



NATURA CUPIDITATEM INGENUIT HOMINI VERI VIDENDI
Marcus Tullius Cicero
(Природа наделила человека стремлением к познанию истины)

Мысли Об Истине

Альманах «**МОИ**»
Электронное издание, ISBN 9984-688-57-7

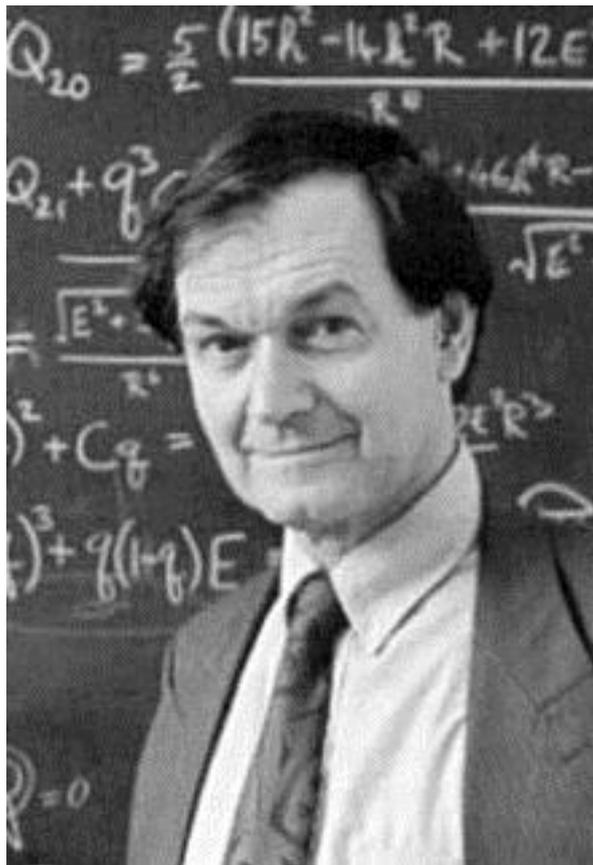
Альманах «Мысли об Истине» издается для борьбы с лженаукой во всех ее проявлениях и в поддержку идей, положенных в основу деятельности Комиссии РАН по борьбе с лженаукой и фальсификацией научных исследований. В альманахе публикуются различные материалы, способствующие установлению научной истины и отвержению псевдонаучных заблуждений в человеческом обществе.

Альманах издается с 8 августа 2013 года
Настоящая версия тома выпущена **2016-06-25**

© 2014 Марина Ипатьева (оформление и комментарии)

Файл PENRO4

<http://vekordija.narod.ru/R-PENRO4.PDF>



Roger Penrose

Роджер Пенроуз. «Новый Разум Короля»

(Продолжение; предыдущее в файле {PENRO3 = МОИ [№ 15](#)})

Глава 7. Космология и стрела времени

§7.1. Течение времени

Главным для нашего осознания бытия является ощущение движения времени. Нам кажется, что мы всегда движемся вперед, из определенного прошлого в неопределенное будущее. Мы чувствуем, что прошлое позади, и с ним уже ничего нельзя поделать. Оно неизменно и, в определенном смысле, уже «не с нами». То, что мы знаем в данный момент о прошлом, может брать начало в наших записях, рождаться из наших воспоминаний или подтверждаться иными свидетельствами – но в любом случае мы не склонны подвергать сомнению реальность прошлого. Прошлое является для нас чем-то совершенно определенным и не может стать (сейчас) другим. Что было – то было, и теперь уже ни мы, ни кто-либо другой не в силах ничего изменить! Будущее, с другой стороны, выглядит еще неопределенным. Оно может проявить себя и так и этак. Возможно, что этот «выбор» полностью определен физическими законами; а, возможно, отчасти и нашими собственными решениями (или Богом) – но в любом случае этот выбор, кажется, еще только предстоит сделать. То, что есть в данный момент – это всего лишь потенциальные возможности, один из вероятных вариантов будущего.

Каждый миг, когда мы осознаем течение времени, наиболее близкая часть необозримого и кажущегося неопределенным будущего непрерывно превращается в настоящее, и, таким образом, добавляет свою строку в анналы прошлого. Иногда нам кажется, что мы сами были лично «ответственными» за какое-то действие, повлиявшее на конкретный выбор именно того возможного будущего, которое реализовалось на самом деле и стало необратимым в реальности прошлого. Но чаще мы чувствуем себя пассивными – впрочем, весьма благодарными за такое освобождение от ответственности – наблюдателями того, как неумолимо свершившееся прошлое расширяет свои рамки за счет неопределенного будущего.

Как ни странно, физика рисует нам сегодня совершенно другую картину. Все основные уравнения физики симметричны во времени. Они оказываются одинаково справедливыми как для одного направления времени, так и для другого. Будущее и прошлое, с точки зрения физики, совершенно равноправны. Законы Ньютона, уравнения Гамильтона, уравнения Максвелла, общая теория относительности Эйнштейна, уравнение Дирака, уравнение Шрёдингера – все они, в действительности, остаются неизменными при обращении направления времени (т.е. замены координаты t , представляющей время, на $-t$). Вся классическая механика, вместе с U-частью квантовой, полностью обратима во времени. Может возникнуть вопрос о том, обратима ли R-часть квантовой механики. Подробно мы обсудим это в следующей главе, а пока давайте ограничимся соображениями «здравого смысла» и будем считать, что операция R, несмотря на свой вид, также должна быть взята симметричной во времени (см. Ааронов, Бергманн, Лебовиц [1964]). В этом случае нам, по всей видимости, придется продолжить где-нибудь в другом месте поиски той области, в которой наши физические законы устанавливали бы различие между прошлым и будущим.

Перед тем, как отправиться в путь, имеет смысл немного задержаться еще на одном озадачивающем несоответствии между нашим субъективным восприятием времени и представлениями современной физики. Дело в том, что, согласно специальной теории относительности, такого понятия, как «сейчас», на самом деле вообще не существует. Из того, что мы имеем в этой теории, наилучшим приближением к нему было бы «пространство одновременных событий» наблюдателя в пространстве-времени, показанном на рис. 5.21 {МОИ [№ 15](#) на с. 46} – но оно, однако, зависит от движения наблюдателя! «Сейчас» для одного

наблюдателя совсем не то же самое, что «сейчас» для другого.¹ Исследуя два события A и B в пространстве-времени, один наблюдатель (U) может заключить, что событие B лежит в фиксированном прошлом, а событие A – в неопределенном будущем; в то время как для второго наблюдателя (V), A может оказаться в фиксированном прошлом, а B – в неопределенном будущем (рис. 7.1)! Мы не можем утверждать, что какое-либо из событий A или B остается неопределенным, в то время как другое из них уже определено.²

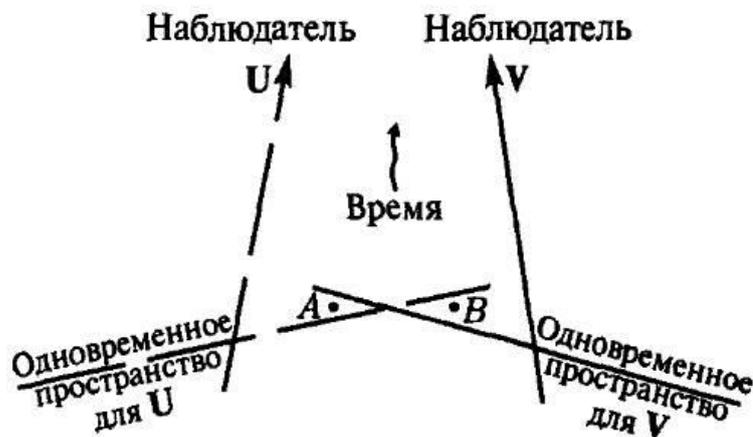


Рис. 7.1. Может ли время действительно «течь»? Для наблюдателя U , B может находиться в «фиксированном» прошлом, в то время как A лежит еще в «неопределенном» будущем. Наблюдатель V придерживается противоположной точки зрения!

Вернемся к рассуждениям на с. 168 и рис. 5.22. Два человека разминулись на улице; для одного из них космическая флотилия Андромеды уже отправилась в путешествие, в то время как для другого решение о том, состоится путешествие или нет, еще даже не принято. Возможно ли это? Ведь если хотя бы один из людей уже знает, что решение было принято, тогда, казалось бы, никакой неопределенности здесь быть не может. Запуск космической флотилии – реальность. На самом деле, ни один из этих людей в момент наблюдения еще не может что-либо знать о запуске. Они узнают о нем позднее, когда наблюдения с Земли подтвердят, что флотилия действительно уже в пути. Тогда они могут еще раз сопоставить свои прошлые наблюдения³ и прийти к заключению, что во время наблюдения для одного из них решение о запуске лежало в неопределенном будущем, тогда как для другого, – в определенном прошлом. Имеет ли смысл, в таком случае, говорить о какой-либо неопределенности будущего? А может быть будущее для них обоих было уже изначально «фиксированным»?

Складывается впечатление, будто всякая определенность чего бы то ни было неизбежно приводит к определенности пространства-времени в целом! В этом случае вовсе нет никакого

¹ Некоторые «ревностные поборники» релятивизма могли бы предпочесть использовать световые конуса наблюдателей, а не их пространства одновременных событий. Однако, все сделанные нами заключения от этого не изменятся.

² **В.Э.:** То, что для наблюдателей U и V нет общего мнения об одновременности – и то, что события A и B оказываются для одного в прошлом, для другого в будущем, – это понятно, и иначе в общем-то и быть не должно, раз «одновременное пространство» (изображенное Пенроузом как прямая линия) представляет собой просто потенциальный продукт мозговых программ данного наблюдателя (как это вытекает из Веданской теории {с.10 МОИ № 15}). Но я думаю, что существует и «абсолютная одновременность», которая позволила бы определить, какая из точек A и B «на самом деле» более ранняя (или обе одновременны). Эта одновременность определяется расстоянием точек A и B до точки Большого взрыва в пространстве Минковского {с.47 МОИ № 15} (возможно, как-то скорректированным согласно общей теории относительности Эйнштейна с учетом скопления масс – гравитации – или т.п.). Но я не настаиваю на этом категорически, потому что это вообще-то уже не область Веданской теории и «в физику я не вмешиваюсь».

³ После первого просмотра напечатанного варианта мне вдруг пришло в голову, что оба человека должны были умереть задолго до этого. «Сопоставить свои наблюдения», в принципе, могли бы их отдаленные потомки (до которых вся информация о возникшем когда-то споре дошла бы, передаваясь из поколения в поколение).

«неопределенного» будущего. Всё пространство-время должно быть изначально фиксированным и никакой неопределенности просто нет места. Кажется, именно так думал и сам Эйнштейн (см. Пайс [1982], с. 444). Следуя этой логике, можно заключить, что нет и течения времени.⁴ Остается только «пространство-время», в котором нет места будущему, в чьи «владения» неумолимо вторгается определенное прошлое! (Читатель может в этом месте задаться вопросом о роли квантово-механических «неопределенностей». Я вернусь к вопросам, навеянным квантовой механикой, в следующей главе. Сейчас будет лучше проводить все рассуждения в рамках чисто классической картины.)

Мы видим, что налицо впечатляющие несоответствия между нашим субъективным ощущением потока времени и тем, как представляют нам физическую реальность наши (удивительно точные) теории. Эти несоответствия, скорее всего, свидетельствуют о существовании иных принципов, которые, по-видимому, и должны лежать глубоко в основе наших субъективных ощущений – предполагая (как мне кажется), что эти принципы могут быть адекватно выражены на языке некоторой физической теории. Во всяком случае, представляется бесспорным, что какая бы теория ни работала, она должна нести в себе существенно асимметричную во времени составляющую, т.е. должна, так или иначе, отделять прошлое от будущего.

Но если уравнения физики никак не различают, как кажется, прошлое и будущее, и если даже сама идея «настоящего» так плохо согласуется с относительностью – тогда в какой же части мироздания нам следует искать ту область, где физические законы в большей степени соответствуют нашему восприятию мира? К счастью, если признаться честно, несоответствия не столь уж катастрофичны, как могло бы показаться. Наша физическая картина мира и в самом деле содержит некоторые фундаментальные составляющие, отличные от простых эволюционных уравнений, и при этом некоторые из них действительно несут в себе временную асимметрию. Наиболее важная из этих составляющих носит название «второго начала термодинамики». Давайте попробуем разобраться, о чем в данном случае идет речь.

§7.2. Неумолимое возрастание энтропии

Представим себе стакан воды, стоящий на самом краю стола. Если его слегка подтолкнуть, он, скорее всего, упадет на пол, наверняка разобьется вдребезги на множество осколков, а вода расплескается повсюду, возможно, частично поглотившись ковром или просочившись в щели между половицами. Наш стакан воды в этой ситуации лишь добросовестно следует уравнениям физики. Ньютоновское описание оказывается справедливым здесь в полной мере. Каждый из атомов в стекле и в воде подчиняется законам Ньютона (рис. 7.2). А теперь попробуем прокрутить эту картину в обратном направлении. В силу обратимости во времени законов Ньютона, вода могла бы также легко истечь из ковра и из щелей в половицах, заполнить стакан, который в это время ловко собирал бы себя из множества отколовшихся осколков, а затем всё это могло запрыгнуть на высоту стола и устроиться в равновесии на его краю. И всё это, так же как и первоначальный процесс, происходило бы в полном соответствии с законами Ньютона!

Читатель, быть может, спросит, откуда берется энергия, поднявшая стакан с пола на стол. Ответить на этот вопрос совсем несложно, поскольку, в то время, когда стакан падает со стола, энергия, которую он приобретает в процессе падения, должна куда-то деваться. На самом деле, энергия падающего стакана переходит в тепло. Атомы в осколках стакана, в воде, в ковре и половицах после удара стакана о пол будут хаотически колебаться чуть-чуть быстрее, чем до удара, т.е. осколки стакана, вода, ковер и половицы будут чуточку горячее, чем они были раньше (если пренебречь возможной потерей тепла за счет испарения, которое, однако, в принципе тоже обратимо). В силу закона сохранения энергии эта тепловая энергия будет в точности равна той,

⁴ **В.Э.:** Так оно и есть – если считать наш мир абсолютно детерминированным (как считаю я – и как, видимо, считал Эйнштейн). Тогда все события, и прошлые и будущие, «существуют одновременно» – но только не для нас, а для такого наблюдателя, который находится ВНЕ нашего пространства-времени (хотя бы того же Демона Лапласа {с.23 МОИ [№ 15](#)}). Но и для него есть некоторая разница между «прошлым», «настоящим» и «будущим» нашей Вселенной. Для него это похоже на просмотр нами какого-нибудь кинофильма в компьютере. Там – на диске – весь фильм есть уже целиком (и я в принципе могу заглянуть в любое его место). Но в то же время, когда я его проигрываю естественным ходом, некоторый «лазерный луч» скользит по этому диску, отделяя то, «что уже было» от того, «что еще будет». Так наша Вселенная должна выглядеть для наблюдателя, находящегося ВНЕ ее.

которая теряется стаканом с водой при его падении со стола. Таким образом, этой маленькой порции тепловой энергии было бы как раз достаточно, чтобы поднять стакан обратно на стол! Очень важно не забыть учесть вклад тепловой энергии в общий энергетический баланс. Закон сохранения энергии, в котором учитывается также и тепловая энергия, носит название первого начала термодинамики. Этот закон, будучи следствием ньютоновской механики, симметричен во времени. Он не накладывает каких-либо ограничений на стакан и воду, которые бы запрещали стакану собирать себя, заполняться водой и таким вот чудесным образом запрыгивать обратно на стол.



Рис. 7.2. Законы механики обратимы во времени; однако последовательность событий в направлении справа налево никогда не наблюдается, в то время как последовательность слева направо была бы вполне обычной

Причина, по которой мы не наблюдаем ничего подобного в реальности, заключается в том, что «тепловое» движение атомов в осколках стекла, воде, половицах и ковре является совершенно беспорядочным, так что подавляющая часть атомов будет двигаться во всех возможных направлениях. Необходима невероятно точная координация их движений для того, чтобы восстановить стакан, вместе со всей собранной в него с пола водой, и аккуратно забросить его на стол. Можно даже утверждать, что такие слаженные движения невозможны. Точнее говоря, подобная скоординированность могла бы возникнуть только благодаря удивительной случайности,⁵ которую мы всё равно отнесли бы к разряду «чудес», даже если бы она и произошла в действительности!

Однако для другого направления времени такая согласованность движений атомов является вполне нормальной. Ведь мы почему-то не относим в разряд случайных те ситуации, в

⁵ В.Э.: Нет, не только благодаря случайности. Рассмотрим «самую простую вселенную», которая только возможна. В ней одна размерность пространства и две частицы. Пусть сначала пространство будет евклидовой прямой, а частицы летят навстречу друг дружке. Вот они ударяются и разлетаются каждая в свою сторону. Больше они никогда не встретятся. Процесс необратим – энтропия возрастает бесповоротно. А теперь представим себе, что это одномерное пространство замкнуто и образует окружность. Вот на правой стороне круга частицы ударились одна о другую и разлетелись в разные стороны – энтропия растет. Но когда они прошли вертикальный диаметр круга, они начинают опять сближаться – на противоположной стороне круга. Энтропия уменьшается, частицы сближаются, пока опять не происходит столкновение – новый «Большой взрыв». Вместо пары частиц можно вообразить мириады частиц, а вместо окружности – физическое пространство (замкнутое). Таким образом, можно представить себе такую модель Вселенной, в которой «второе начало термодинамики» является «временным законом» физики и сменится на противоположное «начало» тогда, когда «лазерный луч», считывающий с общего пространства-времени «настоящее», перейдет некоторый «максимум» этого пространства. Я не говорю, что так оно и есть, но я говорю только, что в принципе можно представить себе и такую ситуацию, когда разбитый стакан летит вверх на стол не потому, что произошла «удивительная случайность», а потому, что мы находимся «на другой стороне шара пространства-времени». Причем заметьте, что здесь причина и следствие НЕ меняются местами, как это описывает Пенроуз. Причины остаются причинами – одна и та же инерция гонит вперед частицы, но они перестают разлетаться и начинают слетаться потому, что такова «геометрия пространства».

которых частицы движутся скоординированным образом после некоторого крупномасштабного изменения физического состояния (в нашем случае – разбивания стакана и расплескивания воды), а не до такого изменения. Движение частиц после подобного события как раз и должно быть в высокой степени согласованным, поскольку сама природа этого движения такова, что если бы мы могли в точности обратить движение каждого отдельного атома, результирующее движение было бы именно таким, какое необходимо для восстановления, заполнения и подъема стакана в его исходное положение.

Высокая координация движения вполне приемлема и даже естественна в том случае, когда оно является следствием крупномасштабного изменения, а не его причиной. Но слова «причина» и «следствие», так или иначе, затрагивают вопрос о временной асимметрии. Используя эти термины в нашем повседневном разговорном языке, мы обычно подразумеваем, что причина должна предшествовать следствию. Но если мы пытаемся осознать физическое различие между прошлым и будущим, нам необходимо быть предельно осторожными, чтобы невольно не привнести в рассуждения наши житейские представления об этих понятиях. Я должен предупредить читателя, что избежать этого чрезвычайно трудно, но нам всё же стоит попробовать. Мы должны попытаться использовать слова таким образом, чтобы они заранее не предreshали вопроса о физическом различии прошлого и будущего. В частности, если обстоятельства будут к тому располагать, нам придется иногда рассматривать причины некоторых явлений лежащими в будущем, а следствия – лежащими в прошлом! Детерминистские уравнения классической физики (или операция U в квантовой физике) никоим образом не выделяют эволюцию в направлении будущего. Они могут быть столь же хорошо применимы и для описания эволюции в прошлое. Будущее определяет прошлое точно так же, как и прошлое определяет будущее. Мы можем каким-либо образом зафиксировать некоторое состояние системы в будущем и затем использовать его для определения состояния системы в прошлом. Если, применяя наши уравнения к системе с обычным направлением времени в сторону будущего, мы можем считать прошлое причиной, а будущее – следствием, то в случае, когда мы также правомерно используем эти уравнения для описания эволюции в прошлое, мы будем вынуждены относить будущее к «причине», а прошлое – к «следствию».

Есть, однако, еще один момент, связанный с использованием терминов «причина» и «следствие», который, на самом деле, никак не зависит от того, какие события мы относим к прошлому, а какие – к будущему. Вообразим себе гипотетическую вселенную, в которой справедливы те же симметричные во времени классические уравнения, что и в нашей вселенной, но в которой явления обычного порядка (такие, как разбивание и расплескивание стакана воды) сосуществуют с их обращениями во времени. Предположим, что наряду с обычными явлениями, стаканы воды иногда действительно собирают себя из отколовшихся кусочков, чудесным образом заполняются расплескавшейся водой и затем запрыгивают на стол; предположим также, что иногда, приготовленная яичница-болтуня снова превращается в исходный полуфабрикат, желток в ней отделяется от белка и, наконец, она запрыгивает обратно в сломанную яичную скорлупу, которая становится совершенно целой, вновь заключая в себя всё свое содержимое; что кусочки сахара могут восстанавливаться из растворенного сахара в подслащенном кофе и затем самопроизвольно выпрыгивать из чашки прямо в чью-нибудь руку. Если бы мы жили в мире, в котором подобные вещи относились бы к разряду повседневных явлений, мы, очевидно, могли бы приписать «причины» таких событий не фантастической случайности, связанной с коррелированным поведением отдельных атомов, но некоторому «телеологическому воздействию», благодаря которому самовосстанавливающиеся объекты стремятся в конце концов достичь желаемой макроскопической конфигурации. «Смотрите! – могли бы воскликнуть мы. – Это повторяется. Та смесь намеревается собрать себя в другой стакан воды!» Мы, разумеется, можем принять точку зрения, согласно которой атомы направили сами себя именно так, потому что именно таким способом можно получить стакан воды на столе. Стакан на столе был бы в этом случае причиной, а явно беспорядочная смесь атомов на полу – «следствием» – несмотря на то, что это «следствие» теперь существует во времени раньше, чем причина. Точно также, внезапное упорядочивание движения атомов в приготовленной яичнице-болтуне не является «причиной» ее запрыгивания в целую яичную скорлупу, но есть следствие этого будущего состояния; и кусок сахара собирается и выскакивает из чашки не «потому, что» атомы движутся с такой необычайной точностью, но благодаря тому, что кто-то – находящийся в будущем – будет позднее держать этот кусок сахара в своей руке!

Конечно, мы не наблюдаем ничего подобного в нашем мире – или, лучше сказать, что мы не обнаруживаем одновременного сосуществования подобных вещей с явлениями обычного порядка. Ведь если бы всё, что мы видели, было бы явлениями обратного порядка, подобного описанному выше, у нас не было бы проблем. Нам нужно было бы просто поменять местами «прошлое» и «будущее», «до» и «после» и т.д. во всех наших описаниях. Время следовало бы тогда считать текущим в направлении обратном по отношению к первоначально выбранному, и такой мир мог бы описываться так же, как и наш. Здесь я, однако, хочу рассмотреть другую возможность, в точности согласующуюся с симметричными во времени уравнениями физики, а именно – когда разбивающийся и самовосстанавливающийся стаканы могут сосуществовать.

В этом мире мы были бы не в состоянии восстановить привычные описания событий одним только изменением наших соглашений о направлении движения времени. Конечно, наш мир оказывается не таким – но почему? Чтобы разобраться с этим, я для начала попросил бы вас представить такой мир и подумать над тем, как описывать события, происходящие в нем. Согласитесь, что в подобном мире мы могли бы хорошо описывать крупные макроскопические конфигурации – такие как полные стаканы воды, неразбитые яйца, или кусочки сахара в руке, являющиеся «причинами»; и микроскопические, быть может, тонко скоррелированные движения отдельных атомов, представляющие «следствия» – независимо от того, лежат ли «причины» в прошлом или будущем своих «следствий».

Почему же в мире, в котором живем мы, именно причины всегда предшествуют следствиям или, иными словами, почему точно скоординированные движения частиц возникают только после крупномасштабных изменений физического состояния, а не перед ними? Чтобы лучше разобраться в таком положении дел, мне нужно ввести понятие энтропии. Грубо говоря, энтропия системы есть мера ее явного беспорядка. (Позже я дам более точное определение.) Таким образом, разбитый стакан и разлитая по полу вода находятся в состоянии с большей энтропией, чем целый заполненный водой стакан на столе. Приготовленная яичница-болтуня обладает большей энтропией, чем свежее неразбитое яйцо; подслащенный кофе обладает большей энтропией, чем кофе с растворенным куском сахара в нем. Подобные низкоэнтропийные состояния выглядят как бы «специально упорядоченными» некоторым явным образом, а высокоэнтропийные состояния – менее «специально упорядоченными».

Здесь важно подчеркнуть, что говоря о «специальности» (или, скажем, «особенности») состояния с низкой энтропией, мы, на самом деле, имеем ввиду именно явную «специальность». Если этого не оговорить, то при более детальном рассмотрении мы могли бы увидеть, что высокоэнтропийные состояния в подобных ситуациях будут такими же «специально упорядоченными», как и низкоэнтропийные, благодаря чрезвычайно точной координации движений отдельных частиц. Например, кажущееся случайным движение молекул воды, просочившейся между половицами после того, как стакан разбился, является, на самом деле, вполне специальным: эти перемещения настолько точны, что если их обратить, то получится то самое исходное низкоэнтропийное состояние, в котором восстановленный стакан покоится на столе. (Это должно быть именно так, поскольку обращение всех этих движений полностью соответствует обращению направления времени, в результате которого стакан, разумеется, восстановил бы себя и запрыгнул обратно на стол.) Но подобное скоординированное движение всех молекул воды – совсем не та «специальность», которую мы имеем ввиду, говоря о низкой энтропии. Энтропия относится к явному беспорядку. Порядок же, относящийся к точной координации движений частиц, не есть явный порядок, и потому он не приводит к понижению энтропии системы. Таким образом, упорядочивание молекул разлитой жидкости, в данном случае, не учитывается, и ее энтропия остается высокой. В то же время, явный порядок в восстановленном стакане воды дает низкое значение энтропии. Всё дело здесь в том, что с конфигурацией восстановленного и заполненного стакана воды совместимо относительно немного возможных движений частиц; в то время как движений, совместимых с конфигурацией слегка нагретой воды, протекающей между щелями в половицах, – существенно больше.

Второе начало термодинамики гласит, что энтропия изолированной системы возрастает со временем (или остается неизменной в случае обратимых систем). Теперь становится очевидным, что мы совершенно правильно не рассматриваем скоординированное движение частиц как признак низкой энтропии, поскольку в этом случае «энтропия» системы, в соответствии с ее определением, всегда оставалась бы постоянной. Понятие энтропии должно быть связано только с явным беспорядком. Для системы, изолированной от всей остальной вселенной, ее полная энтропия возрастает, так что, если подобная система начинает свою эволюцию из состояния с

некоторой явной упорядоченностью, то с течением времени этот порядок неизбежно разрушается и присущие ей особые свойства превращаются в «бесполезно» скоординированное движение частиц.

Может показаться, что второе начало действует как некий предвестник упадка, поскольку оно утверждает существование безжалостного универсального физического принципа, напоминающего нам о том, что всякое упорядоченное состояние подвержено непрерывному разрушению. Позднее мы увидим, что это пессимистическое заключение справедливо не всегда!

§7.3. Что такое энтропия?

Каково же точное определение энтропии физической системы? Мы уже знаем, что это некая мера явного беспорядка – но что означают такие не очень строгие понятия, как «явный» и «беспорядок»? Может возникнуть мысль, что энтропия – это величина, вообще не имеющая четкого физического определения. Кроме того, имеется еще одно обстоятельство, связанное со вторым началом термодинамики, которое еще в большей степени усиливает ощущение нестрогости обсуждаемого понятия: энтропия не остается постоянной и возрастает только в так называемых необратимых системах. Но что значит «необратимых»? На микроскопическом уровне, когда мы принимаем в расчет движения всех частиц, все системы оказываются обратимыми! Обычно мы полагаем, что падение стакана со стола и его разбивание, разбалтывание яйца или растворение сахара в кофе – суть процессы необратимые; в то же время, столкновения друг с другом небольшого числа частиц – процесс обратимый, так же, впрочем, как и вообще любой процесс, в котором путем некоторых ухищрений нам удастся избежать превращения кинетической энергии в тепло. Термин «необратимый» служит нам, главным образом, лишь для указания на то, что проследить за микроскопическими движениями отдельных частиц или управлять ими было невозможно. Собственно, эти неконтролируемые движения и есть «тепло». Таким образом, может создаться впечатление, будто бы понятие «необратимости» обязано своим происхождением чисто «практическим» соображениям. Мы, конечно, и в самом деле не можем на практике отделить белок от желтка в разболтанном яйце, хотя подобная процедура и не противоречит законам механики. Поэтому возникает вопрос: а не будет ли все-таки наше определение энтропии зависеть от того, какие процессы практически осуществимы, а какие – нет?

Как уже говорилось в главе 5 {МОИ № 15}, физическое понятие энергии, так же как и импульса, и углового момента, имеют вполне четкие математические определения в терминах положений частиц, их скоростей, масс и действующих на них сил. А можем ли мы сходным образом определить понятие «явного беспорядка», которое, в свою очередь, необходимо для придания точного математического смысла понятию энтропии? Очевидно, что «явное» для одного наблюдателя может не быть таковым для другого. И вообще, не находится ли это «явное» в прямой зависимости от точности, с которой тот или иной наблюдатель способен изучать данную систему? Наблюдатель, располагающий более точной измерительной аппаратурой, способен получить намного больше информации о микроскопическом строении системы, чем другой наблюдатель, использующий менее совершенное оборудование. В этом случае один наблюдатель сможет обнаружить больше «скрытого порядка», чем другой, и он, разумеется, зафиксирует более низкий уровень энтропии данной системы, чем его коллега. Может даже сложиться впечатление, что и личные эстетические вкусы каждого из наблюдателей способны оказать решающее влияние на их выбор между «порядком» или «беспорядком». Предположим, что мы пригласили некоего художника, для которого россыпь осколков стекла на полу окажется настоящим произведением «искусства упорядочивания» по сравнению с безобразным, отвратительным стаканом, банально покоящимся на краю стола! Понизится ли и в самом деле энтропия системы после ее оценки наблюдателем с таким тонким артистическим восприятием?

Несмотря на все проблемы, связанные с субъективностью некоторых наших суждений, понятие энтропии оказывается замечательным образом применимо всякий раз, когда речь идет о точном научном описании – каковым и является само понятие энтропии! Причина этого заключается в том, что изменения, вызванные переходами системы от порядка к беспорядку, если их выразить в терминах микроскопических положений и скоростей частиц, поистине колоссальны и (почти во всех случаях) превосходят любые заметные на глаз отличия точек зрения на то, что считать «явным порядком» на макроскопическом уровне, а что – нет. В частности, любое заключение художника или ученого, относительно того, какой из стаканов обладает бóльшим

порядком – целый или разбитый, практически не имеет никакого отношения к их реальной энтропии. Намного больший вклад в энтропию дает случайное движение частиц, вызывающее незначительное нагревание стакана и воды, и растекание воды после удара стакана с водою о пол.

Теперь, чтобы точно сформулировать понятие энтропии, вернемся к идее фазового пространства, введенного в главе 5. Напомним, что фазовое пространство системы имеет, как правило, гигантское число измерений, а каждая его точка изображает с максимальной детализацией мгновенную конфигурацию системы. Подчеркнем, что «одна-единственная» точка фазового пространства определяет одновременно положения и импульсы всех отдельных частиц, составляющих рассматриваемую физическую систему. Всё, что нам необходимо сейчас для определения энтропии, это сгруппировать вместе все те микроскопические состояния, которые выглядят совершенно одинаковыми с точки зрения их явных (т.е. макроскопических) свойств. Другими словами, нам необходимо разбить наше фазовое пространство на области (рис. 7.3), в каждой из которых различные точки изображают физические системы, отличающиеся на микроскопическом уровне расположением и скоростями частиц, но которые при этом совершенно неразличимы с точки зрения макроскопического наблюдателя, для которого все точки любой такой конкретной области будут описывать одну и ту же физическую систему. Подобное разбиение фазового пространства на области называется гранулированием фазового пространства.

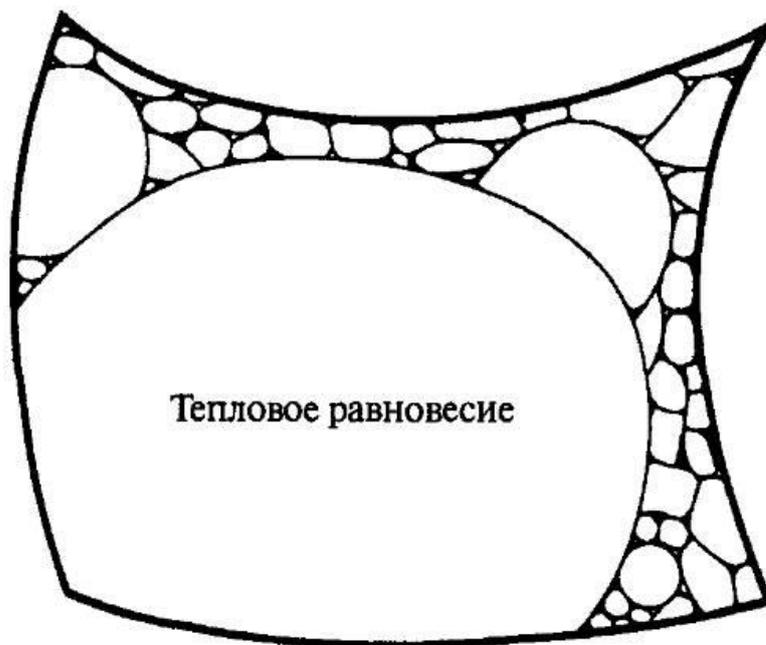


Рис. 7.3. Гранулирование фазового пространства на области, соответствующие макроскопически неотличимым состояниям. Энтропия пропорциональна логарифму фазового объема

После такого группирования некоторые из областей могут приобрести подавляюще огромные размеры по сравнению с другими областями. Рассмотрим, к примеру, фазовое пространство газа, заключенного в ящике. Наибольшая область фазового пространства будет приходиться на состояния, в которых частицы газа практически равномерно распределены по ящику с некоторым характерным распределением скоростей, обеспечивающим однородные давление и температуру. Это характерное распределение, в некотором смысле наиболее случайное из всех возможных, называется распределением Максвелла – по имени Джеймса Клерка Максвелла, которого мы уже упоминали ранее. В этом случае про газ говорят, что он находится в состоянии теплового равновесия. Подавляющая часть точек всего фазового пространства соответствует этому тепловому равновесию, и эти точки изображают всевозможные микроскопические значения координат и скоростей отдельных частиц, которые совместимы с состоянием теплового равновесия. Эта огромная часть является, конечно, только одной из многих областей нашего фазового пространства – но она оказывается (существенно) большей

всех других областей, занимая практически всё фазовое пространство! Рассмотрим теперь другое возможное состояние этого газа, скажем, такое, в котором весь газ собран в одном из углов ящика. В этом случае мы будем опять иметь целое множество различных микроскопических состояний, каждое из которых описывает газ сосредоточенным в углу ящика. Все эти состояния макроскопически неразличимы, и изображающие их точки фазового пространства заполняют в нем свою область. Однако объем этой области оказывается намного меньшим объема области для состояний теплового равновесия – примерно в $10^{10^{25}}$ раз (если ящик – это метровый куб, содержащий воздух при нормальных условиях, а область в углу – сантиметровый кубик)!

Чтобы оценить различия в фазовых объемах, рассмотрим упрощенную ситуацию, в которой некоторое количество шаров распределено по большому числу ячеек. Предположим, что каждая ячейка может либо быть пустой, либо содержать один шар. Шары будут моделировать молекулы газа, а ячейки – различные положения молекул в ящике. Выделим небольшое подмножество ячеек, которое будем называть особым; оно будет соответствовать положению молекул газа в углу ящика. Для определенности условимся, что ровно 1/10 часть всех ячеек особая – т.е. в случае, когда имеется n особых ячеек, не особых будет ровно $9n$ (рис. 7.4).

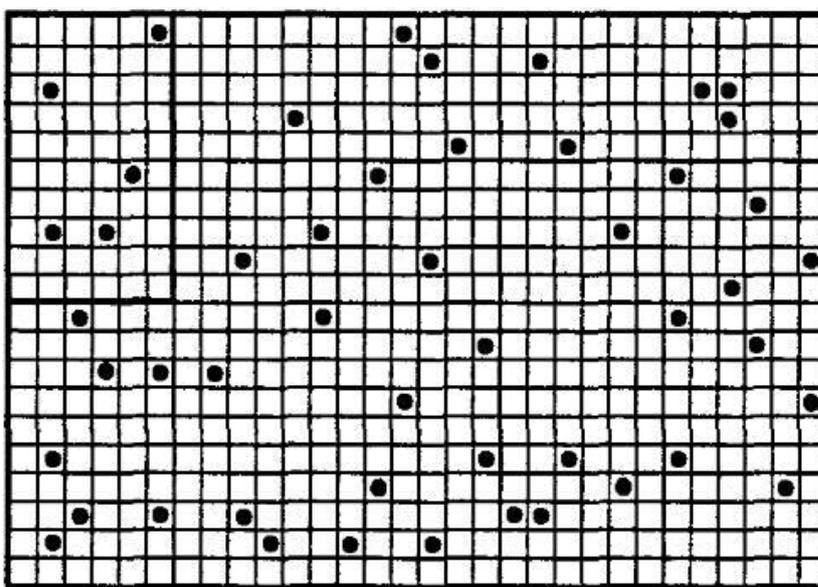


Рис. 7.4. Модель газа в ящике: некоторое количество шаров распределено по значительно большему числу ячеек. Одна десятая часть ячеек отмечены как особые. Эти ячейки выделены в левом верхнем углу

Мы хотим теперь случайным образом распределить m шаров среди всех ячеек и найти вероятность того, что все шары окажутся в особых ячейках. В случае, когда имеется только один шар и десять ячеек (т.е. имеется только одна особая ячейка), эта вероятность, очевидно, равна одной десятой. Тот же результат получится в случае одного шара и любого числа $10n$ ячеек (т.е. в случае n особых ячеек). Таким образом, для газа, состоящего только из одного атома, особая область, соответствующая «газу, собранному в углу ящика», будет иметь фазовый объем, составляющий лишь одну десятую всего объема «фазового пространства». Однако, если мы увеличим число шаров, вероятность того, что все они соберутся в особых ячейках, существенно понизится. Скажем, для двух шаров с двадцатью ячейками (две из которых особые) ($m = 2, n = 2$)⁶, вероятность равна 1/190; в случае ста ячеек (среди них – десять особых) ($m = 2, n = 10$) вероятность равна 1/110; а при неограниченном увеличении числа ячеек с сохранением доли особых вероятность будет стремиться к 1/100.

Таким образом, в случае газа из двух атомов фазовый объем особой области составляет только одну сотую часть всего «фазового пространства». Для трех шаров и тридцати ячеек ($m = 3, n = 3$), он будет составлять 1/4060 всего фазового объема, а в пределе бесконечного числа ячеек – 1/1000 – т.е. для газа из трех атомов объем особой части будет составлять одну тысячную объема всего «фазового пространства». Для четырех шаров в пределе бесконечного числа ячеек

⁶ В общем случае n, m вероятность равна $C_m^n / C_{10n}^m = n!(10n - m)! / (10n)!(n - m)!$.

вероятность становится равной $1/10^{\cdot}000$. Для пяти шаров – $1/100^{\cdot}000$ и т.д. Для m шаров в пределе бесконечного числа ячеек вероятность стремится к $1/10^m$; т.е. для «газа» из m атомов фазовый объем особой области составляет только $1/10^m$ от всего «фазового объема». (Этот результат остается справедливым, если учесть также и импульсы.)

Мы можем применить теперь те же оценки к нашей ситуации с реальным газом в ящике, только в этом случае для особой области нам нужно вместо одной десятой взять одну миллионную ($1/1^{\cdot}000^{\cdot}000$) от общего объема ящика (т.е. отношение объемов одного кубического сантиметра и одного кубического метра). В результате, вместо значения $1/10^m$ для вероятности обнаружить все частицы газа в особой области, мы получим $1/1^{\cdot}000^{\cdot}000^m$, т.е. $1/10^{6m}$. Для воздуха, взятого при нормальных условиях, в нашем ящике находилось бы около 10^{25} молекул, поэтому мы принимаем $m = 10^{25}$. Таким образом, особая область фазового пространства, представляющая состояния, в которых весь газ сосредоточен в углу ящика, составляет только $1/10^{60\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000}$

часть всего фазового пространства!

Энтропия состояния – это мера объема V области фазового пространства, которая содержит все точки, представляющие данное состояние. Ввиду гигантской разницы между объемами, которую мы оценили выше, более удобным оказывается определять энтропию как величину, пропорциональную не самим объемам, а их логарифмам:

$$\text{энтропия} = k \log V.$$

Использование логарифма делает все возникающие в расчетах числа более обозримыми. Так, к примеру, логарифм⁷ $10^{\cdot}000^{\cdot}000$ составляет всего-навсего число, близкое к 16. Величина k – константа, называемая постоянной Больцмана. Ее значение приблизительно равно 10^{-23} джоулей на один градус Кельвина.

Одним из важнейших следствий использования логарифма в определении энтропии является ее аддитивность в случае независимых систем. Другими словами, полная энтропия двух независимых физических систем, рассматриваемых как одна система, равна сумме их энтропии. (Это и есть основное свойство логарифмической функции: $\log AB = \log A + \log B$. Если эти подсистемы находятся в состояниях, изображающихся областями с объемами A и B в соответствующих им фазовых пространствах, то объем фазового пространства для составной системы будет равен произведению их объемов AB , поскольку каждое микроскопическое состояние одной системы должно быть независимо учтено вместе с каждым микроскопическим состоянием другой; и, следовательно, энтропия составной системы, очевидно, будет равна именно сумме энтропии отдельных систем.)

Те гигантские отличия между размерами различных частей фазового пространства, о которых говорилось выше, в терминах энтропии будут выглядеть более скромно. Энтропия нашего кубического метра газа, как следует из предыдущих рассмотрений, оказывается всего на 1400 Дж/К ($= 14 k \times 10^{25}$) больше энтропии того же газа, сосредоточенного в кубическом сантиметре «особой» области (так как $\log_e (10^6 \times 10^{25})$ составляет примерно 14×10^{25}).

Для того, чтобы определить реальные значения энтропии для указанных областей фазового пространства, нам осталось бы только немного позаботиться о выборе системы единиц (метры, джоули, килограммы, градусы Кельвина и т.д.). Однако, на самом деле, здесь было бы совсем неуместным заботиться об этом: для тех чудовищно огромных значений энтропии, которые я буду рассматривать в дальнейшем, выбор системы единиц не играет особой роли. Всё же для определенности (и для специалистов), я скажу, что буду пользоваться так называемой естественной системой единиц, которая следует из законов квантовой механики и в которой постоянная Больцмана оказывается равной единице:

$$k = 1.$$

⁷ Используемый здесь логарифм называется натуральным, т.е. берется по основанию $e = 2,7182818285\dots$, а не по основанию 10, однако это различие в нашем случае совершенно несущественно. Натуральный логарифм, $x = \log n$, числа n – это степень, в которую мы должны возвести e , чтобы получить n , т.е. решение уравнения $e^x = n$ (см. ссылку на с. 113 МОИ [№ 14](#)).

§7.4. Второе начало в действии

Предположим, что мы привели некоторую систему в особое начальное состояние, например, поместили газ в один из углов ящика в начальный момент времени. В следующее мгновение этот газ начнет стремительно расширяться и занимать всё больший и больший объем. Через некоторое время он достигнет состояния теплового равновесия. Как описывается этот процесс на языке фазового пространства? В каждый момент времени микроскопическое состояние нашего газа, зависящее от положений и скоростей всех его молекул, изображается определенной точкой фазового пространства. По мере того, как газ расширяется, эта точка как-то блуждает в фазовом пространстве, при этом точная траектория ее блужданий будет полной историей всех молекул газа. Эта точка стартует из некоторой ничтожно малой области, а именно, той, которая включает в себя всевозможные начальные микроскопические состояния, соответствующие газу, сосредоточенному в одном из углов ящика. Далее наша движущаяся точка проходит последовательность областей фазового пространства, объемы которых монотонно возрастают, что является отражением процесса расширения газа внутри ящика. По мере расширения газа, точка продолжает свое путешествие, попадая в области фазового пространства всё больших и больших объемов, причем каждый новый объем будет превосходить все предшествующие по своим размерам в огромное число раз (рис. 7.5)! Всякий раз, когда точка оказывается в очередном большем объеме, у нее практически нет никаких шансов вернуться в какой-либо из предыдущих объемов меньших размеров. В конце концов, она оказывается внутри области фазового пространства наибольшего объема, соответствующей тепловому равновесию.

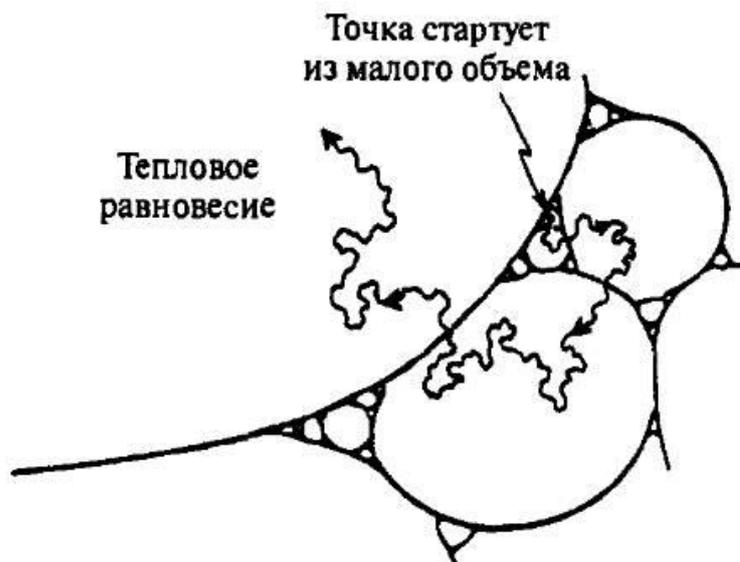


Рис. 7.5. Второе начало термодинамики в действии: с течением времени точка фазового пространства попадает в области всё больших и больших объемов. Следовательно, энтропия постоянно возрастает

Этот объем занимает почти всё фазовое пространство. И едва ли кто-то будет сомневаться в том, что наша точка фазового пространства в процессе своих случайных блужданий не вернется ни в какую из областей меньшего размера за любое разумное время. Можно также утверждать, что газ, достигнув состояния теплового равновесия, останется в нем практически навсегда. Мы видим, таким образом, что энтропия системы как логарифмическая мера ее фазового объема, должна так же монотонно возрастать с течением времени, как и сам фазовый объем.⁸

⁸ Было бы, конечно, неверным утверждать, что наша точка фазового пространства вообще никогда не достигнет ни одной из предшествующих областей меньшего объема. Если мы подождем достаточно долго, точка может снова оказаться внутри одного из них, несмотря на его ничтожно малый объем (в соответствии с теоремой о возвращении Пуанкаре.) Однако, в подавляющем большинстве случаев, соответствующие масштабы времен будут чудовищно велики, порядка $10^{10^{26}}$ лет, в случае газа, собравшегося в сантиметровом кубике в одном из углов ящика. Это на много порядков больше времени

Может показаться, что, наконец-то, мы обрели ключ к пониманию второго начала термодинамики! В самом деле, мы можем предположить, что наша точка фазового пространства движется совершенно хаотически, и, стартуя из некоторого крохотного объема фазового пространства, соответствующего малому значению энтропии, будет в дальнейшем с большой вероятностью попадать внутрь всё больших и больших объемов, соответствующих всё возрастающим значениям энтропии.

Есть, однако, нечто странное в том выводе, к которому, похоже, мы пришли путем такого рассуждения. Похоже, мы пришли к выводу с явной асимметрией во времени. Если энтропия возрастает в прямом направлении времени, то, следовательно, она должна убывать в обратном направлении. Но откуда взялась эта временная асимметрия? Мы абсолютно уверены в том, что не использовали в наших рассуждениях никаких несимметричных во времени законов и соображений. Эта временная асимметрия, на самом деле, является прямым следствием того обстоятельства, что наша система начала эволюционировать из особого (низкоэнтропийного) состояния, и наше наблюдение за ее последующей эволюцией выявило факт возрастания ее энтропии. Такое возрастание, конечно же, находится в полном соответствии с поведением систем в нашей реальной вселенной. Но мы могли бы с равным успехом применить те же самые рассуждения и для обратного направления времени. Именно, мы могли бы опять создать некоторое низкоэнтропийное состояние в начальный момент времени, но теперь задаться вопросом: какова наиболее вероятная последовательность состояний, предшествующих этому начальному состоянию?

Попробуем теперь порассуждать в таком обратном направлении. Как и ранее, выберем в качестве низкоэнтропийного состояния газ, сосредоточенный в одном из углов ящика. В этом случае наша точка фазового пространства будет в начальный момент времени находиться в той же ничтожно малой области фазового пространства, что и ранее. Но теперь мы попробуем проследить за ее предыдущей историей. Если мы представим, что эта точка, также как и ранее, движется совершенно хаотично, мы обнаружим, по мере наблюдения за последовательностью ее прошлых состояний, что сначала она достигает того же значительно большего объема фазового пространства, что и ранее, соответствующего некоторой промежуточной стадии расширения не в состоянии теплового равновесия. Затем, проходя через последовательность областей с монотонно растущими и сильно отличающимися друг от друга объемами, в самом удаленном прошлом она попадает в тот самый наибольший объем, соответствующий тепловому равновесию. Теперь мы, очевидно, приходим к следующему наиболее вероятному сценарию предшествующей истории газа, сосредоточенного в некоторый момент времени в одном из углов ящика: находясь в состоянии теплового равновесия, газ начинает всё больше и больше концентрироваться в направлении одного из углов ящика и, наконец, весь собирается в небольшом объеме в этом углу. Во время подобного процесса энтропия должна была бы убывать: ее начальное значение в тепловом равновесии велико, затем оно непрерывно падает до тех пор, пока не достигнет очень низких значений, соответствующих газу, собранному в небольшом объеме в углу ящика.

Всё это, конечно, имеет совсем мало общего с тем, что происходит в действительности в нашей вселенной! Энтропия никогда не убывает подобным образом; она возрастает. Если бы в некоторый момент времени газ действительно был бы сконцентрирован в одном из углов ящика, то, скорее всего, ранее, газ надежно удерживался в этом углу перегородкой, которую затем внезапно убрали. А может быть, газ удерживался там самопроизвольно, будучи охлажденным до температуры его твердого или жидкого состояния, а затем был очень быстро разогрет и, в результате, перешел в газообразную фазу. В любом случае, энтропия этих предшествующих состояний была бы даже еще ниже, чем исходного. Второе начало, несомненно, оставалось бы справедливым и в этих случаях, и энтропия бы всё время возрастала – т.е. при обратном течении времени она бы, как нетрудно понять, убывала. Теперь мы отчетливо видим, что наше предыдущее рассуждение приводит нас к совершенно неправильному заключению о том, что наиболее вероятной предысторией газа, сконцентрированного в некоторый момент времени в углу ящика, была его эволюция из начального состояния теплового равновесия с монотонным убыванием энтропии вплоть до того момента, когда весь газ собрался в углу; в то время как в нашем реальном мире этот способ оказывается чрезвычайно маловероятным. В действительности, газ должен был начинать свою эволюцию из состояния с гораздо меньшим значением

существования вселенной. Я не собираюсь обсуждать эту возможность в дальнейшем из-за ее практической нереализуемости.

энтропии и энтропия должна была монотонно возрастать, проходя через все свои промежуточные значения вплоть до момента времени, когда весь газ соберется в углу.

Таким образом, наши рассуждения, опирающиеся на свойства случайных блужданий точки в фазовом пространстве, оказываются вполне удовлетворительными, когда мы применяем их для предсказания будущей эволюции системы и совершенно неудовлетворительными для восстановления ее прошлой эволюции. Именно, мы получаем, что наиболее вероятным будущим газа, который начинает эволюционировать из угла ящика, будет его конечное состояние теплового равновесия, а не внезапное появление перегородки или внезапное замерзание или сжижение газа. Столь странные сценарии будущего как раз и могли бы послужить примерами процессов, протекающих с понижением энтропии, которые совершенно исключаются нашей трактовкой процессов в фазовом пространстве. Но в направлении прошлого, именно такие «странные» сценарии и могли бы иметь место и, более того, они совсем не выглядят странными. Наши рассуждения, связанные с представлением процессов в фазовом пространстве, дали нам совершенно неправильный ответ при попытке применить их к обратному направлению времени!



