событий. Драматическое изложение той же истории в интерпретации Гордона Гоулда можно найти в книге Nick Taylor, *Laser: The Inventor, the Nobel Laureate, and the Thirty-Year Patent War* (New York; Simon & Schuster, 2000). Как бы то ни было, создателем первого в мире работающего лазера не оказался ни тот, ни другой. Первый в мире работающий лазер был создан в 1960 г. Теодором Мейманом из Hughes Research Labs.

Чтобы не отвлекаться на второстепенные подробности, я опускаю в этой аналогии некоторые детали. Например, рядом с каждым арбузом вместо табуретки должна стоять лестница, разные ступеньки которой соответствуют определенным возбужденным энергетическим уровням, на которых может пребывать атом. Но во многих лазерах более возбужденные атомы быстро скатываются вниз и скапливаются на самой нижней из ступенек этой лестницы; именно такую конструкцию в действительности представляет собой упомянутая мною табуретка. Кроме того, фотоны отнюдь не безлики, как арбузные семечки или пули; они обладают определенным цветом (соответствующим длине волны света, носителями которого являются фотоны) и во многих отношениях ведут себя подобно волнам. Фотон можно представлять себе как объект, имеющий складчатый, гофрированный вид со множеством гребней и впадин, подобно ряби на поверхности пруда. К тому же я не упомянул о том, во-первых, что для возбуждения атома и перевода его на более высокий энергетический уровень (иными словами, чтобы вызвать индуцированное излучение) фотон должен обладать определенным цветом; во-вторых, что лазерный резонатор должен быть настроен на правильную длину волны, чтобы обеспечивался резонанс с желаемой длиной волны света лазера; в-третьих, что фотоны, испускаемые в результате индуцированного излучения, имеют такую же поляризацию, как у фотонов, породивших их; и т. д.

Хорошим введением в этот предмет – с акцентом на возможные последствия дерегулирования – может служить статья Thomas J. Overbye, “Reengineering the electric grid,” *American Scientist* 88 (May/June 2000), pp. 220–229. С техническим аспектом этого вопроса можно ознакомиться в книге Arthur R. Bergen, *Power Systems Analysis* (Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall, 1986).

Захватывающий рассказ о «блэкауте» в северо-восточной части США в 1965 г. приведен в статье Theodore H. White, “What went wrong? Something called 345 KV,” *Life Magazine* 59 (November 19, 1965).

Более подробную информацию об ограничениях синхронного тактирования и проблемах проектирования асинхронных микросхем, в которых каждая локальная схема работает на собственной частоте, можно почерпнуть в статьях Ivan E. Sutherland and Jo Ebergen, “Computers without clocks,” *Scientific American* 287 (August 2002), pp. 62–69; John Markoff, “Computing pioneer challenges the clock,” *New York Times* (March 5, 2001).

С вводным материалом можно ознакомиться в интернете: <http://www.boulder.nist.gov/timefreq/index.html>, а более «техническое» обсуждение приведено в статье James C. Bergquist, Steven R. Jefferts, and David J. Wineland, “Time measurement at the millennium,” *Physics Today* (March 2001), pp. 37–42.

T. A. Herring, "The global positioning system," *Scientific American* 274 (February 1996), pp. 44–50; Неизвестный автор, "Accuracy is addictive," *The Economist* (Technology Quarterly) (March 16, 2002), pp. 24–25.

Sharon Begley, "N sync and a whopper," *Newsweek* (January 22, 2001), pp. 52–53; R. Cowen, "Astronomers find two planetary systems," *Science News* 159 (January 13, 2001), p. 22.

Популярное изложение так называемой метеорной гипотезы и возможное открытие кратера возле полуострова Юкатан приведено в книге Walter Alvarez, *T. Rex and the Crater of Doom* (Princeton: Princeton University Press, 1997).

Ron Cowen, "A rocky bicentennial: Asteroids come of age," *Science News* 160 (July 28, 2001), pp. 61–63.

Роль хаоса в формировании этих промежутков была впервые разъяснена в статье J. Wisdom, "Meteorites may follow a chaotic route to Earth," *Nature* 315 (1985), pp. 731–733.

С одним из последних обзоров можно ознакомиться в статье R. Murray and M. Holman, “The role of chaotic resonances in the solar system,” *Nature* 410 (2001), pp. 773–779.

A. Morbidelli et al., “Source regions and rimescales for the delivery of water to the Earth,” *Meteoritics and Planetary Science* 35 (2000), pp. 1309–1320. Популярное изложение современных научных идей, касающихся появления воды на Земле, приведено в статье Ben Harder, “Water for the rock: Did Earth’s oceans come from the heavens?” *Science News* 161 (March 23, 2002), pp. 184–186.

Моя интерпретация большей части материала, представленного в этой главе, начиная с основ электроники и заканчивая сверхпроводимостью, обусловлена сильным влиянием замечательной книги Ричарда Туртона: Richard Turton, *The Quantum Dot: A Journey into the Future of Microelectronics* (Oxford, England: Oxford University Press, 1995).

R. D. Ouboter, "Heike Kamerlingh-Onnes's discovery of superconductivity," *Scientific American* 276 (March 1997), pp. 98–103.

Несмотря на то что физики уже на протяжении 70 лет пытаются объяснить непосвященным людям основы квантовой механики, никому из них это не удалось лучше, чем Брайану Грину в его книге-бестселлере Brian Greene, *The Elegant Universe: Suptrstrings, Hidden Dimensions, and the Quest for the Ultimate Theory* (New York: W.W. Norton and Company, 1999). Объяснения Брайана Грина отличаются творческим подходом, научной честностью и высокой педагогической ценностью.

Richard P. Feynman, Robert B. Leighton, and Matthew Sands, *The Feynman Lectures on Physics, Volume III: Quantum Mechanics*, Reading, Massachusetts: Addison-Wesley, 1965 (Русский перевод: Р. Фейнман. Фейнмановские лекции по физике, Том 3. М.: Мир, 1967.). В главе 4 приведено обсуждение фермионов, бозонов и принципа исключения Паули; в ней рассказано, почему бозоны так любят собираться в группы, и представлен вывод формулы Планка для излучения черного тела на основании статистики Бозе – причем все это излагается на уровне, доступном для бакалавров, специализирующихся в области физики.

Бозонами называются частицы с целым спином, фермионами – частицы с полуцелым спином, по именам индийского теоретика Бозе и итальянского физика Энрико Ферми, которые первыми стали изучать специфические особенности этих двух видов частиц. К бозонам отнесли глюоны, частицу света фотон, квант гравитационного поля гравитон, многие типы мезонов. В отряд фермионов входят кварки, электрон, нейтрино, протон с нейтроном и большинство других тяжелых частиц. Эти два отряда частиц играют различную роль в строении вещества. Фермионы – это «кирпичики», из которых складывается вещество, а бозоны, как правило, – кванты связывающих их калибровочных полей. *Прим. ред.*

Одной из лучших научных биографий Эйнштейна является книга Abraham Pais, *Subtle Is the Lord: The Science and the Life of Albert Einstein* (Oxford, England: Oxford University Press, 1982). Работа Эйнштейна над проблемой, которая в настоящее время носит название конденсации Бозе-Эйнштейна, обсуждается на техническом уровне в главе 23. Подробнее о его переписке с Бозе см. статью William Bragg, "Einstein as guru? The case of Bose," в сборнике *Einstein: The First Hundred Years*, под редакцией Maurice Goldsmith, Alan Mackay, and James Woudhuysen (Oxford, England; Pergamon Press, 1980).