Рис. 7.6. Если мы интерпретируем ситуацию, изображенную на рис. 7.5 в обратном направлении времени, мы «восстановим» такое прошлое, в котором энтропия должна возрастать от ее настоящего значения. Это катастрофически противоречит наблюдениям

Очевидно, всё это бросает тень сомнения на наши исходные рассуждения. Получается, что мы не обрели никакого ключа к пониманию второго начала. Единственный достоверный вывод, который мы можем сделать из наших рассуждений, заключается в следующем: если фиксировано какое-либо начальное низкоэнтропийное состояние (скажем, газ, собранный в углу ящика), то в отсутствии каких-либо факторов, ограничивающих систему, следует ожидать возрастания энтропии в обоих направлениях времени по отношению к энтропии данного состояния (рис. 7.6). Это утверждение не сработало в нашем случае в направлении прошлого именно из-за того, что подобные ограничения имелись. Безусловно существовало нечто, ограничивающее систему в прошлом. Это было что-то такое, что просто вынудило энтропию быть низкой в прошлом. Таким образом, стремление энтропии к возрастанию в будущем совсем неудивительно. Высокоэнтропийные состояния, в некотором смысле – состояния «естественные», которые не требуют какого-либо объяснения причин своего существования. Настоящей загадкой являются низкоэнтропийные состояния в прошлом. А что ограничивало наш мир и сделало его энтропию в прошлом столь низкой? Именно повсеместное присутствие состояний с ничтожно малой энтропией и есть самый удивительный факт той действительной вселенной, в которой мы живем, хотя такие состояния настолько привычны для нас, что мы, как правило, перестаем им удивляться. Мы сами представляем собой системы с пренебрежительно малой энтропией. Все вышеизложенные соображения подводят нас к мысли о том, что мы можем легко объяснить стремление энтропии увеличиваться с течением времени для системы, начинающей эволюцию из некоторого заданного низкоэнтропийного состояния. Но что действительно достойно удивления, так это тот факт, что энтропия оказывается монотонно убывающей по мере того, как мы продолжаем ее измерять во всё более и более отдаленном прошлом этой системы!

§7.5. Источник низкой энтропии во Вселенной

Теперь мы попытаемся понять, откуда же все-таки берется такая «удивительно» низкая энтропия в том реальном мире, где мы живем. И начнем мы, в первую очередь, с самих себя. Если мы сумеем разобраться с вопросом о природе нашей собственной низкой энтропии, то, наверное, сумеем найти ее источник и для газа, удерживаемого перегородкой, и для стакана воды на столе, и для яйца над шкворчащей сковородой, и для кусочка сахара над чашкой кофе. В каждом из перечисленных случаев прямо или косвенно в дело были замешаны или одно лицо, или группа людей (и даже курица!). Создание подобных низкоэнтропийных состояний в значительной мере было связано с использованием некоторой небольшой части нашей собственной низкой энтропии. Но это, возможно, была не единственная причина. Не исключено, что для откачки газа за перегородку в углу ящика использовался специальный вакуумный насос.

Если насос был не ручной, то, наверное, для получения низкоэнтропийной энергии, необходимой для этого процесса, было использовано какое-нибудь «природное топливо» (например, нефть). Возможно также, что насос имел электрический привод и, в некоторой степени, использовал низкоэнтропийную энергию, заключенную в урановом топливе атомной энергетической станции. Я вернусь ко всем этим внешним низкоэнтропийным источникам позже, но сперва давайте разберемся с низкой энтропией в нас самих.

Откуда же и в самом деле берется наша собственная столь малая энтропия? Строительный материал для наших тел – это продукты, которые мы едим, и кислород, которым мы дышим. Существует довольно расхожее мнение, что продукты и кислород необходимы нам лишь для получения энергии, но, на самом деле, это верно лишь отчасти. Потребляемые нами продукты действительно окисляются кислородом, который мы вдыхаем, и это обеспечивает нас энергией. Но большая часть этой энергии снова покидает наши тела, главным образом, в виде тепла. Поскольку энергия сохраняется, и поскольку реальное энергетическое содержание наших тел остается более или менее неизменным на протяжении всей нашей взрослой жизни, то нет никакой необходимости и увеличивать его. Нам вполне достаточно той энергии, которая содержится в наших телах в настоящий момент. Иногда мы, действительно, увеличиваем собственное энергетическое содержание, когда наращиваем вес – но это, как правило, совсем нежелательно! Также, начиная с детского возраста, по мере взросления и роста нашего тела, мы значительно увеличиваем свое энергетическое содержание; но речь сейчас идет совсем не об этом. Вопрос заключается в том, как нам удастся поддерживать свою жизнь на всем ее протяжении (в основном во взрослый период). Для этого нам совсем не требуется увеличивать свое энергетическое содержание.

Тем не менее, нам действительно необходимо пополнять энергию, которую мы постоянно теряем в виде тепла. Несомненно, что чем более мы «энергичны», тем большее количество энергии мы теряем таким образом. Вся эта энергия должна быть восстановлена. Тепло – это самая неупорядоченная, т.е. самая высокоэнтропийная форма энергии в ряду остальных. Мы потребляем энергию в низкоэнтропийной форме (продукты и кислород), а выделяем ее в форме высокоэнтропийной (тепло, углекислый газ, экскременты). Нам не нужно как-то вылавливать энергию из окружающей среды, так как энергия сохраняется. Но мы непрерывно боремся со вторым началом термодинамики. Энтропия не постоянна – она всё время растет. Для поддержания нашей жизни нам необходимо сохранять тот низкий уровень энтропии, который имеется внутри нас. Это нам удается благодаря потреблению низкоэнтропийной комбинации продуктов и атмосферного кислорода, их взаимодействию в наших телах и выделению энергии, которую иначе мы бы усвоили, в высокоэнтропийной форме. Таким образом, мы можем предохранять энтропию наших тел от возрастания и можем поддерживать (и даже совершенствовать) свою внутреннюю организацию (см. Шрёдингер [1967]).

А откуда берется этот запас низкой энтропии? Если речь идет о мясе (или грибах!), то эти продукты, как и мы сами, должны были использовать внешние низкоэнтропийные источники следующего уровня, для обеспечения и поддержания своей низкоэнтропийной структуры. Это только переводит вопрос об источнике внешней низкой энтропии на что-то еще. Предположим теперь, что мы (или животные, или грибы) потребляем растения. Все мы, на самом деле, должны быть чрезвычайно благодарны зеленым растениям – прямо или косвенно – за их замечательную способность потреблять атмосферный углекислый газ, разделять углерод и кислород и использовать углерод в качестве строительного материала для своих организмов.



Рис. 7.7. Так мы используем Солнце – раскаленный шар среди темноты космического пространства

Этот процесс, называемый фотосинтезом, приводит к сильному понижению энтропии. Мы сами используем это низкоэнтропийное разделение, в конечном счете, просто соединяя снова кислород и углерод внутри наших тел. Каким же образом зеленые растения совершают подобное чудо? Они используют солнечный свет. Этот свет переносит энергию с Солнца на Землю в сравнительно низкоэнтропийной форме – в виде фотонов видимого света. Земля, включая и ее обитателей, не задерживает эту энергию надолго, а переизлучает ее целиком обратно в окружающее пространство. Однако эта переизлученная энергия находится уже в высокоэнтропийной форме, а именно, в виде так называемого «радиационного тепла», т.е. инфракрасных фотонов. В противоположность общепринятому мнению, Земля вместе с ее обитателями не получает энергии от Солнца! Вся роль Земли здесь сводится к тому, чтобы принять энергию в низкоэнтропийной форме, а затем рассеять ее обратно в окружающее пространство, но уже как энергию с высокой энтропией (рис. 7.7). Таким образом, Солнце служит для нас мощным источником низкой энтропии. Мы (благодаря упомянутой замечательной способности растений) это используем, выделяя некоторую небольшую ее часть и преобразуя ее в удивительные по своей сложности структуры наших организмов.

Давайте теперь в общих чертах рассмотрим, что происходит с энергией и энтропией относительно Солнца и Земли. Солнце излучает энергию в виде фотонов видимого диапазона длин волн. Часть из них поглощается Землей, а затем переизлучается в виде фотонов инфракрасного диапазона. Решающее значение здесь имеет тот факт, что видимые фотоны имеют большую частоту, чем инфракрасные и, следовательно, большую энергию, приходящуюся на одну частицу. (Вспомните формулу Планка $E = hv$, приведенную на с. 66 {МОИ № 15}. Она как раз и говорит о том, что энергия фотона пропорциональна его частоте.) Так как одиночный видимый фотон обладает большей энергией, чем одиночный инфракрасный, то видимых фотонов, падающих на Землю, должно быть меньше, чем инфракрасных, испускаемых Землей, причем ровно настолько, чтобы соблюдался баланс между падающей и излученной энергиями. А значит, энергия, переизлучаемая Землей в окружающее пространство, распределяется по гораздо большему числу степеней свободы, чем энергия, получаемая Землей от Солнца. Из-за этого большого числа задействованных степеней свободы соответствующий объем в фазовом пространстве электромагнитного поля также оказывается значительно большим у переизлученных фотонов по сравнению с фазовым объемом падающих и, следовательно, энтропия системы фотонов после переизлучения существенно возрастает. Зеленые растения, потребляя энергию в низкоэнтропийной форме (сравнительно небольшого числа видимых фотонов) и переизлучая ее в высокоэнтропийной форме (сравнительно большого числа инфракрасных фотонов), одновременно обеспечивают себя

необходимой низкой энтропией, а нас – жизненно необходимым разделением углерода и кислорода.

И всё это возможно благодаря тому, что Солнце – это горячее пятно на небе! Дело в том, что небо находится в термодинамически неравновесном состоянии: один его небольшой участок, а именно, тот, который и занимает Солнце, имеет температуру, намного превышающую температуру оставшейся его части. Благодаря этому мы и оказываемся обеспечены мощным источником низкой энтропии. Земля получает энергию от этого горячего пятна в низкоэнтропийной форме (немного фотонов) и переизлучает ее в холодные области неба в высокоэнтропийной форме (много фотонов).

А почему Солнце является этим горячим пятном? Каким образом оно приобрело столь высокую температуру и затем смогло поддерживать низкоэнтропийные состояния других систем? Ответ заключается в том, что изначально оно образовалось из однородного газового облака (главным образом – водорода) посредством гравитационного сжатия. В ходе этого процесса, еще на ранних стадиях своего образования, Солнце разогрелось. Оно продолжало бы и далее сжиматься и разогреваться, если бы, при некоторых определенных давлении и температуре, в игру не вступил другой источник энергии негравитационной природы, а именно, термоядерные реакции: слияние ядер водорода в ядра гелия с выделением энергии. Без термоядерных реакций Солнце было бы намного горячее и меньше, чем сейчас, оставаясь таким до самого момента своей звездной смерти. Термоядерные реакции не дали Солнцу стать слишком горячим, приостановив его дальнейшее сжатие и стабилизировав температуру Солнца на том уровне, который оказался вполне пригоден для нашей жизни, одновременно продлив при этом период его свечения.

Важно отметить, однако, что хотя термоядерные реакции и играют очень важную роль в происхождении и установлении количественных характеристик солнечной энергии, именно гравитация является здесь решающим фактором. (На самом деле, возможность термоядерных реакций дает существенный вклад в низкую энтропию Солнца, но учесть энтропию, обусловленную слиянием ядер весьма непросто, и детальное обсуждение этого вопроса только усложнило бы наши рассуждения, не изменяя окончательного вывода.)⁹ Без гравитации Солнце вообще не могло бы существовать! Оно продолжало бы светить и без термоядерных реакций (хотя в этом случае его излучение было бы губительным для нас), но без гравитации оно не светило бы вообще, поскольку именно гравитационное взаимодействие связывает вещество Солнца и обеспечивает необходимые температуру и давление. Без гравитации вместо Солнца мы имели бы холодный и рассеянный газ – такой же «мертвый», как и остальное космическое пространство вокруг нас.

Нам осталось обсудить вопрос об источнике низкой энтропии различных видов «природного топлива» на Земле; но суть и в этом случае остается прежней. В соответствии с общепринятыми взглядами, вся нефть (и природный газ) образовались из доисторической растительности. И снова растения оказываются источником низкой энтропии. Поскольку доисторическая растительность имела благодаря Солнцу низкую энтропию, то мы опять возвращаемся к гравитации, которая формирует Солнце из рассеянного газа. Существует интересная «альтернативная» теория происхождения нефти на Земле, выдвинутая Томасом Голдом, который оспаривает традиционный подход, утверждая, что доисторическая растительность не могла

⁹ (*3) Во внутризвездных процессах слияния легких ядер (например, водорода) в более тяжелые (например, гелий или в конечный продукт – железо) энтропия возрастает. По этой причине водород, присутствующий на Земле, часть которого мы можем, в конце концов, использовать путем его превращения в гелий на термоядерных станциях, содержит много «низкой энтропии». Возможность увеличения энтропии таким способом возникает только благодаря тому, что гравитация собрала ядра вместе, вдали от того гораздо большего числа фотонов, которые рассеялись по всему пространству и в настоящий момент образуют чернотельное фоновое излучение с температурой 2,7 К (см. с. 263 (§7.6 – В.Э.). Это излучение включает в себе существенно большую энтропию, чем та, которая содержится в веществе звезд и, если бы было возможно собрать это излучение и поместить его обратно в вещество звезд, то оно разложило бы большую часть тяжелых ядер на составляющие их более легкие ядра! Следовательно, прирост энтропии в процессе термоядерного синтеза является «временным» и возможен только благодаря концентрирующему воздействию гравитации. Позднее мы увидим, что, хотя энтропия, порождаемая в процессе термоядерного синтеза, намного превосходит энтропию, возникающую в большей части различных гравитационных процессов, а энтропия чернотельного фонового излучения оказывается еще большей – всё это справедливо только временно и локально. Гравитационные запасы энтропии оказываются неизмеримо более мощными и существенно превосходят как энтропию термоядерного синтеза, так и энтропию фонового излучения.

послужить источником такой гигантской массы гидрокарбонатов на Земле. Голд полагает, что нефть и природный газ были захвачены внутренностью Земли во время ее формирования, и с тех пор они непрерывно просачиваются наружу, накапливаясь в подземных пустотах и по сей день.¹⁰ Согласно теории Голда, синтез нефти в любом случае должен был происходить под действием солнечного света, хотя на этот раз в космосе, прежде чем сформировалась Земля. Но и здесь за всё отвечает Солнце, которое сформировала гравитация.

А что можно сказать по поводу низкоэнтропийной ядерной энергии изотопа урана-235, который используется в ядерных реакторах? Она имеет своим источником не само Солнце (хотя вполне и могла быть связана с Солнцем на некоторой стадии), а какие-то другие звезды, которые взорвались много миллиардов лет назад во время вспышек сверхновых. В действительности, этот материал образовался в результате большого числа таких вспышек. Он рассеялся в пространстве после взрыва, часть его случайно соединилась (под воздействием Солнца) и обеспечила Землю тяжелыми элементами, включая и весь запас урана-235 на ней. Каждое ядро, с его низкоэнтропийным запасом энергии, возникло в результате грандиозного ядерного процесса, происшедшего во время вспышки сверхновой. Этот взрыв, в свою очередь, был следствием гравитационного коллапса¹¹ звезды, которая была слишком массивна, чтобы сдерживать этот коллапс одними только силами теплового давления. После такого коллапса и последующего взрыва обычно остается только небольшое ядро – возможно, в виде так называемой нейтронной звезды (подробнее о них чуть позже!). Эта звезда должна была получиться в результате гравитационного сжатия рассеянного газового облака, и большая часть ее исходного вещества – включая и наш уран-235 – должна была быть выброшена обратно в космическое пространство. При этом, однако, благодаря гравитационному сжатию, в целом произошел колоссальный выигрыш в энтропии, заключенной в ядре оставшейся нейтронной звезды. И снова именно гравитация окончательно всё расставила по местам, конденсируя (на последних этапах – стремительно) рассеянный газ в нейтронную звезду.

Таким образом напрашивается вывод, что вся та удивительно низкая энтропия, которую мы обнаруживаем вокруг себя – и которая составляет наиболее загадочную сторону второго начала термодинамики – должна быть приписана тому, что огромный выигрыш в энтропии может быть получен в процессе гравитационного сжатия рассеянного газа в звезды. А откуда взялся весь этот рассеянный газ? Здесь для нас важно, что в самом начале этот газ был рассеянным, благодаря чему человечество было обеспечено огромным запасом низкой энтропии, которого нам хватало до сих пор и хватит еще на продолжительный период в будущем.

Именно возможность собирания этого газа в гравитационные сгустки и дала нам второе начало термодинамики. Более того, эти сгустки не просто послужили основанием второго начала, но дали нечто намного более точное и определенное, чем простое утверждение: «Энтропия мира вначале была очень низкой». Ведь энтропия могла быть дана нам низкой и многими другими способами, например, в ранней вселенной мог бы иметь место космологический «явный порядок» совсем другого рода, чем тот, с которым мы сталкиваемся в действительности. (Представьте себе, что ранняя вселенная была бы правильным додекаэдром – как это могло видаться Платону – или имела бы какую-нибудь другую самую невероятную геометрическую форму. Это был бы, конечно, самый настоящий «явный порядок», но совсем не тот, который мы ожидали бы обнаружить в действительной ранней вселенной!) Мы должны разобраться в том, откуда взялся весь этот рассеянный газ, для чего нам необходимо обратиться к существующим космологическим теориям.

§7.6. Космология и Большой взрыв

Наша Вселенная на всех масштабах, доступных для наблюдений с помощью самых мощных оптических и радиотелескопов, оказывается в целом довольно однородной; и, что еще более впечатляет, она расширяется. При этом, чем большее расстояние разделяет нас и удален-

¹⁰ Недавние результаты исследований сверхглубоких скважин на территории Швеции можно интерпретировать как подтверждающие теорию Голда, но ситуация далеко неоднозначна и может иметь альтернативное истолкование в рамках общепринятых геологических концепций.

¹¹ Я предполагаю здесь, что эта звезда относится к так называемому «типу II» сверхновых. Если бы это была сверхновая «типа I», мы могли бы опять вести рассуждения в терминах «временного» прироста энтропии, связанного с термоядерным синтезом (см. примечание 3 (*3 – В.Э.). Вряд ли, однако, сверхновая «типа I» способна произвести много урана.

ные объекты – галактики (или совсем далекие квазары), тем с большей скоростью эти объекты удаляются от нас. Всё выглядит так, как будто сама Вселенная родилась в результате гигантского взрыва, который принято называть Большим взрывом, имевшим место несколько десятков миллиардов лет назад.¹² Убедительным свидетельством в пользу однородности Вселенной и существования Большого взрыва оказалось открытие чернотельного фонового излучения. Это тепловое излучение, состоящее из фотонов, не имеющих явного источника и движущихся совершенно хаотично, имеет температуру $2,7^\circ$ по абсолютной шкале ($2,7\text{ K}$), т.е. $-270,3^\circ$ Цельсия или $454,4^\circ$ ниже нуля по Фаренгейту. И хотя кажется, что эта температура очень низка (а так оно, в действительности, и есть!), это излучение представляет собой остаток вспышки самого Большого взрыва! Из-за колоссального расширения, которое испытала Вселенная с момента Большого взрыва, начальный пылающий сгусток вещества распределился впоследствии по гигантскому объему. Температура Большого взрыва намного превышала все мыслимые значения, с которыми мы имеем дело, но из-за расширения она понизилась до той совершенно ничтожной величины, которую чернотельное фоновое излучение имеет сегодня.

Впервые существование фонового излучения было теоретически предсказано американским физиком и астрономом русского происхождения Георгием Гамовым в 1948 году на основе общепринятой ныне теории Большого взрыва. А в 1965 году Пензиас и Вильсон впервые (и совершенно случайно) обнаружили его.

Я собираюсь задать вопрос, который обычно многих озадачивает. Если все далекие галактики во Вселенной удаляются от нас, не означает ли это, что мы сами занимаем какое-то особое центральное положение во Вселенной? Оказывается, нет! Точно такое же разбегание наблюдалось бы и из любого другого места во Вселенной. В больших масштабах расширение Вселенной однородно и все положения во Вселенной совершенно равноправны.

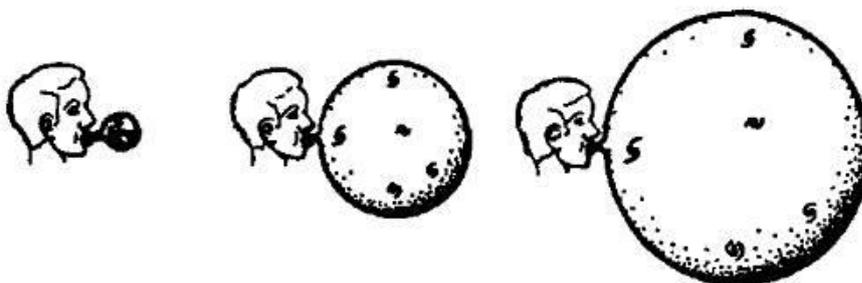


Рис. 7.8. Расширяющаяся вселенная очень напоминает поверхность надуваемого шара. Все галактики удаляются друг от друга

Часто это положение иллюстрируют с помощью надуваемого шара (рис. 7.8). Пусть пятнышки на шаре изображают различные галактики, а сама двумерная поверхность шара – всё трехмерное пространство вселенной. Ясно, что относительно произвольно выбранной точки на шаре все остальные точки удаляются. В этом смысле все точки шара равноправны. Точно так же, наблюдая из любой выбранной нами галактики, мы обнаружим изотропное удаление всех остальных галактик.

Раздувающийся шар дает хорошее представление об одной из трех общепринятых моделей вселенной, называемых моделями Фридмана–Робертсона–Уокера (ФРУ), а именно: пространственно замкнутой ФРУ-модели с положительной кривизной. В двух других ФРУ-моделях (с нулевой и отрицательной кривизной) вселенная расширяется подобным же образом, но вместо пространства конечного объема, которое изображает шар, мы имеем бесконечную вселенную с бесчисленным множеством галактик.

Из этих двух моделей наиболее проста для понимания модель с евклидовой пространственной геометрией, т.е. с нулевой кривизной. Будем изображать всю пространственную вселенную обычной плоскостью, на которой помечены точки, изображающие галактики. По мере эволюции вселенной во времени эти галактики одинаковым образом удаляются друг от друга.

¹² В настоящее время эта цифра уточняется. Современные оценки возраста Вселенной колеблются между 6×10^9 и $1,5 \times 10^{10}$ лет. В любом случае эти цифры намного превосходят те 10^9 лет, которые полагались в качестве оценки возраста Вселенной сразу после открытия ее расширения Эдвином Хабблом приблизительно в 1930 году.

Попробуем представить развитие этого процесса в пространстве-времени. Там мы будем иметь совокупность различных «мгновенных» евклидовых плоскостей, сложенных в стопку, которая изображает всю вселенную сразу во всей ее пространственно-временной целостности (рис. 7.9). Галактики теперь будут иметь вид некоторых кривых, называемых мировыми линиями историй галактик, и эти кривые будут расходиться друг от друга в направлении будущего. И снова все мировые линии галактик оказываются равноправными.

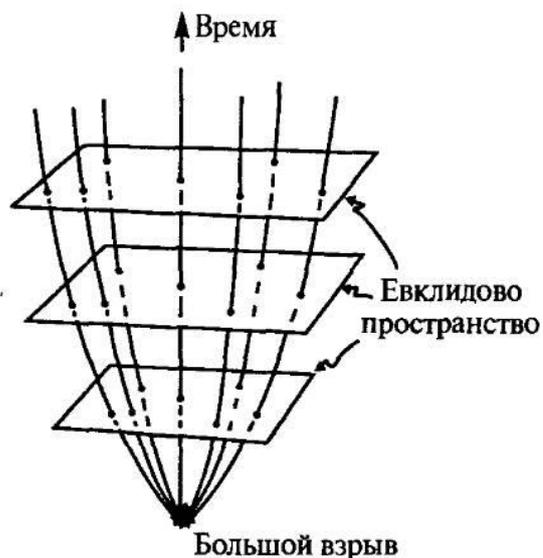


Рис. 7.9. Пространственно-временная картина расширяющейся вселенной с евклидовыми пространственными сечениями (показаны только два пространственных измерения)

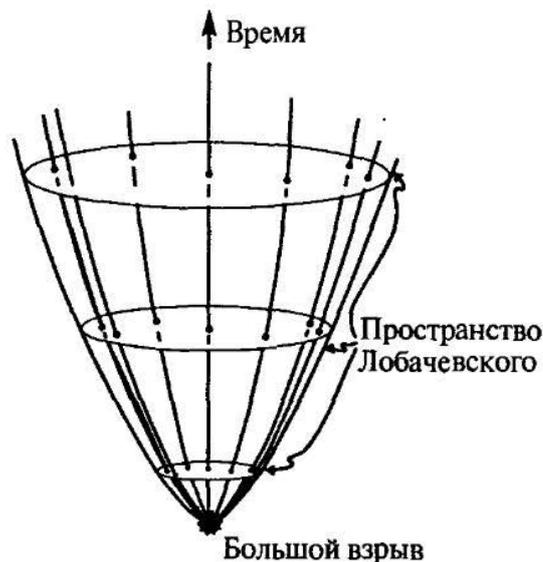


Рис. 7.10. Пространственно-временная картина расширяющейся вселенной с пространственными сечениями Лобачевского (показаны только два пространственных измерения)

В оставшейся ФРУ-модели с отрицательной кривизной в качестве пространственной геометрии берется неевклидова геометрия Лобачевского, которая подробно описана в главе 5 и проиллюстрирована картиной Эшера (рис. 5.2, с. 11 [МОИ № 15](#)). Для построения полной пространственно-временной картины нам необходимо все «мгновенные» пространства Лобачевского расположить вплотную одно над другим в порядке их следования (рис. 7.10)¹³. Мировые линии галактик будут опять изображаться расходящимися в направлении будущего кривыми, причем все галактики и здесь оказываются совершенно равноправными.

Конечно, при таком описании мы для большей наглядности изображаем не все четыре измерения, а показываем лишь трехмерное пространственно-временное сечение, убирая одно измерение (точно также, как мы это делали в главе 5, с. 41 [МОИ № 15](#)). Но даже и этого оказывается недостаточно, чтобы наглядно изобразить пространство-время положительной кривизны – необходимо убрать еще одно измерение! Сделаем это и изобразим замкнутое трехмерное пространство вселенной положительной кривизны (одномерной) окружностью, а не (двумерной) сферой, которой была поверхность шара. По мере расширения вселенной размер этой окружности растет, и мы можем изобразить всё пространство-время, накладывая одну окружность на другую (каждую – для своего момента времени) и получая в результате искривленный конус (рис. 7.11а).

Из уравнений Эйнштейна общей теории относительности следует, что такая замкнутая вселенная не может расширяться вечно. После того, как ее размер достигнет некоторого максимального, она начнет сжиматься и, в конце концов, сколлапсирует в точку, испытав при этом как бы большой взрыв наоборот (рис. 7.11б). Этот большой взрыв наоборот иногда называют большим коллапсом. Во ФРУ-моделях с отрицательной и нулевой кривизной

¹³ Я отношу модели с нулевой и отрицательной пространственной кривизной к бесконечным моделям. Есть, однако, возможность некоторой «свертки» этих моделей, после которой они становятся пространственно конечными. Такое рассмотрение, которое вряд ли применимо к реальной вселенной, существенно не меняет ход нашего обсуждения, и поэтому я предлагаю не заострять здесь внимание на этом вопросе.

вселенная уже не коллапсирует повторно. Вместо большого коллапса, она продолжает неограниченно расширяться.

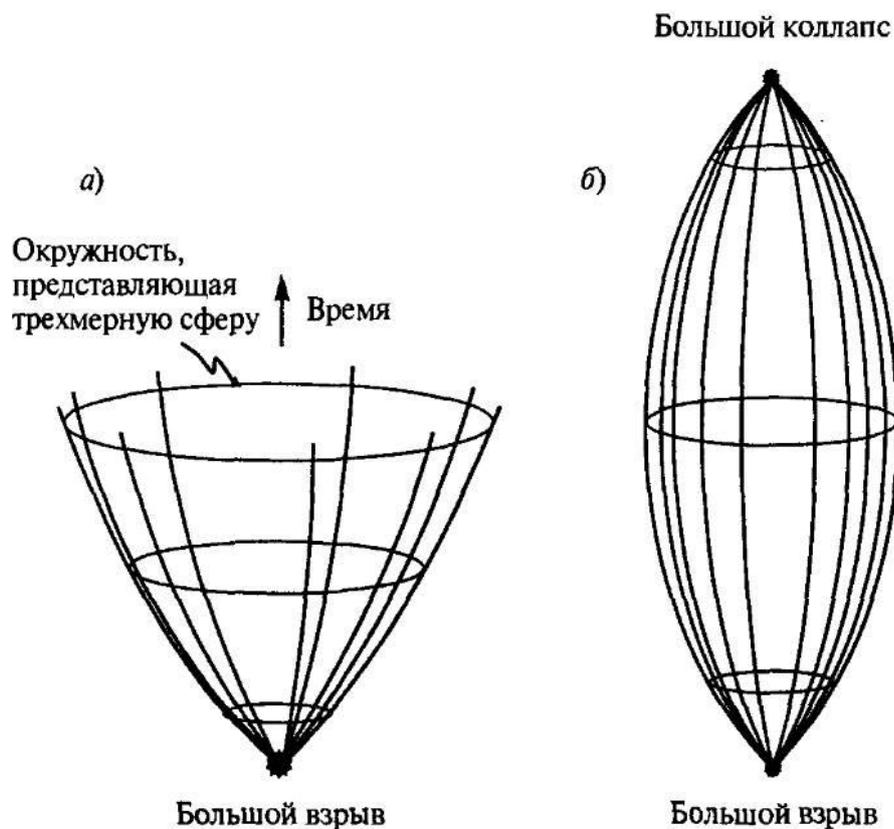


Рис. 7.11. а) Пространственно-временная картина расширяющейся вселенной со сферическими пространственными сечениями (показано только одно пространственное измерение); б) На конечной стадии вселенная испытывает большой коллапс

Так, во всяком случае, обстоит дело в стандартной общей теории относительности, в которой так называемая космологическая постоянная полагается равной нулю. Подбирая ненулевое значение этой космологической постоянной, можно получить или неограниченную вселенную, испытывающую большой коллапс, или конечную вселенную положительной кривизны, которая будет расширяться неопределенно долго. Присутствие космологической постоянной немного усложнило бы дальнейшее обсуждение, но в контексте нашей темы не существенно. Для простоты я буду полагать космологическую постоянную просто равной нулю.¹⁴ На момент написания этой книги эмпирические данные свидетельствуют о том, что космологическая постоянная должна быть очень малой, и согласуются с ее нулевым значением. (Более подробно о космологических моделях см. Риндлер [1977].)

К сожалению, имеющиеся данные наблюдений не выделяют определенно ту или иную космологическую модель (равно как ничего не говорят и о том, каков будет эффект малой космологической постоянной в случае, если она отлична от нуля). С другой стороны, кажется, что эти данные свидетельствуют скорее об отрицательной пространственной кривизне вселенной (с геометрией Лобачевского на больших масштабах); и о том, что Вселенная будет продолжать расширяться неограниченно долго. Основанием для такого вывода служит, главным образом, то количество видимого вещества во вселенной, которое доступно непосредственным наблюдениям. Однако в пространстве может оказаться рассеянным и огромное количество невидимой материи, в случае чего вселенная будет обладать положительной кривизной и может в конце своей эволюции испытать большой коллапс, хотя это произойдет за промежуток времени, намного превосходящий 10^{10} лет – время существования Вселенной. Чтобы такой коллапс стал возможным, распределенного по пространству невидимого вещества – так называемой «темной

¹⁴ Эйнштейн ввел в теорию космологическую постоянную в 1917 году, но впоследствии, в 1931 году, отказался от нее, говоря о ней как о своей «самой большой ошибке».

материи» – должно быть раз в тридцать больше того количества видимой материи, которую мы наблюдаем в телескопы. Имеются надежные косвенные свидетельства в пользу того, что значительное количество темной материи всё же присутствует, но вот достаточно ли ее, чтобы гравитационно замкнуть вселенную (или хотя бы сделать ее плоской) – привести ее к коллапсу – однозначного ответа на этот вопрос пока еще не получено.

§7.7. Горячий протошар

Вернемся к вопросу о природе второго начала термодинамики. Мы свели этот вопрос к рассеянному газу, из которого впоследствии образовались звезды. Но что представляет собой этот газ? Откуда он взялся? Кроме водорода, который является его основной составляющей, туда входит также гелий (около 23 % по массе) и пренебрежительно малое количество других веществ. В соответствии с общепринятой теорией, весь этот газ был выброшен в результате того самого Большого взрыва, который образовал и саму вселенную. Важно, однако, понимать, что этот взрыв имел совершенно иной характер, чем обычный взрыв, при котором вещество выбрасывается из его эпицентра в уже существующее окружающее пространство. В нашем случае само пространство возникает в результате взрыва и никакого эпицентра нет (или не было) вообще! Такую ситуацию проще всего представить себе в случае пространства положительной кривизны. Обратимся снова к рис. 7.11 или к рис. 7.8 с раздувающимся шаром. Никакого «предсуществующего пустого пространства», в которое могло бы извергаться вещество, порожденное взрывом, нет. Само пространство, т.е. «поверхность шара» возникает в результате взрыва. Надо отдавать себе отчет в том, что только из соображений наглядности мы изобразили на рисунках (для случая положительной кривизны) «объемлющие пространства» – евклидово пространство, в котором находится шар на рис. 7.8, и трехмерное пространство, в котором изображено пространство-время на рис. 7.11. Ни одно из этих объемлющих пространств не имеет какого-либо физического смысла. Пространство снаружи и внутри шара всего лишь помогает нам наглядно представить его поверхность. Именно поверхность шара и только она представляет физическое пространство вселенной. Совершенно очевидно, что нет никакого центра, из которого бы извергался материал вселенной в процессе Большого взрыва.

Точка, которая кажется геометрическим центром шара, не принадлежит вселенной,¹⁵ она лишь помогает нам наглядно представить нашу модель. Вещество, выброшенное в результате Большого взрыва, однородно рассеивается по всей пространственной вселенной.

Точно так же обстоит дело и в двух других стандартных моделях (хотя наглядно представить себе картину взрыва будет немного труднее). Вещество никогда не было сконцентрированным в какой-либо точке пространства. Напротив, оно равномерно заполняло всё пространство – причем, с самого начала.

Такая картина лежит в основе теории горячего большого взрыва, называемой стандартной моделью. Согласно этой теории, вселенная, сразу после своего возникновения, была чрезвычайно разогретой и находилась в состоянии горячего протошара. В результате довольно кропотливых вычислений, мы имеем некоторое представление о природе и начальном составе этого шара (т.е. самой ранней вселенной), а также о том, как менялся этот состав по мере расширения и остывания протошара. Достоин удивления тот факт, что для описания вселенной, находящейся в столь отличном от нынешнего состоянии, вообще оказались возможными какие-либо правдоподобные вычисления. Правда, физические принципы, на которых эти вычисления основаны, работают, пока мы не интересуемся событиями, происходившими во вселенной в первые десяти тысячные доли секунды после Большого взрыва! Начиная с этого момента и на протяжении последующих трех минут после Большого взрыва поведение вселенной изучено в деталях (см. Вайнберг [1977]) и, что удивительно, современные физические теории, основанные на экспериментальных наблюдениях нынешней вселенной, которая очень сильно отличается по свойствам от той, далекой ранней вселенной, оказываются вполне пригодными для ее описания.¹⁶

¹⁵ В.Э.: Ну как же не принадлежит?! Она не принадлежит сегодняшней Вселенной, но она принадлежит пространству-времени Вселенной вообще, включающему ее прошлое и будущее.

¹⁶ Экспериментальные основания для такой уверенности заключаются, главным образом, в данных двух типов. Во-первых – это поведение частиц при их столкновениях друг с другом на различных скоростях: рассеяние, распад и рождение новых частиц. Эти процессы изучаются либо на ускорителях, построенных и размещенных в самых разных уголках Земли, либо с помощью космических лучей, бомбардирующих Землю из открытого космоса. Во-вторых, известно, что параметры, регулирующие

Из этих вычислений следует, что во вселенной в однородном рассеянном состоянии должно было находиться большое количество фотонов (т.е. свет), электронов и протонов (две составные части водорода), небольшое количество α -частиц (ядра гелия), еще меньшее количество дейтронов (ядра дейтерия, тяжелого изотопа водорода) и совсем незначительное количество ядер других элементов; а также, вполне вероятно, большое количество всевозможных «невидимых» частиц, которые весьма неохотно обнаруживают себя наблюдателю. Эти материальные составляющие вселенной (главным образом, протоны и электроны), должны были соединиться вместе и образовать тот газ (в основном водород), из которого сформировались звезды спустя примерно 10^8 лет после Большого взрыва.

Звезды, однако, формировались постепенно. После дальнейшего расширения и охлаждения газа, его концентрация в некоторых частях вселенной могла немного увеличиться, что было необходимо для того, чтобы гравитационное притяжение в этой области начало доминировать над всеобщим расширением. Здесь мы подходим к еще нерешенному и спорному вопросу о действительном механизме формирования галактик, и о характере тех начальных неоднородностей, которые обеспечивают возможность формирования галактик. Я не собираюсь обсуждать сейчас эти вопросы. Мы только примем как факт, что в начальном распределении газа должны были иметь место некоторые неоднородности, и в определенный момент вступил в действие определенный механизм гравитационной конденсации, который обеспечил формирование галактик, со всеми сотнями и тысячами миллионов составляющих их звезд!

Мы установили, откуда взялся рассеянный газ. Он возник из того самого протошара, которым, собственно, и являлся Большой взрыв. Второе начало термодинамики в той детальной форме, в которой оно дошло до нас, обязано своим существованием факту удивительно равномерного распределения этого газа в пространстве после того, как стали возможными процессы гравитационной конденсации, повышающие полную энтропию. Насколько же однородно распределено вещество в настоящей вселенной? Мы уже обращали внимание на то, что звезды во вселенной собраны в галактики. Галактики, в свою очередь, группируются в скопления галактик, а скопления – в так называемые сверхскопления. Есть даже некоторые свидетельства в пользу того, что эти сверхскопления собираются в огромные группировки, известные как комплексы сверхскоплений. Необходимо заметить, однако, что все эти неоднородности и скопления – «совершенные пустяки» в сравнении с поразительной однородностью структуры вселенной в целом. При этом, чем глубже в прошлое мы бы могли проникнуть и чем больший объем вселенной мы бы могли исследовать, тем всё более однородной оказывалась бы вселенная. Чернотельное фоновое излучение дает самое убедительное свидетельство в пользу такого вывода. Отсюда следует, в частности, что когда возраст вселенной равнялся всего одному миллиону лет, на тех масштабах, которые сейчас расширились до 10^{23} километров (такое расстояние от нас включает около 10^{10} галактик) вселенная и всё составляющее ее вещество были однородны с точностью до одной стотысячной (см. Дэвис и др. [1987]). Вселенная, несмотря на взрывообразный характер своего рождения, была в высокой степени однородной на своих самых ранних стадиях.

Итак, мы поняли, что это был горячий протошар, который так однородно распределил газ по всему пространству. Именно к этому моменту нас привели наши исследования.

§7.8. Объясняется ли второе начало Большим взрывом?

Но закончились ли на этом наши поиски оснований для второго начала термодинамики?

Можно ли объяснить тот интригующий факт, что начальная энтропия вселенной была чрезвычайно мала – а именно он и дает нам второе начало – тем обстоятельством, что вселенная началась с Большого взрыва? После некоторых размышлений мы обнаружим, что такое объяснение содержит в себе парадокс. И потому оно никак не может быть окончательным ответом. Вспомним, что первичный протошар представлял собой некоторое тепловое состояние, а именно, горячий расширяющийся газ в тепловом равновесии. Вспомним также, что термин «тепловое равновесие» относится к состоянию с максимальной энтропией. (Именно так мы определяли максимум энтропии для газа в ящике.) Но второе начало требует, чтобы в начальном состоянии наша вселенная, напротив, находилась, в своего рода минимуме, но не в максимуме!

взаимодействие частиц, не изменились даже на одну миллионную за 10^{10} лет (см. Барроу [1988]), так что, скорее всего, они существенно и не менялись (если менялись вообще) со времен первичного протошара.

Где же ошибка? Один из «стандартных» ответов примерно таков:

Действительно, в самом начале протошар пребывал в тепловом равновесии, но вселенная в то время была совсем маленькой. Этот протошар находился в состоянии с максимумом энтропии, разрешенной для вселенной с крошечными размерами, но такая энтропия оказалась бы совершенно ничтожной по сравнению с энтропией, разрешенной для вселенной с ее сегодняшними размерами. По мере расширения вселенной, соответствующий максимум энтропии также возрастал с увеличением размеров вселенной, но реальное значение энтропии вселенной сильно отставало от этого максимума. Следовательно, второе начало появляется благодаря тому, что реальная энтропия всегда пытается догнать свой разрешенный максимум.

Однако, небольшой анализ показывает, что такое объяснение не может быть правильным. Если бы оно было верным, то в случае (пространственно замкнутой) вселенной, которая испытывает в конце большой коллапс, это объяснение можно было бы применить снова в обратном направлении времени. Когда вселенная снова достигнет крошечных размеров, для максимума ее энтропии снова будет очень низкий потолок. То же самое рассуждение, благодаря которому мы получили низкую энтропию на ранних этапах расширяющейся вселенной, должно быть применено на конечных этапах существования сжимающейся вселенной. Именно некоторый предел на низкую энтропию в «начале времен» был тем, что дало нам второе начало, согласно которому энтропия вселенной возрастает со временем. Но если тот же самый предел должен быть применен и в «конце времен», то мы бы обнаружили вопиющее несоответствие со вторым началом.

Конечно, не исключено, что наша действительная вселенная никогда не будет сжиматься подобным образом. Возможно, что мы живем во вселенной с нулевой средней пространственной кривизной (Евклидов случай), или с отрицательной кривизной (случай Лобачевского). Или может оказаться, что мы живем во вселенной (с положительной кривизной), которая обречена на схлопывание, но оно будет иметь место в столь отдаленном будущем, что никакие отклонения от второго начала в настоящий момент нам еще не видны, несмотря на то, что, вообще говоря, вся энтропия вселенной должна будет в некоторый момент времени начать уменьшаться до чрезвычайно малых величин, и второе начало – в том смысле, в котором мы понимаем его сегодня – будет сильно нарушено.

На самом деле, имеются веские основания сомневаться в подобной смене энтропии в сжимающейся вселенной. Самые убедительные из них связаны с загадочными объектами, именуемыми черными дырами. На примере черной дыры мы имеем микрокосмос сжимающейся вселенной, поэтому, если бы смена энтропии в такой вселенной действительно имела бы место, то в окрестности черной дыры должно было бы наблюдаться нарушение второго начала. Есть, однако, все основания полагать, что второе начало имеет прочную власть и над черными дырами. В процессе нашего обсуждения энтропии нам не удастся избежать вопросов, связанных с теорией черных дыр, поэтому нам просто необходимо познакомиться с этими странными объектами поближе.

§7.9. Черные дыры

Начнем с теоретических предсказаний дальнейшей судьбы нашего Солнца. К настоящему моменту оно уже просуществовало около пяти миллиардов лет. В ближайшие 5–6 миллиардов лет оно начнет увеличиваться в размерах и будет непрерывно раздуваться до тех пор, пока его поверхность не достигнет где-то орбиты Земли. Тогда оно превратится в звезду, называемую красным гигантом. На небосводе можно обнаружить множество красных гигантов, из которых наиболее известны Альдебаран в созвездии Тельца и Бетельгейзе в созвездии Ориона. Пока поверхность красного гиганта расширяется, в самой его сердцевине находится чрезвычайно плотная концентрация материи, которая непрерывно увеличивается в размерах. Это плотное ядрышко имеет ту же природу, что и звезда, называемая белым карликом (рис. 7.12).

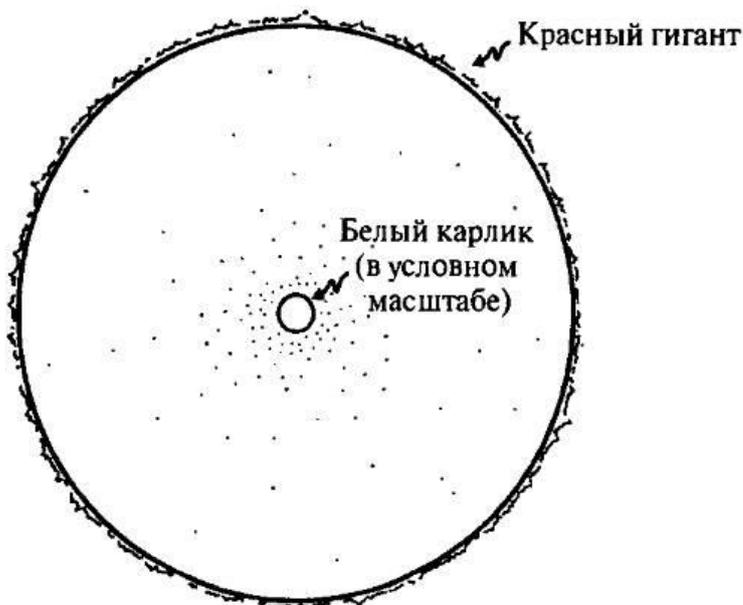


Рис. 7.12. Красный гигант с белым карликом в своей сердцевине

Сами по себе белые карлики – это самые настоящие звезды, вещество которых, правда, спрессовано до такой степени, что теннисный шарик, заполненный им, весил бы несколько сотен тонн! Их число на небосводе довольно велико: примерно десять процентов всех светящихся звезд Млечного Пути приходится на белые карлики. Самый знаменитый из них – спутник Сириуса, чья невообразимо высокая плотность представляла большую загадку для наблюдательной астрономии в начале XX века. Однако позже именно эта звезда превосходным образом подтвердила справедливость физической теории (выдвинутой Р.Х. Фаулером примерно в 1926 году), согласно которой некоторые звезды и в самом деле могут обладать колоссальной плотностью, при которой они удерживаются в равновесии «давлением электронного вырождения». Это означает, что от гравитационного коллапса такую звезду спасает только квантовомеханический принцип запрета Паули (с. 226), примененный к электронам.

Любой красный гигант имеет ядро в виде белого карлика, и это ядро постоянно затягивает в себя вещество из основного тела звезды. В конце концов, красный гигант будет целиком поглощен своим ядром-паразитом и в результате останется самый настоящий белый карлик размером с Землю. Что касается нашего Солнца, то оно будет находиться в стадии красного гиганта «всего лишь» несколько миллиардов лет. После этого, в своем последнем «видимом» воплощении, Солнце станет похожим на тлеющие и медленно остывающие угли¹⁷ белого карлика, и просуществует еще несколько миллиардов лет до тех пор, пока окончательно не превратится в совершенно невидимый **черный карлик**.

Далеко не все звезды повторяют судьбу Солнца. У некоторых из них жизненный путь имеет гораздо более бурный характер и определяется так называемым **пределом Чандрасекара**: максимально возможной массой белого карлика. Согласно вычислениям, проведенным еще в 1929 году Субраманьяном Чандрасекаром, белые карлики не могут существовать, если их масса превышает шесть пятых массы Солнца! (В то время он был еще совсем молодым индийским студентом, и свои вычисления делал во время морского путешествия из Индии в Англию.) Затем, где-то в 1930 году, эти вычисления были проделаны (независимо) еще раз советским теоретиком Львом Давидовичем Ландау. Современное уточненное значение предела Чандрасекара составляет примерно

$$1,4 M_{\odot},$$

где M_{\odot} – масса Солнца.

Заметим, что предел Чандрасекара совсем ненамного превосходит солнечную массу, и в то же время известно множество звезд, обладающих значительно большими массами. А как сложится судьба звезды, обладающей массой, скажем, $2M_{\odot}$? В соответствии с принятой теорией,

¹⁷ В действительности, на этой конечной стадии карлик будет светиться как красная звезда, но то, что называют «красными карликами», относится к звездам совсем другого типа.

такая звезда будет так же раздуваться и превратится в красный гигант, а ее ядро – белый карлик – будет постепенно набирать свою массу, – т.е. в точности так, как было описано выше. Однако, в некоторый критический момент, это ядро достигнет предела Чандрасекара, и принцип запрета Паули уже не сможет обеспечить давление, необходимое для компенсации чудовищных сил гравитации.¹⁸ Примерно в этот момент ядро начнет катастрофически коллапсировать внутрь, что приведет, в свою очередь, к значительному повышению давления и температуры. Начнутся интенсивные ядерные реакции, и колоссальное количество энергии выделится из ядра в виде нейтрино. Они разогреют внешнюю оболочку коллапсирующей звезды, а затем последует грандиозный взрыв. Звезда превратится в сверхновую!

А что произойдет далее со всё еще коллапсирующим ядром? Теория утверждает, что оно достигнет таких немыслимых плотностей, которые намного превосходят даже плотность белого карлика. Тогда коллапс ядра остановится, и оно станет нейтронной звездой (с. 262)¹⁹, в которой теперь уже давление нейтронного вырождения (т.е. принцип Паули, примененный к нейтронам) будет удерживать ее в равновесии. Ее плотность такова, что теннисный мячик, сделанный из вещества нейтронной звезды, весил бы как астероид Гермес (или как марсианская луна Демос). Таковую плотность имеет само ядерное вещество! (По сути дела, можно сказать, что нейтронная звезда представляет собой гигантское атомное ядро, радиусом с десятков километров, что, впрочем, совсем немного по звездным меркам!) Но здесь вступает в силу новый предел, аналогичный пределу Чандрасекара (и называемый пределом Ландау–Оппенгеймера–Волкова), который приближенно (по уточненным современным данным) составляет

2,5 М \odot ,

и по превышении которого равновесие нейтронной звезды невозможно.

А что случится с коллапсирующим ядром, если масса исходной звезды будет настолько велика, что даже и этот предел будет превышен? Кстати говоря, известно много звезд, масса которых заключена в пределах от 10 М \odot до 100 М \odot . Маловероятно, что все они в процессе взрыва сверхновой сбрасывают столь большую массу, что ядро-остаток неизменно оказывается с массой ниже верхнего предела для нейтронной звезды. Вместо этого мы, скорее всего, получим черную дыру.

Что же такое черная дыра? Это – область пространства (или пространства-времени), в пределах которой гравитационное поле настолько сильно, что даже свет не способен вырваться из нее. Вспомним, что в силу принципа относительности скорость света является предельной: ни один материальный объект или сигнал не может превысить ее локальное значение (с. 42 [МОИ № 15](#)). Следовательно, если даже свет не может вырваться из черной дыры, то из нее не сможет выбраться наружу вообще ничего.

Читатель, возможно, знаком с понятием второй космической скорости. Это та минимальная начальная скорость, которую должен иметь объект, чтобы он мог удалиться от некоторого массивного тела на сколь угодно большое расстояние. Пусть массивное тело – это Земля, тогда вторая космическая скорость для нее будет составлять примерно 40'000 км/ч (километров в час). Камень, брошенный с земной поверхности (в любом направлении) со скоростью, превышающей это значение, навсегда покинет Землю (мы, конечно, пренебрегаем силами сопротивления земной атмосферы). Если же камень бросить со скоростью, меньшей этого значения, он упадет обратно на Землю. (Поэтому неверно утверждение, что «всё брошенное вверх, обязательно упадет вниз»; это будет справедливым только в том случае, когда скорость бросания меньше второй космической!) Для Юпитера вторая космическая скорость равна 220'000 км/ч; а для Солнца она будет составлять уже 2'200'000 км/ч. Теперь представим себе, что вся солнечная масса оказалась сосредоточенной в сфере радиуса в одну четверть от его истинного значения. В этом случае вторая космическая скорость увеличится в два раза по сравнению с исходным значением. А если бы вся масса Солнца оказалась сосредоточенной в еще меньшем объеме, скажем, внутри сферы радиуса в одну сотую от его истинного значения, вторая космическая скорость увеличилась бы в десять раз. Мы можем представить себе, таким образом, достаточно массивное тело малых

¹⁸ На самом деле, принцип Паули не запрещает электронам находиться в одном и том же месте, а запрещает им находиться лишь в одном и том же «состоянии», учитывающем их движение и вращение (спин). Применение этого принципа в рассматриваемом случае связано с определенными тонкостями, и в первое время расценивалось некоторыми (особенно Эддингтоном) как достаточно спорное.

¹⁹ В.Э.: Это §7.5 выше в этом томе.

размеров, для которого вторая космическая скорость превышает даже скорость света! Когда это происходит в действительности, мы и имеем черную дыру.²⁰

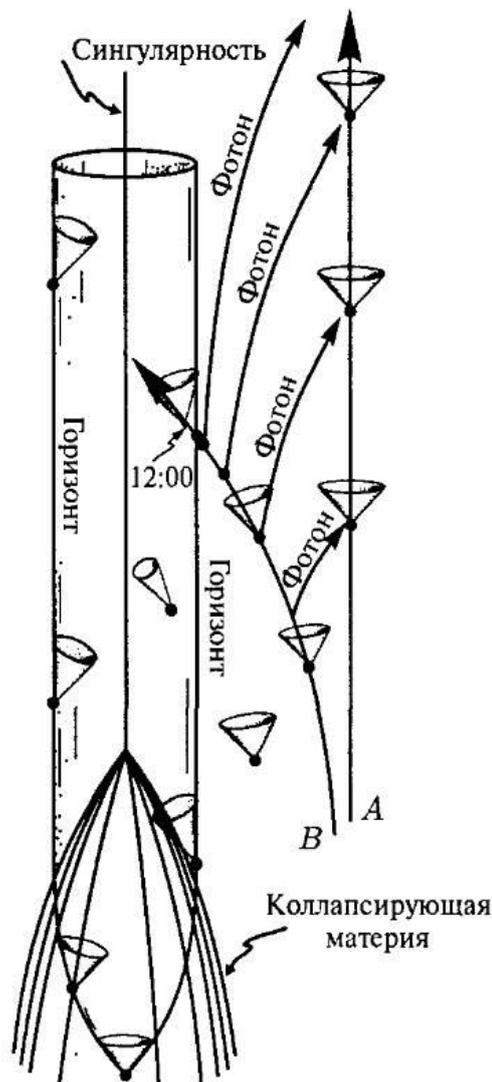


Рис. 7.13. Пространственно-временная диаграмма, демонстрирующая коллапс в черную дыру. Шварцшильдовский радиус обозначен как «горизонт»

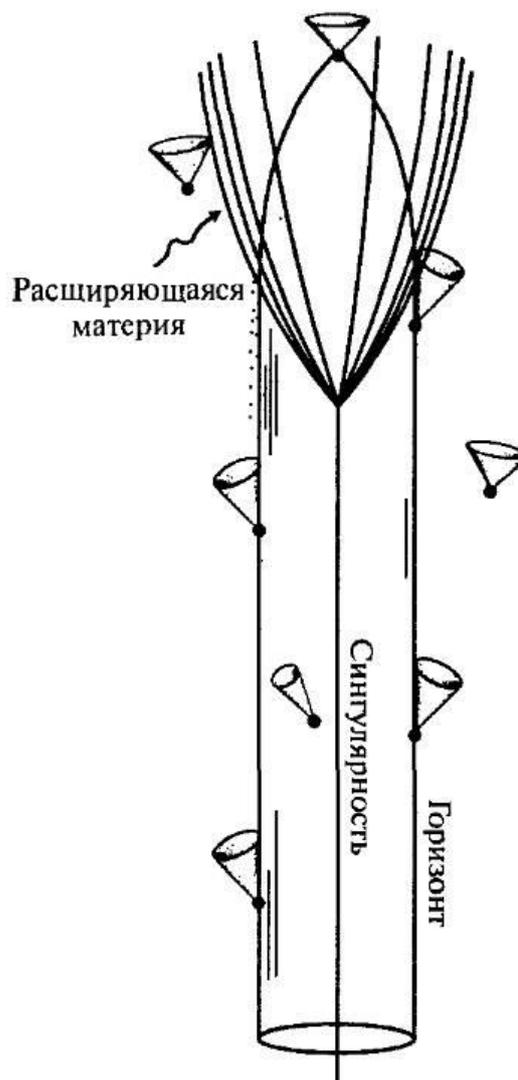


Рис. 7.14. Гипотетическая пространственно-временная конфигурация: белая дыра, эволюция которой приводит к расширяющейся материи (эта ситуация является обращением во времени рис. 7.13)

На рис. 7.13 я изобразил пространственно-временную диаграмму, показывающую коллапс тела, который приводит к образованию черной дыры (для простоты я предположил, что в процессе коллапса сохраняется сферическая симметрия тела и убрал одно пространственное измерение). На рисунке изображены также световые конусы, которые, как мы помним из обсуждения общей теории относительности в главе 5 (см. с. 52 [МОИ № 15](#)), абсолютным образом ограничивают допустимые движения тел и распространение сигналов. Заметим, что эти конусы начинают немного наклоняться внутрь и чем ближе к центру, тем этот наклон становится более и более значительным.

²⁰ Похожие соображения были высказаны уже в 1784 году английским астрономом Джоном Мичеллом и, немного позднее и независимо от него, Лапласом. Они пришли к выводу, что наиболее массивные и плотные тела во вселенной могут оказаться совершенно невидимыми – как и черные дыры – но их (поистине пророческие) выводы были сделаны на основе ньютоновской теории, в которой подобные заключения являются, в лучшем случае, спорными. Надлежащий общерелятивистский подход был разработан Робертом Оппенгеймером и Хартландом Снайдером [1939].

Существует некоторое критическое расстояние от центра, называемое шварцшильдовским радиусом, на котором внешние границы конусов становятся вертикальными на приведенной диаграмме. Здесь свет (который по определению должен двигаться по световому конусу) как бы зависает над коллапсирующим телом, а составляющей скорости света, направленной наружу, едва-едва хватает на то, чтобы противодействовать гигантским силам притяжения. Та трехмерная поверхность, которая вычерчивается зависшим светом на шварцшильдовском радиусе (т.е. вся световая история) носит название (абсолютного) горизонта событий черной дыры. Всё, что находится внутри горизонта событий, не может выйти наружу и даже не может иметь какой-либо связи с внешним миром. Это заключение является прямым следствием наклона конусов и того фундаментального факта, что возможное движение и распространение сигналов может осуществляться только внутри (или вдоль) этих конусов. Черная дыра, образовавшаяся из начальной звезды массой, равной нескольким массам солнца, будет иметь горизонт радиусом несколько километров. Есть некоторые основания предполагать, что в центрах галактик могут находиться черные дыры гораздо больших масс и размеров. Наша собственная Галактика, которую мы наблюдаем на небе как Млечный Путь, вполне может содержать черную дыру, имеющую массу около миллиона солнечных масс и, следовательно, радиус горизонта – несколько миллионов километров.

Реальное материальное тело, которое коллапсирует с образованием черной дыры, в конце концов, целиком окажется внутри своего горизонта и, следовательно, потеряет всякую связь с внешним миром. Далее мы в общих чертах проследим вероятную судьбу этого тела, а в данный момент для нас будет представлять интерес только геометрия пространства-времени, порожденная этим коллапсом, которая приводит к весьма любопытным следствиям.

Вообразим, что некий отважный (а, может быть, безрассудный?) астронавт *B* собрался совершить путешествие в нутро большой черной дыры, а его менее смелый (а, может быть, просто более осторожный?) коллега *A* остается при этом за пределами горизонта событий. Предположим, что *A* намеревается держать *B* в поле своего зрения до тех пор, пока это в принципе возможно. Что же увидит *A*? Глядя на рис. 7.13, нетрудно сообразить, что ту часть истории *B* (т.е. мировой линии *B*), которая лежит внутри горизонта, *A* не увидит никогда, в то время как часть, лежащую снаружи горизонта, *A* рано или поздно увидит целиком, хотя те точки истории *B*, которые непосредственно предшествуют моменту его прохождения через горизонт, будут наблюдаться *A* спустя всё большее и большее время ожидания. Пусть *B* проходит горизонт в тот момент, когда его собственные часы показывают 12 часов. Само это событие *A* не зафиксирует никогда, но события, соответствующие показаниям часов 11:30, 11:45, 11:52, 11:56, 11:58, 11:59, 11:59½, 11:59¾, 11:59⅞ и т.д. *A* будет наблюдать совершенно определенно (причем через приблизительно равные интервалы времени по показаниям часов *A*). В принципе, *B* будет всё время находиться в поле зрения *A* как бы навечно зависшим над горизонтом черной дыры, а часы *B* будут отсчитывать время всё медленнее и медленнее по мере приближения к роковой отметке 12:00, но никогда не покажут этого значения. Но, в действительности, образ *B*, который видит *A*, очень быстро станет неясным и трудноразличимым. Это происходит потому, что образ *B*, который будет наблюдать *A* в течение всего оставшегося времени наблюдения, будет формироваться лишь светом, испущенным из того крошечного участка мировой линии *B*, который непосредственно примыкает извне к горизонту. В результате *B* просто исчезнет из поля зрения *A*, и то же самое окажется верным и для исходного коллапсирующего тела. Всё, что увидит *A*, будет выглядеть, в конце концов, действительно как какая-то «черная дыра»!

А что можно сказать о несчастном *B*? Каковы будут его ощущения? Необходимо сразу же подчеркнуть, что в момент пересечения горизонта с *B* ничего особенного не произойдет. Он смотрит на свои часы около 12 и видит, что минута за минутой следуют обычным порядком: 11:57, 11:58, 11:59, 12:00, 12:01, 12:02, 12:03, Промежуток времени около 12:00 не содержит ничего необычного. *B* может обернуться, посмотреть на *A* и убедиться, что *A* всё время остается в поле его зрения. *B* может также посмотреть на часы *A* и также убедиться, что для него они идут обычным образом. Таким образом, *B* никак не может узнать о своем пересечении горизонта, если только не проделает для этого специальных расчетов.²¹ Горизонт оказался предельно коварным! После пересечения горизонта, у *B* уже не остается никаких шансов выйти наружу. Он обнаружит,

²¹ На самом деле, точное положение горизонта (в общем случае нестационарной) черной дыры не может быть установлено непосредственными измерениями. В частности, для его определения необходимо обладать информацией о том веществе, которое черная дыра поглотит в будущем!

что окружающая его часть вселенной сжимается, и что довольно скоро ему предстоит испытать свой собственный «большой коллапс»!

А может быть, и не только его собственный. Всё вещество того первоначального тела, из которого образовалась черная дыра, будет, в некотором смысле, разделять судьбу B и испытывать такой же коллапс. Более того: в случае, если вселенная снаружи дыры пространственно замкнута, так что вся внешняя материя тоже оказывается вовлеченной в глобальный большой коллапс, то этот коллапс должен оказаться, в определенном смысле, «тем же самым», что и «собственный» коллапс B .²²

Но несмотря на столь безрадостный конец B , физика, с которой он будет иметь дело вплоть до гибельной точки, будет той самой, которую мы с вами хорошо знаем и понимаем. В частности, нет никаких оснований предполагать нарушение второго начала термодинамики, тем более предполагать, что полностью обратится монотонный рост энтропии. Второе начало будет действовать внутри черной дыры точно так же, как и везде. Энтропия в окрестности B будет продолжать возрастать, вплоть до самого момента его окончательного коллапса.

Чтобы разобраться, каким образом энтропия «большого коллапса» («собственного» или «всеохватывающего») может быть чрезвычайно высокой, в то время как энтропия большого взрыва может оказаться при этом намного меньше, нам следует немного глубже вникнуть в свойства геометрии пространства-времени черной дыры. Перед тем, как мы этим займемся, читатель должен взглянуть на рис. 7.14, на котором показано гипотетическое временное обращение черной дыры, называемое белой дырой. (Скорее всего, белых дыр в природе не существует, но их теоретическая возможность будет иметь для нас большое значение в дальнейшем.)

§7.10. Структура пространственно-временных сингулярностей

Вспомним из главы 5 (с.50 [МОИ № 15](#)), как кривизна пространства-времени проявляется в приливных эффектах. Сферическая поверхность, образованная свободно падающими в гравитационном поле частицами некоторого большого тела, будет вытянута в одном направлении (вдоль линии, направленной на притягивающее тело) и сплюснута в перпендикулярном направлении. По мере приближения к притягивающему телу приливная деформация возрастает (рис. 7.15) по закону обратного куба расстояния до него. Нарастающее приливное воздействие подобного рода будет ощущаться и астронавтом B по мере его падения на черную дыру и последующего движения внутри нее. Черные дыры с массой, равной нескольким солнечным, оказывали бы столь большое приливное воздействие, что космонавт не выдержал бы даже незначительного приближения к горизонту, не говоря уже о его пересечении. Для больших дыр величина приливного воздействия на горизонте может оказаться существенно меньше. Для черных дыр с массой в миллион солнечных, одна из которых, как предполагают астрономы, находится в центре нашей Галактики – Млечного Пути, – приливное воздействие на горизонте, испытываемое астронавтом, было бы ничтожно малым, так что он, в худшем случае, ощутил бы лишь небольшой дискомфорт. Однако, это приливное воздействие менялось бы по мере дальнейшего падения астронавта внутри дыры, так что за какие-то секунды оно достигло бы, в конце концов, бесконечной величины! И не только тело бедного астронавта оказалось бы разорванным на кусочки этой очень быстро возрастающей приливной силой, но, как в ускоренном кино, оказались бы разорванными и молекулы, из которых это тело состоит, потом составляющие эти молекулы атомы, их ядра, и, в конце концов, вообще все какие только есть субатомные частицы! Таким образом, «коллапс» разрушает всё до основания.

При этом разрушается не только материя, но даже и само пространство-время прекращает свое существование. Такая окончательная катастрофа называется пространственно-временной сингулярностью. Читатель, конечно, может задаться справедливым вопросом, откуда мы знаем, что подобные катастрофы должны иметь место, и при каких обстоятельствах материю и пространство-время ожидает такая судьба. Вывод о неизбежности пространственно-временной

²² Делая подобное утверждение, я неявно ввожу следующие два допущения. Первое заключается в том, что возможному полному окончательному исчезновению черной дыры – с учетом ее (чрезвычайно медленного) хокинговского радиационного «испарения», которое мы рассмотрим чуть позже (см. с. 278 (§7.11 – *В.Э.*)) – будет предшествовать окончательный коллапс вселенной; второе допущение – (весьма правдоподобное), известно под названием «космическая цензура» (с. 58 [МОИ № 15](#)).

сингулярности следует из классических уравнений общей теории относительности и оказывается справедливым при любых условиях, в которых находится уже сформировавшаяся черная дыра. Первоначальная модель Оппенгеймера и Снайдера (Оппенгеймер, Снайдер [1939]) как раз и демонстрировала поведение подобного типа. Долгое время, однако, астрофизики питали надежду, что такое сингулярное поведение является артефактом специальной симметрии, которая допускалась в этой модели с самого начала. Предполагалось, что в реалистичном (асимметричном) случае коллапсирующая материя могла бы скручиваться каким-то другим способом, а затем снова вырываться наружу. Но эти надежды исчезли после того, как было проведено математическое исследование более общего характера, которое послужило основой для формулировки так называемых теорем о сингулярности (см. Пенроуз [1965]; Хокинг, Пенроуз [1970]). Эти теоремы утверждали, что в рамках классической общей теории относительности с разумными источниками гравитации, пространственно-временные сингулярности неизбежны в случае гравитационного коллапса.

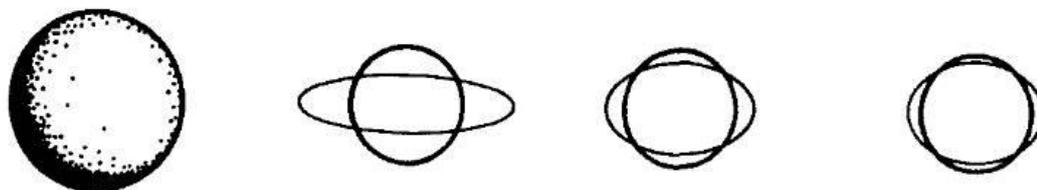


Рис. 7.15. Приливное воздействие, оказываемое сферическим притягивающим телом, возрастает по мере того, как другое тело приближается к нему, по закону обратного куба расстояния между центрами тел

Таким же образом, меняя направление времени, мы приходим к выводу о неизбежности соответствующей начальной пространственно-временной сингулярности, которую мы теперь представляем как Большой взрыв, в любой (надлежащим образом) расширяющейся вселенной. Только теперь, вместо окончательного разрушения пространства-времени и материи, эта сингулярность представляет собой рождение пространства-времени и материи. Может показаться, что имеется полная временная симметрия между этими двумя типами сингулярностей: начальным типом, при котором пространство-время и материя рождаются, и конечным типом, когда пространство-время и материя уничтожаются. Конечно, между этими двумя ситуациями действительно имеется важная аналогия, но исследуя их более детально, мы обнаружим, что они не являются точными копиями, обращенными во времени относительно друг друга. И для нас важно разобраться в тех различиях геометрического характера, которые имеются между ними, поскольку именно они оказываются ключевыми в понимании источника второго начала термодинамики!

Обратимся к наблюдениям нашего астронавта B , который отважился на самопожертвование ради науки. Он наблюдает приливные силы, которые очень быстро возрастают до бесконечности. Поскольку он путешествует в пустом пространстве, то он ощущает деформирующие эффекты, которые оставляют величины объемов неизменными и которые создаются частью тензора пространственно-временной кривизны, обозначенной мною как ВЕЙЛЬ (см. главу 5, с. 54 [МОИ № 15](#)). Другая часть тензора пространственно-временной кривизны, отвечающая за общее изменение объемов и называемая РИЧЧИ, обращается в нуль в пустом пространстве. Может оказаться, что B всё же встретится с какой-нибудь материей в некоторый момент, но даже если это действительно произойдет (ведь, в конце концов, и сам астронавт состоит из материальных частиц), мы, вообще говоря, всё равно обнаружим, что величина ВЕЙЛЬ будет превосходить величину РИЧЧИ. Таким образом, значение кривизны вблизи конечной сингулярности полностью определяется поведением тензора ВЕЙЛЬ. Этот тензор, вообще говоря, стремится к бесконечности:

$$\text{ВЕЙЛЬ} \rightarrow \infty$$

(хотя это стремление может иметь осциллирующий характер). Эта ситуация оказывается типичной для пространственно-временной сингулярности.²³ Такое поведение связано с высокоэнтропийной сингулярностью.

²³ Смотри изложение этого вопроса в работах Белинского, Халатникова и Лифшица [1970] и Пенроуза [1979].

Однако в случае Большого взрыва, ситуация оказывается совершенно другой. Стандартная модель Большого взрыва выводится из рассмотренных нами ранее вселенных Фридмана–Робертсона–Уокера, обладающих высокой степенью симметрии. Здесь деформирующее приливное воздействие, связанное с тензором ВЕЙЛЬ, вообще отсутствует. Вместо него теперь имеется направленное внутрь симметричное ускорение, действующее на любую сферическую поверхность, состоящую из пробных частиц (см. рис. 5.26). Но это – результат воздействия тензора РИЧЧИ, а не тензора ВЕЙЛЬ. В любой ФРУ-модели всегда имеет место тензорное уравнение:

$$\text{ВЕЙЛЬ} = 0.$$

По мере того, как мы приближаемся к начальной сингулярности всё ближе и ближе, мы обнаруживаем, что именно РИЧЧИ, а не ВЕЙЛЬ, становится бесконечным и, таким образом, именно РИЧЧИ, а не ВЕЙЛЬ, определяет начальную сингулярность. Значит, мы имеем дело с низкоэнтропийной сингулярностью.

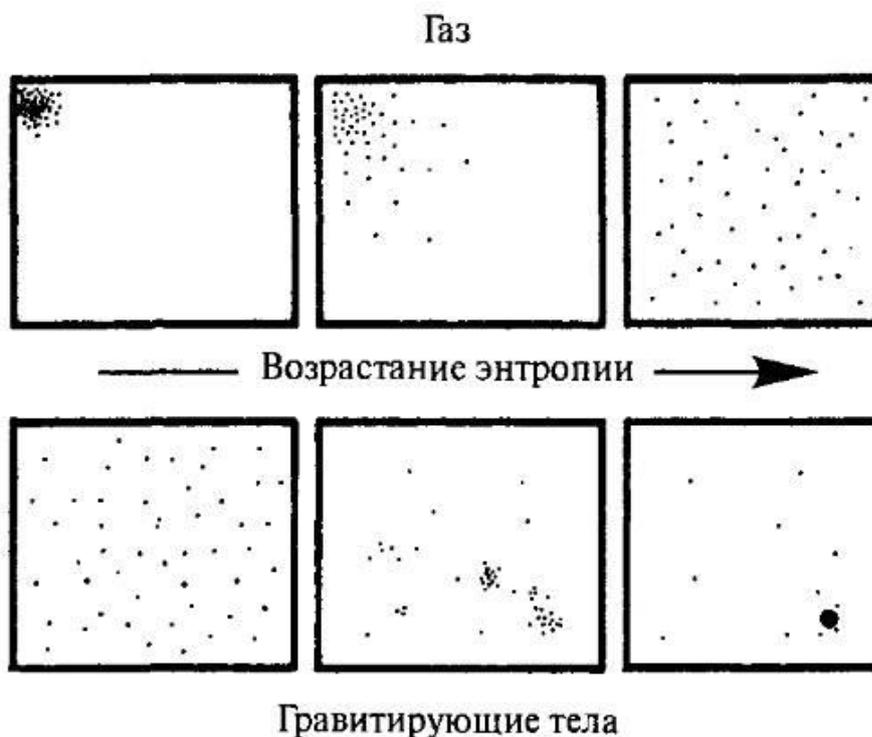


Рис. 7.16. Для обычного газа повышение энтропии связано с увеличением степени однородности его распределения внутри ящика. Для гравитирующих систем имеет место обратная ситуация. Высокая энтропия соответствует гравитационному конденсату, а максимальная – образованию черной дыры

Если мы исследуем сингулярность схлопывания в точной коллапсирующей ФРУ-модели, мы и здесь обнаружим, что в момент схлопывания $\text{ВЕЙЛЬ} = 0$, тогда как РИЧЧИ стремится к бесконечности. Однако, эта особая ситуация дает нам совсем не то, что мы ожидаем от более реалистичной модели, в которой учитывается также и гравитационная конденсация. С течением времени вещество, находящееся первоначально в виде рассеянного газа, будет конденсироваться в звездные галактики. В этом процессе большое число звезд испытают гравитационное сжатие и превратятся в белые карлики, нейтронные звезды и черные дыры, а также в гигантские черные дыры, которые вполне могут образоваться в центрах галактик. Такого рода конденсация – особенно в случае черных дыр – связана с огромным возрастанием энтропии (рис. 7.16). Может показаться странным, на первый взгляд, что конденсированные состояния дают большую энтропию, чем состояния с однородным распределением, особенно если вспомнить, что для газа в ящике его конденсированные состояния (например, случай, когда весь газ собирается в одном из углов ящика) имели низкую энтропию, в то время как однородное распределение, соответствующее тепловому равновесию – имело высокую энтропию. При учете гравитации ситуация меняется на обратную благодаря универсальности гравитационного притяжения. С

течением времени, конденсация становится всё более и более сильной и, в конце концов, множество сконденсировавшихся черных дыр соединяет свои сингулярности в финальной сингулярности большого коллапса. Такая конечная сингулярность не имеет ничего общего с тем идеализированным большим коллапсом, который имеет место в коллапсирующей ФРУ-модели, где действовало ограничение ВЕЙЛЬ = 0. По мере накопления числа сконденсировавшихся объектов, тензор ВЕЙЛЬ имеет тенденцию непрерывно увеличиваться²⁴ и, вообще говоря, ВЕЙЛЬ $\rightarrow \infty$ в конечной сингулярности. Посмотрите на рис. 7.17, где показана полная история замкнутой вселенной в соответствии с этой общей картиной.



Рис. 7.17. Полная история замкнутой вселенной, которая начинается с однородного низкоэнтропийного большого взрыва с ограничением ВЕЙЛЬ = 0 и заканчивается высокоэнтропийным большим коллапсом – представляющим собой сгущение большого числа черных дыр – с условием ВЕЙЛЬ $\rightarrow \infty$

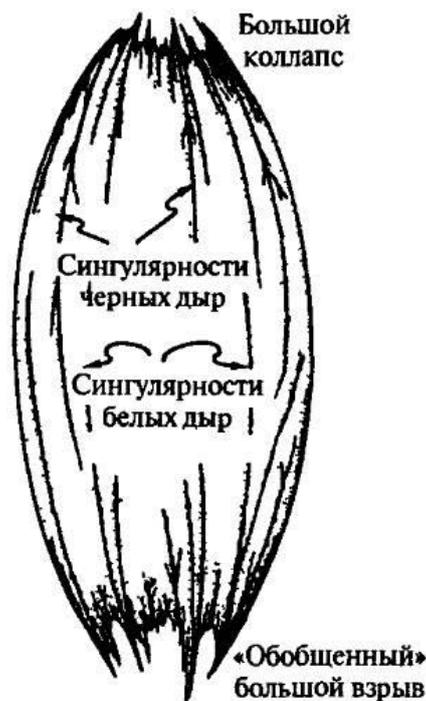


Рис. 7.18. Если убрать ограничение ВЕЙЛЬ = 0, то большой взрыв получится тоже высокоэнтропийным, с условием ВЕЙЛЬ $\rightarrow \infty$. Такая вселенная была бы сплошь испещрена белыми дырами и в ней не выполнялось бы второе начало термодинамики – в полном противоречии с нашим опытом

Мы видим теперь, как становится возможной ситуация, когда сжимающаяся вселенная может не обладать низкой энтропией. Та «малость» энтропии Большого взрыва, которая обеспечивает нам выполнение второго начала, не была, таким образом, следствием одной только «малости» вселенной в момент взрыва! Если бы мы обратили во времени картину большого коллапса, к которой только что пришли, мы бы получили «большой взрыв» с чрезвычайно высокой энтропией, где не было бы второго начала! По некоторым причинам, вселенная возникла в особом (низкоэнтропийном) состоянии, на которое было наложено условие типа ВЕЙЛЬ = 0 для ФРУ-моделей. И если бы подобного рода ограничение не имело места, то «намного более вероятной» могла бы оказаться ситуация, в которой как начальная, так и конечная сингулярности были бы высокоэнтропийного типа ВЕЙЛЬ $\rightarrow \infty$ (рис. 7.18). В такой гипотетической вселенной, конечно же, не нашлось бы места для второго начала термодинамики!

²⁴ Возникает искушение отождествить гравитационный вклад в энтропию системы с некоторой мерой вейлевской кривизны, но до сих пор ни одной подходящей меры не найдено. (Искомая мера, вообще говоря, должна была бы обладать нелокальными свойствами.) К счастью, в наших рассуждениях мы можем обойтись и без нее.

§7.11. Насколько особым был Большой взрыв?

Попробуем разобраться с вопросом о том, насколько ограничивающим для Большого взрыва было условие типа ВЕЙЛЬ = 0. Для простоты (как и ранее) мы будем считать вселенную замкнутой. Для того, чтобы составить ясную и конкретную картину, далее мы везде будем полагать, что число барионов B – т.е. общее число протонов и нейтронов, во вселенной составляет примерно

$$B = 10^{80}.$$

(Не существует каких-то особых оснований для выбора именно этого значения, кроме тех эмпирических данных, которые приводят к нему как к нижней оценке B . Эддингтон однажды заявил, что вычислил B точно и полученное им значение оказалось близким к приведенному выше! Кажется, что сейчас уже никто не принимает всерьез эти вычисления, но значение 10^{80} надежно утвердилось.) Если бы мы взяли большее значение B (в действительности может оказаться, что $B = \infty$), то величины, полученные нами в этом случае, оказались бы еще поразительнее тех (и без того весьма экстраординарных чисел), к которым мы через несколько шагов придем!

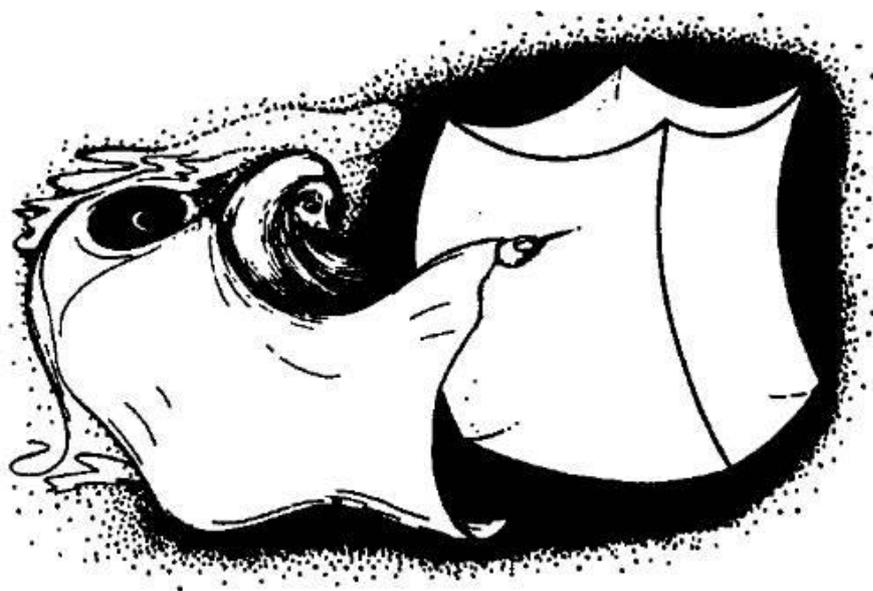


Рис. 7.19. Для сотворения вселенной, близкой по своим свойствам к той, в которой мы живем, Творец ограничивает свой выбор исчезающе малым объемом в фазовом пространстве возможных вселенных, в рассматриваемом случае – всего около $1/10^{10^{123}}$ объема всего пространства. (Этот объем и нацеленная на него булавка показаны без соблюдения масштабов!)

Попробуем представить себе фазовое пространство (§5.7 [МОИ № 15](#)) всей вселенной! Каждая точка этого пространства потенциально соответствует определенному начальному состоянию, из которого вселенная могла начинать свою эволюцию. На рис. 7.19 мы условно изображаем Творца, который в своей деснице держит «булавку», чтобы отметить ею некую точку нашего фазового пространства. Каждое положение булавки соответствует творению особой вселенной. Точность, с которой Творец создает какую-либо вселенную, напрямую связана с энтропией этой вселенной. Создать вселенную с высокой энтропией было бы относительно «легко», поскольку в этом случае в распоряжении Творца имеется большой объем фазового пространства, в который надо указать булавкой. (Напомним, что энтропия пропорциональна логарифму объема соответствующего фазового пространства.) Но чтобы создать вселенную в состоянии с низкой энтропией – так, чтобы в ней выполнялось второе начало термодинамики, – Творец должен направить булавку в гораздо меньший объем фазового пространства. Насколько малым должен быть этот объем, чтобы в результате творения получилась вселенная, напоминающая по своим свойствам ту, в которой мы живем? Для ответа на этот вопрос, мы должны обратиться к замечательной формуле, выведенной Якобом Бекенштейном [1972] и Стивеном Хокингом [1975], которая говорит о том, чему должна быть равна энтропия черной дыры.

Рассмотрим черную дыру и допустим, что площадь ее горизонта есть A . Формула Хокинга–Бекенштейна для энтропии черной дыры гласит:

$$S_{\text{ч.д.}} = \frac{A}{4} \times \left(\frac{kc^3}{G\hbar} \right),$$

где k – константа Больцмана, c – скорость света, G – ньютоновская гравитационная постоянная и \hbar – постоянная Планка, деленная на 2π . Самая существенная часть этой формулы заключена во множителе $A/4$. Часть, стоящая в скобках, содержит только необходимые для соблюдения размерности физические константы. Таким образом, энтропия черной дыры оказывается пропорциональной площади ее поверхности. Для сферически симметричной черной дыры эта площадь оказывается пропорциональной квадрату массы этой дыры:

$$A = m^2 \times 8\pi \frac{G^2}{c^4}.$$

Объединяя это с формулой Бекенштейна–Хокинга, мы получаем, что энтропия черной дыры пропорциональна квадрату ее массы:

$$S_{\text{ч.д.}} = m^2 \times 2\pi \frac{kG}{\hbar c}.$$

Таким образом, энтропия, приходящаяся на единицу массы ($S_{\text{ч.д.}}/m$) черной дыры, пропорциональна ее массе и оказывается тем больше, чем больше черная дыра. Следовательно, для заданной массы или, эквивалентно, – согласно формуле Эйнштейна $E = mc^2$, – для заданной энергии, наибольшая энтропия достигается тогда, когда вся материя сколлапсирует в черную дыру! Более того, энтропия системы двух черных дыр существенно возрастает, когда эти дыры сливаются в одну! Гигантские черные дыры, типа тех, которые, как полагают, находятся в центрах галактик, заключают в себе колоссальное количество энтропии – намного превосходящее те ее значения, которые встречаются в других физических ситуациях.

Утверждение о том, что максимум энтропии достигается при коллапсе всей массы в черную дыру, требует небольшого пояснения. Анализ термодинамики черных дыр, проведенный Хокингом, показывает, что с любой черной дырой можно связать некоторую ненулевую температуру. Одним из следствий этого является тот факт, что в состоянии с максимальной энтропией в черной дыре не может быть заключена вся масса-энергия; максимум энтропии достигается, когда черная дыра приходит в тепловое равновесие с «тепловым резервуаром излучения». Температура этого излучения оказывается действительно ничтожной для черных дыр с любым разумным размером. Так, к примеру, для черной дыры с массой порядка массы Солнца эта температура оказалась бы равной примерно 10^{-7} К, что значительно ниже температур, достигнутых в настоящее время в лабораториях, и намного меньше температуры 2,7 К межгалактического пространства. Для черных дыр больших размеров температура Хокинга оказывается еще меньшей!

Эта температура могла бы оказаться существенной для нашего обсуждения только в том случае, если либо (а) во вселенной существуют намного меньшие черные дыры, которые называют черными мини-дырами; либо (б) вселенная не успеет полностью сколлапсировать за время, меньшее хокинговского времени испарения – времени, за которое черная дыра полностью испаряется. Относительно (а) надо заметить, что черные мини-дыры могут возникнуть лишь в случае особенно хаотичного Большого взрыва. В нашей вселенной их не может быть очень много, в противном случае они бы уже как-то проявили бы себя; более того, согласно излагаемой мной здесь точки зрения, их вообще не должно быть.

Что же касается (б), то для черной дыры с солнечной массой хокинговское время испарения имело бы величину, превосходящую нынешний возраст вселенной где-то в 10^{54} ; а для черных дыр больших размеров оно оказалось бы еще более продолжительным. Таким образом, вряд ли эффект испарения может существенно изменить наши предыдущие рассуждения.

Чтобы иметь некоторое представление о гигантских величинах энтропии черных дыр, рассмотрим чернотельное фоновое излучение с температурой 2,7 К, которое, как долго казалось, давало наибольший вклад в энтропию вселенной. Астрофизики были просто ошарашены огромным количеством энтропии, заключенным в этом излучении, которое намного превосходило все значения энтропии, с которыми приходилось сталкиваться в других ситуациях

(например, на Солнце). Энтропия фонового излучения составляет примерно 10^8 на один барион (здесь я снова перехожу к «естественной системе единиц», в которых постоянная Больцмана равна единице). (По сути, это означает, что на каждый барион приходится 10^8 фотонов фонового излучения.) Таким образом, если всего имеется 10^{80} барионов, то для полной энтропии фонового излучения во вселенной мы имели бы величину

$$10^{88}.$$

Несомненно, что если бы не было черных дыр, то эта величина представляла бы собой практически всю энтропию вселенной, поскольку энтропия фонового излучения намного превосходит энтропию всех других обычных процессов. Так, например, энтропия, приходящаяся на один барион на Солнце, оказывается порядка единицы. С другой стороны, по меркам черных дыр, энтропия фонового излучения – это просто «писк комара». Для черной дыры в одну солнечную массу формула Бекенштейна–Хокинга дает нам значение энтропии около 10^{20} на один барион (в естественных единицах). И даже если бы вселенная состояла всего-навсего из одной черной дыры с массой Солнца, полная энтропия оказалась бы уже намного превосходящей приведенное ранее значение, а именно, была бы равной

$$10^{100}.$$

Конечно, вселенная не устроена таким образом, но эта цифра определенно свидетельствует о том, насколько несущественной становится энтропия фонового излучения, когда мы начинаем учитывать влияние вездесущей гравитации.

А теперь попробуем сделать более реалистичную оценку. Вместо того, чтобы заселять наши галактики одними только черными дырами, примем, что эти галактики состоят, в основном, из обычных звезд – примерно 10^{11} штук в каждой и еще содержат в своей сердцевине около миллиона (10^6) черных дыр с массой солнца (что было бы вполне правдоподобно для нашей собственной Галактики – Млечного Пути). Вычисления показывают, что энтропия, приходящаяся на один барион, оказалась бы в этом случае существенно больше даже того огромного значения, которое было только что получено – она стала бы равной 10^{21} , что для полной энтропии дает (в естественных единицах) величину, равную примерно

$$10^{101}.$$

Мы можем предположить, что, по истечении достаточно большого промежутка времени, подавляющая часть галактических масс окажется захваченной черными дырами в центрах галактик. Когда это произойдет, энтропия в расчете на один барион станет равной 10^{31} , что дает чудовищное значение для полной энтропии:

$$10^{111}.$$

Мы, однако, рассматриваем замкнутую вселенную, которая, в конце концов, должна сколлапсировать; и было бы вполне разумно оценить энтропию конечного коллапса, используя формулу Бекенштейна–Хокинга и полагая при этом, что вся вселенная в момент коллапса представляет собой одну черную дыру. Такая оценка дает величину энтропии на один барион около 10^{43} и совершенно немыслимую величину полной энтропии для конечного коллапса:

$$10^{123}.$$

Это число мы будем рассматривать как некоторую оценку полного объема фазового пространства V , доступного для Творца, поскольку эта энтропия должна представлять собой логарифм объема (несомненно) наибольшей его части. Поскольку 10^{123} есть логарифм объема, сам объем должен представлять собой экспоненту от 10^{123} , т.е.

$$V = 10^{10^{123}}$$

в естественных единицах! (Некоторые особо внимательные читатели могли заметить, что я должен был написать $e^{10^{123}}$ – но для чисел такого порядка разница между основаниями e и 10 совершенно несущественна!) А каков был исходный объем фазового пространства, на который должен был нацелиться Творец, чтобы сотворить вселенную, совместимую со вторым началом термодинамики? Оказывается, что совершенно не важно, какое выбрать значение

$$W = 10^{10^{101}} \text{ или } W = 10^{10^{88}},$$

определяемое галактическими черными дырами или фоновым излучением соответственно, а, может быть, даже еще меньшее (и, на самом деле, более вероятное), которое могло иметь место в реальных условиях при Большом взрыве.

В любом случае, значение отношения V к W будет приблизительно:

$$V/W = 10^{10^{123}}.$$

(Проверьте сами: $10^{10^{123}} : 10^{10^{101}} = 10^{(10^{123}-10^{101})}$ дает с хорошим приближением $10^{10^{123}}$.)

Эта величина свидетельствует о том, насколько точным должен был быть замысел Творца: точность составляла примерно одну $10^{10^{123}}$ -ую! Это поразительная точность. Полученную цифру нельзя даже полностью выписать в обычной десятичной системе исчисления: она представляла бы собой «1» с последующими 10^{123} нулями! Даже если бы мы были в состоянии записать «0» на каждом протоне и каждом нейтроне во вселенной, а также использовали бы для этой цели все остальные частицы, наше число, тем не менее, осталось бы недописанным.

Точность, необходимая для задания начальных условий вселенной, как видно, совершенно несоизмерима с той весьма высокой точностью, которая уже стала привычной, когда речь заходит о динамических уравнениях (Ньютона, Максвелла, Эйнштейна), управляющих поведением физических объектов в различных ситуациях.

Но почему же Большой взрыв был организован с такой высокой степенью точности, в то время как большой коллапс (или сингулярности черных дыр) должен быть совершенно хаотичным? Может показаться, что этот вопрос стоило бы переформулировать в терминах поведения ВЕЙЛЬ-части пространственно-временной кривизны в пространственно-временной сингулярности. Мы установили, что имеется ограничение

$$\text{ВЕЙЛЬ} = 0$$

(или нечто похожее) в сингулярностях начального типа, отсутствующее в конечных сингулярностях – и, кажется, именно оно отражает выбор Творцом соответствующей крошечной области фазового пространства.²⁵ Предположение о том, что такое ограничение применимо к любой начальной (но не конечной!) сингулярности, я назвал бы Гипотезой Вейлевской Кривизны. Таким образом, напрашивается вывод, что нам осталось понять лишь одну вещь для окончательного разрешения вопроса о происхождении второго начала термодинамики, а именно: почему мы должны использовать такую несимметричную во времени гипотезу²⁶?

Но как нам преодолеть это (последнее?) препятствие на пути к полному пониманию причины существования второго начала? Кажется, мы попали в безвыходное положение. Нам необходимо понять, почему пространственно-временные сингулярности имеют определенную структуру; но пространственно-временные сингулярности представляют собой как раз те области, в которых наше понимание физики достигает своих пределов. Этот тупик, связанный с

²⁵ В.Э.: Как я уже говорил, я не хочу «влезать в физику» и поэтому очень мало комментирую физические главы Пенроуза. Но здесь всё же скажу пару слов. Энтропия не представляет собой не только материальную сущность, но даже и не что-то хоть как-то измеряемое наподобие массы (которую всё же можно взвесить хотя бы весами при определенном g). Энтропия – это просто число, приписываемое человеком тому или иному состоянию системы и характеризующее на самом деле лишь субъективную оценку человеком невозможности системы вернуться в прежнее состояние. По своей природе энтропия родственна вероятности (тоже субъективная оценка человека, выраженная числом), но только «противоположная по направлению»: если вероятность выражает возможность события, то энтропия выражает невозможность события. (И вспомним, КАК энтропия вводилась – хотя бы здесь же Пенроузом – всё и начиналось с вероятностей). Но Природе нет никакого дела до того, какие вероятности или невероятности насчитал человек, – она просто делает свое. И я думаю, что для Природы «начальная сингулярность» Большого взрыва с ВЕЙЛЕМ = 0 и «конечная сингулярность» сколлапсировавшей вселенной с ВЕЙЛЕМ = ∞ – это одно и то же. Из сколлапсировавшей нашей Вселенной в «другом пространстве-времени» новым большим взрывом возникнет новая вселенная, и Пенроуз, который будет жить в той вселенной, опять будет считать ВЕЙЛЬ с нуля, не догадываясь, что Пенроуз из нашей Вселенной уже насчитал ВЕЙЛЬ до бесконечности. (Какой-то смысл в этом действительно есть: ведь энтропия – это мера невозможности вернуться назад, а из коллапса обратно в нашу Вселенную и вправду не вернуться – оттого и ВЕЙЛЬ = ∞ , а в той вселенной всё труднее и труднее будет вернуться к ихнему большому взрыву – потому и энтропия будет расти – в оценках ихних ученых).

²⁶ Существует популярная в настоящее время точка зрения, называемая «инфляционным сценарием», которая призвана объяснить, почему вселенная, помимо всего прочего, является однородной на очень больших масштабах. Согласно этой теории, вселенная на очень ранних стадиях испытала гигантское расширение – намного превосходящее по своим масштабам «обычное» расширение стандартного сценария. Идея заключается в том, что любые нерегулярности сглаживаются в результате такого расширения. Однако, инфляция не работает без наложения еще более жестких начальных ограничений, чем те, которые уже даются гипотезой о вейлевской кривизне. Она не вводит в теорию никакой асимметричной во времени составляющей, которая дала бы возможность объяснить различие между начальной и конечной сингулярностью. (Более того, она опирается на физические теории – теории великого объединения – чей статус не более, чем ПРОБНЫЙ, по терминологии главы 5. Для более подробного знакомства с критическим анализом «инфляции», в контексте идей, изложенных в этой главе, см. Пенроуз [1989б].)

существованием пространственно-временных сингулярностей, иногда сравнивают с другим тупиком: он имел место в начале XX века и был связан с проблемой устойчивости атомов (см. §6.2 [МОИ № 15](#)). В каждом из этих случаев хорошо обоснованная классическая теория приводит к ответу «бесконечность» и обнаруживает, тем самым, свою несостоятельность для решения соответствующей проблемы.

Сингулярный характер электромагнитного коллапса атомов был устранен квантовой теорией. Аналогично именно квантовая теория должна привести теперь к конечной теории, взамен «бесконечных» классических пространственно-временных сингулярностей, возникающих при гравитационном коллапсе звезд. Но это не может быть обычная квантовая теория. Это должна быть квантовая теория самой структуры пространства и времени. Такую теорию (в случае, если она вообще появится) следовало бы назвать «квантовой гравитацией». То, что ее пока нет, не является признаком недостатка усилий, опыта или изобретательности физиков: многие первоклассные ученые с мировым именем пытались построить такую теорию, но безуспешно. Это тупик, к которому, в конце концов, пришли и мы в наших попытках понять направленность и течение времени.

Читатель может справедливо спросить: а что же, в таком случае, дало нам наше путешествие? В наших поисках понимания того, почему время кажется текущим только в одном направлении, нам пришлось побывать в начале и конце времен, там, где растворяется даже само понятие пространства. Что же мы в результате выяснили? Мы узнали, что нашим теориям пока еще недоступны ответы на эти вопросы – но что полезного это нам дает для понимания сущности разума? Я всё же полагаю, что несмотря на отсутствие адекватной теории, мы можем извлечь важные уроки из нашего путешествия. А теперь нам необходимо вернуться домой. И хотя наше путешествие назад будет еще более наполнено догадками и предположениями, но других приемлемых путей назад просто нет!

Глава 8. В поисках квантовой теории гравитации

§8.1. Зачем нужна квантовая теория гравитации?

Что еще осталось узнать о мозге и мышлении такого, чего мы не выяснили в предыдущей главе? Хотя мы уже кратко рассмотрели некоторые из всеобъемлющих физических принципов, лежащих в основе направленности воспринимаемого нами «потока времени», нам всё же пока не удалось понять не только почему мы воспринимаем время как нечто текущее, но даже почему мы вообще его воспринимаем. Я считаю, что тут необходимы гораздо более радикальные идеи. До сих пор мое изложение особым радикализмом не отличалось, хотя в некоторых случаях расстановка акцентов была далека от традиционной. Мы ознакомились со вторым началом термодинамики, и я попытался убедить читателя в том, что этот закон – данный нам в виде, выбранном самой природой, – уходит своими корнями в чрезвычайно сильное геометрическое ограничение на происхождение вселенной в результате Большого взрыва – гипотезу о вейлевской кривизне. Некоторые космологи предпочитают интерпретировать это исходное ограничение иначе, но такого рода ограничение на начальную сингулярность действительно является необходимым. Выводы, которые я собираюсь сделать из этой гипотезы, будут гораздо менее традиционными, чем сама гипотеза. Я утверждаю, что потребуются изменения в самих основах квантовой теории!

Эти изменения должны сыграть свою роль при объединении квантовой механики с общей теорией относительности, т.е. в рамках искомой квантовой теории гравитации. Большинство физиков не считают необходимым что-либо менять в квантовой теории при ее объединении с общей теорией относительности. Более того, они утверждают, что на пространственных масштабах, имеющих значение для нашего мозга, эффекты любой квантовой теории гравитации пренебрежимо малы! Они отмечают (и весьма резонно), что хотя такого рода физические эффекты действительно могут оказаться существенными на абсурдно малых пространственных масштабах, сравнимых с так называемой планковской длиной,²⁷ что составляет 10^{-35} м – т.е. примерно в $100\,000\,000\,000\,000\,000\,000\,000$ раз меньше размера самой маленькой из субатомных частиц, – эти эффекты тем не менее никоим образом напрямую не затрагивают явления, происходящие на много больших «обычных» пространственных масштабах, от 10^{-12} м и более, там, где правят бал химические и электрические процессы, важные для деятельности мозга. Собственно говоря, даже классическая (то есть не квантовая) теория гравитации почти никак не затрагивает эти электрические и химические процессы. Если классической гравитацией можно пренебречь, то какое может иметь значение любая ничтожно малая «квантовая поправка» к классической теории? Более того, поскольку отклонения от квантовой теории до сих пор не наблюдались, то тем более представляется лишенной всяких оснований сама мысль о каком бы то ни было влиянии на процессы мышления любого ничтожно малого гипотетического отклонения от стандартной квантовой теории!

Я же буду рассуждать совсем иначе. Меня интересует не столько влияние квантовой механики на теорию структуры пространства-времени (теорию относительности Эйнштейна), сколько возможное обратное влияние эйнштейновской теории пространства-времени на саму структуру квантовой механики. Я хочу подчеркнуть, что предлагаемая мною точка зрения нетрадиционна. Нетрадиционным является предположение о самой возможности влияния общей теории относительности на структуру квантовой механики! Традиционная физика относится с большим предубеждением к любым попыткам что-либо изменить в стандартной структуре квантовой механики. Несмотря на, по-видимому, непреодолимые трудности, возникающие при попытках непосредственного применения правил квантовой механики к теории Эйнштейна, работающие в этой области исследователи, как правило, делали отсюда вывод о необходимости

²⁷ Это расстояние (10^{-35} м = $\sqrt{\hbar G c^{-3}}$), на котором так называемые «квантовые флуктуации» самой метрики пространства-времени становятся настолько большими, что обычное представление об однородном пространственно-временном континууме оказывается неприменимым. (Квантовые флуктуации являются следствием принципа неопределенности Гейзенберга – см. с. §6.7 МОИ [№ 15](#)).

корректировки теории Эйнштейна, а не квантовой механики.²⁸ Я же придерживаюсь практически противоположной точки зрения и считаю, что проблемы самой квантовой теории носят фундаментальный характер. Вспомним о несовместимости двух основных ее процедур – U и R (U подчиняется совершенно детерминистскому уравнению Шрёдингера – это так называемое уравнение унитарной эволюции, а R представляет собой вероятностную редукцию вектора состояния, необходимость в которой возникает всякий раз, когда предполагается, что было сделано «наблюдение»). По-моему, эту несовместимость нельзя адекватно разрешить простой подходящей «интерпретацией» квантовой механики (хотя эта точка как раз и является господствующей), – ее устранение возможно лишь в рамках новой теории, коренным образом отличной от существующей, в которой процедуры U и R будут рассматриваться как различные (и очень хорошие) приближения к более всеобъемлющей и точной единой процедуре. Моя точка зрения, следовательно, состоит в том, что даже такая изумительно точная теория, как квантовая механика, потребует изменений, и что именно теория относительности Эйнштейна позволит лучше всего понять характер этих изменений. Я пойду еще дальше, утверждая, что речь идет именно об искомой квантовой теории гравитации, одним из компонентов которой должна как раз стать предполагаемая единая процедура U/R.

С другой стороны, с общепринятой точки зрения любые прямые следствия квантовой теории гравитации должны иметь более эзотерический характер. Я уже упоминал об ожидаемом радикальном изменении структуры пространства-времени на абсурдно малых масштабах порядка планковской длины. Существует мнение (и, по-моему, вполне обоснованное), что квантовая теория гравитации должна сыграть фундаментальную роль в окончательном установлении природы наблюдаемого «зоопарка элементарных частиц». Например, сейчас у нас нет хорошей теории, которая бы объяснила, почему массы частиц именно таковы, каковы они есть – а ведь понятие «массы» теснейшим образом связано с понятием гравитации. (Действительно, единственное действие массы – быть «источником» гравитации.) К тому же не без оснований считается, что (согласно идее, выдвинутой где-то около 1955 года шведским физиком Оскаром Клейном) правильная квантовая теория гравитации обязана устранить расходимости, преследующие обычную квантовую теорию поля (см. с. 235). Физика представляет собой единое целое, и правильная квантовая теория гравитации, когда она, наконец, будет построена, должна стать основой нашего досконального понимания универсальных законов природы.

Мы, однако, пока еще далеки от такого понимания. Более того, вне всякого сомнения любая гипотетическая квантовая теория гравитации не будет иметь практически никакого отношения к явлениям, управляющим поведением мозга. Особенно далеки от деятельности мозга могут оказаться те (общепринятые) аспекты квантовой теории гравитации, которые необходимы для выхода из тупика, в который мы попали в предыдущей главе, а именно для разрешения проблемы пространственно-временных сингулярностей – сингулярностей классической теории Эйнштейна, которые возникают в момент большого взрыва и в черных дырах, а также при большом коллапсе – если наша вселенная решит в конце концов сколлапсировать сама на себя. Конечно же, эта роль квантовой теории гравитации вполне может показаться далекой [от проблем деятельности мозга]. Я, однако, утверждаю, что тут всё же имеется почти неуловимая, но важная логическая связь. Постараемся выяснить, в чем она состоит.

§8.2. Что скрывается за гипотезой о вейлевской кривизне?

Как я уже отмечал, даже согласно традиционной точке зрения именно квантовая теория гравитации должна прийти на помощь классической общей теории относительности и решить проблему пространственно-временных сингулярностей. Так, квантовая теория гравитации должна дать непротиворечивое физическое описание взамен бессмысленного «бесконечного»

²⁸ Вот самые распространенные корректировки этого типа: (i) замена уравнений Эйнштейна РИЧЧИ = ЭНЕРГИЯ (используя лагранжианы более высоких порядков); (ii) замена четырехмерного пространства-времени на пространство-время с большим числом измерений (как в случае так называемых «теорий Калуцы–Клейна»); (iii) введение «суперсимметрии» (идея, заимствованная из квантового поведения бозонов и фермионов, сведенного в единую схему, и примененная, не совсем последовательно, к пространственно-временным координатам); (iv) теория струн (очень популярная сейчас теория, в которой «мировые линии» заменяются на «истории струн» – обычно в сочетании с идеями (ii) и (iii)). Все эти предложения, несмотря на их популярность, следует рассматривать как заведомо ПРОБНЫЕ согласно терминологии главы 5 {МОИ № 15 стр.5}.