Внятное объяснение способа подсчета всех разных конфигураций неразличимых частиц, предложенного Бозе, можно найти в интернете: <http://home.achilles.net/~jtalbot/history/einstein.html>. Аналогия с Питером и Полем не может считаться самой подходящей, хотя она указывает на возможность существования разных, но не одинаково рациональных способов подсчета. Реальная проблема, с которой столкнулся Бозе, заключается в следующем: сколькими разными способами – при условии неизменной совокупной энергии – можно распределить частицы по энергетическим уровням, чтобы сумма всех этих энергий равнялась заданной совокупной энергии? Превосходную графическую иллюстрацию можно найти в интернете: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/quantum/disbex.html>.

Цитируется в Pais (1982), p. 432.

Технический подвиг заключался не только в достижении столь низкой температуры, но и в том, что газ нужно было уберечь от сжижения или кристаллизации, прежде чем он сможет конденсироваться в это новое, экзотическое состояние материи. Для этого требовалось, чтобы газ был предельно разрежен, вследствие чего взаимодействие между его атомами сводилось к минимуму.

Eric A. Cornell and Carl E. Wieman, “The Bose-Einstein condensate,” *Scientific American* 278 (March 1998), pp. 40–45; Wolfgang Ketterle, “Experimental studies of Bose-Einstein condensation,” *Physics Today* 52 (December 1999), pp. 30–35. Могу также рекомендовать превосходный сайт, представленный в удобном формате вопросов и ответов: <http://www.colorado.edu/physics/2000/bec/>.

Этот пресс-релиз Королевской академии наук Швеции можно найти в интернете: <http://www.nobel.se/physics/laureates/2001/press.html>.

George Johnson, “Quantum stew: How physicists are redefining reality’s rules,” *New York Times* (October 16, 2001), p. F4.

Могу рекомендовать классическую статью J. Bardeen, L. N. Cooper, and J. R. Schrieffer, “Theory of superconductivity,” *Physical Review* 108 (1957), pp. 1175–1204. Относительно доступный материал по этой теме представлен в книге Michael Tinkham, *Introduction to Superconductivity*, 2nd edition (New York: McGraw Hill, 1995).

В книге Feynman et al. (1965), vol. III, Section 4.3, это правило объясняется так, что у читателей складывается впечатление, будто ничего сложного в нем нет. Впрочем, придумать такое объяснение оказалось под силу одному лишь Фейнману.

J. R. Kirtley and C. C. Tsuei, “Probing high-temperature superconductivity,” *Scientific American* 275 (August 1996), pp. 68–73.

Peter Weiss, "Little big wire: High-temperature superconductivity makes a bid for the power grid," *Science News* 158 (November 18, 2000), pp. 330–332; B. Schechter, "Engineering superconductivity. No Resistance: High-temperature superconductors start finding real-world uses," *Scientific American* 283 (August 2000), pp. 32–33; Steven Ashley, "Superconductors heat up," *Mechanical Engineering* (June 1996), pp. 58–63.

Воспоминания Джозефсона содержатся в речи, которую он произнес во время вручения ему Нобелевской премии. Впоследствии текст этой речи был опубликован в журнале *Science*: B. D. Josephson, "The discovery of tunneling supercurrents," *Science* 184 (1974), pp. 527–530.

Андерсон вспоминает свои впечатления от преподавания физики Джозефсону в статье Philip W. Anderson, “How Josephson discovered his effect,” *Physics Today* 23 (November 1970), pp. 23–28.

B. D. Josephsors, "Possible new effects in superconductive tunneling," *Physics Letters* 1 (1962), pp. 251–253.

Чтобы понять, насколько удивительным казался в то время этот прогноз, имеет смысл прислушаться к мнению одного из «главных действующих лиц». Андерсон (1970 г.) полагает, что сам он, а также Джозефсон и Пиппард «были весьма озадачены, поскольку не могли уяснить смысл того обстоятельства, что электрический ток зависит от фазы... Я полагаю, что именно остаточная неудовлетворенность в этом отношении заставила двух Брайанов (Пиппарда и Джозефсона) отправить статью в журнал *Physics Letters*, который в то время лишь начал выходить, а не в журнал *Physical Review Letters*». Андерсон имеет в виду, что Джозефсон и Пиппард были настолько неуверенны в прогнозах Джозефсона, что не решились отправить свою статью в ведущий журнал (*Physical Review Letters*), опасаясь, что их выводы окажутся ложными.

Приведенные здесь сведения основываются исключительно на статье Donald G. McDonald, “The Nobel laureate versus the graduate student,” *Physics Today* 54 (2001), pp. 46–51. Цитата из Джайевера приведена на стр. 49.

P. W. Anderson and J. M. Rowell, "Probable observation of Josephson superconducting tunneling effect," *Physical Review Letters* 10 (1963), p. 230.

Richard P. Feynman, Robert B. Leighton, and Matthew Sands, *The Feynman Lectures on Physics, Volume III: Quantum Mechanics* (Reading, Massachusetts: Addison-Wesley, 1965). Обсуждение сверхпроводимости приведено в главе 21, а в разделе 21.9 приведено элементарное объяснение эффектов Джозефсона.

N. David Mermin and David M. Lee, "Superfluid helium 3," *Scientific American* 235 (December 1976), pp. 56–71.

S. V. Pereverzev et al., “Quantum oscillations between two weakly coupled reservoirs of superfluid He-3,” *Nature* 388 (1997), pp. 449–451. С популярным обзором этой работы можно ознакомиться в статьях Р. McClintock, “Quantum mechanics: Whistles from superfluid helium,” *Nature* 388 (1997), p. 421, и Michael Brooks, “Liquid genius,” *New Scientist* 159 (September 5, 1998), pp. 24–28.

John Clarke, "SQUIDS," *Scientific American* 271 (August 1994), pp. 46–53.

Принципы, на которых основана работа компьютеров Джозефсона, разъясняются у Turton (1995).

Arthur L. Robinson, "IBM drops superconducting computer project,"
Science 222 (1983), pp. 492–494.

S. Hasuo, “Toward the realization of a Josephson computer,” *Science* 255 (1992), pp. 301–305.

Интервью, в котором Джозефсон обсуждает свои интересы, не имеющие отношения к магистральным направлениям физики, опубликовано в статье John Gliedman, “The Josephson junction,” *Omni* 4 (July 1982), pp. 86–88. Цитата о возможности сгибания металлических ложек силой психической энергии приведена на стр. 116. Более свежие материалы можно найти в статье John Horgan, “Josephson’s inner junction,” *Scientific American* 272 (May 1995), pp. 40–41, а также в интернете: <http://www.tcm.phy.cam.ac.uk/-bdj10/mm/artides/PWprofile.html>. Для полноты картины читателям следовало бы ознакомиться с собственными высказываниями Джозефсона. На его веб-странице можно найти немало информации о его нынешних воззрениях; см. <http://www.tcm.phy.cam.ac.uk/-bdj10/>.