результата классической теории. Я безусловно согласен с этой точкой зрения: это как раз та самая ситуация, где квантовая теория гравитации должна проявить себя в полной мере. Однако, теоретики не могут смириться с тем поразительным фактом, что проявления квантовой теории гравитации вопиющим образом асимметричны во времени! В случае Большого взрыва – прошлой сингулярности – квантовая теория гравитации должна требовать выполнения условия типа

$$\text{ВЕЙЛЬ} = 0$$

в тот момент, когда приобретает смысл описание в терминах классических понятий геометрии пространства-времени. С другой стороны, для сингулярностей, расположенных внутри черных дыр, и (возможно) для сингулярности большого коллапса – т.е. для будущих сингулярностей – такого рода ограничение отсутствует, и мы полагаем, что по мере приближения к такой сингулярности тензор Вейля стремится к бесконечности:

$$\text{ВЕЙЛЬ} \rightarrow \infty.$$

Я считаю это обстоятельство несомненным свидетельством асимметричности во времени истинной теории. Итак:

искомая квантовая теория гравитации асимметрична во времени.

Хочу предупредить здесь читателя, что приведенный вывод, несмотря на его очевидность, с неизбежностью вытекающей из изложенных выше рассуждений, не является, тем не менее, общепринятым! Большинство исследователей, работающих в рассматриваемой области науки, крайне неохотно встают на эту точку зрения. Причина, по-видимому, кроется в отсутствии ясного способа, каким привычные и (насколько можно судить) хорошо нами понятые процедуры квантования могли бы породить асимметричную во времени²⁹ квантовую теорию при том, что классическая теория, к которой упомянутые процедуры применяются (стандартная общая теория относительности или ее модификации), сама по себе симметрична во времени. Соответственно, эти специалисты по квантованию гравитации вынуждены (если они вообще задаются подобными вопросами – что случается не так уж и часто) искать другие «объяснения» малого значения энтропии при Большом взрыве.

Многие физики могут возразить, что гипотезы, подобные предположению о нулевом начальном значении вейлевской кривизны, – представляя собой выбор «граничного условия», а не динамические законы, – находятся за пределами наших возможностей объяснения. Они утверждают, по сути, что в данном случае мы имеем дело с «актом Творца» и нечего даже и пытаться понять, почему нам дано именно это граничное условие, а не какое-нибудь другое. Однако, как мы уже убедились выше, ограничение, накладываемое рассматриваемой гипотезой на «булавку Творца», по своей исключительности и точности не уступает той потрясающей и тончайшим образом организованной хореографии динамических законов, к пониманию которых мы пришли через уравнения Ньютона, Максвелла, Эйнштейна, Шрёдингера, Дирака и др. Хотя второе начало термодинамики и может показаться нечетким и статистическим по своей природе, оно тем не менее вытекает из чрезвычайно точного геометрического ограничения. Поскольку научное осмысление доказало свою ценность как способ понимания динамических уравнений, мне представляется неразумным впасть в отчаяние и терять всякую надежду на научное постижение ограничений, действовавших в случае «граничного условия», каким являлся Большой взрыв. С моей точки зрения, как одно, так и другое являются частью науки, хотя и той частью, которая нами – пока еще – недостаточно понята.

История науки продемонстрировала, насколько ценной для физики оказалась идея отделения динамических уравнений (законов Ньютона, уравнений Максвелла и т.д.) от так называемых граничных условий – то есть условий, необходимых для выделения из огромного множества решений того, что имеет физический смысл. Исторически простые формулировки были найдены именно для динамических уравнений. Движения частиц подчиняются простым законам, а вот о встречающихся во вселенной реальных конфигурациях частиц это, похоже, можно сказать нечасто. Иногда эти конфигурации на первый взгляд выглядят простыми – как, например, в случае планетных орбит, эллиптическая форма которых была установлена Кеплером, – но простота их в дальнейшем оказалась следствием динамических законов. Более глубокое понимание всегда достигалось через динамические законы, а простые конфигурации, подобные

²⁹ Хотя процедуры квантования не всегда сохраняют симметрию классической теории (см. Трейман [1985]; Аштекар и др. [1989]), здесь требуется нарушение всех четырёх симметрий, обычно обозначаемых как T, P, C и CP. Это (особенно нарушение CP симметрии) выходит за пределы возможностей обычных методов квантования.

вышеописанной, как правило оказывались просто приближениями к более сложным конфигурациям вроде возмущенных (уже не совсем эллиптических) реально наблюдаемых движений планет, которые находят свое объяснение в динамических уравнениях Ньютона. Граничные условия служат для «запуска» рассматриваемой системы, после чего за дело принимаются динамические законы. Сам факт возможности отделения проблемы динамического поведения от вопроса о конфигурации реального содержимого вселенной представляет собой одно из важнейших достижений физической науки.

Я сказал, что исторически это разделение на динамические уравнения и граничные условия сыграло чрезвычайно важную роль. Сама же возможность такого разделения представляет собой свойство конкретного типа уравнений (дифференциальных уравнений), который, как кажется, всегда возникает в физике. Но я не верю, что это разделение сохранится навечно. По-моему, когда нам удастся окончательно постичь законы или принципы, в действительности управляющие поведением нашей вселенной, – а не просто те изумительные приближения, к пониманию которых мы уже пришли и которые суть составные части наших ПРЕВОСХОДНЫХ современных теорий, то увидим, как различие между динамическими уравнениями и граничными условиями исчезнет, уступив место потрясающе согласованной всеобъемлющей схеме. Разумеется, утверждая это, я выражаю исключительно свое собственное мнение, с которым многие могут не согласиться. Но именно эту точку зрения я имею в виду, когда стараюсь нащупать следствия из пока неизвестной квантовой теории гравитации. (Под этим углом будут рассмотрены также некоторые наиболее спекулятивные рассуждения последней главы.)

Как же можно изучать следствия неизвестной еще теории? Это, однако, не обязательно столь безнадежно, как кажется. Главное здесь – быть последовательными! Сначала я попрошу вас допустить, что наша гипотетическая теория, далее называемая ПКТГ («правильная квантовая теория гравитации»), должна объяснить гипотезу о вейлевской кривизне (ГВК). Это значит, что в непосредственном ближайшем будущем начальная сингулярность должна удовлетворять условию ВЕЙЛЬ = 0. Это ограничение не должно противоречить законам ПКТГ и поэтому обязано соблюдаться для любой начальной сингулярности, а не только той, что мы называем Большим взрывом. При этом я никоим образом не утверждаю существование в нашей реальной вселенной каких бы то ни было других начальных сингулярностей, отличных от Большого взрыва, но всего лишь говорю, что такая сингулярность, если бы она существовала, должна удовлетворять ограничению, накладываемому ГВК. Начальная сингулярность – это сингулярность, из которой, в принципе, могут возникать частицы. Такие сингулярности ведут себя противоположно черным дырам – конечным сингулярностям, в которые частицы могут падать.

Одним из возможных примеров начальной сингулярности, отличной от Большого взрыва, может быть сингулярность белой дыры, которая, как мы помним из главы 7, представляет собой обращенную во времени черную дыру (см. рис. 7.14). Но, как мы уже видели, сингулярности внутри черных дыр удовлетворяют условию ВЕЙЛЬ $\rightarrow \infty$, поэтому и для белых дыр должно выполняться ВЕЙЛЬ $\rightarrow \infty$. Однако теперь сингулярность стала начальной и для нее, согласно ГВК, должно выполняться условие ВЕЙЛЬ = 0. Таким образом, ГВК делает существование белых дыр в нашей вселенной невозможным! (К счастью, этот результат не только желателен из термодинамических соображений – поскольку белые дыры были бы вопиющим нарушением второго начала термодинамики – но к тому же согласуется с наблюдательными данными! Время от времени разными астрофизиками предпринимались попытки объяснить некоторые явления, предполагая существование белых дыр, но такие гипотезы всегда создавали гораздо больше проблем, чем решали.) Заметьте, что сам Большой взрыв я не называю «белой дырой». Белая дыра должна содержать локализованную начальную сингулярность, для которой выполнение условия ВЕЙЛЬ = 0 невозможно, в то время как всеобъемлющий Большой взрыв может удовлетворять условию ВЕЙЛЬ = 0, и существование такого взрыва допускается ГВК при условии выполнения соответствующего ограничения.

Примером еще одного вида начальных сингулярностей является точка взрыва черной дыры, окончательно исчезающей, после, скажем, 10^{64} лет хокинговского испарения (см. с. 278,³⁰ а также с. 294³¹)! Точная природа этого (весьма правдоподобно аргументированного) явления является предметом многочисленных теоретических гипотез. Я думаю, что никакого противоречия с ГВК здесь нет. Такого рода (локализованный) взрыв может быть практически

³⁰ В.Э.: Это §7.11 выше в этом томе.

³¹ В.Э.: Это §8.4 ниже в этом томе.

мгновенным и симметричным, и я не вижу здесь никакого конфликта с гипотезой ВЕЙЛЬ = 0. Во всяком случае, если предположить, что черных мини-дыр не существует (см. с. 278), то первый такой взрыв вряд ли произойдет раньше, чем вселенная просуществует в 10^{54} раз больше современного возраста T . Чтобы получить представление о величине $10^{54} \times T$, мысленно уменьшим T до самого короткого измеримого промежутка времени, равного времени распада самой короткоживущей из нестабильных частиц. В полученной таким образом шкале времени современный возраст вселенной окажется меньше $10^{54} \times T$ в миллион миллионов раз!

Кто-нибудь может посмотреть на всё это с другой точки зрения. Мне могут возразить,³² что ПКТГ не обязана быть асимметричной во времени, а должна лишь допускать на самом деле два типа сингулярностей, для одних из которых должно выполняться равенство ВЕЙЛЬ = 0, а для вторых возможно ВЕЙЛЬ $\rightarrow \infty$. В нашей вселенной оказалась сингулярность первого типа, и наше восприятие направления течения времени (в силу вытекающего отсюда второго начала термодинамики) помещает эту сингулярность туда, где находится наше так называемое «прошлое», а не «будущее». По-моему, однако, соображение это в таком виде не выдерживает критики. Оно не объясняет отсутствие других начальных сингулярностей типа ВЕЙЛЬ $\rightarrow \infty$ (а также отсутствие других начальных сингулярностей типа ВЕЙЛЬ = 0). Почему, если согласиться с этой точкой зрения, вселенная не усеяна белыми дырами? Поскольку она, как мы предполагаем, кишит черными дырами, отсутствие белых дыр требует объяснения.³³

Другое соображение, иногда привлекаемое в связи с рассматриваемой проблемой, – это так называемый антропный принцип (см. Барроу, Типлер [1986]). Согласно этому соображению, конкретная вселенная, обитателями которой мы сейчас являемся, выбрана из всех возможных вселенных потому, что в ней должны существовать мы (или, по крайней мере какие-нибудь чувствующие существа), чтобы ее было кому наблюдать! (Я вернусь к обсуждению антропного принципа в главе 10.) На этом основании утверждается, что разумные существа могут населять только вселенные с Большим взрывом очень определенного типа – и поэтому следствием этого принципа должно быть что-то вроде ГВК. Однако, это соображение не позволяет и близко подойти к числу $10^{10^{123}}$, полученному в главе 7 (см. с. 280), которое характеризует степень «специфичности» Большого взрыва. Путем очень грубого расчета можно установить, что порождение солнечной системы со всем ее населением в результате случайных столкновений частиц обойдется гораздо «дешевле», а именно: соответствующая степень «невероятности» (измеряемая в терминах фазовых объемов) соответствует «всего лишь» одной доле из много менее чем $10^{10^{60}}$. Это всё, что может дать антропный принцип, и нам еще чудовищно далеко до требуемого числа. Более того, соображения, основанные на антропном принципе, не в состоянии объяснить, как и обсуждавшаяся перед этим концепция, отсутствия белых дыр.

§8.3. Временная асимметрия в редукции вектора состояния

По-видимому, нам действительно ничего не остается, как заключить, что ПКТГ должна быть асимметричной во времени теорией, одним из следствий которой является ГВК (или что-то вроде этого). Как же асимметричная во времени теория может получиться из симметричных во времени ингредиентов: квантовой теории и общей теории относительности? Есть, оказывается, несколько технических способов достижения этой цели, и ни один из них не исследовался достаточно глубоко (см. Аштекар и др. [1989]). Но я собираюсь подойти к проблеме с другой стороны. Как я уже отмечал, квантовая теория «симметрична во времени», но это в действительности относится только к части U теории (уравнению Шрёдингера и т.д.). Обсуждая временную

³² Насколько я смог понять, именно такая точка зрения неявно содержится в выдвигаемых сейчас Хокингом предложениях по квантово-гравитационному объяснению рассматриваемых проблем (Хокинг [1987, 1988]). Гипотеза Хартли и Хокинга [1983] о квантово-гравитационной природе начального состояния, возможно, относится к тем гипотезам, что могут подвести теоретическую базу под начальное условия типа ВЕЙЛЬ = 0, но эти идеи пока что лишены чрезвычайно важного (по моему мнению) компонента, каким является асимметрия во времени.

³³ Некоторые могут на это возразить (совершенно справедливо), что наблюдения не подтверждают однозначным образом мое утверждение о существовании во вселенной черных дыр и отсутствии белых. Но мой довод, в основном, теоретического характера. Черные дыры не противоречат второму началу термодинамики, а белые дыры противоречат! (Разумеется, можно просто постулировать второе начало термодинамики и отсутствие белых дыр, но мы хотим достичь более глубокого понимания сути вещей, происхождения второго начала термодинамики.)

симметрию физических законов в начале главы 7, я умышленно избегал упоминания части R (коллапс волновой функции). Согласно преобладающей точке зрения R тоже должна быть, по-видимому, симметричной во времени. Своим существованием эта точка зрения может, в частности, быть обязана нежеланию признавать в R реальный независимый от U «процесс», вследствие чего из временной симметрии U должна бы также вытекать временная симметрия R. Я хотел бы возразить, что это не так: R асимметрична во времени – по крайней мере, если считать R просто процедурой, принятой физиками для расчета квантово-механических вероятностей.

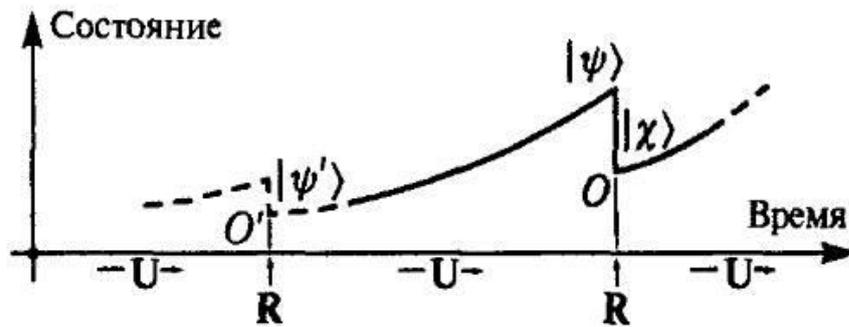


Рис. 8.1. Временная эволюция вектора состояния: гладкая унитарная эволюция U (в соответствии с уравнением Шрёдингера), перемежаемая с разрывной редукцией R вектора состояния

Я сначала напомним вам используемую в квантовой механике так называемую процедуру редукции вектора состояния (R) (см. рис. 6.23). Рис. 8.1 иллюстрирует (условно) характер предполагаемой эволюции вектора состояния $|\psi\rangle$ в квантовой механике. Как видим, этот характер довольно своеобразный: считается, что большую часть времени эволюция происходит в соответствии с унитарной эволюционной процедурой U (уравнение Шрёдингера), но в некоторые моменты времени, когда предполагается, что происходит «наблюдение» (или «измерение»), применяется R-процедура и вектор состояния скачком переходит в другой вектор состояния, например $|\chi\rangle$, где $|\chi\rangle$ представляет собой одну из двух или нескольких ортогональных альтернативных возможностей $|\chi\rangle$, $|\phi\rangle$, $|\theta\rangle$, ..., определяемых природой конкретного производимого наблюдения O. Тогда вероятность p скачкообразного перехода от $|\psi\rangle$ к $|\chi\rangle$ определяется уменьшением квадрата длины $|\psi|^2$ вектора $|\psi\rangle$ при проекции $|\psi\rangle$ (в гильбертовом пространстве) на направление вектора $|\chi\rangle$. (Математически это равно величине уменьшения $|\chi|^2$ при проекции вектора $|\chi\rangle$ на направление $|\psi\rangle$.) В таком виде эта процедура оказывается асимметричной во времени, поскольку сразу же после выполнения наблюдения O вектор состояния должен принадлежать к заданному множеству $|\chi\rangle$, $|\phi\rangle$, $|\theta\rangle$, ... возможных значений, определяемых O, в то время как непосредственно перед наблюдением O вектор состояния должен был иметь значение $|\psi\rangle$, которое не обязано быть равным ни одному из элементов упомянутого множества. Однако, это всего лишь кажущаяся асимметричность, и она может быть устранена, если посмотреть на эволюцию вектора состояния с другой точки зрения. Рассмотрим квантово-механическое решение, обращенное во времени. Это экстравагантное описание проиллюстрировано на рис. 8.2. Мы предполагаем, что вектор состояния равен $|\chi\rangle$ непосредственно перед O, а не сразу после этого наблюдения, и применим процедуру унитарной эволюции вспять по времени вплоть до момента предыдущего наблюдения O'. Предположим, что в результате обратной эволюции мы получим состояние, описываемое вектором $|\chi'\rangle$ (сразу же после наблюдения O'). В нормальном описании эволюции вперед во времени, изображенном на рис. 8.1, сразу же вслед за O' мы имели другое состояние $|\psi'\rangle$ (результат наблюдения O', при котором эволюция вперед во времени вектора $|\psi'\rangle$ переводит его в $|\psi\rangle$ в момент наблюдения O). Теперь в нашем обращенном во времени описании у вектора $|\psi'\rangle$ тоже есть своя роль: он представляет состояние системы непосредственно перед O'. Вектор состояния $|\psi'\rangle$ соответствует состоянию, фактически наблюдавшемуся в точке O', так что с «обращенной» точки зрения мы рассматриваем $|\psi'\rangle$ как результат наблюдения O' в обращенном вспять времени. Расчетное значение квантово-механической вероятности p' , связывающее результаты наблюдений в точках O и O', теперь

определяется уменьшением величины $|\chi|^2$ при проекции $|\chi\rangle$ в направлении $|\psi\rangle$ (что равно уменьшению $|\psi|^2$ при проекции $|\psi\rangle$ в направлении $|\chi\rangle$). То, что мы получим то же самое значение, что и раньше, является фундаментальным свойством оператора U .³⁴

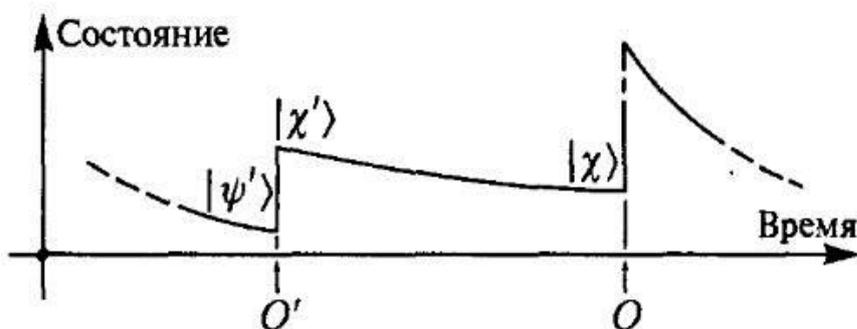


Рис. 8.2. Более экстравагантное изображение эволюции вектора состояния, описанное вспять по времени. Расчетная вероятность, связывающая наблюдение в точке O с наблюдением в точке O' , такая же, как и в случае, изображенном на рис. 8.1, но к чему относится это вычисленное значение?

Таким образом, может создаться видимость установления симметричности во времени квантовой теории даже в случае, когда помимо обычной процедуры унитарной эволюции U учитывается также и разрывный процесс, описываемый процедурой редукции R вектора состояния. Это, однако, неверно. Квантовая вероятность p описывает – независимо от того, как она рассчитывается – вероятность получить результат (а именно, $|\chi\rangle$) в точке O при условии определенного результата (а именно, $|\psi\rangle$) в точке O' . Эта вероятность не обязательно равна вероятности получить данный результат в точке O' при условии данного результата в точке O , а ведь именно последнюю вероятность³⁵ и должна определить обращенная во времени квантовая механика. Просто удивительно, до чего много физиков молчаливо полагают эти две вероятности равными друг другу. (Я сам этим грешил – см. Пенроуз [1979б], с. 584.) Однако наиболее вероятно, что эти две вероятности совершенно различны и только первая из них правильно определяется в рамках квантовой механики!

Давайте поясним эту ситуацию на простом конкретном примере. Предположим, что у нас есть лампа L и фотоэлемент (то есть, детектор фотонов) P . Между L и P разместим полуперебренное зеркало M , наклонив его под углом равным, скажем, 45° к линии, соединяющей точки L и P (рис. 8.3). Предположим, что лампа время от времени случайным образом испускает фотоны, и что конструкция ее такова (в ней используются параболические зеркала), что фотоны всегда оказываются очень точно нацеленными на P . При каждом попадании фотона на фотоэлемент последний регистрирует это событие, причем мы предполагаем, что устройство срабатывает со 100 %-ной надежностью. Предположим также, что каждый факт излучения фотона регистрируется в точке L и тоже со 100 %-ной надежностью. (Ни одно из этих идеализированных требований не противоречит принципам квантовой механики, хотя практическое достижение такой эффективности может представлять определенные трудности.)

³⁴ Это станет несколько более понятным, если использовать операцию скалярного произведения $\langle\psi|\chi\rangle$, упомянутую в замечании 6 к главе 6. В случае описания вперед по времени вероятность p рассчитывается как: $p = |\langle\chi|\psi\rangle|^2 = |\langle\psi|\chi\rangle|^2$. Тожественность двух выражений следует из $\langle\psi|\chi\rangle = \langle\chi|\psi\rangle$, а это, в сущности, и подразумевается под «унитарной эволюцией».

³⁵ Возможно, некоторым читателям сложно понять, что имеется в виду под вероятностью прошлого события при условии, что имело место определенное событие в будущем. Однако это совсем не сложно. Вообразите себе всю историю нашей вселенной, отображенной в пространстве-времени. Чтобы найти вероятность события p при условии, что произошло событие q , мысленно рассмотрим все случаи, когда имело место событие q , и сосчитаем, в какой доле этих случаев имело место также и событие p . Это и есть требуемая вероятность. При этом не важно, относится ли q к событиям, которые обычно происходят после события p , или до него.

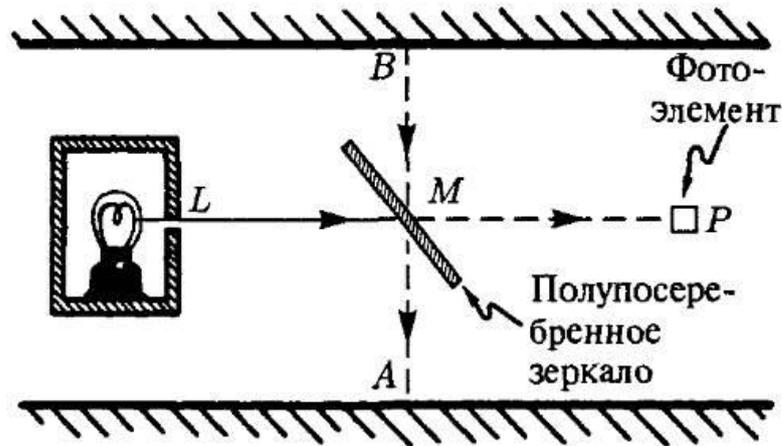


Рис. 8.3. Необратимость во времени R-процедуры в простом квантовом эксперименте. Вероятность регистрации фотона фотоэлементом при условии излучения фотона источником равна в точности одной второй, но вероятность излучения фотона источником при условии, что фотоэлемент зарегистрировал фотон, заведомо не равна одной второй

Свойства полупосеребрянного зеркала M таковы, что оно отражает в точности половину попадающих на него фотонов и пропускает остальную половину. Правильнее рассматривать это с точки зрения квантовой механики. Волновая функция фотона падает на зеркало и расщепляется на две волновых функции. Амплитуда отраженной части волны равна $1/\sqrt{2}$, а амплитуда прошедшей части волны тоже равна $1/\sqrt{2}$. Обе части волновой функции должны считаться «сосуществующими» (при нормальном описании вперед по времени) до того момента, когда предполагается имевшим место «наблюдение». В этой точке ситуация с одновременно сосуществующими альтернативами разрешается (в пользу одной или другой) фактически реализованной альтернативы с вероятностями, равными квадратам (модулей) соответствующих амплитуд, а именно $(1/\sqrt{2})^2 = 1/2$ в обоих случаях. После выполнения наблюдения вероятности отражения или прохождения фотона действительно оказываются равными одной второй.

Посмотрим теперь, как всё это соотносится с нашим экспериментом. Предположим, что зарегистрирован факт излучения фотона лампой L . Волновая функция фотона расщепляется на зеркале и приходит в точку P с амплитудой, равной $1/\sqrt{2}$, поэтому фотоэлемент либо регистрирует фотон, либо не регистрирует его – и то и другое с вероятностью, равной одной второй. Другая часть волновой функции фотона попадает в точку A на лабораторной стене (см. рис. 8.3) и тоже с амплитудой $1/\sqrt{2}$. Если фотоэлемент P не регистрирует событие, то фотон следует считать попавшим в лабораторную стену в точке A . Если бы в точке A находился другой фотоэлемент, то он регистрировал бы фотон всякий раз, когда фотоэлемент P не регистрирует фотон, и не регистрировал бы фотон всякий раз, когда фотоэлемент регистрирует фотон. В этом смысле нет никакой необходимости устанавливать фотоэлемент в точке A . Мы можем определить, что сделал бы фотоэлемент в точке A , будь он там установлен, просто глядя на фотоэлементы в точках L и P .

Теперь должно стать ясно, как выполняются расчеты в квантовой механике. Зададимся вопросом: «Если известно, что лампа L сработала, то какова вероятность того, что сработал фотоэлемент P ?»

Для ответа на этот вопрос учтем, что имеется амплитуда, равная $1/\sqrt{2}$ для фотона, прошедшего путь LMP , и амплитуда, равная $1/\sqrt{2}$, для фотона, прошедшего путь LMA . Возведя эти амплитуды в квадрат, получаем соответствующие вероятности, равные $1/2$ и $1/2$, попадания фотона в точки P и A соответственно. Следовательно, на наш вопрос квантовая механика дает ответ, равный

«одной второй».

И действительно, именно такой результат получился бы в случае проведения реального эксперимента.

Мы могли бы с таким же успехом использовать экстравагантную процедуру «с обращенным вспять временем» и получили бы тот же самый результат. Предположим, что мы зафиксиро-

вали факт срабатывания фотоэлемента в точке P . Рассмотрим направленную вспять во времени волновую функцию фотона в предположении, что фотон в конце концов приходит в точку P . Отслеживая эволюцию процесса назад во времени, мы видим, что фотон движется назад от P , пока не достигнет зеркала M . В этой точке происходит бифуркация волновой функции и мы имеем амплитуду $1/\sqrt{2}$ того, что фотон достигнет лампы L , и амплитуда $1/\sqrt{2}$ того, что фотон претерпит отражение в точке M и придет в другую точку на лабораторной стене, а именно в точку B на рис. 8.3. Возводя соответствующие амплитуды в квадрат, мы снова получаем для обеих вероятностей значения, равные одной второй. Следует, однако, отдавать себе отчет в том, на какие именно вопросы отвечают эти вероятности. А вопросы следующие: «Если известно, что лампа L сработала, то какова вероятность срабатывания фотоэлемента P ?» – тот же самый вопрос, что мы рассматривали до этого; и более экстравагантный вопрос: «Какова вероятность срабатывания фотоэлемента P при условии, что известен факт испускания фотона из стены в точке B ?»

Мы можем рассматривать оба ответа как экспериментально «правильные» в определенном смысле, хотя второй ответ (испускание фотона из стены) скорее представляет собой логическое умозаключение, а не результат реально выполненного ряда экспериментов! Однако ни один из этих вопросов не является обращением во времени того, что был задан выше. Обращенный вспять во времени вопрос звучал бы так: «Если известно, что фотоэлемент P сработал, то какова вероятность того, что сработала лампа L ?»

Отметим, что правильный экспериментальный ответ на этот вопрос – это никакая не «одна вторая», а

«единица».

В случае срабатывания фотоэлемента нет практически никаких сомнений в том, что фотон пришел от лампы, а не от лабораторной стены! На наш обращенный во времени вопрос проведенный в рамках квантовой механики расчет дал нам абсолютно неверный ответ!

Отсюда следует, что правила R -части квантовой механики просто-напросто неприменимы к такого рода обращенным во времени задачам. Если мы хотим рассчитать вероятность прошлого состояния исходя из известного состояния в будущем, то применение стандартной R -процедуры, которая заключается в простом возведении в квадрат модуля квантово-механической амплитуды, приводит к неверным результатам. Эта процедура пригодна только для расчета вероятностей будущих событий исходя из прошлых событий – и в этом случае она работает великолепно! Поэтому я считаю совершенно очевидным, что R -процедура не может быть симметрична во времени (и, между прочим, вследствие этого не выводима из симметричной во времени процедуры U).

Многие могут посчитать, что причина этого противоречия с временной симметрией состоит в том, что второму началу термодинамики каким-то образом всё же удалось пролезть в цепь рассуждений и привнести дополнительную асимметрию во времени, не описываемую процедурой возведения амплитуды в квадрат. Действительно, кажется, что любой физический измерительный прибор, способный реализовать R -процедуру, должен содержать элемент «термодинамической необратимости» – так, что энтропия возрастает всякий раз, когда имеет место измерение. Я думаю, что процесс измерения должен быть фундаментальным образом связан со вторым началом термодинамики. Более того, по-видимому попытки обратить вспять во времени целиком весь процесс квантово-механического эксперимента, вроде описанного выше (идеализированного) опыта, с регистрацией всех проведенных измерений, бессмысленны. Я не задавался вопросом о том, как далеко мы можем пойти по пути действительного обращения эксперимента во времени. Меня интересовала только применимость этой замечательной квантово-механической процедуры, которая дает правильные вероятности через вычисление квадратов модулей амплитуд. Поразительно, что эта простая процедура применима в направлении от прошлого к будущему и при этом не требует никакой дополнительной информации о системе. Действительно, невозможность повлиять на эти вероятности, которые в квантовой теории являются абсолютно случайными, представляет собой одну из неотъемлемых частей рассматриваемой теории! Однако попытка применить те же самые процедуры в направлении от будущего к прошлому (т.е. не для предсказания будущего, а для установления прошлого) приводит к результату неверному до удивления. Можно приводить сколько угодно оправданий, смягчающих обстоятельств и других доводов для объяснения того, почему процедура возведения амплитуды в квадрат не дает правильных результатов в случае применения ее в направлении от будущего к прошлому, но факт остается фактом. А при рассмотрении ситуации от прошлого к

будущему никакие оправдания попросту не нужны! Процедура R , в том виде, как она реально применяется, просто-напросто не является симметричной во времени.

§8.4. Ящик Хокинга: связь с гипотезой о вейлевской кривизне?

Как бы то ни было, а читатель вне всякого сомнения подумает: какое всё это имеет отношение к ГВК или ПКТГ? Действительно, второе начало термодинамики, в его настоящем виде, вполне может быть частью процедуры R , но вот где тут в этих непрерывных «каждодневных» актах редукции вектора состояния может найтись место сколь-нибудь заметным эффектам пространственно-временных сингулярностей? Чтобы прояснить этот вопрос, я хочу, хотя и с совершенно иной целью, описать здесь фантастический «мысленный эксперимент», первоначально предложенный Стивеном Хокингом.

Представьте себе герметичный ящик чудовищных размеров. Его стенки предполагаются абсолютно отражающими и непроницаемыми для любого воздействия. Сквозь них не может пройти никакой материальный объект, в том числе никакой электромагнитный сигнал, нейтрино и вообще всё, что угодно. Стенки отражают обратно любой объект, независимо от того, приходит ли он снаружи или изнутри, и даже действие гравитации не может проникнуть сквозь них. Такие стенки невозможно сделать ни из одного существующего в природе вещества. Никто в действительности не в состоянии выполнить описанный ниже «эксперимент». (И, как мы увидим, никто и не захочет этого делать!) Важно не это. Целью мысленного эксперимента является раскрытие общих принципов путем простого мысленного рассмотрения в принципе выполнимых опытов. Технические проблемы игнорируются при условии, что они не связаны с рассматриваемыми общими принципами. (Вспомним дискуссию о шрёдингеровской кошке в главе 6 {МОИ № 15, с.114}.) В нашем случае проблемы сооружения стенок ящика должны рассматриваться с точки зрения стоящих перед нами целей как чисто «технические», и, следовательно, ими надо пренебречь.

Внутри ящика находится большое количество вещества. Для нас не имеет значения, что это за вещество. Нас интересует только его полная масса M , которая должна быть очень большой, а также большой объем V , в который она заключена. Что же мы собираемся делать с этим дорогостоящим ящиком, а также с его совершенно неинтересным содержимым? Мы произведем самый занудный из опытов, какой только можно себе вообразить. Оставим ящик в покое – навечно!

Нас интересует окончательная судьба того, что находится внутри. Согласно второму началу термодинамики, энтропия содержимого ящика должна возрасти, пока не достигнет максимума, а вещество – состояния «теплового равновесия». После этого уже не будет происходить практически ничего интересного, если не считать «флуктуаций», приводящих к (относительно) кратковременным отклонениям от теплового равновесия. В нашей ситуации мы полагаем M достаточно большим при соответствующем V (т.е. очень большом, но не слишком большим), так что к моменту достижения «теплового равновесия» большая часть вещества сколлапсирует в черную дыру, окруженную совсем небольшим количеством вещества, и излучения, которые образуют (очень холодную!) тепловую ванну с погруженной в нее черной дырой. Чтобы быть конкретнее, примем M равной массе Солнечной системы, а V – размеру Млечного Пути! В этом случае температура «ванны» составит всего 10^{-7} градуса выше абсолютного нуля!

Чтобы лучше понять природу описываемых здесь равновесия и флуктуации, вспомним понятие фазового пространства, с которым мы познакомились в главах 5 и 7, в частности, в связи с понятием энтропии. На рис. 8.4 условно изображено всё фазовое пространство \mathbb{P} содержимого ящика Хокинга. Как мы помним, фазовое пространство – это пространство с большим количеством измерений, каждая точка которого полностью отображает одно из возможных состояний рассматриваемой системы – в данном случае содержимого ящика. Таким образом, каждая точка \mathbb{P} содержит информацию о положениях и импульсах всех находящихся в ящике частиц, а также всю необходимую информацию о геометрии пространства-времени внутри ящика. Расположенная в правой части рис. 8.4 подобласть \mathbb{B} (фазового пространства \mathbb{P}) представляет совокупность всех состояний с черной дырой внутри ящика (включая все случаи наличия более чем одной черной дыры), а расположенная слева область \mathbb{A} представляет совокупность всех состояний без черных дыр. Представим себе дальнейшее разбиение областей \mathbb{A} и \mathbb{B} на меньшие ячейки для построения «грубого разбиения», необходимого для точного

определения энтропии (см. рис. 7.3 на с. 254). Точный вид этого разбиения нас здесь не интересует. На этом этапе нам важно лишь, что самая большая из рассматриваемых ячеек – та, что представляет состояния теплового равновесия при наличии черной дыры, – занимает большую часть области \mathbb{B} , а (несколько меньшая) большая часть области \mathbb{A} представляет то, что, как кажется, является тепловым равновесием, но без единой черной дыры.

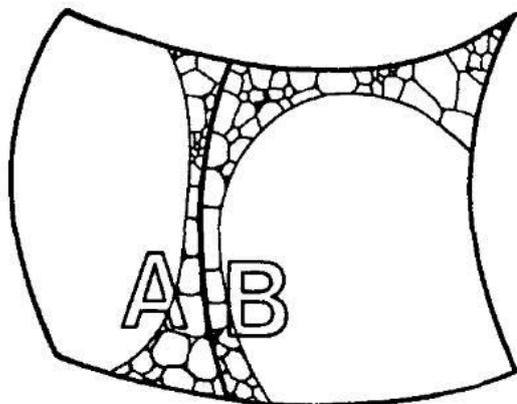


Рис. 8.4. Фазовое пространство \mathbb{P} ящика Хокинга. Область \mathbb{A} соответствует состояниям без черных дыр внутри ящика, а область \mathbb{B} – состояниям, при которых внутри ящика есть хотя бы одна черная дыра

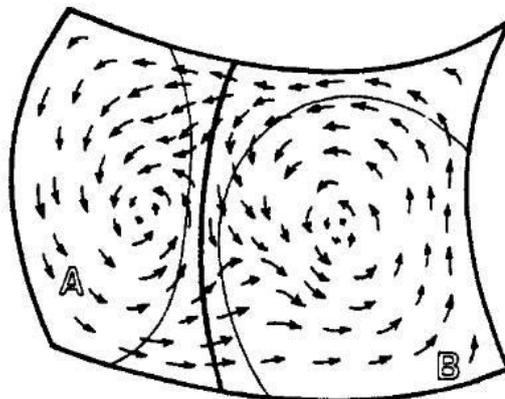


Рис. 8.5. «Гамильтонов поток» содержимого хокинговского ящика (см. рис. 5.11). Линии тока, пересекающие границу между областями в направлении от \mathbb{A} к \mathbb{B} , соответствуют коллапсу в черную дыру, а линии, пересекающие границу от \mathbb{B} к \mathbb{A} – исчезновению черной дыры в результате хокинговского испарения

Вспомним теперь, что на каждом фазовом пространстве существует поле стрелок (векторное поле), описывающих эволюцию физической системы во времени (см. главу 5, с. 28 МОИ № 15, а также рис. 5.11). Таким образом, чтобы узнать, что произойдет с нашей системой в следующий момент, нужно просто сдвинуться вдоль стрелок (рис. 8.5). Некоторые стрелки перейдут из области \mathbb{A} в область \mathbb{B} . Такое происходит при возникновении черной дыры в результате гравитационного коллапса вещества. А пересекают ли какие-нибудь стрелки границу между областями в обратном направлении из \mathbb{B} в \mathbb{A} ? Такие стрелки действительно есть, но только при условии учета хокинговского испарения, о котором упоминалось ранее (с. 278³⁶ и 287³⁷). В строгой классической общей теории относительности черные дыры способны только поглощать и не в состоянии ничего испускать. Но Хокингу [1975] удалось показать путем учета эффектов квантовой механики, что черные дыры всё же способны – на квантовом уровне – кое-что испускать в процессе хокинговского излучения. (Это происходит в рамках квантового процесса «рождения виртуальных пар», при котором частицы и античастицы постоянно создаются из вакуума – как правило, лишь на мгновение, чтобы тут же аннигилировать, исчезнув без следа. Если есть черная дыра, она может «проглотить» одну из частиц такой пары до того, как произойдет аннигиляция, и вторая частица может покинуть черную дыру. Хокинговское излучение как раз и состоит из этих убежавших частиц.) При обычных обстоятельствах хокинговское излучение чрезвычайно слабое. Но в состоянии теплового равновесия величина энергии, теряемой черной дырой в результате хокинговского излучения, в точности компенсируется энергией, получаемой черной дырой в результате поглощения других «тепловых частиц» из окружающей «тепловой ванны», в которой дыра находится. В результате «флуктуации» иногда может возникать небольшой избыток излучения или недостаток поглощения, что приводит к потере энергии черной дырой. Теряя энергию, черная дыра теряет также и массу (согласно формуле Эйнштейна $E = mc^2$) и, согласно законам, управляющим хокинговским излучением, становится чуть-чуть горячее. В очень редких случаях, если флуктуация оказывается достаточно большой, черная дыра может даже пойти в разнос, постоянно разогреваясь, теряя всё больше энергии в этом процессе, непрерывно уменьшаясь в размерах, пока наконец (как мы предполагаем) совершенно не исчезнет в результате бурного взрыва! Когда это случится (и если

³⁶ В.Э.: Это §7.11 выше в этом томе.

³⁷ В.Э.: Это §8.2 выше в этом томе.

считать, что других дыр в ящике нет), мы оказываемся в ситуации перехода из области \mathbb{B} в область \mathbb{A} фазового пространства \mathbb{P} , и значит действительно есть стрелки, идущие из области \mathbb{B} в область \mathbb{A} !

Я хотел бы сделать замечание о смысле, который я вкладываю здесь в понятие «флуктуация». Вспомним ячейки грубого разбиения, рассмотренные в предыдущей главе. Точки фазового пространства, принадлежащие одной ячейке, считаются (макроскопически) «неотличимыми» друг от друга. Энтропия возрастает, потому что, следуя вдоль стрелок, с течением времени мы, как правило, переходим ко всё более крупным ячейкам. В конечном итоге точка фазового пространства оказывается затерянной внутри самой большой ячейки – а именно той, что соответствует тепловому равновесию (максимальной энтропии). Однако, это будет справедливо только до определенной степени. Если подождать достаточно долго, то точка фазового пространства окажется в какой-то момент в ячейке меньших размеров, и энтропия, соответственно, уменьшится. Как правило, это состояние продлится (сравнительно) недолго и энтропия вскоре снова увеличится при возвращении точки фазового пространства в самую крупную ячейку. Это – флуктуация, сопровождаемая мимолетным понижением энтропии. Обычно значительного падения энтропии не происходит, но в очень редких случаях возникает огромная флуктуация и энтропия может уменьшиться существенно и остаться малой на протяжении значительного времени.

Как раз такого рода событие и должно произойти, чтобы произошел переход из области \mathbb{B} в область \mathbb{A} через процесс хокинговского испарения. Очень большая флуктуация нужна потому, что маленькую ячейку необходимо протащить через то самое место, где стрелки пересекают границу между областями \mathbb{B} и \mathbb{A} . Точно также, если наша точка фазового пространства находится внутри большой ячейки в области \mathbb{A} (представляющей совокупность состояний теплового равновесия без черных дыр), пройдет еще очень много времени, прежде чем произойдет гравитационный коллапс и точка перейдет внутрь области \mathbb{B} . И снова нужна большая флуктуация. (Тепловое излучение неохотно идет на гравитационный коллапс!)

Каких стрелок больше – тех, что идут из \mathbb{A} в \mathbb{B} ; тех, что идут из \mathbb{B} в \mathbb{A} ; или же число стрелок обоих типов одинаково? Для нас это очень важно. Вопрос можно сформулировать иначе: что природе «проще сделать» – породить черную дыру, заставив сколлапсировать частицы в состоянии теплового равновесия или же избавиться от черной дыры через хокинговское испарение? А может оба процесса одинаково «трудные»? Строго говоря, нас интересует не число стрелок, а скорость потока объема фазового пространства. Представьте себе, что фазовое пространство заполнено некой (многомерной) несжимаемой жидкостью. Стрелки отображают поток этой жидкости. Вспомним теперь описанную в главе 5 (с. 31 [МОИ № 15](#)) теорему Лиувилля, гласящую, что фазовый поток сохраняет объем элемента фазового пространства – а это как раз и означает, что наша жидкость, заполняющая фазовое пространство, действительно является несжимаемой! Теорема Лиувилля как будто говорит нам, что поток из \mathbb{A} в \mathbb{B} должен равняться потоку из \mathbb{B} в \mathbb{A} , поскольку фазовая жидкость, будучи несжимаемой, не может накапливаться на одной какой-нибудь стороне. Таким образом, кажется, что черную дыру так же трудно создать из теплового излучения, как и разрушить ее!

К такому же выводу пришел и Хокинг, правда на основании несколько иных соображений. Главным аргументом Хокинга была симметричность во времени всех основных физических законов, имеющих отношение к рассматриваемой задаче (общая теория относительности, термодинамика, стандартные процедуры квантовой теории), из которой следует, что, если повернуть время вспять, то мы получим тот же самый результат, что и для прямого течения времени. Всё сводится к простой смене направления всех стрелок в \mathbb{P} на противоположное. Из этого рассуждения действительно совершенно строго следует точное равенство числа стрелок из \mathbb{A} в \mathbb{B} числу стрелок из \mathbb{B} в \mathbb{A} при условии, что при обращении направления времени область \mathbb{B} отображается сама на себя (а область \mathbb{A} тоже, соответственно, отображается сама на себя). Это условие сводится к замечательной гипотезе Хокинга о том, что черные дыры и их временные инверсии – белые дыры – с точки зрения физики неотличимы друг от друга! Аргументация Хокинга состояла в том, что в симметричной во времени физике состояние теплового равновесия тоже должно быть симметричным во времени. Я не хочу здесь пускаться в подробное обсуждение этой поразительной возможности. Идея Хокинга состояла в том, что квантово-механическое хокинговское излучение может рассматриваться как своего рода временная инверсия классического «поглощения» вещества черной дырой. Несмотря на всю изобретатель-

ность ее автора, эта гипотеза наталкивается на серьезные теоретические трудности и я лично не верю в ее работоспособность.

В любом случае, эта гипотеза плохо согласуется с теми идеями, которые я здесь выдвигаю. Я утверждал, что, несмотря на то, что черные дыры должны существовать, существование белых дыр запрещено гипотезой о вейлевской кривизне! ГВК привносит в обсуждение элемент временной асимметрии, не учтенный Хокингом. Следует отметить, что поскольку черные дыры и их пространственно-временные сингулярности действительно занимают большое место в обсуждении того, что происходит внутри ящика Хокинга, то, следовательно, рассматриваемая проблема вне всякого сомнения тоже должна быть связана с неизвестными пока физическими законами, управляющими поведением такого рода сингулярностей. Хокинг считает, что эта неизвестная физика должна иметь вид симметричной во времени квантовой теории гравитации, а я считаю – что это должна быть асимметричная во времени ПКТГ! Я утверждаю, что одним из главных следствий ПКТГ должна быть ГВК (и, следовательно, второе начало термодинамики в известном нам виде), и поэтому необходимо попытаться установить, какие из ГВК вытекают следствия для рассматриваемой проблемы.

Посмотрим, как включение ГВК отразится на обсуждении потока «несжимаемой жидкости» в фазовом пространстве \mathbb{P} . Действие черной дыры в пространственно-времени состоит в том, что она поглощает и разрушает всё попадающее на нее вещество. Для нас же гораздо важнее, что эта сингулярность уничтожает информацию! Следствием этого для фазового пространства \mathbb{P} является слияние некоторых линий тока (рис. 8.6). Два состояния, до этого различные, могут превратиться в одно, как только различающая их информация окажется уничтоженной. При слиянии линий тока в фазовом пространстве \mathbb{P} мы фактически имеем дело с нарушением теоремы Лиувилля. Наша жидкость больше не является несжимаемой, а непрерывно уничтожается в области \mathbb{B} !

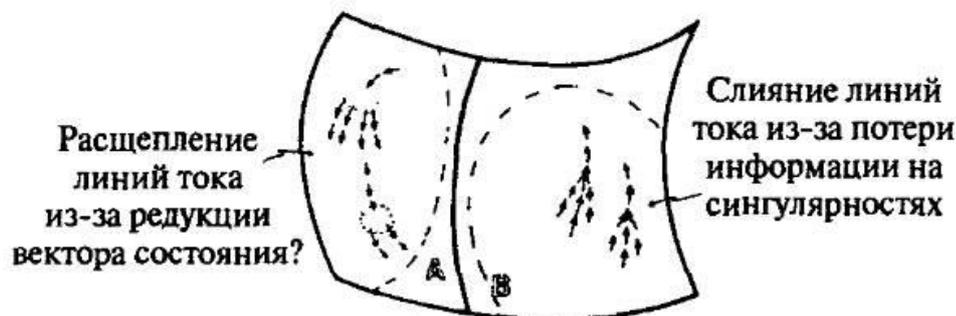


Рис. 8.6. В области \mathbb{B} должно происходить слияние линий тока из-за потери информации на сингулярностях черных дыр. Компенсируется ли слияние порождением новых линий тока в результате R-процедуры (главным образом в области \mathbb{A})?

Похоже, что теперь мы оказались в действительно трудном положении. Если «жидкость» постоянно уничтожается в области \mathbb{B} , то число линий тока из \mathbb{A} в \mathbb{B} должно превышать число линий тока из \mathbb{B} в \mathbb{A} , откуда следует, что породить новую черную дыру легче, чем уничтожить уже имеющуюся! Всё это действительно имело бы смысл, если бы не то обстоятельство, что теперь количество «жидкости», покидающее область \mathbb{A} , превышает количество «жидкости», которое возвращается в эту область. Черных дыр в области \mathbb{A} нет, а существование белых дыр исключается ГВК – и поэтому теорема Лиувилля должна вне всякого сомнения абсолютно точно выполняться в области \mathbb{A} ! Однако теперь, похоже, нам нужно каким-то образом «порождать жидкость» в области \mathbb{A} для восполнения ее потери в области \mathbb{B} . Какой механизм может обеспечить увеличение числа линий тока? По-видимому, нам потребуется, чтобы в некоторых случаях одно и то же состояние могло приводить к более чем одному результату (т.е. допустить возможность бифуркации линий тока). Такого рода неопределенность эволюции физической системы в будущем «попахивает» квантовой теорией – ее R-частью. Возможно ли, чтобы R была в некотором смысле «оборотной стороной монеты» к ГВК? В то время, как ГВК обеспечивает слияние линий тока в области \mathbb{B} , квантово-механическая R-процедура приводит к бифуркациям линий тока. Я действительно утверждаю, что именно объективный квантово-механический процесс R редукции вектора состояния приводит к бифуркациям линий тока и таким образом в точности компенсирует их слияние, вызываемое ГВК (см. рис. 8.6)!

Для того, чтобы такое расщепление произошло, R-процедура должна быть, как мы уже видели, асимметричной во времени: вспомним описанный выше эксперимент с лампой, фотоэлементом и полупосеребренным зеркалом. В случае излучения лампой фотона возможны два (одинаково вероятных) результата этого процесса: либо фотон попадает на фотоэлемент и последний регистрирует его, либо фотон попадает на стену в точке A и фотоэлемент не срабатывает. В фазовом пространстве этого эксперимента мы имеем линию тока, представляющую излучение фотона, и эта линия тока расщепляется на две: одна часть представляет ситуацию, когда фотоэлемент срабатывает, а другая – когда он не срабатывает. Здесь мы, по-видимому, имеем дело с самой настоящей бифуркацией: одно допустимое состояние на входе и два возможных состояния на выходе. Второе входное состояние, которое следовало бы рассмотреть, – это испускание фотона из точки B на лабораторной стене, и в этом случае мы имели бы два состояния на входе и два на выходе. Однако только что упомянутое альтернативное состояние на входе исключается по причине его противоречия со вторым началом термодинамики – т.е. исходя из изложенной здесь концепции, и, в конечном итоге, по причине противоречия с ГВК при отслеживании эволюции системы назад в прошлое.

Я должен еще раз отметить, что излагаемая мною здесь точка зрения на самом деле не является «традиционной» – хотя мне и не совсем понятно, как «традиционные» физики предлагают решать все поставленные здесь проблемы. (Я подозреваю, что немногие из них вообще серьезно над ними задумывались!) Разумеется, я слышал разные точки зрения. Например, время от времени некоторые физики выдвигали предположение о том, что хокинговское излучение никогда не приводит к полному исчезновению черной дыры, и что от нее всегда остается своего рода «ядрышко». (И, следовательно, согласно этой точке зрения стрелок из \mathbb{B} в \mathbb{A} нет!) На самом деле это почти никак не скажется на мои рассуждениях (и фактически даже усилит их). Можно, однако, избежать моих выводов, если постулировать, что общий объем фазового пространства \mathbb{P} на самом деле бесконечен, но это противоречило бы некоторым весьма фундаментальным представлениям об энтропии черных дыр и природе фазового пространства замкнутых (квантовых) систем, а другие технические приемы, позволяющие избежать моих выводов, о которых мне доводилось слышать, представляются еще менее удовлетворительными. Гораздо более серьезное возражение состоит в том, что построение ящика Хокинга требует слишком сильной идеализации, и что, предполагая возможность его создания, мы вынуждены преступать некоторые барьеры принципиального характера. Хотя я сам не до конца в этом уверен, но всё же склоняюсь к тому, чтобы считать некоторую необходимую идеализацию вполне допустимой!

Наконец, есть один серьезный аспект, о котором я умолчал. Я начал обсуждение, предположив, что мы имеем дело с классическим фазовым пространством – а теорема Лиувилля относится к классической физике. Но затем пришлось рассмотреть квантово-механический феномен хокинговского излучения. (Кроме того, квантовая теория нужна для обеспечения конечной размерности и конечного объема \mathbb{P} .) Как мы видели в главе 6 {МОИ № 15}, квантовым аналогом фазового пространства является гильбертово пространство, и, поэтому следовало бы, наверно, проводить все наши рассуждения в терминах гильбертова, а не фазового пространства. Для гильбертова пространства существует аналог теоремы Лиувилля, который следует из так называемого «унитарного» характера временной эволюции U . Не исключено, что все мои рассуждения можно сформулировать полностью в терминах гильбертового, а не классического фазового пространства, но мне трудно представить себе, каким образом в этом случае можно рассматривать классические явления, связанные с пространственно-временной геометрией черных дыр. Я считаю, что для правильной теории непригодно ни классическое фазовое пространство, ни гильбертово пространство, а потребуются какой-то новый, до сих пор еще не открытый тип математических пространств, занимающий промежуточное положение между двумя упомянутыми выше. Соответственно, мои рассуждения следует рассматривать только в эвристическом смысле, и они представляют собой скорее всего лишь общие предположения, а не окончательные выводы. Тем не менее, я действительно считаю свои рассуждения сильным доводом в пользу глубинной связи между ГВК и R, откуда вытекает, что R-процедура действительно должна представлять собой эффект квантовой теории гравитации.

Повторю свои выводы еще раз: я выдвигаю гипотезу, согласно которой квантово-механическая редукция вектора состояния действительно является обратной стороной ГВК. В соответствии с этой гипотезой два важнейших следствия нашей искомой правильной квантовой теории гравитации (ПКТГ) – это ГВК и процедура R. ГВК приводит к слиянию линий тока в

фазовом пространстве, в то время, как процедура R приводит к расщеплению линий тока, в точности компенсирующему их слияние, вызванное ГВК. Оба процесса теснейшим образом связаны со вторым началом термодинамики.

Отметим, что слияние линий тока происходит только в области \mathbb{B} , в то время как их расщепление может иметь место как внутри области \mathbb{A} , также и внутри области \mathbb{B} . Вспомним, что \mathbb{A} представляет совокупность состояний, в которых черные дыры отсутствуют, и, следовательно, редукция вектора-состояния действительно возможна при отсутствии черных дыр. Ясно, что для выполнения R совсем необязательно иметь в лаборатории черную дыру (как в случае только что рассмотренного нами эксперимента с фотоном). Нас сейчас интересует лишь общий баланс между различными возможными событиями в той или иной ситуации. В рамках излагаемой концепции отсутствие детерминизма в квантовой теории должно всего лишь компенсироваться возможностью образования черных дыр на некотором этапе (и следующей отсюда возможностью уничтожения информации)!

§8.5. Когда происходит редукция вектора состояния?

Предположим, что мы признаем, исходя из вышеизложенных соображений, что редукция вектора состояния может каким-то образом оказаться гравитационным феноменом. Можно ли сформулировать связь между R-процедурой и гравитацией более явным образом? Когда, согласно этой концепции, должен фактически иметь место коллапс вектора состояния?

Здесь следует прежде всего отметить, что даже в рамках более «традиционных» подходов к построению квантовой теории гравитации согласование принципов общей теории относительности с правилами квантовой механики наталкивается на определенные и весьма серьезные технические трудности. Эти правила (в первую очередь – интерпретация импульсов как дифференцирования по координатам в уравнении Шрёдингера – см. §6.20) плохо вписываются в представление об искривленной геометрии пространства-времени. Я лично считаю, что введение «значительной» пространственно-временной кривизны влечет неизбежное нарушение правил квантовой линейной суперпозиции. Именно в этом случае суперпозиция комплексных амплитуд в принципе допустимых альтернатив заменяется набором вероятностно-взвешенных реальных альтернатив, из которых одна фактически имеет место.

Что я понимаю здесь под «значительной» степенью кривизны? Я имею в виду достижение такой степени кривизны, при которой ее характерное значение становится сравнимым с одногравитонным³⁸ масштабом или превышает его. (Напомним, что, согласно правилам квантовой теории, электромагнитное поле «квантуется» на отдельные элементы, называемые «фотонами». При разложении поля на его частотные составляющие, компонента с частотой ν может входить в это разложение только в виде целого числа фотонов, каждый с энергией равной $h\nu$. Предполагается, что аналогичные правила должны быть также применимы и к гравитационному полю.) Один гравитон – это минимальная единица кривизны, допускаемая квантовой теорией. Идея состоит в том, что при достижении этого уровня обычные правила линейной суперпозиции, предписываемые процедурой U, должны претерпеть определенные изменения при их применении к гравитонам, и при этом возникает некая асимметричная во времени «нелинейная неустойчивость». Мы получаем вместо комплексных суперпозиций неограниченно долго сосуществующих «альтернативных возможностей» ситуацию, когда одна из «возможностей» начинает на этом этапе одерживать верх над другими и система «перескакивает» в то или иное из альтернативных состояний. Возможно, что выбор одного из альтернативных состояний происходит случайно, а быть может, в его основе лежат какие-то более глубокие законы. Однако теперь реальность обретает вид одного из альтернативных состояний. Процедура R осуществилась.

Отметим, что согласно этой гипотезе R-процедура осуществляется спонтанно, совершенно объективно и независимо от какого бы то ни было вмешательства человека. Идея состоит в том, что «одногравитонный уровень» должен находиться как раз между «квантовым уровнем» атомов, молекул и т.д., на котором хорошо действуют линейные правила (U) обычной квантовой механики, и «классическим уровнем» нашего повседневного опыта. Насколько «велик»

³⁸ Следует допустить, что это как раз и есть так называемые продольные гравитоны – «виртуальные» гравитоны, из которых состоит статическое гравитационное поле. К сожалению, четкое и «инвариантное» математическое определение таких объектов связано с определенными теоретическими трудностями.

одногравитонный уровень? Отметим, что дело тут на самом деле не в физическом размере, а скорее в распределении массы и энергии. Как мы видели, эффекты квантовой интерференции могут возникать и на больших расстояниях при условии, что связанная с ними энергия мала. (Вспомним самоинтерференцию фотона, описанную на с. 84 {МОИ № 15}, и эксперименты типа ЭПР, проведенные Клаузером и Аспектом, §6.19.) Характерный масштаб массы в квантовой гравитации известен под названием планковской массы, приблизительно равной

$$m_{\text{пл}} = 10^{-5} \text{ г.}$$

Она может показаться гораздо большей, чем хотелось бы, поскольку в простых наблюдениях мы видим, как гораздо менее массивные объекты, например, пылинки, ведут себя классическим образом. (Величина $m_{\text{пл}}$ немного меньше массы блохи.) Однако, я не думаю, что одногравитонный критерий применим столь грубым образом. Я постараюсь высказываться по возможности яснее, но на момент написания этих строк вопрос о конкретном способе применения рассматриваемого критерия остается в значительной степени открытым.

Давайте рассмотрим сначала очень непосредственный способ наблюдения частицы – при помощи камеры Вильсона. В этом случае мы имеем камеру, заполненную паром, находящимся на грани конденсации в капельки воды. При попадании в такую камеру быстро движущейся частицы – например, частицы, возникшей в результате распада расположенного вне камеры радиоактивного атома, ее прохождение сквозь камеру вызывает ионизацию расположенных вблизи траектории пролета атомов (т.е. атомы становятся заряженными в результате отрыва от них электронов). Эти ионизированные атомы служат центрами конденсации капелек из водяного пара. Таким образом возникает трек, состоящий из капелек, которые могут непосредственно наблюдаться экспериментатором (рис. 8.7).

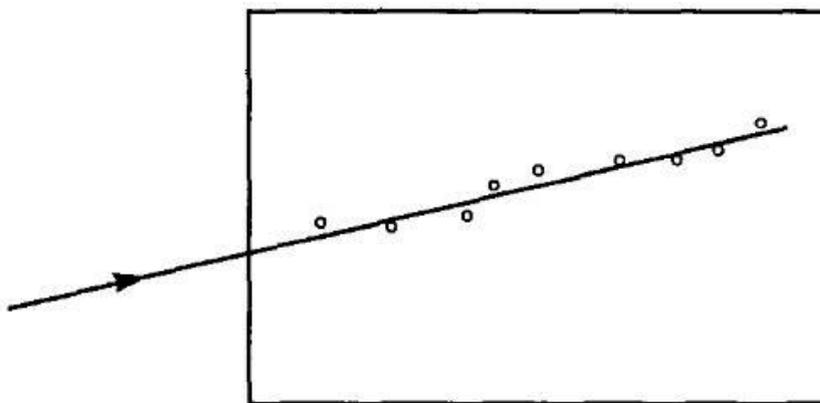


Рис. 8.7. Заряженная частица влетает в камеру Вильсона и вызывает конденсацию капелек на своем пути

Ну а как же всё это описывается в квантовой механике? В момент распада радиоактивного атома он испускает частицу. Но у этой частицы существует множество различных направлений движения: каждое направление движения описывается своей амплитудой, причем все они сосуществуют одновременно в виде линейной квантовой суперпозиции. Совокупность всех этих наложенных друг на друга альтернатив образует исходящую из распавшегося атома сферическую волну – волновую функцию испущенной атомом частицы. При попадании любого из возможных треков частицы в камеру, он тут же оказывается ассоциированным с цепочкой ионизированных атомов, каждый из которых служит центром конденсации пара. Все эти различные возможные цепочки ионизированных атомов должны сосуществовать в виде линейной квантовой суперпозиции, так что мы имеем теперь линейную суперпозицию большого числа различных цепочек конденсирующихся капелек. На некотором этапе эта комплексная квантовая линейная суперпозиция превращается в действительную совокупность фактических альтернатив с вероятностными весами, равными, согласно R-процедуре, квадратам модулей амплитуд вероятностей. В реальном физическом мире реализуется только одна из этих альтернатив, и именно она наблюдается экспериментатором. В соответствии с излагаемой здесь точкой зрения эта стадия наступает, когда разность между гравитационными полями различных альтернативных вариантов достигает одногравитонного уровня.

Когда это происходит? Согласно очень грубым расчетам,³⁹ если бы имелась только одна однородная шарообразная капля, то одногравитонный уровень достигался бы, когда ее масса вырастет до одной сотой от величины m_{pl} , что составляет одну десятиллионную грамма. В этом расчете много неопределенностей (включая трудности принципиального характера), да и величина полученной массы несколько великовата, однако результат не совсем уж бессмысленный. Остается надеяться на появление в будущем более точных расчетов и возможность рассмотрения всей цепочки, а не просто одной из составляющих ее капель. К тому же учет неоднородности капель – того факта, что они состоят из большого числа мельчайших атомов, может существенно изменить результат, да к тому же сам «одногравитонный критерий» нуждается в существенном математическом уточнении.

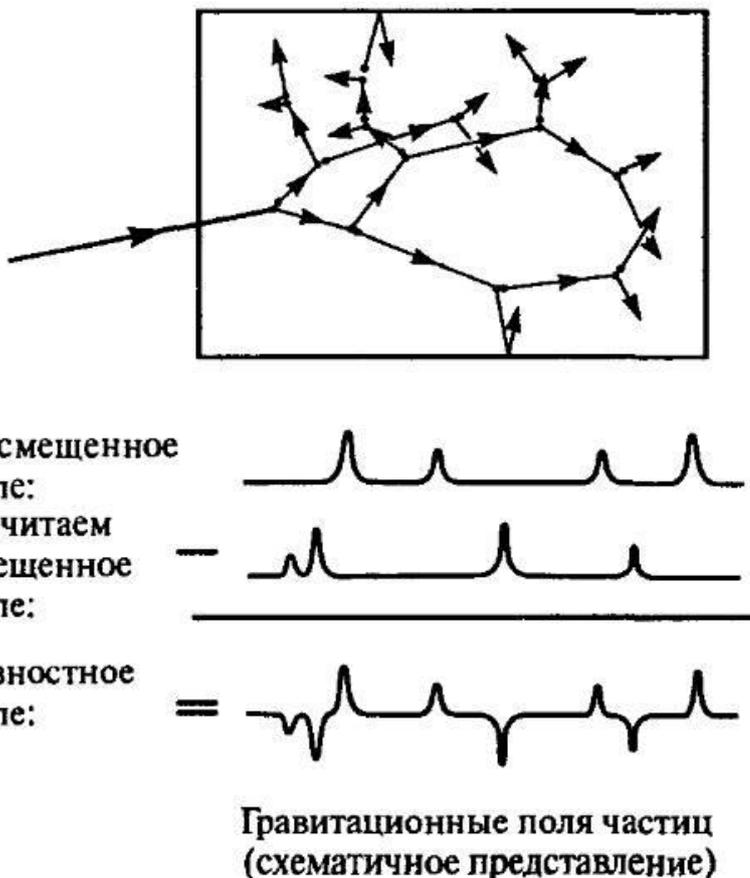


Рис. 8.8. Гравитационные поля частиц (условное изображение). При попадании частицы в ящик с газом через некоторое время практически все атомы газа оказываются охваченными порожденным частицей возмущением. Линейная квантовая суперпозиция частицы, попавшей в ящик, и частицы, не попавшей в ящик, подразумевает линейную суперпозицию двух различных пространственно-временных геометрий, описывающих гравитационные поля двух различных распределений частиц газа. В какой момент различие между этими геометриями достигает одногравитонного уровня?

В описанной выше ситуации рассматривалось возможное реальное наблюдение квантового процесса (распада радиоактивного атома), при котором квантовые эффекты оказываются усиленными настолько, что различные квантово-механические альтернативы приводят к различным и непосредственно наблюдаемым макроскопическим альтернативам. Я считаю, что R-процедура действительно может иметь место объективным образом даже в отсутствие столь ярко

³⁹ Мои собственные первые грубые расчеты этой величины были очень существенно улучшены Абхеем Аштекар, и здесь я привожу значение, определенное Аштекар (см. Пенроуз [1987a]). Аштекар, однако, специально отметил, что многие из предположений довольно произвольны, и поэтому следует относиться к полученному значению массы весьма осторожно.

выраженного усиления. Предположим, что наша частица попала не в камеру Вильсона, а просто в большой ящик, заполненный газом (или жидкостью) с плотностью, обеспечивающей практически гарантированное столкновение частицы или иное ее воздействие на большое число атомов газа. Рассмотрим всего два варианта возможного поведения частицы, как составные части начальной линейной суперпозиции: частица может просто не попасть в ящик совсем или же она попадет в него по определенной траектории и окажется отраженной каким-либо атомом газа. Во втором случае соответствующий атом газа отскочит, двигаясь с очень большой скоростью так, как он никогда не повел бы себя, не столкнувшись он с частицей, затем столкнется с еще одним атомом и, в свою очередь, от ricoшетит от него. После этого движение двух атомов будет отличаться от их движения в отсутствие столкновения с частицей, и мы будем иметь уже целый каскад движений атомов в газе, невозможный в отсутствие первоначального попадания частицы в ящик (рис. 8.8). Вскоре после этого порожденное частицей возмущение охватит практически все атомы газа.

Подумаем теперь, как эту ситуацию можно описать на языке квантовой механики. Вначале мы имеем лишь исходную частицу, и ее различные положения составляют комплексную линейную суперпозицию – волновую функцию частицы. Однако через какое-то время квантово-механическое описание должно уже охватывать все атомы газа. Рассмотрим комплексную суперпозицию двух возможных траекторий частицы, при движении по одной из которых частица попадает в ящик, а по другой – нет. Стандартная квантовая механика требует распространения этой суперпозиции на все атомы газа: мы должны рассмотреть суперпозицию двух состояний, таких, что положение атомов газа в одном состоянии оказываются смещенными относительно их положений в другом состоянии. Теперь рассмотрим разность гравитационных полей всех отдельных атомов. Хотя распределение газа (и гравитационное поле) в целом практически одинаково для обоих состояний, чью суперпозицию мы должны рассмотреть, если мы вычтем одно поле из другого, то получим (сильно флуктуирующее) разностное поле, которое вполне может оказаться «значительным» в подразумеваемом здесь смысле – а именно это разностное поле вполне может превысить одногравитонный уровень. По достижении этого уровня немедленно же происходит редукция вектора состояния: в реальном состоянии частица либо попала в ящик, либо нет. Комплексная линейная суперпозиция сводится к статистически взвешенным альтернативам с осуществлением только одной из них.

В предыдущем примере я рассматривал камеру Вильсона в качестве способа квантово-механического наблюдения. Я считаю, что и другие виды таких наблюдений (фотопластинки, искровые камеры и т.д.) можно анализировать в рамках одногравитонного критерия, используя подход, примененный в описанном выше случае ящика с газом. Многое еще предстоит сделать, чтобы разобраться в подробностях применения этой процедуры.

Изложенные здесь соображения представляют собой всего лишь зачаток новой теории, которая, как мне кажется, является столь необходимой.⁴⁰ Для того, чтобы быть полностью удовлетворительной, любая схема должна, по-моему, включать в себя радикально обновленные представления о природе пространственно-временной геометрии, быть может, с применением нелокального описания.⁴¹ Один из самых неоспоримых доводов в пользу этого следует из экспериментов ЭПР-типа (см. с. §6.18 и §6.19 {МОИ № 15}), в которых «наблюдение» (в данном случае – срабатывание фотоэлемента) в одном конце комнаты может вызвать мгновенную редукцию вектора-состояния в другом конце комнаты. Построение полностью объективной теории редукции вектора состояния, не противоречащей духу теории относительности, представляет собой очень трудную и глубокую задачу, поскольку понятие «одновременности», будучи зависимым от движения некоторого наблюдателя, является чуждым теории относительности. Я убежден, что наше современное представление о физической реальности – особенно в том, что касается природы времени – нуждается в коренном пересмотре, пожалуй,

⁴⁰ Время от времени в литературе появляются и другие попытки построения объективной теории редукции векторов состояний. Среди наиболее существенных следует отметить работы Каройхази [1974], Каройхази, Френкеля и Лукача [1986], Комара [1969], Перла [1985, 1989], Гирарди, Римини и Вебера [1986].

⁴¹ На протяжении нескольких лет я тоже пытался разрабатывать нелокальную теорию пространства-времени, побуждаемый к этому главным образом стимулами иного рода, исходящими из так называемой «теории твисторов» (см. Пенроуз, Риндлер [1986], Хаггетт, Год [1985], Уорд, Уэллс [1990]). Однако этой теории в лучшем случае недостает ряда существенных ингредиентов, и обсуждение ее здесь представляется неуместным.

даже в более радикальном, чем тот, который был вызван к жизни современной теорией относительности и квантовой механикой.

Вернемся к исходной проблеме. Какое всё это имеет отношение к физическим законам, которые управляют действиями нашего мозга? Как это связано с нашими мыслями и чувствами? Для того, чтобы попытаться хоть как-то ответить на эти вопросы, придется сначала немного разобраться в устройстве нашего мозга. Потом я вернусь к проблеме, которую считаю фундаментальной: какого рода новые физические действия происходят, когда мы сознательно мыслим или воспринимаем что-либо?

(Продолжение в файле {PENRO5})

Файл PENRO5

<http://vekordija.narod.ru/R-PENRO5.PDF>



Задняя обложка книги

Роджер Пенроуз. «Новый Разум Короля»

(Продолжение; предыдущее в файле {PENRO4})

Глава 9. Реальный мозг и модели мозга

§9.1. Как же устроен мозг?

У нас в голове находится великолепное устройство, которое управляет нашими действиями и каким-то образом дает нам представление об окружающем мире. Правда, как однажды отметил Алан Тьюринг,⁴² внешне оно больше всего напоминает миску холодной овсянки! Трудно представить, как столь заурядного вида объект умудряется совершать чудеса, на которые, как мы знаем, он способен. Однако при ближайшем рассмотрении оказывается, что он имеет гораздо более сложное строение и замысловатую организацию (рис. 9.1).



Рис. 9.1. Мозг человека: вид сверху, сбоку, снизу и в разрезе

Большая покрытая извилинами (и более всего похожая на овсянку) часть мозга, расположенная сверху, называется собственно головным (или большим) мозгом. Он четко делится посередине на правое и левое полушария и, более условно, в передне-заднем направлении – на лобную долю и три остальные: височную, теменную и затылочную. Еще дальше и несколько книзу расположен небольшой и округлый мозжечок, чем-то похожий на пару клубков шерсти. Глубоко внутри мозга, как бы укрытый им, находится целый ряд любопытных и сложных на вид структур: варолиев мост и продолговатый мозг, которые вместе с ретикулярной формацией – областью, к которой мы обратимся позднее – составляют ствол мозга, а также таламус,

⁴² Из радиовещания BBC (см. Ходжис [1983], с. 419).

гипоталамус, гиппокамп, мозолистое тело и еще много других, странных как по виду, так и по названиям, частей.

Большой мозг – предмет особой гордости человека и не только потому, что он является самой большой частью человеческого мозга, но и потому, что пропорция между этой частью и мозгом в целом у человека больше, чем у животных. (Мозжечок человека тоже превосходит размерами таковой у большинства других животных.) Головной мозг и мозжечок имеют сравнительно тонкий наружный слой серого вещества, под которым расположено значительно большее по массе белое вещество. Эти области серого вещества называют, соответственно, корой головного мозга и корой мозжечка. Считается, что в сером веществе происходят различные вычислительные действия, а белое вещество, состоящее из длинных нервных волокон, отвечает за передачу сигналов из одной части мозга в другую.

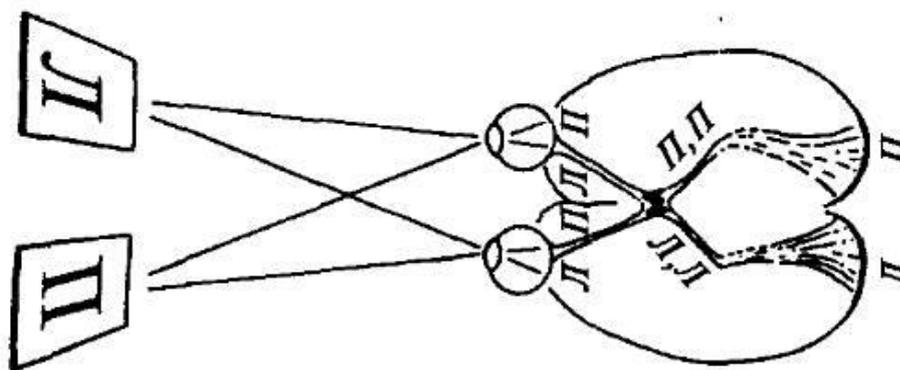


Рис. 9.2. Левая сторона поля зрения обоих глаз отображается на правой половине зрительной коры, а правая, соответственно, на левой (вид снизу; обратите внимание, что предметы на сетчатке отображаются в перевернутом виде)⁴³

Каждой из различных областей коры головного мозга присущи свои специфические функции. Зрительная кора расположена в затылочной доле, прямо в задней части мозга, и занимается восприятием и распознаванием зрительных образов. Забавно, что природа именно там решила разместить интерпретатор визуальной информации, получаемой зрительными органами, которые (по крайней мере, у человека) находятся прямо спереди! Но природа вытворяет и куда более странные вещи. Так, за левую половину человеческого тела практически полностью отвечает правое полушарие, тогда как за правую – почти исключительно левое, поэтому чуть ли не все нервы, идущие в головной мозг или выходящие из него, по необходимости должны перекрещиваться⁴⁴! При этом в случае зрительной коры правая ее часть связана не

⁴³ В.Э.: На сетчатке предметы изображаются «вверх ногами» (иначе не может быть, поскольку линза переворачивает). Но в дальнейшей обработке мозг опять «переворачивает» изображение, привязывая его к своей системе кодирования пространства. Но эта связь между изображением на сетчатке и системой кодирования пространства не является жесткой (физиологической, «хардверной»). Она – динамическая связь, устанавливаемая программами путем поиска пригодной интерпретации. Об этом свидетельствуют эксперименты с очками, переворачивающими изображение «вверх ногами». Испытуемые, которые надевали и носили такие очки, сначала видели весь мир перевернутым, и чувствовали себя в нем очень неуверенно. Однако вскоре они «привыкли», и мир опять стал для них «нормальным», несмотря на очки. Зато теперь, когда очки сняли, мир опять «перевернулся вверх ногами», и люди чувствовали себя в нем плохо, уже без переворачивающих очков – пока опять не привыкли. Это доказывает существование в мозге динамических интерфейсов, в которых связь между отдельными системами мозга не является жесткой, врожденной, а устанавливается по принципу «наилучшей интерпретации» поступающих сигналов. Такие динамические интерфейсы существуют не только в зрительной области, и они играют большую роль в различных психологических феноменах, например, целиком на них основаны явления гипноза, «раздвоения личности» и др.

⁴⁴ В.Э.: Я думаю, что этот общий принцип «перекрещивания» выработан Естественным отбором для предотвращения одновременного поражения как органа, так и центра его управления при травме одной стороны организма, как я это пояснил в {с.140 [МОИ № 18](#)}.

с левым глазом, а с левой частью поля зрения обоих глаз.⁴⁵ Аналогично, левая часть зрительной коры связана с правой частью поля зрения обоих глаз.

Это означает, что нервы от правой части сетчатки каждого из глаз должны идти к правой половине зрительной коры (вспомните, что изображение на сетчатке перевернуто по отношению к источнику), а нервы от левой части сетчатки – к левой половине коры (рис. 9.2). Таким образом в левой и правой частях зрительной коры формируется четкое отображение правой и левой областей поля зрения, соответственно.

Сигналы от ушей приходят на противоположные части мозга столь же замысловатым образом. Правая слуховая кора (часть правой височной доли) обрабатывает в основном звуки, поступающие слева, а левая слуховая кора – звуки, поступающие справа.⁴⁶ Обоняние кажется здесь исключением из общего правила. Правая часть обонятельной коры, которая расположена в передней части большого мозга (в передней доле – что уже само по себе является исключением для сенсорной области), отвечает в основном за правую ноздрю, а левая часть – за левую ноздрю.⁴⁷

Осязание связано с областью затылочной доли мозга, которая носит название соматосенсорной коры. Эта область находится как раз за условной границей, разделяющей лобную и теменную доли. Между различными частями поверхности тела и отдельными участками соматосенсорной коры существует довольно своеобразное соответствие. Иногда оно изображается графически в виде так называемого «соматосенсорного гомункулуса» – искаженной человеческой фигуры, изображаемой лежащей вдоль соматосенсорной коры, как это показано на рис. 9.3.

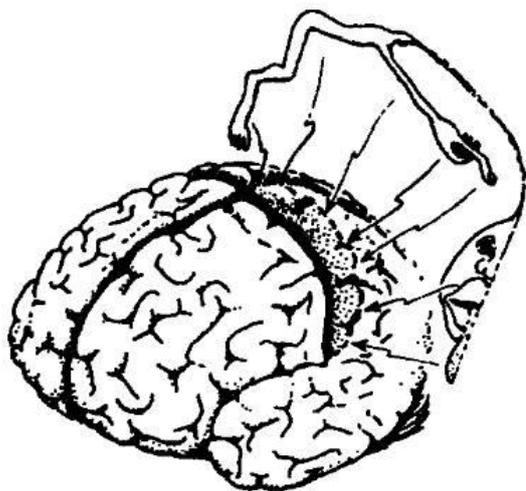


Рис. 9.3. «Соматосенсорный гомункулус» наглядно иллюстрирует участки коры головного мозга, расположенные сразу за линией, разделяющей лобную и теменную доли и непосредственно связанные с частями тела, откуда поступает осязательная информация

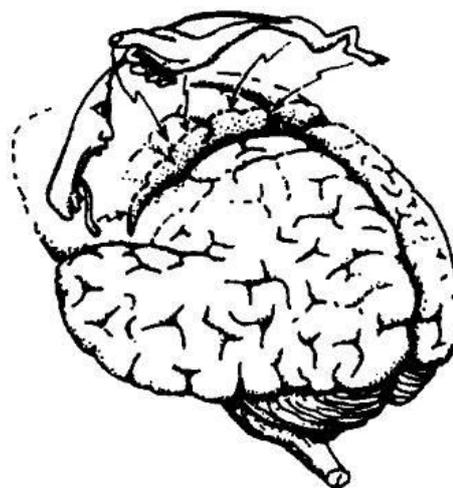


Рис. 9.4. «Двигательный гомункулус» наглядно изображает участки коры головного мозга, примыкающие к линии раздела между лобной и теменной долями, которые непосредственно приводят в движение различные части тела

Правая часть соматосенсорной коры принимает осязательные сигналы, идущие от левой стороны тела, а левая – с правой. В лобной доле непосредственно перед границей с теменной

⁴⁵ В.Э.: Сигналы от двух глаз, отображающие один участок пространства, должны стекаться вместе, чтобы можно было сравнить степень поворота глаз, установить их разность и тем самым – расстояние до видимого объекта. «Глубина пространства» устанавливается (т.е. вычисляется) в первую очередь этой разностью поворота глаз при фокусированном изображении.

⁴⁶ В.Э.: Поступающие справа – но от обоих ушей. Сигналы об одном и том же звуке с обоих ушей должны стекаться вместе, чтобы по разности во времени и интенсивности звука программа могла вычислить направление, откуда звук пришел.

⁴⁷ В.Э.: Видимо, это потому, что обоняние, во-первых, самый древний из сенсорных аппаратов, а, во-вторых, он меньше чем зрение, слух или двигательный аппарат, влияет на спасение в случае опасности. В основном обоняние предназначено для определения пригодности чего-либо в пищу и для выслеживания пищи, а не для того, чтобы самому спастись бегством.

долей находится участок коры, известный как двигательная кора. Он приводит в движение различные части нашего тела. И опять мы встречаемся с точно определенным соответствием между мышцами нашего тела и зонами этого участка мозга. Как и в случае с осязанием, эти связи можно графически изобразить в виде «двигательного гомункулуса» (рис. 9.4). И снова правая часть двигательной коры отвечает за движение левой стороны тела, а левая – правой.

Все упомянутые выше зоны коры головного мозга (зрительная, слуховая, обонятельная, осязательная и двигательная) называются первичными, поскольку именно они непосредственно осуществляют прием поступающих в мозг и передачу исходящих из него сигналов. Рядом с ними расположены вторичные зоны, предназначенные для более тонкой и сложной обработки сенсорной информации (рис. 9.5).

Сенсорная информация, полученная зрительной, слуховой или соматосенсорной зоной коры головного мозга, обрабатывается соответствующими вторичными областями, после чего вторичная двигательная область вырабатывает план движения, который переводится первичной двигательной областью на язык прямых команд, непосредственно адресованных мышцам. (Мы не будем касаться обонятельного участка коры, поскольку он функционирует иным и малоизученным пока образом.) Остальные участки коры головного мозга относятся к разряду третичных (или ассоциативных). В этих областях в основном и выполняется наиболее сложная и характеризующая высокую степень абстрагирования часть умственной деятельности. Именно здесь при определенном участии периферической нервной системы собирается воедино и подвергается всестороннему анализу информация, поступающая от различных сенсорных участков; здесь происходит запоминание, складываются картины внешнего мира, намечаются и оцениваются планы действий, распознается и генерируется речь.⁴⁸

Речь представляет для нас особый интерес, поскольку ее обычно относят к разряду способностей, присущих исключительно человеческому интеллекту. Интересно, что (по крайней мере у подавляющего большинства правшей и большей части левшей) речевые центры находятся в основном в левой половине мозга. К важным участкам относятся зона Брока, расположенная в задней нижней части лобной доли, и зона Вернике, которая располагается внутри и вокруг верхней задней части височной доли (рис. 9.6). Зона Брока отвечает за построение предложений, а зона Вернике – за понимание языка.⁴⁹ Повреждение зоны Брока приводит к нарушению речи, но не ее пониманию, тогда как при повреждении зоны Вернике речь остается беглой, но, в основном, бессмысленной. Пучок нервных волокон, который связывает между собой две эти области, называется дуговидным пучком. При его повреждении ни речь, ни ее понимание не нарушаются, но мысль не может быть выражена словами.



Рис. 9.5. Функции большого мозга (грубая схема). Сенсорная информация извне поступает в первичную область восприятия, последовательно обрабатывается до мельчайших деталей во вторичной и третичной сенсорных областях, затем передается в третичную двигательную область, и, в конце концов, в первичных двигательных областях преобразуется в точные инструкции к действию

⁴⁸ В.Э.: Вся эта «география мозга» несомненно важна для нейрофизиологии и интересна сама по себе. Но всё же она не дает ключа к пониманию сущности интеллекта. Неужели, чтобы создавать искусственный интеллект, нам надо обязательно воспроизводить именно эти зоны Вернике и Брока, эти мозжечки и таламусы, эти серые и белые вещества? (А если не это, тогда – что?). Всё это не дает понимания, каким образом в мозге появляются абстрактные понятия, такие, как числа, как возникает понятие о бесконечности, как осуществляются математические доказательства. Объяснение всего этого требует совсем других понятий и других методов, нежели «география мозга» – и эти методы предлагает Веданская теория.

⁴⁹ В.Э.: Значит, в зоне Брока расположен описанный в {РОТИ-1 = МОИ № 41 с.44} энкодер, а в зоне Вернике – декодер.

Мы теперь можем составить очень приблизительную картину того, что делает головной мозг. Входные данные для мозга представляют собой зрительные, слуховые, осязательные и прочие сигналы, которые сначала регистрируются в первичных областях (главным образом) задних долей (теменной, височной и затылочной). Выходные сигналы мозга, приводящие к различным движениям тела, вырабатываются в основном лобными долями мозга. А где-то между ними происходит обработка информации и принятие решений. В общем, можно сказать, что активность мозга, начавшись в первичных областях задних долей, перемещается затем во вторичные области, где входные данные анализируются, и, далее, в третичные области задних долей, где информация становится полностью осмысленной (как, например, в случае с пониманием речи в зоне Вернике). Дуговидный пучок – упомянутый выше пучок нервных волокон, но теперь уже с обеих сторон мозга, – переносит эту информацию в лобную долю, где ее третичными областями вырабатывается общий план действий (например, как это происходит при генерации речи в зоне Брока). Эти общие планы действий преобразуются в более конкретные представления о движениях тела во вторичных двигательных областях, откуда активность мозга перемещается в первичную двигательную кору, которая, в конце концов, посылает соответствующие сигналы различным группам мышц тела (и часто нескольким одновременно).

Создается впечатление, что перед нами предстает картина превосходного вычислительного устройства. Сторонники сильного ИИ (см. главу 1 и далее) рассматривают мозг как великолепный образец алгоритмического компьютера – по сути, машины Тьюринга – в котором есть входные данные (как на ленте слева от машины Тьюринга) и выходные данные (как на ленте справа от машины Тьюринга) и который способен выполнять всевозможные нетривиальные вычисления на промежуточных этапах. Конечно, активность мозга может не прекращаться и в отсутствие внешних раздражителей. Это происходит в тех случаях, когда человек думает, занимается вычислениями или предается воспоминаниям. Приверженцы сильного ИИ отнесли бы это на счет продолжающейся алгоритмической деятельности и предположили бы, что явление «осознания» возникает как раз в те моменты, когда подобная деятельность достигает определенного уровня сложности.⁵⁰

Но, хотя такая логика и напрашивается сама собой, мы не будем торопиться с выводами. Общая картина работы мозга, приведенная выше, довольно груба. Прежде всего, даже зрительное восприятие не происходит по такой простой схеме, как это было мной представлено ранее. В коре, по-видимому, существует несколько различных (хотя и менее значимых) областей, на которые отображаются поля зрения, очевидно, с какими-то другими целями. (Похоже, именно они отвечают за различия в том, как мы осознаем увиденное.) Скорее всего, по коре разбросаны также и другие дополнительные сенсорные и двигательные области (например, движение глаз может быть вызвано сигналами из определенных точек задних долей).

В своем описании мозга я затронул только его кору и ни разу не коснулся вопроса о назначении прочих частей. Какую роль выполняет, например, мозжечок! Ясно, что он отвечает за координацию и контроль движений тела, его равновесие, своевременность и точность действий. Представьте себе артистичность танцора, отточенность движений профессионального игрока в теннис, мгновенную реакцию гонщика, уверенные движения рук музыканта или художника; подумайте о грациозных прыжках газели или крадущейся кошки. Без мозжечка подобная точность движений была бы невозможна, они стали бы неуверенными и неуклюжими. По-видимому, в процессе приобретения новых навыков, будь то ходьба или вождение машины, сначала человеку приходится детально обдумывать каждое свое действие,⁵¹ и за это отвечает

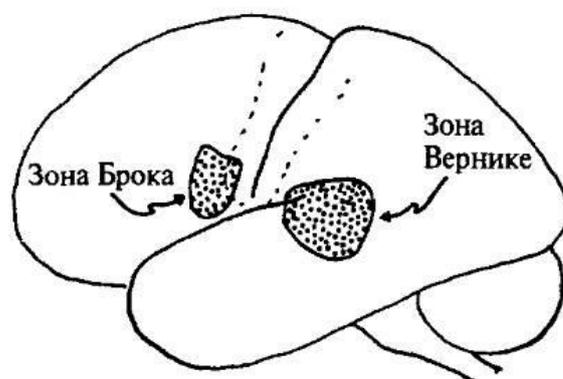


Рис. 9.6. Зоны Вернике и Брока, расположенные (как правило) полностью в левом полушарии, отвечают за понимание и формирование речи соответственно

⁵⁰ В.Э.: Сложность сама по себе тут не при чем. Чтобы происходило то, что в бытовой речи называется «осознанием», надо выполнять определенную работу (т.е., по терминологии Пенроуза – определенный алгоритм). Эта работа заключается главным образом в том, что действия компьютера запоминаются, а запомненная информация впоследствии анализируется.

⁵¹ В.Э.: То есть – составлять программу будущих действий; это и есть самопрограммирование.

кора головного мозга, но когда достигнут определенный уровень мастерства и действия начинают выполняться «автоматически»⁵², управление ими передается мозжечку.⁵³ Более того, хорошо известно, что как только профессионал задумывается о своих действиях,⁵⁴ он на время теряет легкость их координации. Думание, по-видимому, сопровождается переходом контроля к коре головного мозга и, хотя при этом, как следствие, появляется гибкость действий, «мозжечковая» плавность и точность движений на время утрачивается. Такое описание, без сомнения, является чересчур упрощенным, но тем не менее позволяет нам в общих чертах понять функцию мозжечка.⁵⁵

При описании функций головного мозга до сих пор вообще не упоминалось о других частях мозга. Например, гиппокамп играет важнейшую роль в формировании долговременной (постоянной) памяти, хотя сама память располагается где-то в коре головного мозга, возможно, во многих местах одновременно. Мозг способен также сохранять образы различными способами с помощью кратковременной памяти в течение нескольких минут или даже часов (просто, что называется, «держит их в голове»). Но для того, чтобы человек мог вспомнить эти образы после того, как его внимание с них переключилось, необходимо сохранить их в долговременной памяти, и здесь уже не обойтись без гиппокампа. (Повреждение этого участка мозга приводит к ужасному состоянию, когда человек не способен запомнить ничего нового и всё сразу забывается, как только его внимание переключается на другой объект.) Мозолистое тело – это область, ответственная за связь между двумя полушариями мозга. (Далее мы увидим, к каким поразительным явлениям приводит рассечение мозолистого тела.) Гипоталамус представляет собой эмоциональный центр, в котором гнездятся удовольствие, ненависть, страх, отчаяние, голод,⁵⁶ и который служит посредником между эмоциями и их ментальными и физическими проявлениями. Между гипоталамусом и различными частями мозга идет постоянный обмен сигналами. Таламус функционирует как важный обрабатывающий центр и переключающий узел, который передает значительную часть импульсов, поступающих извне, в кору головного мозга. Ретикулярная формация отвечает за общее состояние готовности мозга и его отдельных частей к осознанному восприятию. Все эти и многие другие жизненно важные части мозга соединены многочисленными нервами.

Вышеприведенное описание дает только общее представление о некоторых наиболее значимых частях мозга. Мне кажется целесообразным в завершение этого раздела привести некоторые сведения о строении мозга в целом. Его различные части группируются в три отдела, которые, если двигаться от позвоночника, называются по порядку задним (*rhombencephalon*), средним (*mesencephalon*) и передним (*prosencephalon*) мозгом. На ранних стадиях развития эмбриона эти отделы, в том же порядке, видны как три вздутия на конце позвоночного столба. Самое дальнее – развивающееся в передний мозг – имеет два выроста в виде пузырей, по одному с каждой стороны, которые становятся большими полушариями головного мозга. Полностью развитый передний мозг включает в себя многие важные части всего мозга – не только большой головной, но и мозолистое тело, таламус, гипоталамус, гиппокамп и многие другие. Мозжечок является частью заднего мозга. Ретикулярная формация расположена частью в среднем мозге, а частью в заднем. Передний мозг является «новейшим» отделом с точки зрения эволюционного развития, а задний – наиболее «древним».

Я надеюсь, что это краткое описание, во многом неточное, даст читателю некоторое представление о том, на что похож мозг человека и как он функционирует. До сих пор я лишь вскользь упомянул то, что служит центральной темой нашей дискуссии – сознание. Теперь перейдем к этому вопросу вплотную.

⁵² В.Э.: То есть – программа уже готова и остается ее только запускать при необходимости.

⁵³ В.Э.: Значит, мозжечок – это аппарат для быстрого выполнения готовых двигательных программ.

⁵⁴ В.Э.: То есть – если он перестает просто выполнять давно готовую программу и начинает ее анализировать со стороны (другими программами) как бы с целью перепрограммирования.

⁵⁵ Интересно, что для мозжечка не характерно «перекрестное» поведение коры головного мозга: правая половина мозжечка управляет, в основном, правой стороной тела, а левая – левой. **В.Э.:** Мозжечок – филогенетически более старая часть мозга; видимо, «перекрестный принцип» был выработан Естественным отбором только с определенного этапа развития наших предков и не коснулся более старых частей мозга – обоняния и мозжечка.

⁵⁶ В.Э.: То есть, гипоталамус – это центр управления общей мобилизацией или демобилизацией различных аппаратов организма и мозговых программ.

§9.2. Где обитает сознание?

Существует множество различных точек зрения на соотношение между состоянием мозга и феноменом сознания. Насколько очевидна важность этого явления, настолько же велико и расхождение во взглядах на него. Однако ясно, что не все части мозга в равной степени участвуют в формировании сознания. Например, как следует из вышесказанного, мозжечок по роду своей деятельности гораздо ближе к «автоматическому устройству», чем кора головного мозга. Действия, контролируемые мозжечком, происходят как будто сами собой и не требуют «обдумывания». Когда мы сознательно решаем пройти от одного места до другого, то вряд ли имеем перед собой тщательно разработанный план мышечных сокращений, который был бы необходим для управляемого движения.⁵⁷ То же самое можно сказать и о бессознательных рефлекторных действиях, как, например, отдергивание руки от горячей печи, которое может быть опосредовано не головным мозгом, а верхней частью спинного мозга. Таким образом, напрашивается вывод о том, что феномен сознания, вероятнее всего, связан с активностью головного мозга, а не мозжечка или спинного мозга.

С другой стороны, совершенно не очевидно, что активность коры головного мозга всегда определяет осознанность наших действий. Например, как я уже указывал, в норме при ходьбе человек не контролирует детальные движения конечностей и работу мышц – управление этими действиями осуществляет, в основном, мозжечок (с помощью других частей головного мозга и спинного мозга), – однако первичные двигательные области головного мозга тоже вовлекаются в этот процесс. Более того, то же можно сказать и о первичных сенсорных областях: мы можем совершенно не осознавать меняющееся при ходьбе давление на подошвы ног, тем не менее соответствующие участки соматосенсорной коры постоянно активируются.

Уайддер Пенфилд, выдающийся американско-канадский нейрохирург (среди заслуг которого – составление в 1940-х и 1950-х годах детальных карт двигательных и сенсорных областей мозга человека), считал, что сознание не связано просто с активностью коры головного мозга. На основании опыта проведения многочисленных операций на мозге пациентов, находившихся в сознании, он предположил, что область, которую он называл верхней частью ствола мозга, включающая, в основном, таламус и средний мозг (см. Пенфилд, Джаспер [1947]), хотя он имел в виду главным образом ретикулярную формацию, в некотором смысле может быть названа «центром сознания». Верхняя часть ствола мозга связана с корой головного мозга, и, согласно Пенфилду, «акт осознания» или «осознанное действие» происходит каждый раз, когда эта область ствола мозга непосредственно обменивается сигналами с определенным участком коры, отвечающим именно за те чувства, мысли, воспоминания или действия, которые в данный момент осознанно воспринимаются или совершаются. Он указывал, что можно, например, стимулировать определенный участок двигательной коры мозга, который отвечает за движение правой руки (и правая рука на самом деле будет двигаться), но это не вызовет у подопытного желания двигать правой рукой. (Более того: он может даже постараться остановить ее движение

⁵⁷ В.Э.: Когда мы «сознательно решаем пройти от одного места до другого», то происходит следующее. Во-первых, создается мозговая программа (это первый этап самопрограммирования), которая имеет весьма общие характеристики и совсем еще не детализирована. В программистских терминах ее можно представить себе как самый «головной модуль» компьютерной программы, к которому еще не подключены никакие подпрограммы, необходимые для реальной работы. В бытовых терминах эту «недоделанную» программу называют «намерением». Когда же субъект начинает осуществлять свое намерение, то самопрограммирование продолжается, и к «головному модулю» подключаются необходимые подпрограммы. Если речь идет просто о ходьбе, то они, как правило, берутся из «библиотеки заготовок», но перед запуском слегка модифицируются по обстоятельствам (это такие подпрограммы как «сделать шаг левой ногой», «сделать шаг правой ногой», «остановиться» и т.п.). Если речь идет об осуществлении более сложного намерения (например, ограбления банка), то тут, конечно, многие подпрограммы головной программы (ограбления) будут гораздо сложнее, чем просто сделать «шаг левой» и «шаг правой». Но даже при простой ходьбе непрерывно идет самопрограммирование (для каждого отдельного движения), учитывающее окружающую обстановку (например, что впереди загорелся красный свет на светофоре или приближается автомобиль). Но это непрерывное самопрограммирование, во-первых, происходит в рамках общего головного модуля (намерения перейти с места *A* на место *B*) и, во-вторых, оно обильно использует давно существующие заготовки подпрограмм. (У годовалого ребенка таких заготовок еще нет, поэтому для него переход от точки *A* к точке *B* представляет гораздо большую проблему, чем для взрослого, владеющего обширной библиотекой всевозможных подпрограмм).

левой рукой – совсем как доктор Стрэнджлав из популярного фильма!⁵⁸) Пенфилд предполагал, что желание совершить действие связано скорее с таламусом, нежели с корой головного мозга. Согласно его представлениям сознание – это проявление активности верхней части ствола мозга, однако, поскольку должно еще быть что-то, что осознается, то эта активность не ограничивается стволом мозга, но включает в себя еще и те участки коры, с которыми у верхней части ствола мозга в этот момент существует активная связь и которые представляют собой субъект (чувственное восприятие или воспоминание) или объект (волевое действие) сознания.

Другие нейрофизиологи тоже высказывали предположение о том, что ретикулярную формацию можно было бы назвать «местонахождением» сознания, если таковое на самом деле существует. Ведь, как бы там ни было, эта область отвечает за пребывание мозга в активном состоянии. Ее повреждение приводит к потере сознания. Всегда, когда мозг находится в бодрствующем сознательном состоянии, активна и ретикулярная формация, и наоборот. На самом деле существует явная связь между активностью ретикулярной формации и тем состоянием человека, которое мы традиционно называем «сознательным». Однако ситуация осложняется тем, что во сне, когда мы на самом деле «сознаем», что мы спим, активные в норме участки ретикулярной формации активности не проявляют. И еще один факт мешает ученым признать за ретикулярной формацией столь почетный статус: с точки зрения эволюции, эта часть мозга является очень древней. Если всё, что нужно для обладания сознанием – активность ретикулярной формации, то им должны быть наделены лягушки, ящерицы и даже треска!

Лично я не расцениваю последний довод как достаточно весомый. Разве у нас есть неоспоримые свидетельства того, что ящерицы и треска не обладают неким зачаточным сознанием? Какое право мы имеем утверждать, как это некоторые делают, что человеческие существа – единственные обитатели нашей планеты, наделенные свыше настоящим «сознанием»? Неужели на Земле мы единственные, кому дозволено «осознавать»? Позвольте усомниться в этом. Конечно, лягушки, ящерицы и уж тем более треска не вызывают у меня ощущения, что «кто-то в них» взирает на меня, когда я рассматриваю эти создания, но я очень явственно ощущаю присутствие «сознания», когда смотрю в глаза кошке, собаке или, особенно, когда на меня смотрят обезьяны или мартышки в зоопарке. Я не требую, ни чтобы они чувствовали то же, что и я, ни даже какой-либо сложности испытываемых ими чувств. Им совершенно не обязательно «сознавать себя» в каком-то строгом смысле этого слова (хотя наличие некоторого элемента самосознания у них я не исключаю)⁵⁹. Достаточно будет, чтобы они просто чувствовали! Что касается состояния сна, то я бы признал, что определенная форма сознания при этом присутствует, хотя, по всей видимости, на довольно низком уровне. Если за функционирование сознания каким-то образом отвечают только участки ретикулярной формации, то они должны сохранять активность (хотя бы невысокую) и во время сна.

Другая точка зрения (О'Кифи [1985]) состоит в том, что сознание в большей мере связано с функционированием гиппокампа. Как я уже отмечал, гиппокамп определяет способность к долговременному запоминанию. Принимая в качестве гипотезы, что постоянная память связана с сознанием, мы должны рассматривать гиппокамп как главное действующее лицо в феномене осознанного восприятия.

Есть и другое мнение, согласно которому сознание является результатом деятельности самой коры головного мозга. Раз уж большой головной мозг служит предметом особой гордости человека (хотя у дельфинов он никак не меньше!), и умственная деятельность, понимаемая как интеллект, связана как раз с этой частью мозга, то именно в ней и должна обитать душа человека! Таким, по-видимому, мог бы быть вывод, например, сторонников сильного ИИ. Если «сознание» – не более, чем следствие сложности алгоритма – или, возможно, его «глубины» или некой «степени изошренности», – тогда, в соответствии с представлениями сильного ИИ, сложные алгоритмы, выполняемые корой головного мозга, дали бы ей преимущественное право претендовать на способность к проявлению сознания.

Многие философы и психологи склонны считать язык непременным атрибутом человеческого сознания. Соответственно, именно способность изъясняться при помощи слов позволяет

⁵⁸ Речь идет о фильме *Доктор Стрэнджлав*, в котором Питер Сэллер играет нацистского врача – доктора Стрэнджлава, – эмигрировавшего в США и вынужденного всё время останавливать левую руку свою правую руку, которая самовольно вскидывается в нацистском приветствии. – *Прим. ред.*

⁵⁹ О том, что, по крайней мере, шимпанзе обладают самосознанием, с убедительностью говорят результаты экспериментов, в ходе которых шимпанзе разрешалось играть с зеркалами (см. Окли [1985], главы 4 и 5).

достичь той тонкости мышления, которая служит отличительной чертой человека и выражением самой его сути. Именно язык, в соответствии с этой точкой зрения, отличает нас от других животных и дает нам возможность лишать их свободы и вести на бойню, как только в этом возникает потребность. Именно язык позволяет нам философствовать и описывать наши ощущения, так что мы можем убедить остальных, что мы осознаем окружающий мир и самих себя. С этой точки зрения владение языком является необходимым и достаточным условием наличия сознания.

А теперь мы должны вспомнить о том, что языковые центры находятся (у большинства людей) в левой половине мозга (зоны Брока и Вернике). Из вышеизложенной точки зрения должно было бы следовать, что сознание – это что-то, что связано только с левой половиной коры головного мозга! И таково, на самом деле, мнение целого ряда нейрофизиологов (в частности, Джон Экклз [1973]), которое я, как сторонний наблюдатель, считаю весьма странным по причинам, изложенным ниже.

§9.3. Эксперименты при разделенных больших полушариях мозга

В связи со сказанным выше я должен упомянуть целый ряд замечательных наблюдений над людьми (и животными) при полном рассечении у них мозолистого тела, которое делало взаимодействие левого и правого полушарий головного мозга невозможным. У людей⁶⁰ операция по рассечению мозолистого тела применялась как эффективное средство лечения в случаях особо тяжелых форм эпилепсии.⁶¹ Роджер Сперри с сотрудниками подвергал таких пациентов, спустя некоторое время после операции, многочисленным психологическим тестам. При этом в левом и правом полях зрения испытуемых помещались никак не связанные друг с другом предметы, так что левое полушарие получало информацию только о том, что располагалось с правой стороны, а правое полушарие – с левой. Если справа предъявлялось изображение карандаша, а слева – чашки, то тестируемый произносил: «Это карандаш», поскольку именно карандаш, а не чашку, воспринимала та половина мозга, которая явно отвечает за речевые способности. Однако левой рукой испытуемый выбирал блюдце, а не лист бумаги, считая его ассоциативно более подходящим к чашке. Левая рука находилась «в подчинении» у правого полушария, которое, хотя и не могло оперировать словами, всё же было способно производить определенные, довольно сложные и типичные для человека действия. Было высказано предположение о том, что за «геометрическое мышление» (особенно пространственное воображение) и музыкальное восприятие ответственно, в основном, правое полушарие, а за речевые и аналитические способности – левое. Правое полушарие мозга может понимать общеупотребительные существительные и элементарные предложения, а также выполнять простейшие арифметические действия.