Гомеопатия – это система альтернативной медицины, в которой болезни лечатся с помощью сильно разбавленных препаратов, которые могли бы, если применять их в больших дозах, вызвать такие же симптомы, как сама болезнь. Сторонники гомеопатических методов лечения полагают, что гомеопатическое лекарство становится все более эффективным по мере все большего его разбавления. Если довести этот принцип до крайности, то получится, что сверхразбавленный раствор не будет содержать ни единой молекулы лекарственного препарата, то есть окажется чистой водой, что, по мнению сторонников гомеопатических методов лечения, отнюдь не снижает его эффективности благодаря «памяти», которой лекарственный препарат наделяет молекулы воды. Джозефсон поддерживает ученого по имени Жак Бенвенисте, который заявляет, что эта память воды может заключать в себе «электромагнитную подпись» и что эту подпись можно вычленил электронным способом, оцифровать, а затем передать по электронной почте, чтобы превратить стакан обычной воды где-нибудь на противоположной стороне земного шара в гомеопатический раствор с требуемыми медицинскими свойствами. Джозефсон предложил провести эксперимент, чтобы протестировать эту идею и доставить удовольствие физику Роберту Парку, крайне скептически относящемуся к гомеопатии и любящему подсмеиваться над Бенвенисте. Роберт Парк охотно поддержал идею проведения такого эксперимента; см. Leon Jaroff, “Homeopathic e-mail,” *Time* (May 17, 1999), p. 77. Но на момент написания этой книги эксперимент еще не состоялся. Причина, по которой он не состоялся, мне неизвестна. Самая великодушная интерпретация заключается в том, что сторонам не удалось согласовать протокол. Джеймс Рэнди (он же «Бесподобный Рэнди»), знаменитый волшебник, скептик и разоблачитель, придерживается более пессимистической точки зрения. Он обвиняет Джозефсона и его союзников-гомеопатов в том, что они пошли на попятную и отказались от проведения эксперимента. См. веб-страницу Рэнди: <http://www.randi.org/jr/01-26-2001.html> и выполните на его сайте поиск по ключевому слову «Josephson».

Erica Klarreich, "Stamp booklet has physicists licked," *Nature* 413 (2001), p. 339; Robin McKie, "Royal Mail's Nobel guru in telepathy row," *The Observer* (September 30, 2001). Яркий и остроумный ответ на критику Джозефсона, который дал блестящий физик и популяризатор науки, можно найти в статье Robert Matthews, "Time travel," *Sunday Telegraph* (London) (November 4, 2001).

Этот эксцентричный образ Винера рисуют нам воспоминания Мюррея Гленн-Манна о своих студенческих годах в МТИ. См. George Johnson, *Strange Beauty: Murray Gell-Mann and the Revolution in Twentieth-Century Physics* (New York: Vintage Books, 2000), p. 69.

D. E. McCumber, "Effect of ac impedance on dc voltage-current characteristics of superconductor weak-link junctions," *Journal of Applied Physics* 39 (1968), pp. 3113–3118; W. C. Stewart, "Current-voltage characteristics of Josephson junctions," *Applied Physics Letters* 12 (1968), pp. 277–280.

Механическим аналогом перехода Джозефсона является демпфированный маятник, приводимый в действие постоянным крутящим моментом. Объяснение этой аналогии и анализ нелинейной динамики обеих систем приведены в разделах 4.6 и 8.5 книги Steven H. Strogatz, *Nonlinear Dynamics and Chaos: With Applications to Physics, Biology, Chemistry, and Engineering* (Cambridge, Massachusetts: Perseus Books, 1994).

B. A. Huberman and J. P. Crutchfield, "Chaotic states of anharmonic systems in periodic fields," *Physical Review Letters* 43 (1979), pp. 1743–1747; D. D'Humieres, M. R. Beasley, B. A. Huberman, and A. Libchabet, "Chaotic states and routes to chaos in the forced pendulum," *Physical Review A* 26 (1982), pp. 3483–3496; N. F. Pedersen and A. Davidson, "Chaos and noise rise in Josephson junctions," *Applied Physics Letters* 39 (1981), pp. 830–832; R. L. Kautz and R. Monaco, "Survey of chaos in the RF-biased Josephson junction," *Journal of Applied Physics* 57 (1985), pp. 875–889.

Свежие обзоры можно найти в статьях R. S. Newrock et al., “The two-dimensional physics of Josephson junction arrays,” *Solid State Physics: Advances in Research and Applications* 54 (2000), pp. 263–512; C. A. Hamilton, C. J. Burroughs, and S. P. Bens, “Josephson voltage standard: A review,” *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 7 (1997), pp. 3756–3761.

Оригинальной статьей была Per Bak, Chao Tang, and Kurt Wiesenfeld, “Self-organized criticality: An explanation of $1/f$ noise,” *Physical Review Letters* 59 (1987), pp. 381–384.

Не знаю, кто является автором этого выражения, но слышал его на лекции, которую читал физик Предраг Цвитанович.

Peter Hadley, Malcolm R. Beasley, and Kurt Wiesenfeld, "Phase locking of Josephson-junction series arrays," *Physical Review B* 38 (1988), pp. 8712–8719.

Kurt Wiesenfeld and Peter Hadley, “Attractor crowding in oscillator arrays,” *Physical Review Letters* 62 (1989), pp. 1335–1338.

Эти уравнения цепи поясняются и анализируются в статье К. Y. Tsang, R. E. Mirollo, S. H. Strogatz, and K. Wiesenfeld, “Dynamics of a globally coupled oscillator array,” *Physica D* 48 (1991), pp. 102–112. На последней странице этой статьи мы описываем наши наблюдения неожиданной структуры под названием «русская матрешка» (технически известной как расслаивание фазового пространства на вложенные двумерные торы).

S. Nichols and K. Wiesenfeld, “Ubiquitous neutral stability of splay-phase states,” *Physical Review A* 45 (1992), pp. 8430–8435.

J. W. Swift, S. H. Strogatz, and K. Wiesenfeld, “Averaging of globally coupled oscillators,” *Physica D* 55 (1992), pp. 239–250.

S. Wataliabe and S. H. Strogatz, “Integrability of a globally coupled oscillator array,” *Physical Review Letters* 70 (1993), pp. 2391–2394; “Constants of motions for superconducting Josephson arrays,” *Physica D* 74 (1994), pp. 197–253.

Kurt Wiesenfeld, Pere Colet, and Steven H. Strogatz, “Synchronization transitions in a disordered Josephson series array,” *Physical Review Letters* 76 (1996), pp. 404–407; “Frequency locking in Josephson arrays: Connection with the Kuramoto model,” *Physical Review E* 57 (1998), pp. 1563–1569. Популярное изложение этой работы можно найти в статье Ivars Peterson, “Keeping the beat,” *Science News* 149 (April 13, 1996), pp. 236–237.

G. Kozyreff, A. G. Vladimirov, and P. Mandel, “Global coupling with time delay in an array of semiconductor lasers,” *Physical Review Letters* 85 (2000), pp. 3809–3812.

J. Pantaleone, “Stability of incoherence in an isotropic gas of oscillating neutrinos,” *Physical Review D* 58 (1998), article number 073002.

I. Sample, “Bad vibrations: How could the designers of a revolutionary bridge miss something so obvious?” *New Scientist* 167 (July 8, 2000), p. 14; Deyan Sudjie, “At last: a bridge you can cross. After a shaky start, the Millennium Bridge is undergoing major surgery. Here, its creators reveal what went wrong and why the blade of light won’t wobble when it reopens,” *The Observer* (March 11, 2001).