Самое поразительное, что при разделении полушарий они ведут себя как две практически независимые индивидуальности, с каждой из которых экспериментатор может общаться по отдельности, хотя общение с правым полушарием носит более примитивный характер и значительно затруднено по сравнению с левым из-за отсутствия речевых способностей. Каждая половина головного мозга может поддерживать связь с другой половиной косвенным путем, например, наблюдая за движениями руки, контролируемые другой стороной, или слыша звуковые «подсказки» (такие, как стук блюдца). Но в хорошо контролируемых лабораторных условиях даже эта примитивная связь может быть устранена. Однако от одной половины к другой всё же могут передаваться неясные эмоциональные ощущения, предположительно потому, что нерассеченные структуры мозга, такие как гипоталамус, по-прежнему связаны с обоими полушариями.

Возникает искушение задать вопрос: неужели перед нами – два различных индивидуума, обладающих сознанием и пребывающих в одном теле? Этот вопрос вызвал бурную полемику. Одни без сомнений отвечали на этот вопрос утвердительно, другие считали, что ни одна из сторон не должна рассматриваться как полноценная личность. Некоторые утверждали, что

⁶⁰ Первые эксперименты такого рода были проведены на кошках (см. Мире, Сперри [1953]). За дальнейшими сведениями из области экспериментов с разделением полушарий мозга я отсылаю читателя к работам Сперри [1966], Газзаниги [1970] и Мак-Кей [1987].

⁶¹ В.Э.: Насколько я понимаю, это другая операция – не лоботомия, но, очевидно, применялась во времена расцвета лоботомии – в начале 1950-х –, последовавшие после присуждения в 1949 году Нобелевской премии изобретателю (в 1935 г.) лоботомии португальцу Эгашу Монишу.

общность эмоциональных ощущений может служить доказательством существования только одной личности. Еще одна точка зрения состоит в том, что сознательного индивидуума представляет только левое полушарие, а правое – просто автомат. Этой точки зрения придерживаются те, кто считает речевые способности обязательной составляющей сознания. Само собой, только левое полушарие может убедительно заявить «Да!» в ответ на вопрос: «Обладаешь ли ты сознанием?». Правому полушарию, подобно кошке, собаке или шимпанзе, может быть трудно даже понять отдельные слова этого вопроса, не говоря уже о том, чтобы правильно ответить на него.

И всё же пока вопрос остается открытым. В недавних экспериментах, проведенных Дональдом Вильсоном и его коллегами (Вильсон и др. [1977], Газзанига и др. [1977]), при наблюдениях за пациентом с разделенным мозгом (назовем его «P.S.»), были получены весьма интересные результаты. После операции по разделению полушарий только левое полушарие обладало речью, но понимали речь оба полушария, а позднее правое полушарие научилось и воспроизводить речь⁶²! Несомненно, что оба полушария были наделены сознанием. Более того, это были два отдельных сознания, поскольку их желания и пристрастия были совершенно различны. Например, левое полушарие выражало желание стать чертежником, а правое – гонщиком!

Лично я не верю в справедливость широко распространенного убеждения в том, что обычный человеческий язык необходим для мышления или сознания. (В следующей главе я приведу некоторые доводы в пользу своей точки зрения.) Поэтому я отношусь к тем, кто верит, что, в принципе, обе половины мозга после разделения обладают сознанием независимо друг от друга. Пример с P.S. может служить весомым подтверждением тому, что, по крайней мере в этом частном случае, это так и есть. По-моему мнению, единственное действительное различие между P.S. и всеми другими случаями заключается в том, что сознание его правого полушария на самом деле смогло убедить окружающих в своем существовании!

Если мы допускаем, что P.S. действительно имеет два независимых разума, то возникает довольно пикантная ситуация. Есть все основания полагать, что до операции разделения полушарий у каждого пациента было только одно сознание. Однако после операции их уже два! В некотором смысле, изначально единственное сознание раздвоилось.⁶³ Мы можем в связи с этим вспомнить гипотетического путешественника из главы 1 (с. 50 [МОИ № 14](#)), который воспользовался телепортационной машиной и в какой-то момент (неумышленно) был поставлен перед фактом, что будто бы «настоящее» его «я» благополучно прибыло на Венеру. В этом случае раздвоение сознания приводит к кажущемуся парадоксу. Ведь мы можем задать резонный вопрос: «А какой, собственно, маршрут выбрал поток его сознания “на самом деле”?» Если бы вы были этим путешественником, то какое бы из двух сознаний вы, в конце концов, назвали бы «собой»? Устройство для телепортации относится к области научной фантастики, однако в случае с P.S. мы имеем в чем-то аналогичную ситуацию и притом совершенно реальную! Какое из сознаний P.S. было бы правомерно «отождествить» с P.S. до операции? Нет сомнений, что многие философы сочли бы этот вопрос бессмысленным, ибо его решение при помощи операционалистских методов кажется невозможным.⁶⁴ Каждое полушарие сохраняет память о «дооперационных» временах, и, естественно, каждое будет идентифицировать себя с той – еще

⁶² В.Э.: Это (как и многие другие факты) показывает, что мозг – очень гибкая самопрограммирующаяся система, а все эти «зоны» распределения функций (такие, как «зоны Вернике и Брока») весьма условны; они не представляют собой что-то физиологическое, а нечто программистское; это не «хардвер», а «софтвер», и в случае необходимости соответствующая программа может быть создана и в других областях мозга – соответственно, перепрограммируя эти области.

⁶³ В.Э.: Ну, с точки зрения мозговых программ тут нет абсолютно никакой проблемы. Ясно же, что мозг является системой многопроцессорной, а «цельная личность» представляет собой некоторый суммарный результат действия этих процессоров, где всегда какие-то инициативы каких-то процессоров «остаются победителями» (т.е. принимаются во внимание и вливаются в суммарный результат), а другие «подавляются» (т.е. не принимаются во внимание и в суммарный результат не входят). Когда мозг рассечен на две части, образуются две автономные группы процессоров (и работающих в них программ), и каждая из них дает свой суммарный результат – теперь уже без учета процессоров другой группы. Это и есть «два сознания» или «две личности».

⁶⁴ В.Э.: Что это за «операционалистские методы», при которых решение этого вопроса «кажется невозможным»? С точки зрения Веданской теории тут даже и решать нечего – не больше, чем в любой другой ситуации с какими-то программами.

целостной – личностью. Но всё же подобная ситуация, примечательная в качестве своего рода головоломки и способная поставить в тупик, сама по себе еще не является парадоксальной.

Эта головоломка еще усложнится, если предположить, что в дальнейшем оба сознания можно было бы каким-то образом опять свести воедино. Повторное соединение разрезанных нервных волокон мозолистого тела на сегодняшнем этапе развития медицины исключается, но можно представить себе некий способ разделения полушарий, более мягкий, чем реальное разрезание нервных волокон. Например, нервные волокна могли бы быть временно заморожены или парализованы при помощи лекарственных средств. Пока я не слышал о подобных опытах, но думаю, что появление технических возможностей для их осуществления – это вопрос обозримого будущего. Тогда можно допустить, что после приведения мозолистого тела в работоспособное состояние, мы вновь получим одно сознание! Представьте, что это сознание ваше. Как бы вы себя чувствовали после того, как в течение какого-то времени были двумя независимыми личностями с отдельными «я»⁶⁵?

§9.4. «Зрение вслепую»

Эксперименты по разделению полушарий мозга, помимо прочего, ясно показали, что наличие единственного «места для сознания» вовсе не обязательно. Но были проведены и другие опыты, результаты которых дают основание полагать, что некоторые участки коры головного мозга в большей степени связаны с сознанием, нежели прочие. Среди подобных опытов – изучение явления слепоты. Повреждение тех или иных участков зрительной коры может привести к слепоте в соответствующем секторе поля зрения. Человек не видит предмет, помещенный в этот сектор – у него появляется частичная слепота, связанная с этой конкретной зоной его поля зрения.

Однако, кое-какие любопытные изыскания (см. Вайскранц [1987]) позволяют говорить о том, что дела здесь обстоят совсем не так просто, как кажется. У пациента, называемого здесь и далее «D.B.», необходимо было удалить часть зрительной коры головного мозга, и после операции у него наступила частичная слепота в описанном выше смысле. Однако, когда что-либо (как правило, изображение крестика, кружочка или наклонного отрезка прямой) помещали в «слепую зону» и просили D.B. угадать, что это такое, он обнаружил, что может делать это с практически стопроцентной точностью! Эта способность к «угадыванию» оказалась неожиданной и для самого D.B., который при этом продолжал утверждать, что в этой зоне он вообще ничего не видит.⁶⁶

Изображения, формируемые на сетчатке, в свою очередь тоже обрабатываются не только зрительной корой, но и другими участками мозга, при этом один из наиболее загадочных из них находится в нижней части височной доли. Вполне возможно, что D.B. строил свои «догадки» на основе информации, полученной как раз этим участком нижней части височной доли. При активации этих областей не возникало никаких осознанных ощущений, однако информация в них, бесспорно, содержалась, проявляя себя только в точности «догадок» D.B. На самом деле, после соответствующей тренировки D.B. научился до некоторой степени осознавать информацию, относящуюся к этим областям мозга.⁶⁷

Всё это, по-видимому, указывает на то, что отдельные зоны коры головного мозга (как, например, зрительная кора) имеют большее отношение к сознательному восприятию, чем другие, но некоторые из этих менее важных зон, очевидно, могут быть путем тренировок открыты для непосредственного доступа сознания.

⁶⁵ В.Э.: А никак не чувствовал бы! Скорее всего, даже толком и не заметил бы, что «личности» опять объединились. Обе группы процессоров опять работали бы как единое целое, воспоминания были бы «общими» – просто «моими»; – не видно, какие такие особые эффекты должны там появиться. Во всяком случае, не больше, чем при выходе в бодрствование из сновидения или из пьяного состояния в трезвое или после какого-нибудь удара по голове.

⁶⁶ Своего рода дополнительным к «зрению вслепую» может служить состояние, известное как «отрицание слепоты», при котором совершенно слепой человек настаивает на том, что он хорошо видит, и которое, по-видимому, связано с визуальным осознанием информации об окружении, полученной при помощи других органов чувств! См. Черчланд [1984], с. 143.

⁶⁷ В.Э.: Еще раз: мозг – очень гибкая программная система, и был перепрограммирован.

§9.5. Обработка информации в зрительной коре

Именно в зрительной коре процессы обработки информации изучены гораздо лучше, чем в других частях мозга. Для их описания был предложен целый ряд разнообразных моделей.⁶⁸ На самом деле, до того, как визуальная информация попадает в зрительную кору, ее частичная обработка проходит еще в сетчатке. (Вообще говоря, сетчатка считается частью мозга!) Одни из первых экспериментов по исследованию процессов обработки информации в зрительной коре были проведены Давидом Хьюбелом и Торстеном Визелем и в 1981 году принесли им Нобелевскую премию. В ходе этих экспериментов удалось показать, что определенные клетки зрительной коры кошки воспринимают в поле зрения линии, имеющие вполне определенный угол наклона. При этом соседние клетки были восприимчивы к линиям, расположенным под несколько иным углом. Часто не имело значения, что именно характеризуется таким углом наклона. Это могла быть граница между темной и светлой областью или просто темная черта на светлом фоне. Изучаемые клетки оказались способны абстрагироваться от конкретной природы объекта, имеющего свойство «угол наклона». Другие клетки были чувствительны к определенным цветам или к различиям между изображениями, регистрируемыми каждым глазом, что позволяет воспринимать объемные изображения. Продвигаясь далее от первичных областей восприятия, мы обнаруживаем клетки, которые чувствительны ко всё более тонким аспектам восприятия того, что мы видим. Например, при взгляде на рис. 9.7 мы различаем очертания белого треугольника, однако линии, образующие сам треугольник, большей частью не изображены, но домыслены. Клетки, способные фиксировать эти «подразумеваемые» линии, действительно были обнаружены в зрительной коре (той, что называется вторичной зрительной корой)!

В начале 1970-х годов в литературе⁶⁹ появились заявления об открытии в зрительной коре мозга маргиток клеток, которые активируются только тогда, когда на сетчатку проецируется изображение лица. На основании этой информации была сформулирована «гипотеза бабушкиной клетки», согласно которой в мозге человека должны существовать определенные клетки, реагирующие только в тех случаях, когда в комнату входит его/ее бабушка! Недавние исследования показали, что есть клетки, реагирующие на определенные слова. Может быть, это шаг на пути к доказательству справедливости гипотезы бабушкиной клетки⁷⁰?

Ясно, что нам предстоит еще очень много узнать о деталях процессов обработки информации в мозге. До сих пор очень мало известно о функционировании высших отделов мозга. Мы пока оставим эти вопросы и обратимся к самим клеткам мозга, которые позволяют ему осуществлять эту удивительную деятельность.

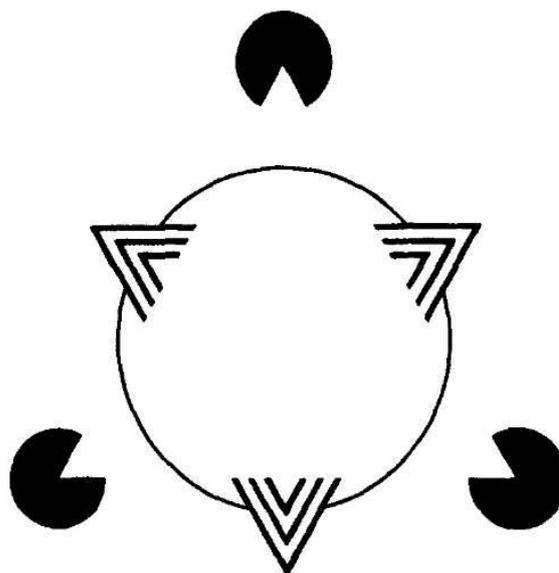


Рис. 9.7. Видите ли вы белый треугольник, лежащий поверх другого треугольника и прикрепленный к нему кольцом? Стороны этого белого треугольника нигде не нарисованы до конца, однако, в мозге есть клетки, ответственные за восприятие этих невидимых линий

⁶⁸ Доступное изложение принципов действия зрительной коры можно найти у Хьюбела [1988].

⁶⁹ См. Хьюбел [1988], с. 221. Ранние эксперименты позволили обнаружить клетки, чувствительные только к образу руки.

⁷⁰ **В.Э.:** Я не думаю, что это клетки, какие-то физиологически особые. Они настраиваются на определенную работу (как и весь мозг), и эта их настройка в терминах информатики как раз и называется – программированием.

§9.6. Как работают нервные импульсы?

Обработка информации в головном мозге (равно как и в спинном мозге и сетчатке) осуществляется уникальными по своему разнообразию клетками, которые называются нейронами.⁷¹ Попробуем разобраться, как же устроен нейрон. Я схематично изобразил его на рис. 9.8. Его утолщенная центральная часть, немного похожая на звезду и часто имеющая форму редиски, называется телом (сомой) нейрона и содержит в себе клеточное ядро. С одной стороны от тела нейрона отходит сильно вытянутое нервное волокно, называемое аксоном. Аксон иногда достигает действительно огромной длины (у человека – часто до нескольких сантиметров), если учесть, что речь идет всего лишь об одной микроскопической клетке.

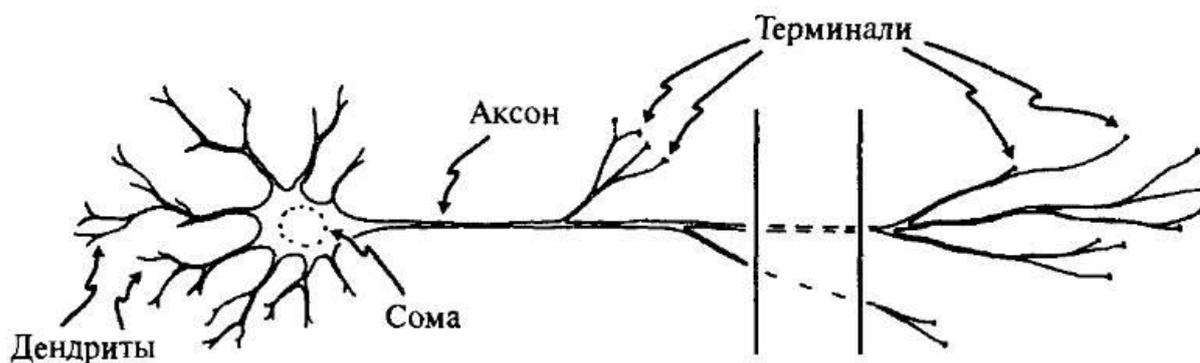


Рис. 9.8. Нейрон (часто гораздо более удлиненный, чем на рисунке). Различные типы нейронов могут существенно отличаться по внешнему виду

Аксон служит «проводом», по которому передается исходящий из клетки нервный сигнал. От аксона в стороны могут отходить более мелкие ветви и, кроме того, аксон может несколько раз разветвляться. На концах каждого из этих нервных волокон находятся нервные окончания (терминали). По другую сторону сомы, а часто и отходя от нее во всех направлениях, располагаются короткие сильно ветвящиеся отростки – дендриты, по которым в клетку поступают входные данные. (Иногда и на концах дендритов встречаются терминали, образующие так называемые дендро-дендритные синапсы между дендритами. В дальнейшем я не буду их учитывать, поскольку связанное с ними усложнение общей картины несущественно.)

Клетка как целое отделена от окружающей клеточной мембраной, которая охватывает сому, аксон, нервные окончания, дендриты и всё остальное. Для того, чтобы сигналы передавались от одного нейрона к другому, надо каким-то образом обеспечить им возможность «перехода через барьер» между нейронами. Это достигается с помощью межклеточного соединения, называемого синапсом, в котором терминаль одного нейрона соединена с какой-либо точкой на соме или на одном из дендритов другого нейрона (рис. 9.9). На самом деле, между терминалью одного нейрона и сомой или дендритом другого остается очень узкий зазор, который называется синаптической щелью (рис. 9.10). При передаче от одного нейрона к другому сигнал должен преодолеть этот зазор.

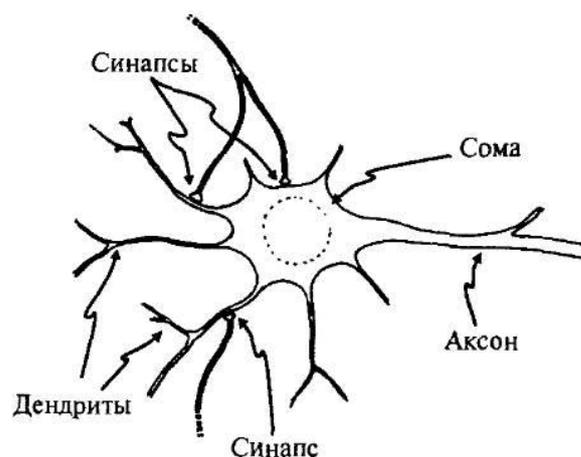


Рис. 9.9. Синапсы обеспечивают контакт одного нейрона с другим

⁷¹ Общепринятая сегодня теория, согласно которой нервная система состоит из отдельных клеток – нейронов – была впервые предложена и убедительно обоснована великим испанским нейрофизиологом Рамоном-и-Кахалом около 1900 года.

В какой форме сигналы передаются по нервным волокнам и через синаптические щели? Что заставляет следующий нейрон передавать сигнал дальше? Для непосвященного, вроде меня, механизмы, которые используются здесь природой, кажутся удивительными и совершенно зачаровывающими! Можно было бы думать, что эти сигналы распространяются точно так же, как электрический ток по проводам, но в действительности всё гораздо сложнее.

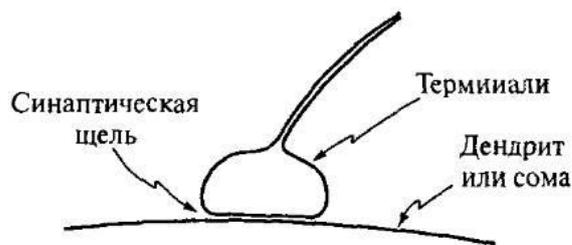


Рис. 9.10. Схема строения химического синапса. Через синаптическую щель сигнал передается с помощью нейромедиатора

Нервное волокно представляет собой цилиндрическую трубку, заполненную раствором обычной соли (хлорида натрия), смешанной с хлоридом калия (с преобладанием последнего), так что внутри трубки находится смесь из ионов натрия, калия и хлора (рис. 9.11). Снаружи волокна находятся те же ионы, но в других соотношениях: ионов натрия больше, чем ионов калия. В состоянии покоя содержимое трубки имеет суммарный отрицательный заряд (т.е. ионов хлора там больше, чем ионов калия и натрия вместе; напомним, что ионы калия и натрия заряжены положительно, тогда как ионы хлора – отрицательно). Клеточная мембрана, образующая поверхность цилиндра, имеет «утечки», поэтому ионы перемещаются через мембрану таким образом, чтобы нейтрализовать избыточный заряд. Компенсацию утечек и поддержание избыточного отрицательного заряда внутри трубки осуществляет «ионный насос», который очень медленно откачивает ионы натрия через мембрану наружу. Отчасти это же помогает поддерживать избыток ионов калия по сравнению с ионами натрия во внутреннем растворе. Существует также ионный насос, который (более медленно) переносит ионы калия из наружной среды внутрь трубки (что, правда, не способствует поддержанию разности зарядов).

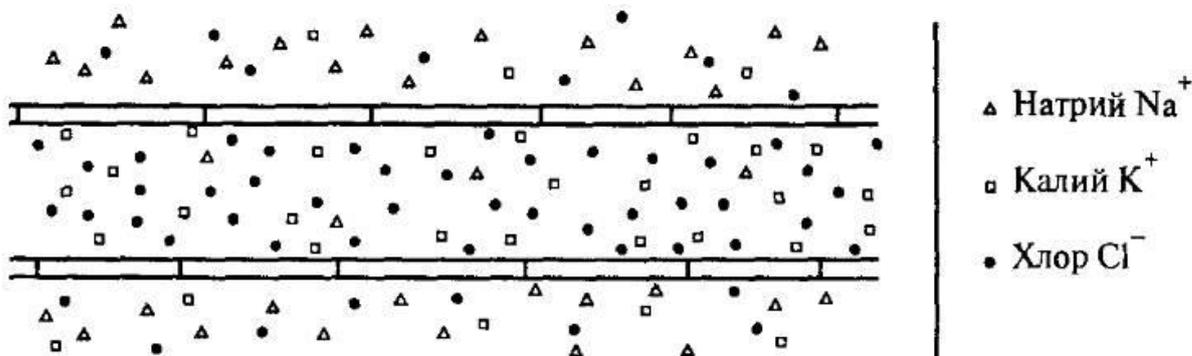


Рис. 9.11. Схематическое изображение нервного волокна. В состоянии покоя внутри волокна ионов хлора больше, чем ионов калия и натрия, что обеспечивает отрицательный суммарный заряд; снаружи ситуация противоположная, и, соответственно, имеется положительный заряд. Калиево-натриевый баланс внутри трубки отличается от баланса снаружи: внутри больше ионов калия, а снаружи – натрия

Сигнал, распространяющийся по нервному волокну, представляет собой область с обратным распределением зарядов (т.е. положительный заряд внутри и отрицательный снаружи), которая перемещается вдоль волокна (рис. 9.12). Вообразите, что вы находитесь на нервном волокне как раз перед такой областью с обратным распределением зарядов. По мере того, как эта область приближается, электрическое поле открывает в мембране маленькие «дверцы», называемые натриевыми каналами. Это позволяет ионам натрия перемещаться с наружной стороны мембраны обратно внутрь трубки (в результате совместного действия электрических сил и давления, обусловленного разностью концентраций, т.е. «осмоса»). Это приводит к тому, что заряд снаружи становится отрицательным, а внутри – положительным. Когда это происходит, мы знаем, что область обратного распределения заряда, которая и является сигналом, достигла нас. При этом позади нее открываются крошечные «дверцы» другого типа (калиевые каналы), которые выпускают ионы калия наружу, тем самым восстанавливая избыточный отрицательный заряд внутри. Теперь сигнал прошел! Наконец, когда сигнал уже достаточно удалился, медленно, но верно работающие ионные насосы постепенно выкачивают ионы натрия из трубки наружу,

закачивая внутрь ионы калия. Таким образом волокно возвращается в состояние покоя и готово к передаче очередного сигнала.

Обратите внимание, что сигнал представляет собой просто область обратного распределения заряда, движущуюся вдоль волокна. Вещество как таковое (т.е. ионы) перемещается при этом совсем немного – только внутрь и наружу через клеточную мембрану!

Этот странный, экзотической механизм действует на поверку очень эффективно. Он универсален и используется как у позвоночных, так и у беспозвоночных. Но у позвоночных он был усовершенствован за счет изоляции нервных волокон при помощи беловатого жироподобного вещества, называемого миелином. (Именно миелиновым покрытием объясняется цвет «белого вещества» мозга.) Такая изоляция позволяет нервным импульсам распространяться без потерь (от одной «ретрансляционной станции» к другой) и с очень приличной скоростью – до 120 метров в секунду.

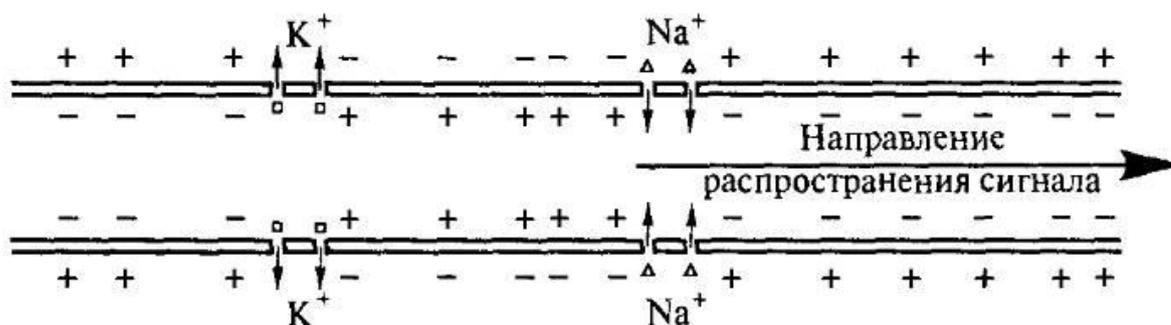


Рис. 9.12. Нервный импульс – это область с обратным (по отношению к состоянию покоя) распределением заряда, перемещающаяся вдоль волокна. При ее приближении открываются натриевые каналы, пропускающие поток ионов натрия внутрь; сразу после ее прохождения открываются калиевые каналы, обеспечивающие отток ионов калия наружу. Работа ионных насосов восстанавливает исходное состояние

Когда сигнал достигает терминали, из нее выделяется химическое соединение, называемое нейромедиатором. Это соединение пересекает синаптическую щель и достигает другого нейрона – поверхности дендрита или сомы. При этом у одних нейронов терминаль выделяет нейромедиатор, облегчающий возбуждение следующего нейрона, т.е. посылку нового сигнала вдоль своего аксона. Эти синапсы называются возбуждающими. У других нейронов терминали выделяют нейромедиатор, затрудняющий другому нейрону генерацию собственного импульса, и поэтому называются тормозящими. На каждом нейроне действие активных в данный момент возбуждающих синапсов суммируется, из результата вычитается суммарное действие тормозящих синапсов, и если полученная разность превышает определенное критическое значение, то нейрон действительно возбуждается. (Возбуждающие синапсы создают положительную разность потенциалов между внутренней и наружной сторонами мембраны следующего нейрона, а тормозящие – отрицательную. Эти разности потенциалов складываются. Нейрон возбуждётся только в том случае, если результирующая разность потенциалов на мембране в начале его аксона достигнет определенной критической величины, при которой ионы калия не успевают выходить наружу достаточно быстро, чтобы восстановить равновесие.)⁷²

§9.7. Компьютерные модели

Важным свойством нервной системы является то, что сигналы, используемые для передачи информации, относятся (большой частью) к классу явлений «всё или ничего». Сила сигнала не изменяется: он или есть, или его нет. Это придает деятельности нервной системы некоторое сходство с работой цифрового компьютера. На самом деле, между работой огромного количества взаимосвязанных нейронов и процессами внутри компьютера со всеми его проводниками и логическими элементами (подробнее об этом чуть позже) есть много общего. В принципе, было

⁷² **В.Э.:** Это всё чрезвычайно интересно, но только, читая про это, не надо выпускать из виду, что это – физическая природа сигнала. Однако для информатики (и для программирования) физическая природа сигнала не важна, а важен смысл сигнала, и особенно – смысл совокупности сигналов (представляющих собой структуру данных).

бы не так уж трудно создать компьютерную модель подобной системы нейронов. Но возникает вполне естественный вопрос: не означает ли это, что какой бы ни была детальная схема соединений нейронов в мозге, всегда можно построить его компьютерную модель?

Чтобы сделать это сравнение более наглядным, я должен объяснить, что такое логический элемент. В компьютере мы также сталкиваемся с ситуацией типа «всё или ничего»: либо в проводнике есть импульс тока, либо его нет, причем когда импульс есть, его величина всегда одна и та же. Поскольку всё в компьютере строго синхронизовано, то отсутствие импульса было бы определенным сигналом, который может быть «замечен» компьютером. Вообще говоря, когда мы пользуемся термином «логический элемент», мы неявно подразумеваем, что наличие или отсутствие импульса обозначает «истину» или «ложь», соответственно. Конечно же, к реальной истине или лжи это никакого отношения не имеет и используется только как общепринятая терминология. Мы будем также обозначать «истину» (наличие импульса) цифрой «1» и «ложь» (отсутствие импульса) цифрой «0». Помимо этого, как и в главе 4, мы будем обозначать знаком «&» логическое «и» (которое является «утверждением» об «истинности» обоих аргументов, т.е. принимает значение 1 тогда и только тогда, когда оба они равны 1); «∨» – логическое «или» (которое «означает», что либо один из аргументов, либо оба они «истинны», т.е. выражение становится равным 0 тогда и только тогда, когда оба аргумента имеют значение 0); знаком «⇒» – «следует» (т.е. $A \Rightarrow B$ означает утверждение «если истинно A, то истинно B», что эквивалентно утверждению «либо A ложно, либо B истинно»); «⇔» – «тогда и только тогда» (выражение истинно, если оба аргумента «истинны» или же оба «ложны» одновременно); и использовать знак «¬» для логического «не» (выражение «истинно», если аргумент «ложен», и «ложно», если аргумент «истинен»). Результаты применения различных логических операций можно описать при помощи так называемых «таблиц истинности»:

$$\begin{array}{l}
 A \& B: \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad A \vee B: \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix} \\
 A \Rightarrow B: \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad A \Leftrightarrow B: \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix},
 \end{array}$$

в каждой из которых A обозначает строки (т.е. $A = 0$ дает первую строку, а $A = 1$ – вторую), а B – столбцы. Например, если $A = 0$ и $B = 1$, что во всех таблицах отвечает правому верхнему углу, то выражение $A \Rightarrow B$ согласно третьей таблице примет значение 1. (Соответствующий словесный пример из области традиционной логики: утверждение «если я сплю, то я счастлив», очевидно, остается истинным в частном случае, когда я бодрствую и счастлив.) И, наконец, действие логического элемента «не» может быть записано просто как:

$$\begin{array}{l}
 \sim 0 = 1 \\
 \sim 1 = 0.
 \end{array}$$

Это – основные типы логических элементов. Есть еще ряд других, но все они могут быть построены из только что описанных.⁷³

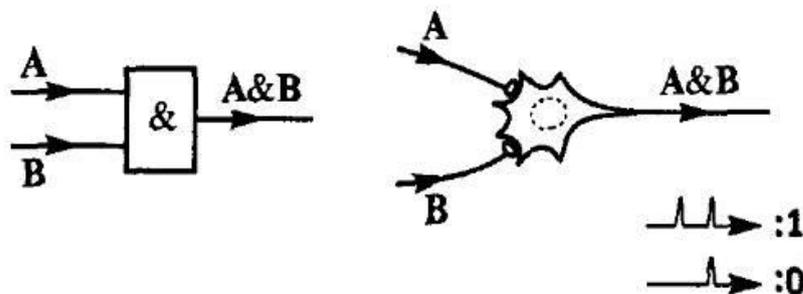


Рис. 9.13. Логический элемент «и». В «нейронной модели» (справа) нейрон возбуждается только в том случае, когда на его вход поступают одновременно два импульса

⁷³ На самом деле, любые логические элементы могут быть построены с помощью одних только операций "¬" и "&" (или даже только одной-единственной операции $\sim (A \& B)$).

Итак, можем ли мы, в принципе, построить компьютер, используя соединенные между собой нейроны? Я собираюсь показать, что это возможно даже при самых примитивных представлениях о функциях нейрона. Посмотрим, как можно было бы, в принципе, построить логические элементы на основе соединенных между собой нейронов. Нам потребуется новый способ записи цифр, поскольку в отсутствие сигнала ничего не происходит. Будем считать (совершенно произвольно), что двойной импульс обозначает 1 (или «истину»), а одиночный – 0 (или «ложь»). Примем также упрощенную схему, в которой нейрон возбуждается только при получении двух возбуждающих импульсов (т.е. двойного импульса) одновременно. Тогда нетрудно сконструировать элемент «и» (т.е. «&»). Как показано на рис. 9.13, для этого достаточно, чтобы с выходным нейроном образовывали входные синапсы два нервных окончания. (Тогда, если по обоим окончаниям приходят двойные импульсы, то и первый, и второй импульс превысят заданный двухимпульсный порог срабатывания; а если хотя бы на один входной синапс приходит одиночный импульс, то превысит порог лишь одна пара возбуждающих импульсов. Я предполагаю, что все импульсы хорошо согласованы по времени, и что в случае двойного импульса, для определенности, синхронизация осуществляется по первой паре импульсов.)

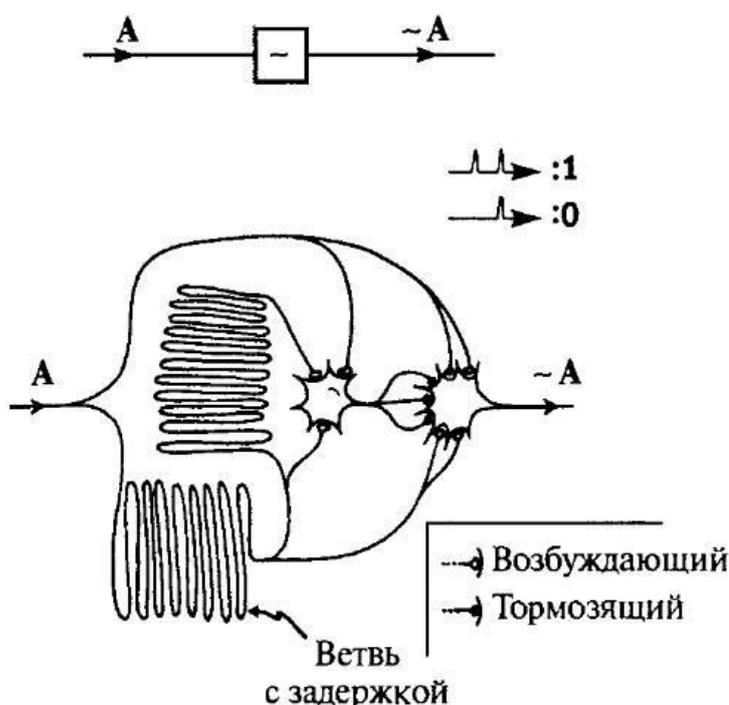


Рис.9.14. Логический элемент «не». В «нейронной модели», как и ранее, для срабатывания нейрона требуется одновременное воздействие двух (по крайней мере) одиночных импульсов

Конструкция элемента «не» (т.е. «~») значительно сложнее. Один из способов его построения приведен на рис. 9.14. Входной сигнал поступает по аксону, разделяющемуся на две ветви. Одна из ветвей имеет увеличенную длину, такую, чтобы сигнал при движении по ней запаздывал ровно на время, равное промежутку между импульсами в паре. Затем обе ветви снова разделяются, и одно из ответвлений каждой ветви отходит к тормозящему нейрону, причем аксон от ветви с задержкой предварительно разделяется снова, образуя прямую ветвь и ветвь с задержкой. На выходе тормозящего нейрона не будет ничего при одиночном импульсе на его входе, и двойной импульс (с задержкой), если на его входе также был двойной импульс. Аксон тормозящего нейрона разделяется на три ветви, каждая из которых образует тормозящий синапс на окончательном нейроне. Оставшиеся два ответвления исходного аксона снова разделяются, так что к конечному нейрону подходят уже четыре терминала, образующие возбуждающие синапсы. При желании читатель может проверить, что выходной сигнал этого конечного нейрона соответствует сигналу элемента «не» (т.е. пара импульсов, если на входе был одиночный, и наоборот). (Такая конструкция кажется абсурдно усложненной, но это наилучшее из того, что пришло мне в голову!) В качестве развлечения читатель может составить подобные «нейронные» схемы и для остальных описанных выше логических элементов.

Естественно, эти конкретные примеры не могут служить серьезными моделями того, что происходит в мозге на самом деле. С их помощью я только старался показать, что описанная выше модель возбуждения нейрона по сути логически эквивалентна конструкции электронного компьютера. Легко видеть, что с помощью компьютера можно воспроизвести любую модель соединения нейронов между собой. В то же время, подробно рассмотренные выше конструкции указывают на то, что и, наоборот, системы нейронов могут быть моделями компьютера и, следовательно, могут действовать как (универсальная) машина Тьюринга. Хотя при обсуждении машин Тьюринга во второй главе мы не использовали понятие логических элементов⁷⁴ и, в действительности, для построения модели машины Тьюринга в общем случае помимо логических элементов нам понадобилось бы еще многое другое, в этом нет ничего принципиально нового, если только мы допускаем возможность аппроксимации используемой в машине Тьюринга бесконечной ленты огромным, но конечным множеством нейронов. А это уже, как кажется, подводит нас к выводу о том, что мозг по своей сути эквивалентен компьютеру!

Но прежде, чем делать такие поспешные выводы, нам следует рассмотреть некоторые различия между деятельностью мозга и работой современных компьютеров, которые могут оказаться достаточно важными. Во-первых, я слишком упростил описание возбуждения нейрона, отнеся его к явлениям типа «всё или ничего». Это справедливо для одиночного импульса, распространяющегося по аксону. На самом деле, когда нейрон возбуждается, он генерирует целую последовательность импульсов, быстро следующих друг за другом. Даже в состоянии покоя нейрон генерирует импульсы, но с гораздо меньшей частотой. Именно многократное увеличение частоты импульсов характеризует переход нейрона в возбужденное состояние. Кроме того, есть еще и вероятностный аспект срабатывания нейрона. Один и тот же стимул может приводить к различным результатам. Более того, в мозге нет точной синхронизации с помощью постоянной тактовой частоты, которая необходима для работы современных компьютеров. Кроме того, следует отметить, что максимальная частота срабатывания нейрона, составляющая около 1000 импульсов в секунду, гораздо меньше, чем у современных электронных устройств, у которых она более чем в 1 млн раз выше. К тому же, по сравнению с очень высокой точностью соединений в электронном компьютере, действительные соединения между нейронами кажутся в большой степени случайными и избыточными – правда, сегодня мы знаем, что в мозге (при рождении) эти соединения установлены с гораздо большей точностью, чем считалось полвека назад.

Может показаться, что бóльшая часть из сказанного выше характеризует мозг с невыгодной стороны по сравнению с компьютером. Но есть и другие факторы, говорящие в пользу мозга. У логических элементов может быть лишь очень ограниченное количество входов и выходов (скажем, три–четыре, не больше), тогда как нейроны могут иметь гигантское число синапсов. (Предельным случаем можно считать нейроны мозжечка, известные как клетки Пуркинье, у которых количество возбуждающих синапсов достигает 80'000.) Помимо этого, общее число нейронов в мозге также превышает максимальное количество транзисторов, входящих в состав самой большой в мире вычислительной машины – примерно 10^{11} в мозге и «всего лишь» 10^9 у компьютера. Однако последнее число в будущем, скорее всего, возрастет.⁷⁵ Более того, большое число клеток мозга в значительной степени обусловлено огромным количеством мелких клеток-зерен в мозжечке, которых насчитывается около тридцати миллиардов (3×10^{10}). Если считать, что осознанным восприятием, в отличие от современных компьютеров, мы обладаем просто благодаря большому числу нейронов, то нам придется найти какое-то дополнительное объяснение тому, что деятельность мозжечка полностью бессознательна и в то же время сознание может быть связано с головным мозгом, в котором нейронов всего в два раза больше (около 7×10^{10}) при значительно меньшей плотности.

⁷⁴ Фактически, использование логических элементов в большей степени отвечает конструкции электронного компьютера, чем изложенные в главе 2 {МОИ № 14} особенности конструкции машины Тьюринга. В главе 2 особое внимание подходу Тьюринга было уделено по теоретическим соображениям. Начало действительному развитию компьютерных технологий положили в равной степени работы Алана Тьюринга и выдающегося американского математика венгерского происхождения Джона фон Неймана.

⁷⁵ Эти сравнения во многом обманчивы. Подавляющее большинство транзисторов в современных компьютерах используется в устройствах «памяти» и не участвует в логических операциях; а память можно наращивать за счет внешних устройств практически бесконечно. При более интенсивном использовании параллельных вычислений количество транзисторов, непосредственно участвующих в выполнении логических операций, могло бы быть значительно больше, чем это принято в настоящее время.

§9.8. Пластичность мозга

Между деятельностью мозга и работой компьютера существуют и другие различия, на мой взгляд даже более важные, чем до сих пор упоминавшиеся, и связанные с явлением, которое называется пластичностью мозга. В действительности, неправомерно рассматривать мозг как фиксированную совокупность связанных друг с другом нейронов. Взаимосвязи нейронов на самом деле не постоянны, как это было бы в рассмотренной выше компьютерной модели, но всё время меняются. Это не значит, что изменяются положения аксонов или дендритов. Многие из их сложных взаимосвязей в общих чертах формируются еще при рождении. Я имею в виду синаптические контакты, которые в действительности и обеспечивают связь между нейронами. На дендритах они часто формируются на небольших выростах, называемых шипиками, к которым подходят терминалы других нейронов (рис. 9.15). Здесь «контакт» означает не соприкосновение, а узкий зазор (синаптическую щель) заданной ширины – около одной сорокатысячной доли миллиметра. При определенных условиях шипики дендритов могут исчезать, тем самым нарушая контакт, или вырастать (могут образовываться и новые) и формировать новую связь. Таким образом, если мы представим себе, что совокупность соединенных друг с другом нейронов в мозгу действительно образует компьютер, то это компьютер, способный непрерывно изменяться⁷⁶!

Согласно одной из ведущих теорий долговременная память обусловлена именно такими изменениями синаптических контактов. Именно они обеспечивают возможность сохранения необходимой информации. Если это так, то пластичность предстает перед нами уже не просто как несущественное усложнение деятельности мозга, но как ее важнейшее свойство.

Каков механизм этих непрекращающихся изменений? Как быстро они могут происходить? Однозначный ответ на второй вопрос вряд ли существует, хотя представители по крайней мере одной из научных школ утверждают, что такие изменения могут происходить за несколько секунд.

Этого можно было ожидать, если такие изменения ответственны за долговременное запоминание, поскольку оно происходит за характерное время около одной секунды (Кандел [1976]). Это имело бы для нас весьма существенное значение в дальнейшем. Я вернусь к этому важному вопросу в следующей главе.

А что же можно сказать о механизмах пластичности мозга? Согласно оригинальной теории, предложенной в 1954 году Дональдом Хеббом, существуют определенные синапсы (впоследствии получившие название «синапсов Хебба»), обладающие тем свойством, что связь между нейронами А и В, обусловленная синапсом Хебба, усиливается каждый раз, когда за возбуждением А следует возбуждение В, и ослабляется, если В не возбуждается. Изменение эффективности связи между нейронами не зависит от степени участия самого синапса Хебба в возбуждении нейрона В. Это делает возможной некоторую форму «обучения». На основе этой теории был предложен целый ряд математических моделей обучения и решения задач. Они получили название нейронных сетей. По-видимому, нейронные сети действительно способны к какому-то элементарному обучению, но им пока еще далеко до реальных моделей мозга. В любом случае, механизмы, управляющие изменениями синаптических контактов, скорее всего более сложны, чем рассмотренные выше. Очевидно, что необходимы дальнейшие исследования.

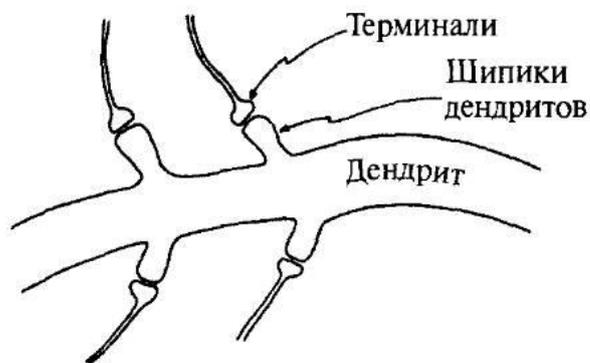


Рис. 9.15. Синаптические контакты, образуемый шипиками дендритов. Эффективность такого соединения легко изменяется при росте или уменьшении шипика

⁷⁶ В.Э.: Всякий компьютер представляет собой устройство, способное непрерывно изменяться. Эти изменения компьютера называются записью в него программы или информации. И (с точки зрения абстрактной информатики) совершенно не важно, какова именно физическая природа этих изменений, кодирующих программу или информацию. Они кодируются связями дендритов? Хорошо. Уровнем ионов калия? Хорошо. Для нас всё это – изменения, кодирующие что-то, и (в качестве программы) влиющие на что-то. Вот, в таком абстрактном виде и рассуждаем: – о программах и о данных для них или о их результатах.

С пластичностью связан и другой аспект выделения нейромедиаторов терминалями. Иногда нейромедиаторы выделяются вовсе не в синаптические щели, а в окружающую межклеточную жидкость, возможно, для воздействия на другие, расположенные на большом удалении нейроны. По-видимому, многие нейрхимические вещества выделяются подобным образом. Существуют различные теории памяти, в которых используются разнообразные сочетания таких веществ, участвующих в процессе запоминания. Конечно, состояние мозга зависит от наличия в нем химических соединений (например, гормонов), выделяемых различными его частями. Проблемы нейрхимии в целом весьма сложны, и пока непонятно, как можно подойти к созданию правдоподобной и полной компьютерной модели мозга.⁷⁷

§9.9. Параллельные компьютеры и «единственность» сознания

Многие считают, что развитие параллельных компьютеров содержит в себе ключ к построению машин, обладающих возможностями человеческого мозга. Далее мы кратко рассмотрим эту популярную сегодня идею.

Параллельный компьютер, в противоположность последовательному, может выполнять одновременно и независимо друг от друга огромное число отдельных операций, и результаты этих автономных операций время от времени объединяются, давая вклад в общий вычислительный процесс. Толчком к созданию такого типа компьютерной архитектуры послужили попытки моделирования нервной системы, поскольку, согласно современным представлениям, разные части мозга выполняют практически автономные вычислительные функции (например, при обработке визуальной информации в зрительной коре).

Здесь необходимо сделать два замечания. Во-первых, между параллельным и последовательным компьютерами не существует принципиальной разницы. По сути, оба являются машинами Тьюринга (ср. главу 2, с.66 МОИ № 14). Отличие может проявляться только лишь в эффективности, или скорости, вычислений в целом.⁷⁸ Для некоторых типов вычислительных процессов параллельная организация, действительно, более эффективна, но это далеко не всегда так. Во-вторых, по крайней мере с моей точки зрения, крайне маловероятно, что классические параллельные вычисления дают ключ к тому, что происходит при сознательном мышлении. Характерным свойством сознательной мысли (по крайней мере в нормальном психологическом состоянии и не после операции по разделению полушарий мозга!) является ее «единственность» – в противоположность множественности выполняемых одновременно и независимо друг от друга операций.

Фразы типа: «Я же не могу думать обо всем сразу?!» можно услышать на каждом шагу. Можно ли вообще думать о нескольких вещах одновременно? Вероятно, кто-то может удерживать в голове несколько мыслей в одно и то же время, но это, скорее всего, будет похоже на постоянное перескакивание от одной мысли к другой и обратно, нежели на действительно одновременное, сознательное и независимое их обдумывание. Если бы кто-то мог думать о двух вещах совершенно независимо, то это было бы более похоже на обладание двумя раздельными сознаниями, пусть даже и на короткий промежуток времени, тогда как повседневный опыт (по крайней мере нормальных людей) свидетельствует о наличии единственного сознания, которое

⁷⁷ В.Э.: А нужна ли нам модель мозга?

⁷⁸ В.Э.: Пенроуз постоянно повторяет этот (ошибочный) тезис; очевидно тот играет большую роль в формировании его воззрений. Этот тезис верен только тогда, если мы имеем дело с одной процедурой, например, такой, как «рассчитать десятичное представление числа π с точностью до миллионного знака за запятой». При такой задаче действительно параллельные процессоры не повлияют ни на что другое, кроме скорости счета. Но совсем иначе обстоят дела, когда параллельные процессоры делают каждый свою работу и только как-то взаимодействуют между собой (а ситуация в мозге именно такова!). По «логике» Пенроуза выходит, что нет вообще разницы – один компьютер у нас работает или два, или миллион; все миллионы компьютеров, подключенные сегодня к Интернету, выполняют один гигантский алгоритм, который в принципе может быть реализован одной машиной Тьюринга! (Нет абсолютно никакого толку от рассуждений такого типа: если мы будем думать о параллельных процессорах, то мы построим вычислительную сеть, а если мы будем думать о том, как всё это делает одна-единственная машина Тьюринга, то мы не построим НИЧЕГО!).

может иметь смутное представление о ряде вещей, но которое сконцентрировано в каждый момент времени только на одной из них.⁷⁹

Конечно, то, что мы подразумеваем здесь под «одной вещью», не совсем ясно. В следующей главе мы познакомимся с совершенно удивительными примерами «отдельных мыслей», появившихся в минуты вдохновения у Пуанкаре и Моцарта. Но нам вовсе не обязательно забираться так далеко, чтобы понять, что мысль человека в каждый конкретный момент времени может неявно быть очень сложной. Представьте себе, например, процесс обдумывания обеденного меню. Одна такая мысль может включать в себя такое количество разнообразной информации, что ее полное словесное описание было бы очень долгим.

«Единственность» осознанного восприятия представляется мне идущей вразрез с концепцией параллельного компьютера. С другой стороны, эта концепция может оказаться более подходящей в качестве модели бессознательной деятельности мозга. Различные независимые действия (ходьба, застегивание пуговиц, дыхание и даже разговор) могут выполняться человеком одновременно и более менее автономно, причем он может не осознавать ни одно из них!

С другой стороны, мне кажется, что эта «единственность» сознания может иметь что-то общее с квантовым параллелизмом. Вспомним, что, согласно квантовой теории, на квантовом уровне различные альтернативы могут сосуществовать в линейной суперпозиции! Отсюда следует, что одиночное квантовое состояние могло бы, в принципе, состоять из большого числа различных событий, происходящих одновременно. Именно это и подразумевается под квантовым параллелизмом. Мы скоро рассмотрим теоретическую концепцию «квантового компьютера», в котором, в принципе, квантовый параллелизм мог бы быть использован для выполнения большого числа одновременных операций. Если «состояние ума», соответствующее рассудочной деятельности, имеет какое-то сходство с квантовым состоянием, то некая форма «единственности», или глобальности, мысли соответствует ему в большей степени, чем в случае обычного параллельного компьютера. У этой идеи есть несколько привлекательных аспектов, к которым я вернусь в следующей главе. Но прежде, чем рассматривать эту идею всерьез, мы должны ответить на вопрос, могут ли квантовые эффекты иметь какое-либо отношение к деятельности мозга.

§9.10. Имеет ли квантовая механика отношение к работе мозга?

Всё предыдущее обсуждение нервной деятельности проводилось целиком в рамках классических представлений, за исключением тех случаев, когда мы затрагивали физические явления, неявные причины которых отчасти обусловлены квантово-механическими эффектами (например, ионы, несущие единичные электрические заряды; натриевые и калиевые каналы; определенные химические потенциалы, определяющие триггерный характер генерации нервного импульса; химия нейромедиаторов). Но нет ли таких ключевых процессов в мозге, которые бы непосредственно определялись квантово-механическими эффектами? Для того, чтобы рассуждения, описанные в конце предыдущей главы, имели какой-то смысл, такие процессы, по-видимому, должны существовать.