Слова лорда Фостера цитируются в статье Matthew Jones, "Survey: The South Bank reborn: Brave vision of blade of light," *Financial Times (London)* (May 9, 2000), p. 2.

Историю строительства моста Tacoma Narrows Bridge (он же – «Галопирующая Герти») можно найти в видеороликах, выложенных на YouTube. См., в частности, <https://www.youtube.com/watch?v=CsKKDLKYsVU>, https://www.youtube.com/watch?v=lXyG68_caV4 и др. *Прим. перев.*

Объяснение инженерами Ove Arup причин, вызвавших опасные вибрации моста, можно найти в интернете: <http://www.arup.com/MillennimnBridge/>. Моделирование колебаний моста тоже можно найти в интернете: <http://www2.eng.cam.ac.uk/-gm249/MillenniumBridge/>.

Brian Josephson, "Out of step on the bridge," *The Guardian (London)* (June 14, 2000), Guardian Leader Pages, p. 23.

E. N. Lorenz, “Deterministic nonperiodic flow,” *Journal of the Atmospheric Sciences* 20 (1963), pp. 130–141.

Лучшим, на мой взгляд, введением в теорию хаоса по-прежнему является классический труд James Gleick, *Chaos: Making a New Science* (New York Viking, 1987). В этой книге можно найти множество замечательных историй о специфике работы ученых; объяснения автора рассчитаны на широкий круг читателей, не поступаясь при этом точностью изложения. Собственный взгляд Лоренца на этот предмет приведен в книге Edward N. Lorenz, *The Essence of Chaos* (Seattle: University of Washington Press, 1993). Тем, кто желает ознакомиться с элементарным введением в математику и науку хаоса, могу порекомендовать книгу Steven H. Strogatz, *Nonlinear Dynamics and Chaos: With Applications to Physics, Biology, Chemistry, and Engineering* (Cambridge, Massachusetts: Perseus Books, 1994). Уравнения Лоренца обсуждаются в главе 9. (Также рекомендуем книгу Малинецкий Г. Г. Хаос. Структуры. Вычислительный эксперимент. Введение в нелинейную динамику. 3-е изд. М.: УРСС, 2001. *Прим. ред.*)

J. Wisdom, S. J. Peale, and F. Mignard, "The chaotic rotation of Hyperion," *Icarus* 58 (1984), pp. 137–152.

Синергетический – получение эффекта в результате интеграции, слияния отдельных частей в единую систему за счет так называемого системного эффекта (эмерджентности). *Прим. ред.*

E. N. Lorenz, “Predictability: Does the flap of a butterfly’s wings in Brazil set off a tornado in Texas?” Выступление на ежегодном собрании Американской ассоциации по развитию науки в Вашингтоне, 29 декабря 1979 г.

W. L. Ditto and L. M. Pecora, "Mastering chaos," *Scientific American* 269 (August 1993), pp. 78–84.

Strogatz (1994), Section 9.1.

Перевод С. Маршака. *Прим. ред.*

Цитируется в этом контексте у Gleick (1987), р. 23, который, в свою очередь, приводит цитату из статьи Норберта Винера.

В осеннем лесу, на развилке дорог,
Стоял я, задумавшись, у поворота;
Пути было два, и мир был широк,
Однако я раздвоиться не мог,
И надо было решаться на что-то.

(Перевод Г. Кружкова). Прим. ред.

Время Ляпунова – время, за которое система приводится к полному хаосу. Оно определено как время, за которое расстояние между соседними траекториями системы возрастает в e раз. Время Ляпунова отражает пределы предсказуемости системы. *Прим. ред.*

Концептуальная важность времени Ляпунова обсуждается в статье J. Lighthill, “The recently recognized failure of predictability in Newtonian dynamics,” *Proceedings of the Royal Society of London, Series A: Mathematical, Physical, and Engineering Sciences* 407 (1986), pp. 35–50.

Время Ляпунова для Солнечной системы оценивается в статье G. Susstnan and J. Wisdom, “Chaotic evolution of the solar system,” *Science* 257 (1992), pp. 56–62.

Странный аттрактор – это притягивающее множество неустойчивых траекторий в фазовом пространстве диссипативной динамической системы. Отличие странного аттрактора в том, что его структура фрактальна. *Прим. ред.*

Доступное введение в странные аттракторы содержится в статье J. P. Crutchfield, J. D. Farmer, N. H. Packard, and R. S. Shaw, "Chaos," *Scientific American* 255 (December 1986), pp.46-&.

Пекора поведал мне эту увлекательную историю своей работы (вместе с Томом Кэрролом) над синхронизированным хаосом в ходе двух телефонных интервью, проводившихся 27 января и 1 февраля 2002 г.

Основополагающей работой по синхронизированному хаосу является статья L. M. Pecora and T. L. Carroll, “Synchronization in chaotic systems,” *Physical Review Letters* 64 (1990), pp. 821–824. Обзор более современных работ можно найти в статье L. M. Pecora et al., “Fundamentals of synchronization in chaotic systems: Concepts and applications,” *Chaos* 7 (1997), pp. 520–543. Как и в случае многих других значительных открытий, теперь нам известно, что Пекора и Кэрролл, вообще говоря, не были первыми, кто обратил внимание на возможность синхронизированного хаоса. См., например, Н. Fujisaka and Т. Yamada, “Stability theory of synchronized motion in coupled-oscillator systems,” *Progress of Theoretical Physics* 69 (1983), pp. 32–47, а также V. S. Afraimovich, N. N. Verichev, and M. I. Rabinovich, “General synchronization,” *Radiophysics and Quantum Electronics* 29 (1986), pp. 795–803. Но перечисленные работы остались практически незамеченными, возможно, из-за того, что в них не подчеркивалась новизна данного явления или его потенциальная важность для систем связи.

Kevin M. Cuomo and Alan V. Oppenheim, "Circuit implementation of synchronized chaos with applications to communications," *Physical Review Letters* 71 (1993), pp. 65–68; K. M. Cuomo, A. V. Oppenheim, and S. H. Strogatz, "Synchronization of Lorenz-based chaotic circuits with applications to communications," *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Analog and Digital Signal Processing* 40 (1993), pp. 626–633. Популярное изложение использования хаоса для частных коммуникаций предложено в статье J. C. G. Lesurf, "Electronics: Chaos in harness," *Nature* 365 (1993), pp. 604–605.

Steve Boggan, "Bugging: Can you hear me? Yes, darling, and so can an awful lot of other people," *The Independent* (London) (January 17, 1993); Susan Levine, "Eavesdropping on cellular calls is illegal but easy," *The Washington Post* (January 11, 1997), p. A01; Juliet Eilperin, "Hill tape dispute allowed to continue," *The Washington Post* (January 9, 2002), p. A17.

Kevin M. Short, "Steps toward unmasking secure communications," *International Journal of Bifurcation and Chaos* 4 (1994), pp. 959–977; J. B. Geddes, K. M. Short, and K. Black, "Extraction of signals from chaotic laser data," *Physical Review Letters* 83 (1999), pp. 5389–5392.

G. D. VanWiggeren and R. Roy, "Communication with chaotic lasers," *Science* 279 (1998), pp. 1198–1200. С комментариями к этому материалу можно ознакомиться в статье D. J. Gauthier, "Chaos has come again," *Science* 279 (1998), pp. 1156–1157.

Доступное введение в странные аттракторы содержится в статье J. P. Crutchfield, J. D. Farmer, N. H. Packard, and R. S. Shaw, "Chaos," *Scientific American* 255 (December 1986), pp.46-&.

Arthur T. Winfree, *The Geometry of Biological Time* (New York Springer-Verlag, 1980).

Представлены на стр. 453 Winfree (1980), в разделе, озаглавленном “Statistics (‘Am I Overdue?!’).” Однажды Уинфри поведал мне о том, что его мать Дороти скрупулезно фиксировала все свои менструальные периоды, поскольку была верующей католичкой и использовала календарный способ предохранения от беременности.

Winfrey (1980), p. 291.

Winfree (1980), pp. 325–329 содержит обсуждение распространения нейро-мышечной волны в тонкой кишке, рассматриваемой как одномерный континуум осцилляторов.

Научная литература, в которой отражается представление о желудке как двумерном «мешке» осцилляторов, обсуждается на стр. 329–330 Winfree (1980).

Со взглядами Уинфри на трехмерные волны в сердце можно ознакомиться в книге А. Т. Winfree, *When Time Breaks Down: The Three-Dimensional Dynamics of Electrochemical Waves and Cardiac Arrhythmias* (Princeton, New Jersey: Princeton University Press, 1987).

G. R. Mines, "On circulating excitations on heart muscles and their possible relation to tachycardia and fibrillation," *Transactions of the Royal Society of Canada* 4 (1914), pp. 43–53; W.E. Garrey, "Nature of fibrillary contraction in the heart," *American Journal of Physiology* 33 (1914), pp. 397–414.

M. A. Allesie, F. I. M. Bonke, and F. J. Schopman, "Circus movement in rabbit atrial muscle as a mechanism of tachycardia," *Circulation Research* 33 (1973), pp. 54–62.

A. T. Winfree, "Sudden cardiac death: A problem in topology," *Scientific American* 248 (May 1983), pp. 144-47; M. S. Eisenberg, L. Bergner, A. P. Hallstrom, and R. O. Cummins, "Sudden cardiac death," *Scientific American* 254 (May 1986), pp. 37-41.

A. N. Zaikin and A. M. Zhabotinsky, "Concentration wave propagation in two-dimensional liquid-phase self-oscillating systems," *Nature* 225 (1970), pp. 535–537.

A. T. Winfree, "The prehistory of the Belousov-Zhabotinsky oscillator,"
Journal of Chemical Educational (1984), pp. 661–663.

A. T. Winfree, "Spiral waves of chemical activity," *Science* 175 (1972), pp. 634-&; "Rotating chemical reactions," *Scientific American* 230 (June 1974), pp. 82-&.

A. G. Mayer, "Rhythmical pulsation in scyphomedusae," *Papers of the Tortugas Laboratory of the Carnegie Institution of Washington* 1 (1908), pp. 115–131.

Разноцветный орнамент; по названию шотландского города. *Прим. перев.*

K. I. Agladze and V. I. Krinsky, "Multi-armed vortices in an active chemical medium," *Nature* 296 (1982), pp. 424–426.

A. T. Winfree, "Scroll-shaped waves of chemical activity in three dimensions," *Science* 181 (1973), pp. 937–939. Первая непосредственная визуализация свиткообразного кольца появилась в статье B. J. Welsh, J. Gomacam, and A. E. Burgess, "Three-dimensional chemical waves in the Belousov – Zhabotinskii reaction," *Nature* 304 (1983), pp. 611–614.

Winfrey (1980), pp. 254–257.

Эта фантастическая картинка, а также точные изображения свиткообразных колец приведены в статье S. H. Strogatz, M. L. Prueitt, and A. T. Winfree, “Exotic shapes in chemistry and biology,” *IEEE Computer Graphics and Applications* 4 (1984), pp. 66–69.

A. T. Winfree and S. H. Strogatz, "Singular filaments organize chemical waves in three dimensions. III. Knotted waves," *Physica D* 9 (1983), pp. 333–345.

Обзор математического аппарата, который нужен, чтобы понять структуру свиткообразных волн, приведен в статье J. J. Tyson and S. H. Strogatz, “The differential geometry of scroll waves,” *International Journal of Bifurcation and Chaos* 1 (1991), pp. 723–744.

A.T. Winfree and S. H. Strogatz, “Singular filaments organize chemical waves in three dimensions. IV. Wave taxonomy,” *Physica D* 13 (1984), pp. 221–233; “Organizing centers for three-dimensional chemical waves,” *Nature* 311 (1984), pp. 611–615. Впоследствии были найдены более элегантные доказательства принципа исключения; см. А. Т. Winfree, E. M. Winfree, and H. Seifert, “Organizing centers in a cellular excitable medium,” *Physica D* 17 (1985), pp. 109–115.

Такое отклонение спиральных волн обсуждается в L. Ge et al., “Transition from simple rotating chemical spirals to meandering and traveling spirals,” *Physical Review Letters* 77 (1996), pp. 2105–2108, и в M. Wolrering, R. Girnus, and M. Markus, “Quantification of turbulence in the Belousov-Zhabotinsky reaction by monitoring wave dpi,” *Journal of Physical Chemistry A* 103 (1999), pp. 4034–4037. Важный теоретический вклад был внесен D. Barkley, “Euclidean symmetry and the dynamics of rotating spiral waves,” *Physical Review Letters* 72 (1994), pp. 164–167.

Подборкой современных научных представлений может служить выпуск “Special Focus” журнала *Chaos*, March 1998. См. также A. T. Winfree, “Electrical turbulence in three-dimensional heart muscle,” *Science* 266 (1994), pp. 1003–1006; A. Garfinkel et al., “Quasiperiodicity and chaos in cardiac fibrillation,” *Journal of Clinical Investigation* 99 (1997), pp. 305–314; F.X. Witkowski et al., “Spatiotemporal evolution of ventricular fibrillation,” *Nature* 392 (1998), pp. 78–82; A. Panfilov and A. Pertsov, “Ventricular fibrillation: Evolution of the multiple-wavelet hypothesis,” *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A: Mathematical Physical, and Engineering Sciences* 359 (2001), pp. 1315–1325; V. N. Biktashev et al., “Three-dimensional organisation of reentrant propagation during experimental ventricular fibrillation,” *Chaos, Solitons, and Fractals* 13 (2002), pp. 1713–1733.

A. T. Winfree, “Persistent tangles of vortex rings in excitable media,” *Physica D* 84 (1995), pp. 126–147; J. P. Keener and J. J. Tyson, “The dynamics of scroll waves in excitable media,” *SIAM Review* 34 (1992), pp. 1–39; D. Margerit and D. Barkley, “Selection of twisted scroll waves in three-dimensional excitable media,” *Physical Review Letters* 86 (2001), pp. 175–178. Подробный обзор динамики свиткообразных волн можно найти в исправленном и дополненном издании *The Geometry of Biological Time* (2nd edition, 2001).

A. T. Winfree, “Stable particle-like solutions to the nonlinear wave equations of 3-dimensional excitable media,” *SIAM Review* 32 (1990), pp. 1–53. Увлекательным исследованием из области волновой физики, родственным данному исследованию, является статья М. V. Berry and М. R. Dennis, “Knotted and linked phase singularities in monochromatic waves,” *Proceedings of the Royal Society of London, Series A: Mathematical, Physical, and Engineering Sciences* 457 (2001), pp. 2251–2263.