⁷⁹ В.Э.: Верно, по всей видимости в мозге действительно есть один специальный процессор, который ближе всего стоит к пенроузовскому понятию «сознания». В Веданской теории он называется «хроникером». Он занят отбором того, что нужно сохранять в память. К чему этот процессор обратился, то и попадает в память и далее, значит, «осознается». В психологии работа этого процессора обозначается словом «внимание» («обратить внимание» – это означает: попасть в поле зрения хроникера). В нормальной ситуации в операционной системе человека действительно имеется только один хроникер (чем и объясняются названные Пенроузом явления). Но параллельно с хроникером в мозге работает огромное множество других процессоров. Пенроуз может обращать внимание на Биг Бен или Тауэр, и в то же время бодро вышагивать по улицам Лондона. (А сколько процессоров должны быть задействованы, чтобы Пенроуз сумел двигать ногами, махать руками, вертеть головой, чтобы он держался вертикально и не упал ни вперед, ни назад, ни вбок; чтобы он видел перекрестки и светофоры на них, чтобы слышал гудки автомобилей, когда пошел на красный свет?) И плюс к этому он еще и ведет разговор с приехавшим из США Айвором Робинсоном, о котором он расскажет ниже в §10.5. Но мало даже и этого: еще один процессор в голове Пенроуза в то же самое время обрабатывает информацию о квазарах с черной дырой Оппенгеймера–Снайдера в центре и прямо на улице выдает ему искомый критерий «ловушечной поверхности» для сингулярностей! (И после этого всего Пенроуз еще рассказывает нам, что нет никакой разницы – один процессор работает или множество, а «ловушечную поверхность» он приписывает, конечно же, «неалгоритмическому озарению»!).

В действительности, можно указать, по крайней мере, одно место, где чисто квантовые явления имеют принципиальное значение для нервной деятельности, – это сетчатая оболочка глаза. (Вспомним, что сетчатка фактически входит в состав мозга!) Эксперименты с жабами показали, что в подходящих условиях адаптированная к темноте сетчатка вырабатывает макроскопический нервный импульс при попадании на нее единичного фотона (Бэйлор и др. [1979]). То же, как выясняется, справедливо и для человека (Хехт и др. [1941]), хотя в этом случае существует дополнительный механизм, который подавляет подобные слабые сигналы, тем самым очищая воспринимаемое изображение от лишнего визуального «шума». Необходимо суммарное воздействие примерно семи фотонов, чтобы адаптировавшийся к темноте испытуемый мог его ощутить. Тем не менее, в нашей сетчатке, по-видимому, все-таки есть клетки, чувствительные к попаданию только одного фотона.

Поскольку в теле человека существуют нейроны, способные срабатывать под воздействием единичного квантового события, то вполне обоснован вопрос о наличии таких клеток где-нибудь в основных отделах мозга. Насколько мне известно, это предположение не подтвердилось. У клеток всех изученных типов есть определенный порог срабатывания и требуется очень большое число квантов, чтобы перевести клетку в возбужденное состояние. Однако можно было бы допустить, что где-то глубоко внутри мозга должны быть клетки, чувствительные к одиночным квантам. Если это окажется верным, то квантовая механика должна играть существенную роль в деятельности мозга.

Но даже при таком положении вещей роль квантовой механики оказалась бы чисто номинальной, поскольку квант используется просто как возбудитель сигнала. Никаких интерференционных эффектов, характерных для квантовых явлений, пока обнаружить не удалось. Похоже, что в лучшем случае всё, что мы можем получить от квантовой механики, это неопределенность момента срабатывания нейрона. Трудно представить, как это может пригодиться нам на практике.

Однако некоторые вопросы, имеющие к этому отношение, не так тривиальны. Для их рассмотрения обратимся вновь к сетчатой оболочке глаза. Предположим, что фотон попадает на сетчатку, предварительно отразившись от полупрозрачного зеркала. Состояние фотона тогда будет представлять собой сложную линейную суперпозицию состояний, когда он попадает в клетку сетчатки и когда он проходит мимо клетки и вместо этого, скажем, улетает через окно в космос (см. рис. 6.17, с. 84 [МОИ № 15](#)). В тот момент, когда он мог бы попасть в клетку сетчатки, до тех пор, пока выполняется линейная процедура U (т.е. детерминированная эволюция вектора состояния по уравнению Шрёдингера, см. §6.8), мы получим сложную линейную суперпозицию наличия и отсутствия нервного сигнала. Когда это доходит до сознания наблюдателя, воспринимается только одна из этих двух альтернатив, и должна использоваться другая квантовая R -процедура (редукция вектора состояния, см. с. 205). (Говоря так, я сознательно обхожу стороной теорию множественности миров, которая имеет множество своих собственных проблем!) В соответствии с рассуждениями, приведенными в конце предыдущей главы, нам следует задать вопрос, достаточное ли количество материи вовлекается в прохождение сигнала, чтобы удовлетворялся одногравитонный критерий (см. главу 8)? Хотя при преобразовании энергии фотона в энергию движения массы при выработке сигнала в сетчатке достигается действительно гигантское усиление, возможно, до 10^{20} раз, эта масса всё же значительно меньше величины планковской массы m_p) (примерно в 10^8 раз). Однако нервный сигнал создает регистрируемое изменяющееся электрическое поле в окружающей среде (тороидальное поле с осью, совпадающей с нервным волокном, по которому оно перемещается). Это поле может вносить в окружающую среду значительное возмущение, за счет чего одногравитонный критерий будет легко удовлетворен. Таким образом, в соответствии с изложенной мной точкой зрения, R -процедура могла бы выполняться задолго до того, как мы увидим или, может случиться, не увидим вспышку света. К тому же, для редукции вектора состояния наше сознание не требуется!

§9.11. Квантовые компьютеры

Если мы все-таки предположим, что чувствительные к одиночным квантам нейроны играют важную роль где-то в глубине нашего мозга, то возникает вопрос, какие следствия это могло бы иметь. Для начала я изложу концепцию квантового компьютера, предложенную Дойчем (см. также главу 4, с. 157 [МОИ № 14](#)), а затем мы выясним, можно ли ее рассматривать как имеющую отношение к теме нашей дискуссии.

Как было указано выше, главная идея состоит в использовании квантового параллелизма, в соответствии с которым два совершенно различных процесса должны рассматриваться как происходящие одновременно в виде квантовой линейной суперпозиции, например, фотон одновременно отражается от полупрозрачного зеркала и проходит через него или один и тот же фотон проходит через каждую из двух щелей. В случае квантового компьютера этими двумя различными наложенными друг на друга процессами будут два различных вычисления. При этом предполагается, что нас интересуют результаты не обоих вычислений, а некий результат, основанный на частичной информации, полученной из суперпозиции этих процессов. Наконец, когда оба вычисления завершены, над этой парой процессов должно быть проведено соответствующее «наблюдение», позволяющее получить искомый ответ.⁸⁰ Таким образом, это устройство могло бы сэкономить время за счет выполнения двух вычислений одновременно! До сих пор не видно никакого значительного преимущества от использования такого подхода, поскольку было бы гораздо проще непосредственно использовать два классических компьютера параллельно (или один классический параллельный компьютер), чем один квантовый. Однако реальные преимущества квантового компьютера могли бы проявиться при необходимости выполнить очень большое, возможно, неограниченно большое, количество параллельных вычислений, когда нас интересуют не их результаты сами по себе, а только подходящая комбинация результатов всех вычислений.

Принципиальное устройство квантового компьютера предполагает использование квантовой разновидности логических элементов, у которых выходной сигнал является результатом «унитарной операции» над входным сигналом – операции типа U , – и вся работа компьютера состояла бы в выполнении операции U до самого конца вычислений, пока конечный «акт наблюдения» не приведет к выполнению операции R .

Согласно выводам Дойча квантовые компьютеры не предназначены для выполнения неалгоритмических операций (т.е. действий, выходящих за пределы возможностей машины Тьюринга), но способны в некоторых, очень специфических случаях, достигать более высокого быстродействия (в смысле теории сложности, см. §4.12 {МОИ № 14}), чем обычная машина Тьюринга. Для такой блестящей идеи эти выводы представляются довольно неутешительными, но будем помнить о том, что пока мы стоим у самых истоков.

Какое отношение всё это может иметь к работе мозга, содержащего значительное число нейронов, чувствительных к единичным квантам? Провести аналогию здесь мешает в первую очередь то, что квантовые эффекты быстро теряются в «шуме» – мозг слишком «горяч», чтобы квантовая когерентность (поведение, которое удобно описывать как непрерывное действие U) сохранялась в нем сколько-нибудь продолжительное время. В моей терминологии это означало бы, что постоянно удовлетворяется одногравитонный критерий, так что операция R выполняется всё время, изредка прерываясь операцией U .

Таким образом, пока у нас нет повода слишком надеяться на то, что квантовая механика откроет нам нечто новое о мозге. Возможно, мы все обречены быть просто компьютерами!⁸¹ Лично я в это не верю, но для окончательного выяснения вопроса нам необходимо идти дальше в наших исследованиях.

⁸⁰ Дойч в своих описаниях предпочитает использовать подход «множественности миров» относительно квантовой теории. Однако важно понимать, что это совершенно несущественно, поскольку концепция квантового компьютера принципиально не зависит от точки зрения на традиционную квантовую механику.

⁸¹ В.Э.: Подчеркнуто мною. Таковы общие выводы Пенроуза в Первой книге. Но во Второй книге его взгляды (за 5 лет) значительно радикализировались – видимо, под влиянием критики, в несостоятельности которой он неизменно убеждался. Я не читал критических нападок на Пенроуза (хотя и видел названия этих сочинений в Интернете и в списке литературы Второй книги Пенроуза). Но думаю (судя по реакции Пенроуза), что вся эта критика не содержала действительно убийственных для концепции Пенроуза моментов, какие содержит моя критика, а именно, утверждений: 1) Пенроуз спорит только с имитациями интеллекта, очевидно несостоятельными, а не с подлинными реализациями интеллекта; 2) при этом он опирается на – несостоятельную! – теорему Гёделя. Думаю, что прежней критике, в отличие от моей, не хватало ни решительности оспорить выводы Гёделя, ни знания о том, как надо строить настоящую реализацию искусственного интеллекта. Потому-то Пенроуз и мог – ничуть не попирая свою научную совесть – не соглашаться с такой критикой и после выхода Первой книги и нападок на нее только радикализовать свое мнение.

§9.12. За пределами квантовой теории?

Я хочу вновь обратиться к вопросу, который проходит красной нитью через большую часть этой книги: действительно ли наши представления об окружающем мире, управляемом законами классической и квантовой физики в их современном понимании, адекватны для описания мозга и разума? «Обычное» квантовое описание нашего мозга определенно заходит в тупик, поскольку акт «наблюдения» считается важной составляющей правильной интерпретации общепринятой квантовой теории. Следует ли считать, что мозг «наблюдает сам себя» каждый раз при осознанном восприятии или возникновении мысли? Общепринятая теория не дает нам никаких указаний на то, каким образом квантовая механика могла бы принять это в расчет и, тем самым, как применить ее к мозгу в целом. Я попытался сформулировать вполне независимый от сознания критерий включения операции R («одногравитонный критерий»), и если нечто подобное удалось бы развить до полностью согласованной теории, то появилась бы возможность построения более ясного квантового описания мозга, чем существующее ныне.

Однако я считаю, что эти фундаментальные проблемы возникают не только при наших попытках описать деятельность мозга. Работа самих цифровых компьютеров существенно зависит от квантовых эффектов, пониманию которых, по-моему мнению, мешают трудности, внутренне присущие квантовой теории. Что это за «существенная» квантовая зависимость? Чтобы понять роль квантовой механики в цифровых вычислительных машинах, мы, прежде всего, должны выяснить, как можно заставить полностью классический объект вести себя подобно цифровому компьютеру. В главе 5 мы рассматривали классический «компьютер из миллиардных шаров» Фредкина–Тоффоли (с. 23 [МОИ № 15](#)); но, как мы видели, в этом теоретическом «устройстве» были использованы идеализации, позволяющие обойти проблему существенной нестабильности, внутренне присущей классическим системам. Эта проблема нестабильности, как указано выше (с. 153, рис. 5.14), проявляется в эффективном увеличении фазового объема эволюционирующей системы, которое почти неизбежно приводит к непрерывной потере точности операций, выполняемых классическим устройством. Именно квантовая механика позволяет в конце концов остановить это снижение точности. В современных электронных компьютерах необходимо существование дискретных состояний (скажем, для записи цифр 0 и 1), всегда позволяющих однозначно установить, когда компьютер находится в одном, а когда в другом состоянии. Это выражает саму суть «цифровой» природы компьютерных операций. Эта дискретность, в конечном счете, достигается за счет квантовой механики. (Мы можем вспомнить здесь квантовую дискретность энергетических состояний, спектральных частот, значений спина и т.д., см. главу 6.) Даже старые механические вычислительные машины зависели от прочности различных своих частей, каковая, в свою очередь, непосредственно вытекает из дискретности квантовой теории.⁸²

Но квантовая дискретность не является только следствием операции U. Пожалуй, уравнение Шрёдингера в еще меньшей степени способно предотвратить нежелательное расплывание фазового объема и «потерю точности», чем уравнения классической физики! Согласно U, волновая функция изолированной частицы, изначально локализованная в пространстве, будет всё больше и больше расплываться с течением времени (с. 82 [МОИ № 15](#)). Если бы не действие R время от времени, более сложные системы тоже были бы подвержены такой беспричинной делокализации (вспомним кошку Шрёдингера). (Дискретные состояния атома, например, характеризуются определенными значениями энергии, импульса и полного момента импульса. Общее состояние, которое как раз «расплывается», представляет собой суперпозицию таких дискретных состояний. Именно процедура R на некотором этапе заставляет атом на самом деле «быть» в одном из этих дискретных состояний.)

Мне представляется, что ни классическая, ни квантовая механика – если только в последнюю не будут внесены дальнейшие фундаментальные изменения, которые превратили бы R в «реальный» процесс, – никогда не смогут объяснить механизм мышления. Возможно, что даже работа цифровых компьютеров требует более глубокого понимания взаимосвязи действий U и R.⁸³ В случае с компьютерами, мы, по крайней мере, знаем, что цифровые вычисления являются

⁸² Этот комментарий перестает быть правомерным, если мы рассматриваем в качестве «классических» компонентов системы шестеренки, оси и т.п. Я предполагаю, что система состоит из обычных (скажем, точечных или сферических) частиц.

⁸³ В.Э.: Хотя «дискретность» компьютеров действительно обеспечивается той частью внешнего мира, которую изучает квантовая механика, но, тем не менее, мы, программисты, абсолютно не интересу-

алгоритмическими (по самой конструкции!), и мы не пытаемся «обуздать» предполагаемую неалгоритмичность физических законов. Но я утверждаю, что в случае с мозгом и разумом ситуация совершенно иная. Вполне допустимо, что в процессе (сознательного) мышления участвует некая существенная неалгоритмическая составляющая. В следующей главе я попытаюсь подробно изложить причины, заставляющие меня верить в существование этой составляющей, а также выскажу предположения о том, какими удивительными реальными физическими эффектами обусловлено «сознание», влияющее на работу мозга.

Глава 10. Где находится физика ума?

§10.1. Для чего нужны умы?

В дискуссиях по проблеме «ум–тело» имеются два отдельных пункта, на которых обычно сосредоточивается внимание: «Каким образом материальный объект (мозг) может в действительности пробуждать⁸⁴ сознание?»; и, наоборот: «Каким образом сознание усилием воли может реально воздействовать на (явно физически обусловленное) движение материальных объектов⁸⁵?» Это – пассивный и активный аспекты проблемы «ум–тело». Дело выглядит так, как если бы у нас в «уме» (или, вернее, в «сознании»), существовала некая нематериальная «вещь», которая, с одной стороны, активизируется материальным миром, а с другой – может оказывать на него воздействие.⁸⁶ Я, однако, предпочитаю в своих предварительных замечаниях к этой последней главе обсудить до некоторой степени иной и, возможно, более научный вопрос, который относится к обеим проблемам, как пассивной, так и активной, – в надежде, что наши попытки найти ответ на него смогут приблизить нас к более глубокому пониманию этих извечных фундаментальных загадок философии. Мой вопрос звучит так: «Какое преимущество естественного отбора дает сознание тем, кто действительно им обладает?»

Такой формулировке вопроса присущи некоторые неявные допущения. Прежде всего – это уверенность в том, что сознание – это, на самом деле, «вещь», которую можно научно описать; что эта «вещь» действительно «что-то делает»; и, более того, что это «что-то» приносит пользу существам, которые им обладают, в то время как другие создания, подобные первым во всем, кроме наличия сознания, демонстрируют менее эффективное поведение. С другой стороны, можно полагать, что сознание – это лишь пассивный спутник достаточно совершенной системы управления, и само по себе, в действительности, не «делает» ничего. (Это последнее утверждение является, вероятно, точкой зрения сторонников «сильного» ИИ.)⁸⁷ В качестве альтернативы можно рассмотреть иную концепцию, согласно которой существует некое божественное или таинственное предназначение сознания – быть может, носящее телеологический характер и нам пока не ведомое – так что любое обсуждение этого феномена только лишь в терминах естественного отбора неизбежно уведет нас в сторону от истины. С моей точки зрения, из всех доводов подобного толка, наиболее убедительно и научнообразно здесь выглядел бы так называемый антропный принцип, согласно которому природа нашей вселенной такова, потому

емся квантовыми эффектами, когда создаем свои программы, операционные системы и вычислительные сети. Мы оперируем совсем другими понятиями. И я полагаю, что этих же понятий вполне достаточно, чтобы построить еще одну программную систему – искусственный интеллект.

⁸⁴ В.Э.: А сознание не пробуждается! Если есть определенная работа компьютера – есть и то, что вы называете «сознанием»; нет этой работы компьютера – нет и сознания. Весь вопрос только в том: ЧТО ЭТО за работа?

⁸⁵ В.Э.: Таким образом, что оно само представляет всего лишь «движение материальных объектов».

⁸⁶ В.Э.: Именно такова была позиция марксистского «диалектического материализма», по которому мне в мои студенческие годы приходилось сдавать экзамены. И именно по этому вопросу я спорил с преподавателем. Эта «нематериальная» вещь у них обозначалась словом «идеальное» (а «основной закон философии» гласил, что «материальное первично, а идеальное вторично»). Однако по «лезвию Оккама» нет никакой необходимости вообще постулировать существование этого «идеального».

⁸⁷ В.Э.: Не знаю, отношусь ли я к «сторонникам сильного ИИ» (это зависит от более точного определения такого понятия). Но утверждать, что сознание «не делает ничего» было бы верхом безграмотности. То, что Пенроуз называет «сознанием», у него самого не очень четко определено, но видно, что основной компонент в этом составляет запись мозгом в память «хроники» событий и последующий анализ этих событий (как внешних событий, так и действий самого организма). И польза от такой работы настолько очевидна, что даже и тратить слова на ее объяснение здесь не хочется.

что в ней в обязательном порядке требуется присутствие разумных существ-«наблюдателей» наподобие нас с вами.⁸⁸ (Этот принцип был вкратце упомянут в главе 8, с.43 выше, и я еще вернусь к нему позже.)

Я собираюсь обсудить эти вопросы в должное время, но вначале мы должны заметить, что термин «ум», пожалуй, несколько уводит нас в сторону, когда мы говорим о проблеме «ум-тело». Ведь очень часто говорят о «бессознательном уме» и это указывает на тот факт, что мы не рассматриваем термины «ум» и «сознание» как синонимы. Возможно, когда мы упоминаем о бессознательном уме, перед нами возникает неясный образ «суфлера», который незримо присутствует в каждой сцене, но кто обычно (кроме как, возможно, в снах, галлюцинациях, навязчивых состояниях или фрейдистских обмолвках) не посягает напрямую на контроль над нашим восприятием. Возможно, бессознательный ум в действительности имеет собственную способность осознавать, но в обычном состоянии это осознание пребывает совершенно отдельно от той части ума, которую мы традиционно называем «я».⁸⁹

Это, вообще говоря, не так уж и странно, как это может показаться на первый взгляд. Существуют эксперименты, которые, по-видимому, свидетельствуют о наличии определенного рода «сознания», присутствующего даже у пациента под общим наркозом на операционном столе – в том смысле, что разговоры, которые ведутся во время операции, могут быть впоследствии «неосознанно» восприняты пациентом или же быть «проявлены» позже под гипнозом как действительно «воспринимавшиеся» в прошлом. Более того, ощущения, которые, казалось бы, были вытеснены из сознания гипнотическим внушением, могут позднее быть выявлены во время другого сеанса гипноза как «уже пережитые», но каким-то образом оказавшиеся записанными «на другую дорожку»⁹⁰ (см. Окли, Имз [1985]). Эти результаты мне не вполне ясны, хотя я и не думаю, что было бы правильно приписывать обычную способность осознания бессознательному уму, но у меня нет особого желания пускаться здесь в рассуждения по этим вопросам. Тем не менее, проведение различий между бессознательным и осознающим себя умом – это действительно сложная и тонкая тема, к которой нам еще придется вернуться.

Попытаемся достичь возможно большей ясности в описании того, что мы подразумеваем под «сознанием» и что считаем признаками его проявления. Я не думаю, что было бы умно на данной стадии понимания пытаться предлагать точное определение сознания, но мы можем в достаточной степени полагаться на наши субъективные впечатления и интуитивный здравый смысл относительно того, что этот термин означает,⁹¹ и когда описываемый им феномен проявляет себя. Мне более или менее понятно, когда я нахожусь в сознании, и склонен считать, что и другие люди испытывают при этом нечто подобное. Чтобы находиться в сознании, я должен, как мне кажется, осознавать что-то, может быть, такие ощущения, как боль или тепло, или красочный пейзаж, или звуки музыки; или, возможно, я осознаю такое чувство как изумление, отчаяние или счастье; или я могу осознавать воспоминание о некотором событии в прошлом, или начинаю понимать то, что говорит кто-то другой; или осознавать собственную

⁸⁸ В.Э.: Мне кажется, что Пенроуз и здесь, и в том месте на которое он в скобках ссылается, искажает смысл «антропного принципа». Не в том дело, что «природа нашей вселенной такова, потому что в ней в обязательном порядке требуется присутствие разумных существ», а дело в том, что вселенные могли задаваться (и задаются) с различными «стартовыми параметрами», и при некоторых стартовых параметрах появление жизни и разума возможно, а при других – невозможно, но только в тех вселенных, в которых это возможно, будут находиться существа, рассуждающие об этой возможности. И дело, кажется, здесь не в ошибке перевода, потому что в оригинале это предложение звучит так: «Somewhat preferable, to my way of thinking, would be a rather more scientific version of this sort of argument, namely the ANTHROPIC PRINCIPLE, which asserts that the nature of the universe that we find ourselves in is strongly constrained by the requirement that sentient beings like ourselves must actually be present to observe it.»

⁸⁹ В.Э.: Какой классический пример пути «от слова к объекту»!

⁹⁰ В.Э.: Гипноз вообще представляет собой сдвиг межпрограммных интерфейсов в мозговой операционной системе. (В этой сноске мы не можем разобрать в деталях тот программный механизм, как это происходит; он описан в моих латышских текстах {L-ARTINT§45}). Поэтому нет ничего удивительного, что при таких сдвинутых интерфейсах запись в память тоже происходит «со сдвигом» так, что в нормальном состоянии эту запись невозможно найти. Но раз запись сама по себе физически существует, то существуют и средства, как установить к ней доступ даже из «нормального состояния» человека (не говоря уже о «повторно сдвинутом», т.е. опять под гипнозом).

⁹¹ В.Э.: Продолжается «путь от слова к объекту»! Да надо же делать наоборот: брать сначала «объект», то есть, мозговую операционную систему, а потом смотреть, ЧТО из того, что она делает, мы можем назвать «сознанием».

новую идею; или я могу осознанно намереваться заговорить или предпринять какое-то другое действие, например, встать со стула. Я могу также «отстраниться» и осознавать подобные намерения, или мое ощущение боли, или опыт, запечатленный в памяти, или акт понимания; или я могу даже просто осознавать свое собственное сознание.⁹² Я могу находиться в состоянии сна и всё равно быть до некоторой степени осознающим происходящее, если мне снится сон; или, возможно, когда я начинаю просыпаться, я сознательно воздействую на развитие этого сна. Я готов считать, что сознание – это нечто, имеющее некоторую градацию,⁹³ а не просто что-то, что есть или чего нет. Я считаю слово «сознание» в сущности синонимичным слову «осознание» (хотя, возможно, «осознание» немного пассивнее, чем то, что я понимаю под «сознанием»), в то время как «ум» и «душа» имеют дополнительные оттенки смысла, которые в значительной мере менее отчетливо определены в настоящее время.⁹⁴ У нас будет много хлопот с пониманием того, что такое «сознание» само по себе, поэтому я надеюсь, что читатель меня простит, если я оставлю в покое дальнейшие проблемы, связанные с терминами «ум» и «душа»!

Существует также вопрос о том, что подразумевать под словом интеллект. В конце концов, именно об этом объекте – а не о более расплывчатом понятии «сознания» – предпочитают говорить люди, связанные с ИИ. Алан Тьюринг в своей знаменитой работе (Тьюринг [1950]) (см. главу 1, §1.2) рассматривал непосредственно не столько «сознание», сколько «мышление», а слово «интеллект» даже было вынесено им в заглавие. На мой взгляд, вопрос об интеллекте является вторичным по отношению к вопросу о феномене сознания. Едва ли я поверю в то, что настоящий интеллект мог бы действительно существовать, когда бы его не сопровождало сознание. С другой стороны, если в итоге и вправду окажется, что приверженцы ИИ способны моделировать интеллект без присутствия сознания, тогда было бы совершенно неудовлетворительным определять интеллект, не включая в это понятие такой моделированный интеллект. Но в этом случае «интеллект» как предмет обсуждения оказался бы вне поля моего внимания, поскольку мой интерес связан, в первую очередь, с «сознанием».

Когда я высказываю свое убеждение, что истинный интеллект требует присутствия сознания, я при этом неявно предполагаю (поскольку я не разделяю точку зрения сторонников теории «сильного» ИИ, согласно которой простое применение алгоритма способно пробуждать сознание), что интеллект не может надлежащим образом моделироваться алгоритмическими средствами, то есть путем использования компьютера так, как это делается сегодня. (См. обсуждение «теста Тьюринга» в главе 1.) Очень скоро (см., в частности, обсуждение математического мышления, приведенное тремя разделами ниже, на с. 336) я постараюсь привести самые убедительные доводы в пользу необходимости присутствия существенно неалгоритмической составляющей в работе сознания.

Теперь обратимся к вопросу о том, существует ли четкое различие между одним объектом, который обладает сознанием, – и другим, «эквивалентным» первому во всем, кроме способности сознавать. Всегда ли сознание, присущее некоторому объекту, проявляет свое присутствие? Я предпочитаю думать, что ответить на этот вопрос следует однозначно «да». Однако, эта моя вера едва ли найдет поддержку в научных кругах, если там до сих пор нет согласия даже в вопросе о том, где можно найти сознание в царстве животных. Некоторые вообще не допускают мысли, что им могут обладать какие бы то ни было животные, отличные от людей (а некоторые придерживаются того же мнения и в отношении человеческих существ, живших за 1000 или более лет до н.э.; см. Джейнс [1980]); и в то же время кто-то готов допустить наличие сознания у насекомых, у червей и даже – почему бы нет? – у камней!⁹⁵ Что касается меня, то я склонен сомневаться в том, что червь или насекомое – не говоря уже о камнях – в значительной степени (если вообще) обладают этим качеством; но млекопитающие, в общем и целом, подчас производят на меня впечатление существ, способных на подлинное осознание. Имея столь

⁹² В.Э.: Ну вот – и теперь надо просто разобраться: КАКУЮ работу должна выполнять мозговая операционная система, чтобы всё перечисленное происходило.

⁹³ В.Э.: Работа-то разнообразная; всегда можно вводить различные «градации» в зависимости от того, что выполняется, а что не выполняется.

⁹⁴ В.Э.: В оригинале: «I take the word 'consciousness' to be essentially synonymous with 'awareness' (although perhaps 'awareness' is just a little more passive than what I mean by 'consciousness'), whereas 'mind' and 'soul' have further connotations which are a good deal LESS clearly definable at present.»

⁹⁵ В.Э.: Целыми толпами шагают по пути «от слова к объекту»! (Да разберитесь сначала, что именно происходит в головах у человека, животных, насекомых и камней, а потом определите, что из всего этого вы будете именовать «сознанием», а что нет!).

диаметрально противоположные точки зрения, приходится констатировать, что на сегодняшний день общепринятый критерий проявления сознания отсутствует. Правда, вполне возможно, что есть всё же критерий сознательного поведения, хотя он и не заслужил всеобщего признания. Но не вызывает сомнений, что в любом случае только активная роль сознания могла бы иметь принципиальное значение, поскольку невозможно представить себе, чтобы простое наличие способности осознать, без активного дополнения к ней, может быть непосредственно зафиксировано. Подтверждением этому факту послужили ужасные случаи применения в 40-е годы лекарства на основе яда кураре в качестве «анестезирующего» средства при операциях, проводимых на маленьких детях, – тогда как действительный эффект этого средства заключается в парализации воздействия двигательных нервов на мускулы, из-за чего агония,⁹⁶ которую в буквальном смысле испытывали несчастные дети, оставалась на протяжении операции незаметной для хирурга (см. Деннетт [1978], с. 209).

Вернемся к той гипотетической активной роли, которую может иметь сознание. Верно ли, что сознание может играть – а часто и играет – активную операционально различимую роль? Я полагаю, что это должно быть так, и постараюсь сейчас обосновать свою убежденность несколькими независимыми доводами. Во-первых, благодаря нашему «здравому смыслу» мы часто ощущаем, что мы непосредственно воспринимаем, что другой человек находится в сознании. Такое впечатление вряд ли может быть ошибочным.⁹⁷ В то время как человек, который находится в сознании, может (подобно детям под действием кураре) и не подавать соответствующих признаков – находящийся в бессознательном состоянии едва ли будет выглядеть как человек, обладающий сознанием! Следовательно, должен существовать некий тип поведения, который можно было бы назвать характерным для человека, пребывающего в сознании (хотя даже и не всегда подтверждаемый самим сознанием), который мы бы воспринимали именно так благодаря нашим «интуитивным представлениям».

Во-вторых, примем во внимание безжалостный процесс естественного отбора. Будем рассматривать этот процесс в свете того факта, что, как мы видели в предыдущей главе, не вся активность мозга непосредственно доступна сознанию. И действительно, более «древний» мозжечок – обладающий значительным (по сравнению с остальными частями головного мозга) превосходством в плотности нейронов – производит, по-видимому, весьма сложные действия безо всякого вмешательства со стороны сознания. Однако, природа избрала для эволюционного развития таких сознающих себя и окружающий мир существ, как мы, вместо того, чтобы удовлетвориться созданиями, которые вполне могли бы существовать при помощи абсолютно бессознательных механизмов управления. Если сознание не служит целям селекции, то зачем природа занялась созданием «сознательных» разновидностей мозга, тогда как не наделенные сознанием «мозги-автоматы», наподобие мозжечка, могли бы функционировать не менее успешно⁹⁸?

Более того, существует простая «основополагающая» причина для предположения о том, что сознание должно иметь какое-то активное влияние, даже если его результат не является преимуществом при естественном отборе. Ибо почему еще мы (или существа, нам подобные) можем иной раз мучиться при попытке ответить на вопрос – особенно, если изучается эта тема – «о самих себе». (Мне так и хочется сказать: «Почему вы читаете эту главу?») или «Почему у меня было сильное желание написать книгу именно на эту тему?») Трудно себе представить, чтобы полностью лишенный сознания автомат стал бы тратить время на подобные вещи. А поскольку обладающие сознанием существа, с другой стороны, время от времени поступают как раз таким вот смешным образом, то их поведение отличается от поведения остальных – откуда следует, что сознание все-таки производит определенное активное воздействие! Разумеется, не составит труда специально запрограммировать компьютер так, чтобы он вел себя столь же нелепым образом

⁹⁶ В.Э.: Опять «ложный друг переводчика»! Должно быть просто «страдания».

⁹⁷ По крайней мере, при наличии современных компьютерных технологий (см. обсуждение теста Тьюринга в главе 1).

⁹⁸ В.Э.: Разумеется, они могли бы функционировать «не менее успешно», но при одном условии – что программы, выполняемые ими, уже готовы. Но откуда взять эти программы? У Естественного отбора (т.е. у Природы) нет другого средства получения новых программ, кроме САМОпрограммирования. А для самопрограммирования как раз и необходимо в первую очередь следующее: 1) запоминать обстоятельства и ход выполнения программы; 2) проанализировать результаты этого выполнения; 3) учесть обнаруженные анализом удачи и неудачи при составлении следующих программ. А ЭТО как раз и есть самое центральное из того, что Пенроуз называет «сознанием».

(например, он мог бы в согласии с заложенным в него алгоритмом постоянно повторять на ходу: «О Господи, ну в чем же смысл жизни? Почему я здесь нахожусь? Что такое, черт побери, это “Я”, которым я себя ощущаю?»). Но почему же естественный отбор позаботился о создании благоприятных условий именно для такой расы индивидов, когда жестокий закон джунглей наверняка давно бы выдрал с корнем подобную бесполезную ерунду!⁹⁹

Мне кажется очевидным, что все эти размышления и бормотание, которым мы (временно становясь философами) предаемся, не могли быть самоценными для процесса естественного отбора, а являются просто необходимым с его (естественного отбора) точки зрения «багажом», который должны нести существа, обладающие подлинным сознанием – при том, что само оно возникло в ходе естественного отбора по совершенно другой и, вероятно, очень серьезной причине. Этот багаж не слишком обременителен, и легко (хотя, быть может, и неохотно) переносится, скорее всего, именно непреклонными силами естественного отбора. В тех случаях, когда на земле царят мир и процветание, которыми человеческий род время от времени имеет счастье наслаждаться (ибо нам не всегда приходится бороться со стихиями (или нашими соседями) за выживание) – тогда, возможно, сокровища, содержащиеся в нашем багаже, становятся предметом удивления и любопытства. Именно в такие моменты, глядя на окружающих тебя философствующих людей, всерьез убеждаешься в том, что они, как и ты, тоже обладают умом.

§10.2. Что в действительности делает сознание?

Давайте согласимся с тем, что наличие у данного существа сознания является его реальным преимуществом в ходе естественного отбора. В чем конкретно может заключаться это преимущество? Я знаком с одной точкой зрения, согласно которой способность осознавать происходящее может оказаться полезной хищнику в его попытке предугадать, что его жертва будет делать в следующий момент, с помощью мысленной «постановки себя на место» этой жертвы. Воображая себя своей жертвой, он мог бы увеличить шансы удачного исхода охоты.

Вполне может быть, что эта идея отчасти верна, но кое-что в ней меня смущает. Во-первых, здесь предполагается наличие некоторого сознания у самой жертвы, так как вряд ли имело бы смысл представлять себя автоматом, поскольку автомат – по определению, не обладающий сознанием – ни в коем случае не есть то, чем можно «быть»! В любом случае, я мог бы с таким же успехом представить себе, что совершенно не обладающий сознанием автомат-хищник имеет внутри в качестве подпрограммы последовательность действий, которая в точности соответствовала бы действиям автомата-жертвы. Мне вообще не кажется, что необходимость вводить сознание в отношения типа «хищник–жертва» может быть логически обоснована.

Разумеется, трудно понять, как случайные процессы естественного отбора могли быть достаточно умными, чтобы дать автомату-хищнику полную копию программы жертвы. Это бы выглядело скорее как шпионаж, а не как естественный отбор! А частичная программа (в смысле отрезка «ленты» машины Тьюринга или чего-то подобного такой ленте) вряд ли была бы достаточно полезна хищнику с точки зрения естественного отбора. Ему был бы необходим какой-нибудь завершенный фрагмент этой ленты, а лучше (хотя и менее вероятно) – вся лента целиком. Следовательно (и как некая альтернатива этому), частичная правда могла бы заключаться в том, что модель поведения «хищник–жертва» подразумевает всё же

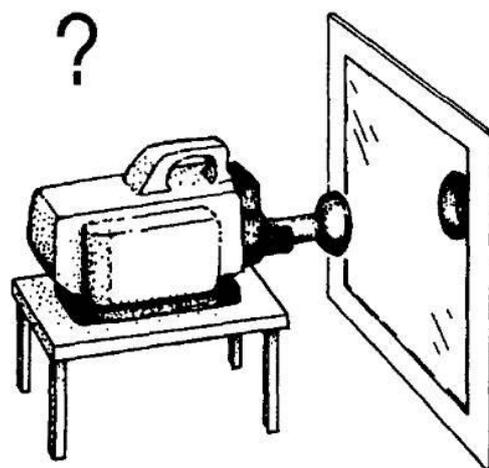


Рис. 10.1. Видеокамера, направленная на зеркало, строит модель себя внутри самой себя. Становится ли она от этого самосознающей?

⁹⁹ **В.Э.:** Однако, как известно, именно ЭТА раса субъектов оказалась на самой верхушке «пищевой цепочки» на планете Земля. А почему? Да потому, что именно подобные «бесполезные поиски» и создают мозговые программы самого высокого качества, какие только удалось сотворить Естественному отбору на этой планете.

наличие не компьютерной программы, но определенного элемента сознания.¹⁰⁰ Однако, это, по моему, уже не относится к настоящему вопросу о различии между сознательным и «запрограммированным» действиями.

Суть идеи, о которой шла речь выше, по-видимому, напрямую связана с широко распространенной точкой зрения, согласно которой считается, что система может «осознавать» нечто, если в ней уже имеется модель этого объекта, и, соответственно, что она становится «самосознающей», когда она в самой себе содержит модель самой себя. Но если компьютерная программа содержит (скажем, в качестве подпрограммы) текст другой компьютерной программы, то первая при этом не может осознавать вторую, также как и не может приводить к самосознанию обращение программы к себе самой. Несмотря на подобные часто встречающиеся заявления, фундаментальные понятия самосознания и способности к осознанию в этих рассуждениях едва ли затрагиваются. Видеокамера не осознает сцены, которые она снимает; как не обладает самосознанием и видеокамера, направленная на зеркало (рис. 10.1).

Я хочу пойти в другом направлении. Как мы уже знаем, не вся деятельность нашего мозга сопровождается работой сознания (в особенности это относится к действиям, которые управляют мозжечком). А какая часть из того, что мы можем делать, осознанно, не может быть сделана бессознательно? Проблема становится еще менее ясной из-за того, что всё, для чего нам изначально требуется сознание, похоже, может быть со временем заучено и впоследствии выполняться уже автоматически (возможно, именно мозжечком). Кажется, что сознание требуется, чтобы справляться с ситуациями, где нам приходится высказывать новые суждения, и где правила не были заданы заранее.¹⁰¹ Трудно достичь большой точности при проведении различий между теми видами умственной деятельности, которые, по-видимому, требуют подключения сознания, и теми, которые нет. Сторонники «сильного» ИИ (да и многие другие) будут настаивать на том, что «формирование новых суждений» – это не более, чем повторное применение ряда точно сформулированных алгоритмических правил – только теперь на некоем полумистическом «высоком уровне», так, что их действия нами при этом не осознаются. Однако, как мне кажется, даже в нашем обиходном лексиконе есть такие термины – используемые нами в повседневной жизни для разделения умственной деятельности на осознанную и бессознательную – которые уже сами по себе могут по меньшей мере навести на мысль о различиях между действиями неалгоритмической и алгоритмической природы:

<u>Сознание требуется</u>	<u>Сознание не требуется</u>
«здравый смысл»	«автоматический»
«суждение об истинности»	«бездумное следование правилам»
«понимание»	«запрограммированный»
«художественная оценка»	«алгоритмический»

Возможно, эти различия не всегда достаточно четко очерчены хотя бы потому, что в наши сознательные суждения входит немало неосознанных факторов: опыт, интуиция, предрассудки, даже наше привычное использование логики. Но я утверждаю, что сами по себе суждения – это проявления работы сознания. Поэтому я полагаю, что, тогда как бессознательные действия мозга происходят в соответствии с алгоритмическими процессами, действие сознания имеет совершенно иную природу, и потому не может быть описано никаким алгоритмом.¹⁰²

Есть некая ирония в том, что многое из того, что я излагаю здесь, является полной противоположностью по отношению к некоторым другим точкам зрения, которые мне приходится довольно часто слышать. Например, утверждают, что именно сознательный ум «рационален» и доступен пониманию; тогда как бессознательные действия нередко загадочны и труднообъяснимы. Те, кто работает с искусственным интеллектом, часто считают, что как только

¹⁰⁰ В.Э.: Самопрограммирования, друг мой, самопрограммирования! И у хищника, и у жертвы...

¹⁰¹ В.Э.: То есть – при самопрограммировании.

¹⁰² В.Э.: Когда Пенроуз говорит такое, то он, видимо, представляет «алгоритм» как нечто готовое и данное человеку при рождении. И далее он отождествляет «компьютер» с устройством, выполняющим такой вот готовый алгоритм. И в результате получается, что мозг не может быть компьютером, а сознание «не может быть описано никаким алгоритмом»... Но это упрощенный взгляд на вещи. На самом деле один алгоритм может генерировать другой алгоритм (которого не было при рождении человека), и всё это может осуществлять компьютер, в том числе – мозг. Это и называется самопрограммированием, а пенроузовское «сознание» есть не что иное, как центральное звено этого самопрограммирования.

мы сможем понять ход осознанной мысли, то можно сразу же будет придумать соответствующий алгоритм для его компьютерной реализации; а вот таинственные бессознательные процессы нашему пониманию (пока!) не доступны.¹⁰³ В моем представлении эти процессы вполне могут быть алгоритмическими, но при этом настолько сложными, что их детальный анализ практически невозможен.¹⁰⁴ Четко осознаваемый ход мысли, который может быть разумно объяснен как нечто полностью логичное, в свою очередь может быть (зачастую) переведен на язык алгоритмов – но на совершенно ином уровне. Мы сейчас говорим не о внутренних процессах (возбуждении нейронов и т.п.), а о манипулировании законченными мыслями. Иногда оно носит алгоритмический характер (как в случае традиционной логики: древнегреческих силлогизмов, формализованных Аристотелем; или символической логики, разработанной математиком Джорджем Булем; см. Гарднер [1958]); а иногда – неалгоритмический (как в случае с теоремой Гёделя или некоторыми примерами, приведенными в главе 4). А как реализовать на компьютере формирование суждений, которое я рассматриваю как критерий наличия сознания, – об этом разработчики ИИ не имеют даже ни малейшего представления!¹⁰⁵

Иногда мне возражают, что, поскольку критерии для этих суждений не являются в конце концов осознанными, то как я могу приписывать такие суждения сознанию? Однако, тем самым мои оппоненты упускают самую суть тех идей, которые я пытаюсь выразить. Ведь я не требую, чтобы мы осознавали, как мы формируем наши сознательные впечатления и суждения. Это привело бы к смешению тех уровней, о которых я только что упоминал. Истинные основания наших осознанных впечатлений наверняка будут недоступны сознанию. Они должны были бы рассматриваться на более глубоком (материальном) уровне по сравнению с первопричинами наших явных мыслей, которые мы непосредственно осознаем. (Ниже я осмелюсь предложить на рассмотрение одну интересную гипотезу на этот счет!) Собственно сознательные впечатления и являются (неалгоритмическими) суждениями.

Эта тема, затрагивающая вопрос о возможной неалгоритмической составляющей механизма нашего осознанного мышления, проходила красной нитью и через все предыдущие главы. В частности, заключительная часть дискуссии в главе 4, особенно касающаяся теоремы Гёделя, подводила к мысли о том, что (по крайней мере, в математике) сознательное «вглядывание» иной раз позволяет нам устанавливать справедливость утверждения способом, недоступным для алгоритма.¹⁰⁶ (Подробнее я остановлюсь на этом доводе чуть позже.) Конечно же, сами по себе алгоритмы не способны находить истину! Построить алгоритм, генерирующий только ложные суждения, столь же просто, как и алгоритм, результатом работы которого были бы одни только истины. Для определения пригодности или непригодности того или иного алгоритма нам совершенно необходимо своего рода вдохновение, интуитивное прозрение,¹⁰⁷ приходящее извне (далее я еще вернусь к этому вопросу). И я утверждаю, что именно эта способность провидения (или «интуитивного постижения») глубокого различия между истиной и ложью (равно как и между красотой и уродством!) является признаком наличия сознания.

Я, однако, должен сразу же оговориться, что ни в коем случае не имею здесь в виду какое-то мистическое «ясновидение». Сознание абсолютно бесполезно при попытке угадать счастливые числа в (честно проводимой) лотерее! Я имею в виду суждения, которые постоянно формируются человеком в сознательном состоянии, когда собираются воедино и сопоставляются все относящиеся к предмету размышлений факты, данные чувственного опыта, воспоминания – а в иную минуту вдохновения даже рождаются мудрые мысли. В принципе, мы располагаем

¹⁰³ В.Э.: И то, и другое – просто работа программ; никакой принципиальной границы между «сознательным» и «бессознательным» нет; что регистрируется в памяти и впоследствии анализируется, то «сознательно», а что не регистрируется, то «бессознательно», а в разных условиях в поле зрения «хроникера» попадает разное. Одна и та же работа мозговой программы может быть при одних условиях «сознательной», при других – «бессознательной».

¹⁰⁴ В.Э.: Смотря, как анализировать. Если вы хотите разобраться с точностью «до последнего битика», то это действительно сложно. Но опытный программист так никогда не поступает. Он начинает свой анализ «сверху»: что принципиально делает вот эта программа, или подпрограмма, или блок? И когда понятно на таком общем уровне, тогда можно (если есть необходимость) опускаться ко всё более и более мелким деталям. И тогда никакая «сложность» не преграда. Мы просто не опускаемся до последних деталей, хотя общий смысл происходящего нам давно ясен.

¹⁰⁵ В.Э.: Американские и британские, может быть, и не имеют, но уж я-то имею! Будьте уверены.

¹⁰⁶ В.Э.: Недоступным для одного алгоритма, но доступным для другого.

¹⁰⁷ В.Э.: то есть – другой алгоритм; об «интуиции» см. {с.88 [МОИ № 14](#)}.

достаточным количеством информации для того, чтобы вынести соответствующее суждение – но процесс его осмысленного формирования путем выделения необходимой информации из трясины фактов может просто не иметь точного выражения на языке алгоритмов (или же подобное выражение существует, но может оказаться при этом бесполезным практически). Возможно, мы находимся в ситуации, что когда суждение уже сделано, некоторый алгоритмический процесс (или просто более простое суждение) проверяет его справедливость, но не его изначальное формирование.¹⁰⁸ В такой ситуации, как мне кажется, сознание «нашло бы себя» в роли создателя подходящих суждений.

Почему я утверждаю, что неалгоритмическое построение суждений является критерием наличия сознания? Отчасти я опираюсь здесь на свой опыт ученого-математика. Я просто не доверяю своим механическим действиям, если они не были сперва придирчиво исследованы сознанием. Часто сам по себе алгоритм, использующийся при определенных вычислениях, не вызывает сомнения – но тот ли алгоритм используется для решения данной конкретной задачи? Рассмотрим простой пример: если вас заставят вы зубрить алгоритмы перемножения двух чисел и деления одного числа на другое (или даже разрешат использовать запрограммированный карманный калькулятор) – гарантирует ли это, что вы сможете определить в каждом конкретном случае, какое из этих действий приведет к решению поставленной перед вами задачи? Для этого нужно думать и строить осознанное суждение.¹⁰⁹ (Вскоре мы увидим, почему такие суждения должны быть, по крайней мере иногда, неалгоритмическими!) Разумеется, коль скоро вы решите большое количество однотипных задач, выбор между умножением и делением станет настолько привычным, что будет выполняться совершенно автоматически – не исключено, что при участии одного лишь мозжечка. На этой стадии осознанное восприятие происходящего не является больше необходимым, поэтому можно спокойно позволить своему сознанию занять ум иными проблемами или просто «отпустить его в свободное плавание» – разве что время от времени проверяя ход выполнения алгоритма.

То же самое постоянно происходит на всех уровнях математического мышления. Люди часто стремятся найти адекватные алгоритмы, когда занимаются математикой, но само это стремление отнюдь не кажется алгоритмической процедурой. Как только подходящий алгоритм найден, задача, в некотором смысле, уже решена. Более того, определение с точки зрения математики степени точности или пригодности алгоритма требует значительных усилий со стороны сознания. Нечто подобное имело место при обсуждении формальных систем для математики, которые были описаны в главе 4. Если начать с формулировки нескольких аксиом, то затем из них можно вывести различные математические утверждения. Не исключено, что последняя операция может оказаться алгоритмической, но всё же изначально математик должен осознанно решить вопрос об адекватности этих аксиом. Почему это решение с необходимостью будет не-алгоритмическим, должно стать ясным из рассуждений, идущих непосредственно после следующего параграфа. Но прежде, чем мы перейдем к этому вопросу, давайте посмотрим, какая

¹⁰⁸ В.Э.: «Изначальное формирование» чего-то нового, ранее не бывшего, представляет определенную проблему для алгоритмов и тем самым для компьютеров вообще. Каждый сколь-нибудь опытный программист сталкивался, например, с проблемой генерации «случайных чисел» в компьютере (множественно и подробно описанной в литературе). Существует только один способ, как компьютер (и вообще детерминированное устройство) может создавать нечто новое: это брать кусочки старого и случайным образом комбинировать их, а из этого случайного «калейдоскопа» отбирать то, что полезно. Так на протяжении миллиардов лет работает сам Естественный отбор (или Природа): случайным образом (при мутациях и при перемешивании хромосом в момент оплодотворения) комбинирует гены и отбирает полезные комбинации. И точно так же работает и наш мозг при «творчестве» нового: случайным образом по-всякому комбинирует уже существующие элементы и потом смотрит, что получилось. По этому принципу работают все мозговые генераторы – для самопрограммирования, для поиска решений, для всех целей. Сновидения – самые наглядные проявления работы такого генератора. (Этот генератор – в Веданской теории он называется «сомниатором» – так этот генератор, разумеется, предназначен Природой отнюдь не для работы во время сна: основная его работа происходит во время бодрствования, да только тогда хроникер, как правило, занят другими, «более важными» процессорами мозга и почти никогда не обращает свой «пржектор» на сомниатор. А вот во время сна, когда большинство других процессоров мозга выключены, а сомниатор и хроникер оказываются единственными или почти единственными работающими, – тогда продукция этого генератора случайных комбинаций попадает в память и тем самым «осознается»). (Таково объяснение сновидений по Веданской теории)).

¹⁰⁹ В.Э.: То есть – применять множество других алгоритмов.

теория возникновения мозга и принципов его деятельности является на сегодняшний день наиболее популярной.

§10.3. Естественный отбор алгоритмов?

Если предположить, что умственная деятельность человека – как осознанная, так и нет – это всего лишь выполнение очень сложного алгоритма, то сразу же возникает вопрос: а как, собственно, мог возникнуть такой в высшей степени эффективный алгоритм. Стандартным ответом здесь, разумеется, будет «естественный отбор». Как только стали появляться существа, наделенные мозгом, между ними возникла конкуренция, в которой побеждали (т.е. выживали и производили более многочисленное потомство) те, чей алгоритм оказывался эффективнее. Их потомки тоже имели, как правило, более эффективные алгоритмы поведения, чем их родственники, коль скоро им посчастливилось унаследовать составляющие этих «продвинутых» алгоритмов от своих родителей; так постепенно алгоритмы улучшались – не обязательно стабильно, поскольку могли случаться и значительные колебания в их эволюции – пока не было достигнуто то поразительное совершенство, которое (по всей видимости) можно обнаружить в мозге современного человека¹¹⁰ (см. Доукинс [1986]).