A. T. Winfree et al., “Quantitative optical tomography of chemical waves and their organizing centers,” *Chaos* 6 (1996), pp. 617–626. Еще один многообещающий подход описан в статье A. L. Cross et al., “Three dimensional imaging of the Belousov – Zhabotinsky reaction using magnetic resonance,” *Magnetic Resonance Imaging* 15 (1997), pp. 719–725.

John Guare, *Six Degrees of Separation* (New York: Vintage Books, 1990).

Ann Oldenburg, "A thousand links to Kevin Bacon: Game calculates actor's connection," *USA Today* (October 18, 1996), p. 5D; Mel Gussow, "Are actors all related? Or is it just Kevin Bacon?" *New York Times* (September 19, 1996), p. C13.

Неизвестный автор, “Media: Six degrees from Hollywood,”
Newsweek (October 11, 1999), p. 6.

David Kirby and Paul Sahre, "Six degrees of Monica," *New York Times* (February 21, 1998), p. A11.

Western Systems Coordinating Council (WSCC), “Disturbance report for the power system outage that occurred on the Western Interconnection on August 10th, 1996 at 1548 PAST,” (October 1996). С этой информацией можно ознакомиться на сайте <http://www.wscce.com>.

Двумя содержательными статьями о наступлении эры генетических и биохимических сетей являются L. H. Hartwell, J. J. Hopfield, S. Leibler, and A. W. Murray, “From molecular to modular cell biology,” *Nature* 402 (1999), pp. C47 – 52, и U. S. Bhalla and R. Lyengar, “Emergent properties of networks of biological signalling pathways,” *Science* 283 (1999), pp. 381–387. Тем, кто хочет получить представление о том, насколько сложными и запутанными могут оказаться такие сети, рекомендую статью K. W. Kohn, “Molecular interaction map of the mammalian cell cycle control and DNA repair systems,” *Molecular Biology of the Cell* 10 (1999), pp. 2703–2734.

Duncan J. Watts and Steven H. Strogatz, “Collective dynamics of ‘small-world’ networks,” *Nature* 393 (1998), pp. 440–442. Более полную презентацию можно найти в книге Duncan J. Watts, *Small Worlds: The Dynamics of Network Between Order and Randomness* (Princeton, New Jersey: Princeton University Press, 1999).

Эта сравнительно новая область научного знания рассматривается в увлекательной и доступной форме в трех недавно вышедших в свет книгах: Mark Buchanan, *Nexus: Small Worlds and the Groundbreaking Science of Networks* (New York: W.W. Norton & Company, 2002); Albert-Lászlo Barabási, *Linked: The New Science of Networks* (Cambridge, Massachusetts: Perseus, 2002); and Duncan J. Watts, *Six Degrees: The Science of a Connected Age* (New York: W.W. Norton & Company, 2003). С обзором, ориентированным на подготовленную аудиторию, можно ознакомиться в статье Steven H. Strogatz, “Exploring complex networks,” *Nature* 410 (2001), pp. 268–276.

T. J. Walker, "Acoustic synchrony: Two mechanisms in the snowy tree cricket," *Science* 166 (1969), pp. 891–894. С подробным обзором синхронного стрекотания у близкородственных видов насекомых можно ознакомиться в статье E. Sismondo, "Synchronous, alternating, and phase-locked stridulation by a tropical katydid," *Science* 249 (1990), pp. 55–58. Эволюционная значимость синхронного «хорового пения» обсуждается в статье M. D. Greenfield, "Synchronous and alternating choruses in insects and anurans: Common mechanisms and diverse functions," *American Zoologist* 34 (1994), pp. 605–615.

Stuart A. Kauffman, “Metabolic stability and epigenesis in randomly constructed genetic nets,” *Journal of Theoretical Biology* 22 (1969), pp. 437–467. Популярное изложение этой темы можно найти в книге Stuart A. Kauffman, *At Home in the Universe: The Search for Lam of Self Organization and Complexity* (Oxford, England: Oxford University Press, 1995).

Nicholas Wade, "Dainty worm tells secrets of human genetic code," *New York Times* (June 24, 1997). Этому червя даже посвящена особая веб-страница: <http://www.nytimes.com/1997/06/24/science/dainty-worm-tells-secrets-of-the-human-genetic-code.html>.

J. G. White, E. Southgate, J. N. Thomson, and S. Brenner, "The structure of the nervous system of *Caenorhabditis elegans*," *Proceedings of the Royal Society of London, Series B: Biological Sciences* 314 (1986), pp. 1–340.

Дискета с полной схемой нервной системы червя *Caenorhabditis elegans* прилагается к каждому экземпляру книги Т. В. Achacoso and W. S. Yamamoto, *AY's Neuroanatomy of C. elegans for Computation* (Boca Raton, Florida; CRC Press, 1992).

Beth Saulnier, “Small world,” *Cornell Magazine* 101 (July/August 1998), pp. 24–29. Гуэйр цитируется на стр. 26.

На удивление пророческая формулировка была предложена Итиэлем де Сола Пул, политологом из МТИ, и Манфредом Кохеном, математиком из IBM, в их совместной статье “Contacts and influence,” *Social Networks* 1 (1978), pp. 1–51. Текст этой статьи был написан в 1958 г. и ходил по рукам ученых-социологов в течение двух десятилетий, прежде чем был опубликован в журнале *Social Networks*. Она вдохновила самого Стенли Милгрэма. Пул и Кохен уяснили принципы этого простого варианта полностью произвольной сети и попытались разобраться со сложностями, порождаемыми кластерингом, однако так и не смогли преодолеть запутанный математический лабиринт. Подробнее об этой проблеме можно прочитать в книге *The Small World*, под редакцией Manfred Kochen (Norwood, New Jersey: Ablex, 1989).

Stanley Milgram, "The small world problem," *Psychology Today* 2 (1967), pp. 60–67. Подчас социология кажется людям не чем иным, как научным вариантом здравого смысла, однако работа Милгрэма опровергает такое мнение. Милгрэм не боялся задавать трудные вопросы, а полученные им результаты были отнюдь не очевидны. Самые знаменитые его эксперименты касались столь непростого вопроса, как повиновение властям. Под предлогом исследования влияния наказания на краткосрочную память человека он предлагал участникам своего эксперимента («учителям») воздействовать чрезвычайно болезненным, как им казалось, электрошоком на других людей («учеников»), повышая напряжение после каждого неправильного ответа на некую словесно-ассоциативную задачу. Разумеется, никакого реального воздействия электрошоком на «учеников» не было; в роли «учеников» выступали актеры, которые изображали ужасные страдания. Результаты эксперимента оказались весьма тревожными. Многие нормальные, на первый взгляд, люди оказались готовы довести других до смерти только потому, что этого требовал от них человек в белом халате. Большинство других экспериментов Милгрэма не были столь жестокими: как правило, они представляли собою некое сочетание игры и театра – что-то наподобие съемки скрытой камерой применительно к социальной психологии. В одном из своих экспериментов Милгрэм отправил своих аспирантов в нью-йоркскую подземку, где они должны были просить пассажиров уступить им место без объяснения причин. Большинство нью-йоркцев оказались на удивление послушными людьми; еще более неожиданным оказалось то, что участники эксперимента (те, кто просил уступить им место) испытывали огромное напряжение. (Когда сам Милгрэм выступил в этой роли, впоследствии он говорил, что «слова буквально застревали у меня в глотке... Я чувствовал, что бледнею. Мне уже не казалось, что это всего лишь игра... Я был готов провалиться сквозь землю».) В ходе другого эксперимента, который был призван проверить силу воздействия толпы тех или иных размеров на человека, он просил участников своего эксперимента стать на тротуаре и пристально всматриваться в окно на шестом этаже офисного здания,

расположенного на противоположной стороне улицы, чтобы узнать, сколько прохожих присоединятся к нему и начнут всматриваться в то же окно. С собранием его эссе и статей – смею вас заверить, что все они чрезвычайно увлекательны и познавательны – можно ознакомиться в книге Stanley Milgram, *The Individual in a Social World: Essays and Experiments*, второе издание, под редакцией John Sabini and Maury Silver (New York: McGraw-Hill, 1992).

Judith S. Kleinfeld, "The small world problem," *Society* 39 (2002), pp. 61–66.

Paul Hoffman, *The Man Who Loved Only Numbers: The Story of Paul Erdos and the Search for Mathematical Truth* (New York: Hyperion, 1998).

Caspar Goffman, “And what is your Erdos number?” *American Mathematical Monthly* 76 (1969), p. 791. Сайт чисел Эрдёша, на котором можно найти немало развлекательной информации с математическим уклоном: <http://www.oakland.edu/~grossman/erdoshp.html>.

Вы можете сыграть «в Кевина Бейкона» в режиме онлайн на сайте <http://www.cs.virginia.edu/oracle/>. Тысяча актеров с самой обширной системой связей перечислены на сайте http://www.cs.virginia.edu/oracle/center_list.html.

H. Sakaguchi, S. Shinomoto, and Y. Kuramoto, “Local and global self-entrainments in oscillator lattices,” *Progress in Theoretical Physics* 77 (1987), pp. 1005–1010.

Соответствующие результаты приведены в главе 9 Watts (1999).

M. Mitchell, J. P. Crutchfield, and P. T. Hraber, “Evolving cellular automata to perform computations – mechanisms and impediments,” *Physics D* 75 (1994), pp. 361–391; James P. Crutchfield and Melanie Mitchell, “The evolution of emergent computation,” *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 92 (1995), pp. 10742–10746.

Соответствующие результаты приведены в главе 7 Watts (1999).

J. Wallinga, K. J. Edmunds, and M. Kretzschmar, "Perspective: Human contact patterns and the spread of airborne infectious diseases," *Trends in Microbiology* 7 (1999), pp. 372–377; M. J. Keeling, "The effects of local spatial structure on epidemiological invasions," *Proceedings of the Royal Society of London, Series B: Biological Sciences* 266 (1999), pp. 859–867; M. Boots and A. Sasaki, "'Small worlds' and the evolution of virulence: infection occurs locally and at a distance," *Proceedings of the Royal Society of London, Series B: Biological Sciences* 266 (1999), pp. 1933–1938.

Randy Stilts, *And the Band Played On: Politics, People, and the AIDS Epidemic* (New York: St. Martins Press, 1987).

Mark Woolhouse and Alex Donaldson, "Managing foot-and-mouth,"
Nature 410 (2001), p. 515.

Mark S. Granovetter, “The strength of weak ties,” *American Journal of Sociology* 78 (1973), pp. 1360–1380. Эта цитата расшифрована с радиопрограммы BBC “Living by Numbers,” которая транслировалась 1 июля 1999 г.

R. Albert, H. Jeong, and A.-L. Barabasi, “Diameter of the World Wide Web,” *Nature* 401 (1999), pp. 130–131. Выполнено гораздо более обширное исследование системы связей во «всемирной паутине». В значительной мере это исследование было стимулировано работой Барабаши и его аспирантов; см. A. Broder et al., “Graph structure in the Web,” *Computer Networks* 33 (2000), pp. 309–320.

Популярным введением в степенные законы во всех их разновидностях может служить книга Manfred Schoeder, *Fractals, Chaos, Power Laws: Minutes from an Infinite Paradise* (New York: W.H. Freeman, 1991).

Степенные законы могут генерироваться по меньшей мере семью разными физическими механизмами. В этом смысле экспериментальное наблюдение степенного закона не является само по себе строгой проверкой любой теории, которая предсказывает его. Доступное обсуждение этой точки зрения можно найти в статье Mark Newman, “Applied mathematics: The power of design,” *Nature* 405 (2000), pp. 412–413.

Albert-Laszlo Barabasi and Reka Albert, “Emergence of scaling in random networks,” *Science* 286 (1999), pp. 509–512.

Обзор таких исследований можно найти в статье Reka Albert and Albert-Laszlo Barabasi, “Statistical mechanics of complex networks,” *Reviews of Modern Physics* 74 (2002), pp. 47–97. Эта статья может также служить превосходным введением в математические методы, используемые в данной области.

R. F. I. Cancho and R. V. Sole, “The small world of human language,” *Proceedings of the Royal Society of London, Series B: Biological Sciences* 268 (2001), pp. 2261–2265.

Чарли Маркус, профессор физики в Гарвардском университете.

R. F. I. Cancho, C. Janssen, and R. V. Sole, "Topology of technology graphs: Small world patterns in electronic circuits," *Physical Review E* 64 (2001), article number 046119 Part 2.

На это свойство безмасштабных сетей впервые указали, по результатам компьютерного моделирования, Reka Albert, Hawoong Jeong, and Albert-Laszlo Barabasi, “Error and attack tolerance of complex networks,” *Nature* 406 (2000), pp. 378–382. Строгая математическая трактовка была разработана (независимо) R. Cohen, K. Erez, D. ben-Avraham, and S. Havlin, “Resilience of the Internet to random breakdowns,” *Physical Review Letters* 85 (2000), pp. 4626–4628, а также D. S. Cattaway, M. E. J. Newman, S. H. Strogatz, and D. J. Watts, “Network robustness and fragility: Percolation on random graphs,” *Physical Review Letters* 85 (2000), pp. 5468–5471.

H. Jeong, S. P. Mason, A.-L. Barabasi, and Z. N. Oltvai, “Lethality and centrality in protein networks,” *Nature* 411 (2001), pp. 41–42.

Nellie Andreeva, “Do the math – It is a small world,” *Business Week* (August 17, 1998), pp. 54–55.

Макс Хаук, в настоящее время директор новой исследовательской программы Forensic Science Initiative университета Западной Вирджинии.

Чтобы составить более полное представление о том, почему его так интересует проблема модных увлечений, см. http://www.edge.org/q2002/q_alda.html.

Anatol Rapoport, "Spread of information through a population with sociostructural bias," *Bulletin of Mathematical Biophysics* 15 (1953), pp. 523–543.

Несмотря на то что это удачное определение было впервые использовано Мортонем Гродансом (Morton Grodans, “Metropolitan segregation,” *Scientific American* 197 [October 1957], pp. 33–41), классической работой по переломному моменту принято считать статью Thomas Schelling, “Dynamic models of segregation,” *Journal of Mathematical Sociology I* (1971), pp. 143–186. И Шеллинг, и Гроданс пытались объяснить внезапное появление у белого населения желания покинуть тот или иной район со смешанным расовым составом, после того как процент афроамериканцев, проживающих в районе, достигал некой критической величины. Самым парадоксальным в данном явлении является то, что вполне безобидное, на первый взгляд, желание отдельно взятого человека проживать в районе, где живут такие же, как он, люди, способно со скоростью снежного кома привести к радикальному и нежелательному социальному результату (тотальной расовой сегрегации). Широкая общественность впервые познакомилась с концепцией переломного момента буквально несколько лет тому назад благодаря книге-бестселлеру Малкольма Гладуэлла: Malcolm Gladwell, *The Tipping Point: How Little Things Can Make a Big Difference* (New York: Little Brown, 2000). Малкольм – великолепный рассказчик, и читателям доставляет истинное удовольствие следить за тем, как он исследует всевозможные «хиты», модные увлечения, социальные движения, эпидемии и прочие явления, которые носят «заразный» характер (в той или иной форме).

M. Granovetter, "Threshold models of collective behavior," *American Journal of Sociology* 83 (1978), pp. 1420–1443.

Duncan J. Watts, “A simple model of global cascades on random networks,” *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 99 (2002), pp. 5766–5771.

Everett M. Rogers, *Diffusion of Innovations*, 4th edition (New York: Free Press, 1995).

С хорошим обзором недавних работ по разным аспектам самоорганизации дорожного движения можно ознакомиться в статье Peter Weiss, “Stop-and-go science,” *Science News* 156 (July 3, 1999), pp. 8–10.

Dirk Helbing and Bernardo Huberman, “Coherent moving states in highway traffic,” *Nature* 396 (1998), pp. 738–740. Популярное изложение этой работы можно найти в статье Robert Kunzig, “The physics of traffic: Curing congestion,” *Discover* (March 1999), pp. 31–32.

B. S. Kerner and H. Rehborn, "Experimental properties of phase transitions in traffic flow," *Physical Review Letters* 79 (1997), pp. 4030–4033.

H. Y. Lee, H.-W. Lee, and D. Kim, “Onset of synchronized traffic flow on highways and its dynamic phase transitions,” *Physical Review Letters* 81 (1998), pp. 1130–1133.

Z. Neda, E. Ravasz, T. Vicsek, Y. Brechet, and A.-L. Barabasi, “The sound of many hands dapping,” *Nature* 403 (2000), pp. 849–850; Z. Neda, E. Ravasz, Y. Brechet, T. Vicsek, and A.-L. Barabasi, “Physics of the rhythmic applause,” *Physical Review E* 61 (2000), pp. 6987–6992. С популярным изложением этой темы можно ознакомиться в статье Josie Glausiusz, “The mathematics of applause,” *Discover* (July 2000), p. 32.

Jonathan Rauch, "Seeing around corners," *The Atlantic Monthly* (April 2002), pp. 35–48.

Представления о влиянии фаз Луны на поведение человека полностью развенчаны в сборнике I. W. Kelly, James Rotton, and Roger Culver, "The moon was full and nothing happened: A review of studies on the moon and human behavior and human belief," в The Outer Edge, под редакцией J. Nickell, B. Kan and T. Genoni (Amherst, New York CSICOP, 1996). С объективным и беспристрастным анализом соответствующих данных можно ознакомиться в интернете, обратившись по ссылке <http://faculty.washington.edu/chudler/moon.html>; дополнительную информацию, развенчивающую миф о влиянии фаз Луны на поведение человека, можно найти в интернете, обратившись по ссылке <http://skepdic.com/fullmoon.html>.

Представления о биоритмах обсуждаются (и развенчиваются) в книге А. Т. Winfree, *The Timing of Biological Clock* (New York: Scientific American Books, 1987), pp. 6–8.

Carl G. Jung, *Synchronicity: An Acausal Connecting Principle*, в переводе R. F. C Hull; Bollingen Series (Princeton, New Jersey: Princeton University Press, 1973).

P. Diaconis and F. Mosteller, “Methods for studying coincidences,” *Journal of the American Statistical Association* 84 (1989), pp. 853–861. Подробный анализ этого вопроса можно также найти в интернете, обратившись по ссылке <http://www.csicop.org/si/9809/coincidence.html>.

Norbert Wiener, *Nonlinear Problems in Random Theory* (Cambridge, Massachusetts: MIT Press, 1958), pp. 71–72, и *Cybernetics*, p. 198.

Janet Snyder, “Monster TV cartoon illness mystifies Japan,” *Reuters* (December 17, 1997). С анализом этого случая в медицинской литературе можно ознакомиться в статье T. Takahashi and Y. Tsukahara, “Pocket Monster incident and low luminance visual stimuli: Special reference to deep red flicker stimulation,” *Acta Paediatrica Japonica* 40 (1998), pp. 631–637. Ссылки на сведения об этом инциденте, содержащиеся в интернете, можно найти здесь: <http://www.virtualpet.com/vp/farm/pmonster/seizures/seizures.html>.

Превосходную информацию общего характера о фоточувствительной эпилепсии можно найти здесь: <http://www.epilepsytoronto.org/people/eaupdate/vol9-3.html>.

Двумя популярными обзорами этой достаточно спорной темы являются статьи Bruce Bower, “All fired up: Perception may dance to the beat of collective neuronal rhythms,” *Science News* 153 (February 21, 1998), pp. 120–121, и B. Schechter, “How the brain gets rhythm,” *Science* 274 (1996), pp. 339–340.

C. von der Malsburg, “The what and why of binding: The modeler’s perspective,” *Neuron* 24 (1999), pp. 95–104. Проблеме связывания посвящен весь этот выпуск журнала *Neuron* (сентябрь 1999 г.). Оригинальную статью Кристофа фон дер Мальсбурга, опубликованную в 1981 г., найти очень трудно, но она перепечатана в сборнике *Models of Neural Networks II*, под редакцией E. Domany, J. L. van Hemmen, and K. Schuhen (Berlin: Springer-Verlag, 1994).

Цитируется в статье В. Schechter, “How the brain gets rhythm,” *Science* 274 (1996), pp. 339–340.

C. M. Gray, A. K. Engel, P. Konig, and W. Singer, "Oscillatory responses in cat visual cortex exhibit inter-columnar synchronization which reflects global stimulus properties," *Nature* 338 (1989), pp. 334–337.

Введением в математические загадки, которые касаются синхронизма, охватывающего обширные области мозга, а также источником сведений о возможных способах решения этих загадок, могут служить статьи Nancy Kopell, “We got rhythm: Dynamical systems of the nervous system,” *Notices of the American Mathematical Society* 47 (2000), pp. 6–16, и Barry A. Cipra, “It’s got a beat, and you can think to it,” *SIAM News* 34 (April 2001), p. 1-&.

Jurgen Fell et al., “Human memory Formation is accompanied by rhinal-hippocampal coupling and decoupling,” *Nature Neuroscience* 4 (2001), pp. 1259–1264.

Oliver Sacks, *The Man Who Mistook His Wife for a Hat* (New York: Simon & Schuster, 1988).

Eugenio Rodriguez et al., "Percept Don's shadow: Long-distance synchronization of human brain activity," *Nature* 397 (1999), pp. 430–433.

Walter J. Freeman, "The physiology of perception," *Scientific American* 264 (February 1991), pp. 78–85. Эта статья может также служить весьма доступным изложением новаторской работы Фримена, который предоставил некоторые из первых экспериментальных свидетельств, увязывающих мозговые ритмы с восприятием.

Christof Koch and Francis Crick, “The zombie within,” *Nature* 411 (2001), p. 893.