Даже если судить сообразно моей точке зрения, некоторая доля истины в этой картине должна быть, поскольку, как мне представляется, большая часть работы мозга действительно носит алгоритмический характер, и к тому же – как читатель наверняка догадался из предыдущих рассуждений – я являюсь убежденным сторонником (теории) естественного отбора. Но я не понимаю, как естественный отбор сам по себе мог дать рождение алгоритмам, которые позволяли бы делать осознанные выводы касательно правомерности применения всех прочих алгоритмов, которыми мы должны, по идее, пользоваться.¹¹¹

Представьте себе обычную компьютерную программу. Как она появилась на свет? Ясно, что никак не за счет (непосредственно) естественного отбора! Чтобы это произошло, какой-нибудь программист должен был бы разработать ее и убедиться, что она корректно выполняет те действия, для которых она предназначена. (В действительности большинство сложных компьютерных программ содержат ошибки – как правило, незначительные и малозаметные, которые выявляются только в достаточно редких случаях при необычных стечениях обстоятельств. Наличие таких ошибок не влияет существенно на мои рассуждения.) Иногда компьютерная программа может быть «написана» другой компьютерной программой-«мастером», но тогда та, в свою очередь, с необходимостью должна быть создана человеческим гением; то же самое относится и к тем программам, в состав которых могут входить фрагменты кодов, написанных другими компьютерными программами. Но в любом случае, задача обоснования использования конкретного алгоритма и разработка общей концепции программы «ложится на плечи» (по крайней мере) одного человеческого сознания.¹¹²

Можно представить себе, конечно, что всё могло бы происходить совсем не так, и что по прошествии достаточного количества времени компьютерная программа могла бы самостоятельно эволюционировать в процессе некоего естественного отбора. Если верить, что действия, производимые в сознании программистов, сами являются всего лишь алгоритмами, то надо с необходимостью согласиться с тем, что таким же образом развились и алгоритмы. Но меня здесь беспокоит то, что принятие решения о правомерности использования алгоритма отнюдь не является алгоритмическим процессом.¹¹³ Кое-что об этом уже было сказано в главе 2. (Будет или нет машина Тьюринга на самом деле останавливаться – вопрос, который не может быть решен

¹¹⁰ В.Э.: Ну, в общих чертах так – но только в очень общих. Здесь нужно подчеркивать не столько «естественный отбор алгоритмов», сколько развитие способности к самопрограммированию, т.е. к генерации новых и новых алгоритмов. Вообще, чтобы корректно рассуждать на эту тему, нужно сначала точно договориться, где кончается один алгоритм, и где начинается другой.

¹¹¹ В.Э.: А тут шел даже двойной «естественный отбор». Во-первых, тот, дарвинский, который развивал в мозгах наших предков способность к самопрограммированию, т.е. к генерации всевозможных новых алгоритмов. И, во-вторых, тот, который включился уже после нашего рождения: каждый из нас с младенчества генерировал всевозможные алгоритмы самых различных действий и на протяжении всей жизни (методом «проб и ошибок») отбирал наиболее подходящие.

¹¹² В.Э.: Да – когда не включено самопрограммирование. А концепция самопрограммирования, понимание его, как я уже писал {с.12 [МОИ № 17](#)}, как раз и есть тот ингредиент, которого недостает как Пенроузу, так и (видимо) его противникам.

¹¹³ В.Э.: Является. Так что беспокойство излишнее.

алгоритмическим путем.) Чтобы решить, будет ли алгоритм действительно работать, нужно глубокое понимание, а не просто еще один алгоритм.¹¹⁴

Тем не менее, можно было бы представить себе, что существует определенный процесс естественного отбора, который способен создавать довольно эффективные алгоритмы. Лично мне, однако, очень трудно в это поверить. Любой процесс отбора такого рода мог бы оказывать воздействие только на результаты выполнения алгоритмов,¹¹⁵ а не на лежащие в основе этих алгоритмов идеи. И это не только совершенно неэффективно – я думаю, что это не принесло бы вообще никакого результата.¹¹⁶ Во-первых, нелегко определить, глядя на итог работы алгоритма, что он из себя на самом деле представляет. (Нетрудно сконструировать две простые, но совершенно различные процедуры для машины Тьюринга, выходные ленты которых совпадали бы, скажем, до 2^{65536} -й позиции – и тогда их различие не было бы замечено даже за всю историю вселенной!)¹¹⁷ Более того, малейшая «мутация» алгоритма (например, небольшое изменение в описании машины Тьюринга или в ее выходной ленте) сделала бы ее полностью бесполезной¹¹⁸; поэтому трудно понять, как настоящие усовершенствования алгоритмов могут получаться таким вот случайным образом. (Даже обдуманные усовершенствования труднореализуемы, когда неизвестен их точный «смысл». Так традиционно получается в тех нередко возникающих ситуациях, когда необходимо внести изменения или исправления в сложную и небрежно задокументированную программу, чей автор находится вне пределов досягаемости или давно умер. Тогда вместо того, чтобы пытаться разобраться в хитросплетениях разнообразных промежуточных значений и неявных подзадач, на которых базируется эта программа, иной раз бывает проще стереть всё и начать заново!)¹¹⁹

Предположим, что мог бы быть разработан гораздо более «здоровый» метод определения алгоритмов, в отношении которого вышеприведенная критика становилась бы беспочвенной. В некотором роде, это как раз то, о чем я и говорю. «Здоровые» определения – это идеи, на которых базируется алгоритм. Но идеям, насколько нам известно, для своего выражения требуется разум, наделенный сознанием. А значит, мы вновь возвращаемся к проблеме определения сознания и тех его свойств, которые отличают обладающих сознанием существ от остального мира – и к вопросу о том, как, черт побери, естественный отбор мог оказаться достаточно «умным», чтобы развивать такие замечательные свойства.

Результаты естественного отбора и в самом деле удивительны. Те скромные познания о функционировании человеческого мозга – и, разумеется, мозга любых других существ – которыми я обладаю, просто ошеломляют меня, заставляя испытывать благоговейный трепет.

¹¹⁴ **В.Э.:** Это «глубокое понимание» представляет собой работу (обычно многочисленных и разнообразных) алгоритмов, со всех сторон оценивающих исследуемый алгоритм и в конце концов выносящих о нем свое решение.

¹¹⁵ Здесь можно упомянуть еще один непростой вопрос относительно того, могут ли два алгоритма рассматриваться как эквивалентные друг другу, если результаты их действий – но не сами вычисления! – являются тождественными. См. главу 2, с. 72 **МОИ № 14**.

¹¹⁶ **В.Э.:** Выше я уже показал, как это происходит – двойной отбор! Сначала Дарвинский отбор развивает общую способность биологического вида к генерации новых алгоритмов, а потом каждый индивид самостоятельно из сгенерированных им алгоритмов отбирает подходящие методом проб и ошибок (а также, конечно, часть новых алгоритмов получает путем обучения в школах).

¹¹⁷ **В.Э.:** Ну и что? При чем тут это? Разумеется, алгоритмы варьируют.

¹¹⁸ **В.Э.:** Э-э, нет! Во-первых, даже в компьютерной программе (.exe модуле или его эквиваленте на диске) изменение одного байта (например, запись вирусом туда произвольной комбинации восьми битов) не обязательно приведет к полной непригодности программы. Этот байт может оказаться просто в «пустом поле», куда программа сама записывает информацию; это может оказаться буквой какого-то сообщения, и в результате только чуточку исказится текст на экране; этот байт может оказаться частью подпрограммы, которая используется только в чрезвычайно редких ситуациях... Это относится к программам, которые не содержат дублирующих элементов (как современные компьютерные). А в природе не так: все программы природных компьютеров имеют многократное дублирование – уж не знаю: стократное, тысячекратное? Там изменение одного «байта» вообще ни на что не влияет – и это во-вторых. А в-третьих, Природе вовсе не надо передавать «точную программу» от поколения к поколению (как это представляет Пенроуз). В генах кодируется лишь способность к генерации программ, а собственно генерацию и накопление отобранных и признанных пригодными алгоритмов каждый индивид осуществляет сам в течение всей своей жизни, но особенно в младенчестве и в детстве.

¹¹⁹ **В.Э.:** За мою программистскую жизнь мне много раз поручали вносить изменения в чужие программы. Но я ни разу не выполнил такие задачи. Даже не пытаюсь в ней разобраться, я всегда в первую очередь выбрасывал программу своего предшественника в мусорник и вместо нее писал свою.

Работа отдельного нейрона поразительна, но все вместе нейроны представляют еще более впечатляющую структуру, с самого момента рождения насчитывающую огромное множество соединений и связей, которые в дальнейшем позволяют ей решать практически любые задачи. Замечательно не только само сознание, но и всё то, что связано с обеспечением его деятельности!¹²⁰

Если бы однажды нам довелось обнаружить то свойство, которое позволяет физическому объекту обретать сознание, то, изучив его во всех деталях, мы, вероятно, могли бы сконструировать подобные объекты для собственных нужд – хотя они не обязательно расценивались бы как «машины», в современном понимании этого слова. Нетрудно предположить, что такие объекты могли бы многократно нас превосходить, ибо они были разработаны специально для этой задачи – т.е. для обретения сознания. Им бы не пришлось вырастать из одной клетки. Им бы не пришлось нести на себе «багаж» предков (старые и «бесполезные» части мозга или тела, которые продолжают существовать в нас только благодаря «несчастьям», приключившимся с нашими далекими предками). Можно также представить себе, что благодаря этим преимуществам, такие объекты могли бы по-настоящему заменять собой людей там, где (по мнению тех, кто согласен со мной) алгоритмические компьютеры обречены на выполнение обслуживающих функций.

Но вполне возможно, что тема сознания имеет гораздо больше аспектов. Может быть и так, что каким-то образом наше сознание действительно зависит от нашего наследия и от миллионов лет эволюции, лежащих у нас за спиной. Меня не покидает ощущение, что в самой эволюции, в ее явном «нащупывании» пути к какой-то будущей цели есть что-то загадочное и непостижимое. Кажется, что всё организовано несколько лучше, чем оно «должно было быть» на основе слепой эволюции и естественного отбора. Вполне возможно, однако, что внешние проявления здесь обманчивы. Возможно, это как-то связано с тем способом, каким действуют физические законы, что позволяет естественному отбору протекать гораздо эффективнее, чем в случае, если бы этот процесс управлялся произвольными законами. Возникающее в результате явно «интеллектуальное нащупывание» – это отдельная интересная тема, к которой я вернусь несколько позже.

§10.4. Неалгоритмическая природа математической интуиции

Как я уже указывал ранее, моя уверенность в том, что сознание способно влиять на характер суждений об истинности неалгоритмическим путем, опирается главным образом на результаты теоремы Гёделя.¹²¹ Если мы видим,¹²² что сознание действует неалгоритмически при формулировании математических суждений, где вычисления и строгие доказательства являются непременным требованием, то уж наверняка нас нетрудно будет убедить и в том, что эта неалгоритмическая составляющая могла бы являться решающей и для роли сознания при более общих (не связанных с математикой) обстоятельствах.

Вспомним доводы, приведенные в главе 4 {МОИ № 14} в рамках доказательства теоремы Гёделя и устанавливающие ее применимость к решению вопроса о вычислимости. Там было показано, что какой бы (достаточно сложный) алгоритм ни использовал математик для установления математической истины или, что то же самое,¹²³ какую бы формальную систему он¹²⁴ ни принял для задания своего критерия истинности – всегда найдутся математические суждения, подобные сформулированному Гёделем утверждению $P_k(k)$ для системы (см. с. 127 МОИ № 14), на которые его алгоритм не сможет дать ответа. Если ум математика работает полностью алгоритмически, то алгоритм (или формальная система), которые он обычно использует для построения своих суждений, оказываются не в состоянии справиться с

¹²⁰ В.Э.: Если бы мне рассказали, что такое явление, как человеческий мозг, имеет место, я бы не поверил. ☺

¹²¹ В.Э.: А теорема Гёделя неверна. Во всяком случае неверны те интерпретации, которые ей обычно даются, в том числе – Пенроузом.

¹²² В.Э.: Но мы не видим.

¹²³ Как мы видели в главе 4 (с. 136 МОИ № 14), проверка справедливости доказательства в формальной системе всегда имеет алгоритмический характер. И наоборот, любой алгоритм, который позволяет получать математически истинные утверждения, всегда можно добавить в систему аксиом и правил вывода обычной логики («предикатного исчисления»), тем самым создавая новую формальную систему выведения математических истин.

¹²⁴ Разумеется, «он» означает «она или он». См. сноску на с. 20 МОИ № 14.

утверждением $P_k(k)$, полученным с помощью его собственного алгоритма. Тем не менее, мы можем (в принципе) понять, что $P_k(k)$ на самом деле истинно! Этот факт, по всей видимости, должен был бы указать ему на противоречие, поскольку он, как и мы, не может не заметить его. А это, в свою очередь, может свидетельствовать о не-алгоритмическом характере его рассуждений!

В этом заключается суть довода, предложенного Лукасом [1961] в поддержку точки зрения, согласно которой деятельность мозга не может быть полностью алгоритмической, против которого, однако, время от времени выдвигались различные контрдоводы (см., например, Бенасерраф [1967], Гуд [1969], Льюис [1969, 1989], Хофштадтер [1981], Бови [1982]). В связи с этой дискуссией я должен подчеркнуть, что термины «алгоритм» и «алгоритмический» относятся к чему угодно, что может быть (достоверно) смоделировано на компьютере общего назначения. Сюда включается, конечно, как «параллельная обработка», так и «нейросети» (или «машины с переменной структурой связей»), «эвристика», «обучение» (где всегда заранее задается определенный фиксированный шаблон, по которому машина должна обучаться), а также взаимодействие с внешним миром (которое может моделироваться посредством входной ленты машины Тьюринга). Наиболее серьезным из этих контраргументов является следующий: чтобы действительно убедиться в истинности утверждения $P_k(k)$, нам нужно знать, какой именно алгоритм использует математик, и при этом быть уверенным в правомерности его использования в качестве средства достижения математической истины.

Если в голове у математика выполняется очень сложный алгоритм, то у нас не будет возможности узнать, что он из себя представляет, и поэтому мы не сможем сконструировать для него утверждение гёделевского типа, не говоря уже об уверенности в обоснованности его применения.

Такого типа возражения часто выдвигаются против утверждений подобных тому, которое я привел в начале этого раздела, а именно, что теорема Гёделя свидетельствует о неалгоритмическом характере наших математических суждений. Но сам я не нахожу это возражение слишком убедительным. Предположим на мгновение, что способы, которыми математики формируют осознанные суждения о математической истине, действительно являются алгоритмическими. Попробуем, используя теорему Гёделя, доказать абсурдность этого утверждения от противного (*reductio ad absurdum!*).

Прежде всего мы должны рассмотреть возможность того, что разные математики используют неэквивалентные алгоритмы для суждения об истинности того или иного утверждения. Однако – и это одно из наиболее поразительных свойств математики (может быть, почти единственной в этом отношении среди всех прочих наук) – истинность математических утверждений может быть установлена посредством абстрактных рассуждений! Математические рассуждения, которые убеждают одного математика, с необходимостью убедят и другого (при условии, что в них нет ошибок и суть нигде не упущена). Это относится и к утверждениям типа гёделевского. Если первый математик готов согласиться с тем, что все аксиомы и операции некоторой формальной системы всегда приводят только к истинным утверждениям, то он также должен быть готов принять в качестве истинного и соответствующее этой системе гёделевское утверждение. Точно то же самое произойдет и со вторым математиком. Таким образом, рассуждения, устанавливающие математическую истину, являются передаваемыми.¹²⁵

¹²⁵ Некоторых читателей может беспокоить тот факт, что в среде математиков действительно существуют различные точки зрения. Вспомним рассуждения, приведенные в главе 4. Однако имеющиеся разногласия не так важны для нас. Они относятся только к в высшей степени абстрактным вопросам, касающимся очень больших множеств, в то время как мы вполне можем ограничиться утверждениями арифметического характера (с конечным числом кванторов существования и всеобщности) и применить дальнейшие рассуждения. (Возможно, здесь допущено некоторое преувеличение, поскольку принцип рефлексии, относящийся к бесконечным множествам, может иногда использоваться для вывода утверждений в арифметике.) Что касается крайне догматичного и не желающего соглашаться с Гёделем формалиста, для которого такая вещь, как математическая истина, вообще не существует, то я его буду просто-напросто игнорировать, поскольку он явно не обладает способностью интуитивного понимания истины, которой посвящены наши рассуждения! Конечно, математики иногда допускают ошибки. Кажется, сам Тьюринг считал, что именно это и есть «лазейка», которая позволяет обойти аргументы гёделевского типа в пользу того, что человеческое мышление существенно неалгоритмично. Но лично мне кажется невероятным, что свойство людей ошибаться каким-либо образом связано с нашей способностью к прозрениям! (Между прочим, генераторы случайных чисел могут быть успешно реализованы при помощи алгоритмов.)

Отсюда следует, что мы, говоря об алгоритмах, имеем в виду не какие-то неясные разномастные построения, которые, возможно, рождаются и бродят в голове каждого отдельного математика, а одну универсально применяемую формальную систему, которая эквивалентна всем возможным алгоритмам, используемым математиками для суждений о математической истине. Однако мы никак не можем знать, является ли эта гипотетическая «универсальная» система той, которая используется математиками для установления истинности. Ибо в этом случае мы могли бы построить для нее гёделевское утверждение, и знали бы наверняка, что оно математически истинно. Следовательно, мы приходим к заключению, что алгоритм, который математики используют для определения математической истины, настолько сложен или невразумителен, что даже правомерность его применения навсегда останется для нас под вопросом.

Но это бросает вызов самой сущности математики! Основополагающим принципом всего нашего математического наследия и образования является непоколебимая решимость не склоняться перед авторитетом каких-то неясных правил, понять которые мы не надеемся. Мы должны видеть – по крайней мере, в принципе – что каждый этап рассуждений может быть сведен к чему-то простому и очевидному. Математическая истина не есть некая устрашающе сложная догма, обоснованность которой находится вне границ нашего понимания – она строится из подобных простых и очевидных составляющих; и когда они становятся ясны и понятны нам, с их истинностью соглашаются все без исключения.

С моей точки зрения, получить такое явное *reductio ad absurdum* (без применения настоящего математического доказательства) мы даже и мечтать не могли! Основная идея должна быть теперь ясна. Математическая истина – это не то, что мы устанавливаем просто за счет использования алгоритма. Кроме того, я полагаю, что наше сознание – это решающая составляющая в нашем понимании математической истины. Мы должны «видеть» истинность математических рассуждений, чтобы убедиться в их обоснованности. Это «видение» – самая суть сознания. Оно должно присутствовать везде, где мы непосредственно постигаем математическую истину. Когда мы убеждаемся в справедливости теоремы Гёделя, мы не только «видим» ее, но еще и устанавливаем неалгоритмичность природы самого процесса «видения».

§10.5. Вдохновение, озарение и оригинальность

Я должен попытаться как-то прокомментировать те внезапные вспышки озарения, которые мы называем вдохновением. Откуда берутся все эти мысли и образы¹²⁶? Может быть, они появляются из нашего бессознательного – или всё же сознание существенным образом связано с их рождением? Можно привести множество примеров из воспоминаний великих мыслителей, где они прямо указывали на такие события. Как математик, я особенно интересуюсь теми случаями, когда вдохновение посещало именно математиков, но думаю, что между математикой и другими науками и искусством есть много общего. Эта тема великолепно изложена в небольшой работе «Исследования психологии процессов изобретательства в области математики» – классическом труде выдающегося французского математика Жака Адамара – к которой я и отсылаю читателя. В ней он приводит многочисленные примеры озарения в изложении ведущих математиков и не только. Один из наиболее известных случаев связан с Анри Пуанкаре. В начале Пуанкаре описывает свои напряженные сознательные исследования, связанные с построением так называемых «функций Фукса», которые в конце концов явно зашли в тупик. И вот что он пишет далее:

«...Я покинул Кон, где я жил в то время, чтобы принять участие в геологической экспедиции, организованной Горной школой. Впечатления от поездки заставили меня забыть о моей математической работе. Достигнув местечка Кутонс мы сели в омнибус, чтобы добраться на нем до следующего пункта назначения. В тот момент, когда я ставил ногу на подножку, мне пришла в голову идея, которая, казалось, никоим образом не вытекала из моих прошлых раздумий, что преобразования, используемые мной для определения функций Фукса, были идентичны определенным преобразованиям в неевклидовой геометрии. Я не проверил эту идею. У меня просто не было времени, так как когда я занял свое место в омнибусе, я продолжил прерванную беседу – но я был совершенно уверен в правильности моей догадки. Вернувшись в Кон, я выбрал свободное время и, проверив для собственного спокойствия свое предположение, убедился в его справедливости».

¹²⁶ В.Э.: От мозгового рандомгенератора.

Что поражает в этом примере (как и во многих других, приведенных Адамаром) – это внезапность появления столь сложной и глубокой идеи в сознании Пуанкаре, которое в тот момент было занято совершенно другим¹²⁷; и тот факт, что возникновение этой идеи сопровождалось четким ощущением ее истинности, которую полностью подтвердили последующие расчеты.¹²⁸ Тут нужно сразу оговориться, что подобные идеи сами по себе далеко не так просты, чтобы их можно было легко выразить словами. Думаю, что для ясного изложения своих мыслей Пуанкаре потребовалось бы провести примерно часовой семинар для экспертов в этой области. Ясно, что эта идея могла полностью оформиться в сознании Пуанкаре только после долгих часов размышлений, направленных на изучение всех возможных аспектов указанной проблемы. Да, в некотором смысле, идея, осенившая Пуанкаре, когда он сидел в омнибусе, была «единичной» идеей, которую можно было полностью осознать в один момент. Еще более замечательной представляется убежденность Пуанкаре в ее справедливости – убежденность, которая сделала последующую детальную проверку этой идеи почти что излишней.

Пожалуй, мне стоит попытаться соотнести этот случай с моим собственным опытом, который оказывается в каком-то смысле похожим. На самом деле, я не могу вспомнить ни одной ситуации, когда хорошая идея пришла бы мне в голову «с неба», как это произошло в случае с Пуанкаре (или во многих других известных примерах подлинного вдохновения). Что касается меня, то мне нужно, чтобы выполнялись определенные условия: мне необходимо думать о том вопросе, над которым я в данный момент работаю, пусть даже в «фоновом режиме» и не целенаправленно, но обязательно осознанно;¹²⁹ вполне возможно, что при этом я буду заниматься чем-то посторонним и успокаивающе-монотонным, например, бриться; вероятно, я заново возьмусь размышлять о проблеме, которая на некоторое время была отложена в сторону. И, конечно же, нужно посвятить не один час упорным сознательным раздумьям, после которых может потребоваться определенное время для того, чтобы вновь переключиться на решаемую проблему. И, тем не менее, ощущение, когда искомое решение возникает при таких условиях подобно «вспышке» – и при этом ты совершенно уверен в его правильности – мне достаточно хорошо знакомо.

Вероятно, стоит привести конкретный пример, который может оказаться небезынттересным и с другой точки зрения. Осенью 1964 года меня занимал вопрос о сингулярностях черных дыр. Оппенгеймер и Снайдер в 1939 году показали, что строго сферический коллапс массивной звезды может приводить к образованию центральной сингулярности пространства-времени, выходящей за пределы классической общей теории относительности (см. главу 7, с. 27 выше, §7.10). Многие считали, что этого неприятного вывода можно было бы избежать, если бы удалось убрать (необоснованное) предположение о строгой сферической симметрии. В противном случае получается, что вся коллапсирующая материя стремится к единой центральной точке, где (как вполне закономерно было бы предположить, учитывая симметричность ситуации) возникает сингулярность бесконечной плотности (вещества). Вполне разумным кажется предположение о том, что без такой симметрии материя попадала бы в центральную область далеко не так согласованно, вследствие чего сингулярности бесконечной плотности могло бы и не получиться. Возможно даже, что вся материя в этом случае снова «раскрутилась» бы, демонстрируя поведение, совершенно отличное от идеализированной черной дыры Оппенгеймера и Снайдера.¹³⁰

¹²⁷ В.Э.: Вот, видите, мистер Пенроуз – совершенно явное доказательство существования параллельных процессоров в мозге! А Вы говорите, что параллельные вычисления ничего не дают, кроме скорости!

¹²⁸ В.Э.: Ну, с этим ощущением истинности дело обстоит так. Параллельный процессор установил эту истинность, потому и было такое ощущение. Но в принципе он мог бы и ошибиться. Тогда последующая проверка установила бы ошибочность, было бы ощущение досады, всё это событие Пуанкаре постарался бы поскорее забыть и не писал бы о нем в своих воспоминаниях. В мемуары попадают только те случаи, когда «интуиция» оправдалась.

¹²⁹ В.Э.: Здесь есть еще один момент. Я думаю, что Пенроуз честнее многих других мемуаристов или более точно и полно видит действительную картину происходящего с ним, когда к нему приходят новые идеи, – поэтому его рассказ выглядит скромнее, чем у многих других. А многие другие люди склонны театрализовать произошедшее, раскрашивать свой рассказ и изображать всё так, чтобы неожиданное «озарение» выглядело как можно более впечатляющим и непонятным (тем самым вольно или невольно свидетельствуя о необычайной гениальности рассказчика или о его связях с «высшими силами»).

¹³⁰ Термин «черная дыра» вошел во всеобщее употребление много позже, около 1968 года (главным образом благодаря пророческим идеям американского физика Джона А. Уилера).

Стимулом для моих собственных размышлений на эту тему послужил вновь возникший интерес к проблеме черных дыр, связанный со сравнительно недавно открытыми квазарами (в начале 1960-х годов). Физическая природа этих на удивление ярких (с учетом отделяющих их от Земли расстояний) астрономических объектов вызвала у некоторых специалистов предположение о том, что в центре каждого из них может находиться нечто наподобие черной дыры Оппенгеймера–Снайдера. С другой стороны, многие считали, что гипотеза Оппенгеймера–Снайдера о сферической симметрии может привести здесь к совершенно неверным представлениям. Однако мне пришло в голову (в контексте другой работы, которую я выполнял), что можно было бы сформулировать и доказать точную математическую теорему, указывающую на неизбежность возникновения сингулярностей в пространстве-времени (в рамках стандартной общей теории относительности) и тем самым подтверждающую наличие черных дыр – при условии достижения коллапсом определенной «точки необратимости». Я не знал, как математически можно было бы определить такую точку (не используя при этом условия сферической симметрии), не говоря уже о формулировке или доказательстве соответствующей теоремы. В то время приехал коллега из США Айвор Робинсон, с которым у меня, пока мы шли по улицам Лондона в направлении моего офиса, завязалась оживленная дискуссия на совершенно другую тему. Разговор на момент прекратился, когда мы переходили через дорогу, и был продолжен только на другой ее стороне. И в эти несколько мгновений – я знаю это совершенно точно! – у меня возникла некая идея, которая также быстро оказалась стерта из памяти возобновившейся беседой!

В тот же день, после того, как мой коллега ушел, я вернулся в свой офис. Я помню, что у меня было странное чувство душевного подъема, которое я сам себе никак не мог объяснить. Я начал перебирать все отложившиеся в памяти впечатления этого дня в попытке отыскать причину такого непонятного воодушевления. После исключения множества неподходящих возможностей, я в конце концов вспомнил ту мысль, которая возникла у меня при переходе улицы – и в которой заключалось решение задачи, постоянно крутившейся у меня в голове всё последнее время!

Несомненно, это был искомый критерий – который я впоследствии назвал «ловушечная поверхность» – и мне уже не понадобилось много времени, чтобы набросать план доказательства искомой теоремы (Пенроуз [1965]). И хотя прошло еще немало времени, прежде чем было сформулировано математически строгое доказательство – ключевое место в нем сохранила та первоначальная идея, которая пришла мне в голову при пересечении улицы. (Я иногда пытаюсь представить себе, что было бы, если бы в течении этого дня произошло другое, менее существенное событие, сравнимое, однако, по эмоциональному воздействию. Может быть, в этом случае, я бы вообще никогда не вспомнил про свою мимолетную идею!)¹³¹

Эта история подводит меня к еще одному вопросу, связанному с вдохновением и озарением, и касающемся той более чем существенной роли, которую играют при формировании суждений эстетические критерии. Можно смело утверждать, что в искусстве эстетические критерии имеют первостепенное значение. Эстетика в искусстве – это самый сложный предмет, изучению которого философ посвящает иной раз всю свою жизнь. Можно было бы утверждать, что в математике, да и в науке вообще, такие критерии скорее второстепенны, а главным критерием всегда является истинность. Однако вряд ли возможно отделить одно от другого, когда речь заходит о вдохновении и озарении. У меня создается впечатление, что твердая уверенность в правильности идей, приходящих в голову в момент прозрения очень тесно (пусть не полностью коррелируя, но и заведомо не случайно) связана с эстетическими качествами. Красивая идея имеет гораздо больше шансов быть правильной, чем идея нескладная.¹³² По крайней мере, об этом свидетельствует мой собственный опыт, а также аналогичные замечания, сделанные другими (см. Чандрасекар [1987]). Вот что, например, пишет Адамар:

¹³¹ В.Э.: Вспомнил – вспомнил бы! Никуда она не делась бы. В худшем случае тот параллельный процессор позже еще раз повторил бы свою работу и пришел бы к тем же результатам.

¹³² В.Э.: Да, это так, но давайте разберемся, ПОЧЕМУ это так. В чем состоит «эстетичность» или «красота» идеи? А в том, что идея удовлетворяет некоторым критериям алгоритма оценки идей: она объясняет не одну, а сразу много вещей, не имеет ничего лишнего (удовлетворяет «лезвию Оккама»), хорошо вписывается в общую картину вместе с другими идеями. По таким и похожим критериям мозговой компьютер признает ее «красивой». А почему она при этом имеет больше шансов быть правильной? А потому, что сам мир прост и непротиворечив – поэтому и ясные идеи его описывают лучше, чем запутанные.

«...ясно, что никакое значительное открытие или изобретение не может быть сделано без сознательного стремления к нему. Но в случае с Пуанкаре мы видим и другое – чувство прекрасного, которое сыграло свою роль необходимого средства изысканий. И мы приходим к двойному заключению: что изобретение – это выбор; что критерием этого выбора служит чувство научной красоты».

Более того, Дирак [1982], например, непоколебим в убеждении, что именно его тонкое чувство прекрасного позволило ему предугадать вид уравнения электрона («уравнение Дирака», упоминаемое на с. 113 [МОИ № 15](#)), в то время как поиски остальных не увенчались успехом.

Я несколько не сомневаюсь в том, что для меня значение эстетических критериев для мышления трудно переоценить – как в случае ощущения «уверенности» при спонтанном возникновении идей в минуты «вдохновения»; так и в отношении более «прозаических» решений, которые постоянно приходится находить, продвигаясь к желанной цели. Я писал об этом еще в связи с открытием неперiodичных «плиточных» наборов замощений, показанных на рис. 10.3 и 4.11. Бесспорно, именно эстетичность первого набора – не только внешний вид, но также и его интригующие математические свойства – позволили мне интуитивно (возможно, в виде «вспышки», но только лишь с 60 %-ной вероятностью!) понять, что этот узор мог быть создан по определенным правилам состыковки (то есть как мозаика-головоломка). Скоро я собираюсь подробнее рассказать об этих плиточных структурах (см. Пенроуз [1974]).

На мой взгляд очевидно, что эстетические критерии важны не только при формировании спонтанных суждений, являющихся результатом озарения, но и гораздо чаще – в каждом суждении, которое появляется в ходе математической (или, говоря в целом, научной) работы. Строгое доказательство – это обычно последний шаг! Перед этим приходится строить множество предположений, и на этом этапе решения, подсказанные эстетическим восприятием, играют исключительно важную роль – конечно, с учетом логически непротиворечивых выводов и известных фактов.

Именно эти суждения я принимаю в качестве критерия сознательного мышления. Я полагаю, что даже при внезапной вспышке озарения, которая, вероятно, является конечным «продуктом» работы бессознательного, арбитром является сознание, и идея будет быстро отвергнута и забыта, если, по мнению сознания, она «не звучит». (Забавно, что я все-таки забыл о своей «ловушечной поверхности» – но не на том уровне, который я имею в виду. Идея достаточно прочно засела в сознании, чтобы надолго сохранить напоминание о себе.) «Эстетический» запрет, о котором идет речь, мог бы, как я полагаю, вообще закрыть доступ неприглядным идеям к тем уровням сознания, где они могли бы осознанно восприниматься сколь-нибудь длительное время.

Какова моя точка зрения на участие бессознательного в рождении «вдохновенной мысли»? Признаюсь, что эти вопросы далеко не так ясны для меня, как хотелось бы. Это та область, в которой бессознательное, по-видимому, и в самом деле играет крайне важную роль, и я должен согласиться с тем, что бессознательные процессы там весьма существенны. Также приходится признать, что вряд ли бессознательное подбрасывает нам идеи случайным образом. Должен существовать мощнейший механизм отбора, который позволял «тревожить» сознание только тем идеям, у которых «есть шанс». Я готов предположить, что критерии отбора – по большей части носящие своеобразный «эстетический» характер – в значительной степени утверждаются уже с учетом «пожеланий сознания»¹³³ (подобно ощущению нескладности, возникающему при виде математических идей, которые несовместимы с уже установленными общими принципами).

В связи с этим необходимо затронуть вопрос о том, что представляет собой подлинная оригинальность. Мне кажется, что тут действуют два фактора, а именно: процессы «предложения» и «отбора»¹³⁴. Из них «предложение» кажется мне по большей части процессом бессозна-

¹³³ В.Э.: Здесь видно, как всё трудно и нескладно получается, когда рассуждаешь в этих категориях «сознательное», «бессознательное»... Да отбросить эти понятия давно надо! Есть мозговые процессоры (в которых работают мозговые программы по определенным алгоритмам). Вот, они и осуществляют как генерацию идей, так и их отбор по разным критериям – что «эстетическим», что «логическим».

¹³⁴ В.Э.: Это совершенно верно! Именно таков фундамент мозговых алгоритмов. Есть генерация новых «идей» (путем случайного комбинирования элементов или путем изменения какого-нибудь элемента в старой конструкции); и есть отбор «идей» (по всевозможным критериям). А что из этого «сознательно» и что «бессознательно» – это зависит только от того, что попадает в поле зрения Хроникера (и, значит, записывается в память и «осознается»), а что не попадает (и, значит, «не осознается»).

тельным, тогда как «отбор» – наоборот. Без эффективного процесса «предложения» новые идеи не возникали бы совсем. Но сама по себе эта процедура мало полезна. Нужен эффективный механизм оценки этих идей, который позволил бы выжить только тем из них, которые представляются достаточно разумными. Во сне, например, необычные идеи возникают легко и в большом количестве – но лишь в очень редких случаях они проходят критический контроль бодрствующего сознания. (Что касается меня, то у меня во сне никогда не возникали плодотворные научные идеи, в то время как другим – например, химику Кекуле при открытии им структуры бензола – кажется, повезло больше.) По моему мнению, именно сознательный процесс «отбора» (или построения суждений) является центральным в содержании понятия оригинальности, а вовсе не бессознательный процесс «предложения»¹³⁵; но я прекрасно понимаю, что многие могут придерживаться противоположной точки зрения.

Прежде чем оставить эту тему в таком неудовлетворительном состоянии, как она есть, я должен упомянуть другую поразительную черту, присущую рожденным в состоянии вдохновения идеям, а именно – их масштабность. История Пуанкаре, рассказанная выше, является собой поразительный пример проявления этого свойства, поскольку идея, мимолетно возникшая в его голове, должна была охватывать весьма обширную область математической мысли. Возможно, более наглядным для читателя-нематематика (хотя и столь же непостижимым) является способ, которым (иные) художники могут представить себе весь замысел своего творения целиком. Подобный удивительный случай очень живо описан Моцартом (см. Адамар [1945], с. 16):

«Когда я чувствую себя хорошо и нахожусь в добром расположении духа; или когда я предпринимаю поездку или отправляюсь на прогулку после сытной трапезы; или ночью во время бессонницы – мне в голову приходит сколько угодно самых разных идей. Откуда и как они приходят? Я не знаю и ничего не могу с этим поделать.¹³⁶ Те, которые мне приятны, я удерживаю в голове и часто напеваю без слов; так, по крайней мере, мне говорили. Когда у меня возникает тема, сразу же приходит следующая мелодия, соединяясь с первой согласно требованиям композиции в целом: контрапункт, партия каждого инструмента – и, наконец, все музыкальные фрагменты складываются в завершённое произведение. Тогда моя душа горит вдохновением. Произведение растёт; я постоянно дополняю его, прорабатываю всё более мелкие детали, пока в один прекрасный момент композиция не оказывается полностью сформирована у меня в голове, хотя она может быть и довольно длинной. Тогда мой ум охватывает её единым взглядом, как красивую картину или прекрасную девушку. Это не последовательный процесс, при котором различные части произведения прорабатываются до мелочей и стыкуются друг с другом (так, как это будет сделано в дальнейшем) – нет, я слышу его целиком, как это позволяет мое воображение».

Мне кажется, что это хорошо согласуется с моей схемой «предложения–отбора». «Предложение» представляется здесь бессознательным («я ничего не могу с этим поделать»), хотя и, несомненно, в высокой степени избирательным, в то время как «отбор» выполняет функцию сознательного судьи вкуса («те, которые мне приятны, я удерживаю...»). Масштабность идеи, рожденной в минуты вдохновения, особенно отчетливо проглядывает в высказывании Моцарта («это не последовательный процесс... нет, я слышу его (произведение) целиком»)¹³⁷ и

¹³⁵ В.Э.: Нет, всё-таки оригинальность зависит больше от генератора, чем от отбора. Именно сильные генераторы, непрерывно выдающие в большом количестве всевозможные идеи, определяют незаурядную личность. Впрочем, нужно уточнить, что мы понимаем под «оригинальностью». Если под этим словом понимается «оригинальность» панка, выстроившего себе на полубритой голове петушиный гребешок из волос, то такая «оригинальность», конечно, сильного генератора идей не требует, а определяется исключительно слабостью критериев отбора.

¹³⁶ В.Э.: Вот он – сильный генератор!

¹³⁷ В.Э.: Ну, это требует уточнения. Моцарт только что рассказывал, как у него появлялись отдельные мелодии, как он их напевал, как постоянно вносил дополнения и изменения... В этом смысле всё это – последовательный процесс. Но в то же время (или с некоторого момента) Моцарт композицию «охватывает единым взглядом» всю целиком. Разумеется, иначе и быть не может. Так писатель (во всяком случае хороший) видит целиком всю композицию будущего романа; так программист (во всяком случае хороший) видит целиком всю архитектуру будущей системы программ... А с точки зрения мозговых программ это означает следующее. Всякое построение композиции (музыкальной, беллетристической, программистской или любой другой) есть процесс работы мозговых программ и одновременно процесс самопрограммирования. Для этих строящих композицию программ она представляет собой выходные, результирующие данные, но в то же время она – будущая программа для мозга. По этой программе, например, Моцарт мог проиграть свою композицию перед Зальцбургским архиепископом или Венским

Пуанкаре («Я не проверил эту идею. У меня просто не было времени...»). Более того, я готов настаивать, что нашему сознательному мышлению в целом подобная масштабность присуща изначально.¹³⁸ К этому вопросу я еще вернусь.

§10.6. Невербальность мысли

Одно из главных утверждений, которое Адамар делает в своей работе о творческом мышлении – это убедительное опровержение популярного сегодня тезиса, который гласит, что вербализация необходима для формирования мысли.¹³⁹ Вряд ли здесь можно привести возражение более убедительное, чем то, которое содержится в письме Альберта Эйнштейна Адамару:

«Слова или язык, как в устной, так и в письменной форме, по-видимому, не играют никакой роли в механизме моего мышления. Психические сущности, которые, по-видимому, и являются составляющими элементами мысли – это определенные знаки и более или менее отчетливые образы, которые могут “произвольно” воспроизводиться и комбинироваться по собственному желанию... В моем случае, упомянутые элементы носят визуальный и моторный характер. Общепринятые слова или другие знаки мне приходится подбирать только на второй стадии, когда упомянутые ассоциативные связи приобретают отчетливые очертания и могут быть воспроизведены по моей воле».

Еще здесь стоит процитировать видного генетика Фрэнсиса Гальтона:

«Для меня серьезную трудность представляет письмо, а еще большую – словесное изъяснение, так как размышления в словесной форме даются мне далеко не так легко, как в любой другой. Часто случается, что проделав большую работу и получив результаты, которые мне абсолютно ясны и вполне меня удовлетворяют, при попытке выразить их словами я сталкиваюсь с необходимостью переводить себя в совершенно иную интеллектуальную плоскость. Мне приходится перекладывать свои мысли на язык, который не слишком-то хорошо им соответствует. Поэтому я вынужден тратить уйму времени в поисках подходящих слов и фраз, и часто осознаю, что, выступая без подготовки, бываю непонятен не из-за неясности содержания высказывания, а только лишь из-за неуклюжести своих вербальных конструкций. Это один из небольших, но досадных моих недостатков».

Нечто сходное пишет и сам Адамар:

«Я утверждаю, что слова полностью отсутствуют в моей голове, когда я действительно предаюсь раздумьям, и я нахожу случай Гальтона полностью идентичным моему личному опыту, поскольку и у меня самого даже после прочтения или выслушивания вопроса все слова исчезают в тот самый момент, когда я начинаю их обдумывать; и я полностью согласен с Шопенгауэром, когда он пишет: “Мысли умирают в момент, когда воплощаются в слова”».

Я цитирую эти примеры, потому что они очень хорошо согласуются с моим собственным способом мышления. Почти всё мое математическое мышление визуализируется или протекает

императором; по аналогичным программам писатель сочиняет непосредственно тексты отдельных глав, а программист – отдельные блоки своей системы. Эта конструкция (композиция-программа) представляет собой древовидную структуру: в ней выделены крупные блоки, которые далее распадаются на более мелкие; те – на еще более мелкие и т.д. (Такова архитектура самопрограммирования вообще – без такой древовидной структуры самопрограммирование просто невозможно, поэтому такая организация универсальна для всех видов творчества). Вот это дерево своей композиции Моцарт и охватывал единым взглядом «как красивую картину или прекрасную девушку».

¹³⁸ В.Э.: Да, разумеется – это то универсальное дерево самопрограммирования.

¹³⁹ В.Э.: Мне кажется, что этот тезис отнюдь не современный, а представляет собой реликт 19-го века или еще более древних времен. Во всяком случае, я отчетливо помню, как, еще будучи школьником, читал его в старых книгах, удивлялся его очевидной нелепости и сочинял его опровержения. (Помню даже, где именно это было: в бабушкиной комнате, возле ее швейной машинки, которую я использовал как письменный столик). Еще больше меня удивляло, что потом в Университете, на лекциях по философии, мне опять пытались вдолбить в голову этот тезис. Но для меня всегда было очевидно, что мышление может происходить БЕЗ всякой вербализации и, более того, что бессловесная «форма мышления» является основной.

на уровне не-вербальных понятий, хотя мысли очень часто сопровождаются пустыми и почти бесполезными словесными комментариями, такими как «вот это идет с этим, а это – с этим». (Иногда я могу употреблять слова для выражения простых логических выводов.) Трудности, которые испытывали упомянутые ученые при переводе своих мыслей на язык слов, я часто испытывал и сам. Причиной тому в большинстве случаев служило просто-напросто отсутствие адекватных терминов, способных выразить требуемые понятия. Действительно, я часто веду расчеты, используя специально разработанные диаграммы, которые представляют собой сокращенную запись определенных типов алгебраических выражений (см. Пенроуз и Риндлер [1984]). Необходимость перевода таких диаграмм в слова – это очень трудоемкий процесс, и я это делаю только в случае крайней необходимости, когда нужно подробно объяснить что-то другим. И еще одно наблюдение: я случайно заметил, что если сосредотачиваю всё свое внимание на математике и некоторое время занимаюсь только ей, а потом кто-то внезапно обращается ко мне, то в течение нескольких следующих секунд я почти не способен говорить.

Не могу сказать, что я никогда не думаю в словесной форме – просто я нахожу слова почти бесполезными для математического мышления. Другие виды рассуждений, возможно, такие, как философские, являются, вероятно, гораздо более подходящими для вербального выражения. Может быть, поэтому так много философов считают язык неотъемлемым средством интеллектуальной деятельности и сознательного мышления! Нет сомнения, что каждый человек думает по-своему – это подтверждает и мой собственный опыт, и мнения других математиков. Наиболее полярными стилями математического мышления являются, как кажется, аналитический/геометрический. Интересно, что Адамар считал себя аналитиком, хотя использовал скорее визуальные, чем вербальные образы в своем математическом мышлении. Что касается меня, то я в значительной степени тяготею к геометрическим методам. Если же говорить обо всех математиках, то разброс здесь окажется весьма широк.

Но коль скоро мы согласились с тем, что значительная часть сознательного мышления, на самом деле, может иметь невербальный характер – а с моей точки зрения к другому выводу приведенные выше соображения привести не могут – тогда, наверное, читателю будет нетрудно поверить также и в то, что подобное мышление может иметь неалгоритмическую составляющую!¹⁴⁰

Напомню, что в главе 9 (с. 310) я упоминал о часто встречающейся точке зрения, согласно которой только одно полушарие мозга – то, где находится центр речи (левое у большинства людей) – способно также и на сознательное мышление.

После ознакомления с вышеизложенным читателю должно быть ясно, почему я считаю эту точку зрения совершенно неприемлемой. Я не знаю, используют ли, как правило, математики одно полушарие чаще, чем другое; но нет сомнения в том, что для истинного математического мышления необходим высокий уровень сознания. В то время как аналитическое мышление, по всей видимости, сосредоточено в левой половине мозга, геометрическое мышление, напротив, часто приписывают правой половине; так что вполне разумным является предположение о том, что значительная часть сознательных математических рассуждений проводится все-таки в правом полушарии!

§10.7. Сознание у животных?

Прежде чем закончить рассуждения о важности вербализации применительно к сознанию, я должен еще рассмотреть один вопрос, который вкратце уже затрагивался ранее, а именно – могут ли живые существа, отличные от нас, обладать сознанием? Мне кажется, что люди иногда используют неспособность животных говорить как аргумент, отрицающий саму возможность наличия у них достаточно развитого сознания и, как следствие, позволяющий априори отказывать им в самых элементарных «правах». Читатель может легко догадаться, что для меня подобные рассуждения являются неубедительными, поскольку для многих сложных разновид-

¹⁴⁰ В.Э.: Ну уж нет! Это совершенно различные вещи. Мышление не является «вербальным» именно потому, что оно представляет собой работу программ – и программы (в общем случае) работают со структурами данных, а не со словами. (Лишь в специальных случаях, когда входными или выходными данными являются тексты, эти программы работают «вербально»). А «неалгоритмическая природа» означала бы, что работают уже не программы – а что тогда? (Пенроуз же не предлагает ничего взамен программам. Квантовая когерентность? Но ведь это только общие слова, абсолютно неспособные заменить собой всё то, что о мозговых программах рассказывает Веданская теория).

ностей сознательного мышления (например, для математического) вербализация и вовсе не требуется. А некоторые по той же причине – т.е. из-за отсутствия речевых способностей – считают, например, что правая сторона мозга обладает сознанием «не более», чем шимпанзе (см. Леду [1985], с. 197–216).

Существуют значительные разногласия относительно способности горилл и шимпанзе выражать свои мысли при помощи языка знаков (а не обычной человеческой речи, которую они не могут воспроизводить из-за особенностей строения их голосовых связок; см. статьи Колина Блэйкмора и Сюзан Гринфилд (Блэйкмор, Гринфилд [1987])). Хотя полемика еще продолжается, один факт уже не вызывает сомнений: эти человекообразные обезьяны могут общаться таким образом, по крайней мере, на некотором элементарном уровне. По моему глубокому убеждению, отказываться признать в этом общении «вербализацию» – это прямое проявление высокомерия со стороны тех, кто придерживается такой точки зрения. Видимо, закрывая обезьянам доступ в «клуб способных к вербализации», надеются автоматически исключить их и из «клуба обладающих сознанием»!

Оставляя пока в стороне вопрос о речи, обратимся к убедительным свидетельствам, которые указывают на способность шимпанзе к подлинному «вдохновению». Конрад Лоренц описывает шимпанзе в комнате, где к потолку был подвешен банан, до которого обезьяна не могла достать, а в одном из углов был поставлен ящик:

«Задача не давала ему покоя, и он возвращался к ней вновь и вновь. Затем внезапно – по-другому и не скажешь – его прежде унылая физиономия “озарилась”. Взгляд шимпанзе перемещался с банана на пустое пространство под ним, оттуда на ящик, потом снова на место под бананом, и оттуда на банан. В следующий момент он издал крик радости и кувыркнулся в сторону ящика, явно пребывая в превосходнейшем настроении. Совершенно уверенный в успехе, он толкнул ящик под банан. Могу поспорить, что никто из видевших его в тот момент не усомнился бы в способности человекообразных обезьян к таким прозрениям, испытав которые, в пору воскликнуть “Эврика!”».

Обратите внимание, что точно так же, как в случае с Пуанкаре, когда тот садился в омнибус, шимпанзе был «совершенно уверен в успехе» еще до того, как он проверил свою идею.¹⁴¹ И если я прав, утверждая, что подобные суждения требуют участия сознания, то перед нами оказывается неопровержимое свидетельство того, что животные действительно могут обладать сознанием.

Глядя на дельфинов (и китов), мы невольно задаемся одним интригующим вопросом. Как нетрудно заметить, головной мозг дельфинов имеет такие же (или даже большие) размеры, как и наш собственный; а кроме того, дельфины могут посылать друг другу чрезвычайно сложные звуковые сигналы. Вполне возможно, что такой большой мозг нужен для каких-то иных целей, которые не сводятся к «интеллектуальной» деятельности в человеческом или околочеловеческом понимании. Более того: не имея рук, приспособленных для хватания, они не могут создать «цивилизацию», которую мы были бы способны оценить. И хотя они по той же самой причине не могут писать книг, они вполне способны время от времени превращаться в философов и размышлять о смысле своей жизни! Что, если они иногда передают свое ощущение «самосознания» при помощи этих сложных звуковых сигналов, распространяющихся под водой? Я не встречал ни одного исследования, где бы изучалось, используют ли дельфины какую-то одну определенную сторону мозга для «вербализации» и общения друг с другом. В связи с проведенными на людях операциями по разделению мозга, которые загадочным образом влияли на целостность «я» человека, следует отметить еще одну особенность дельфинов: их полушария никогда не погружаются в сон¹⁴² одновременно – вместо этого каждая сторона мозга спит по

¹⁴¹ В.Э.: Он составил мозговую программу своих действий, включающую использование ящика – третьего предмета по сравнению с ним самим и бананом. Говорить о том, какого качества мозговые программы способно составить и использовать то или иное живое существо – это лучше, чем перебирать слова «есть сознание», «нет сознания».

¹⁴² Мне кажется, что потребность животных во сне, во время которого они иногда видят сны (как это бывает часто заметно у собак), может служить свидетельством того, что они, вполне вероятно, наделены сознанием. Ибо разница между сном без сновидений и сном со сновидениями, по-видимому, во многом определяется как раз наличием сознания. В.Э.: Сновидения – это свидетельство наличия у субъекта генератора, называемого в Веданской теории «рандомгенератором» (базовая часть сомниатора). Наличие этого генератора обеспечивает активность системы. Крокодил, например, может часами лежать неподвижно, реагируя только на внешние раздражители, но ничего не предпринимая сам. (Сколько я не

очереди. Согласитесь, хорошо было бы выяснить у них, как они «ощущают» целостность своего сознания!

§10.8. Соприкосновение с миром Платона

Я уже упоминал о том, что разные люди скорее всего мыслят по-разному – и даже у разных математиков мысли при решении математической задачи формируются не одинаково. Я вспоминаю, что, поступая на математический факультет университета, я ожидал, что мои будущие коллеги-математики должны думать примерно так же, как я. В школе мои одноклассники, казалось, думали совсем иначе, чем я, что меня несколько удручало. «Теперь, – думал я с восторгом, – я найду коллег, с которыми общаться мне будет гораздо легче! Некоторые будут мыслить более продуктивно, чем я, а некоторые – менее; но все они смогут настроиться на мою ментальную длину волны!» Как же я заблуждался! Думаю, что тогда я познакомился с гораздо большим числом различных способов мышления, чем за всё предыдущее время! Да, мой собственный образ мыслей был куда более геометрическим и далеко не столь аналитическим по сравнению с остальными – но у них было и множество других различий в способе мышления. У меня всегда вызывало затруднение понимание словесного описания формулы, в то время как у многих из моих коллег, казалось, с этим не возникало никаких трудностей.

Довольно часто случалось так, что, слушая своего коллегу, пытающегося объяснить мне какую-нибудь математическую выкладку, я практически совсем не улавливал логической связи между следующими друг за другом наборами слов. Однако, в моей голове постепенно формировалась догадка о содержании передаваемых мне идей – причем складывалась она в рамках моей собственной терминологии и, скорее всего, была мало связана с ментальными образами, которыми оперировал мой коллега, обращаясь к данной проблеме, – и тогда я отвечал. К моему удивлению, эти ответы чаще всего воспринимались как адекватные, и беседа продолжала развиваться в таком же ключе, причем к концу становилось ясно, что состоялся поистине позитивный обмен мнениями. Однако сами предложения, которые произносил каждый из нас в ходе беседы, чаще всего оставались не поняты! В последующие годы, будучи уже профессиональным математиком (или физиком-математиком), я пришел к выводу, что ситуация в целом практически не изменилась по сравнению с тем временем, когда я учился на младших курсах. Возможно, с увеличением моего математического багажа я стал несколько лучше разбираться, о чем говорят другие, пытаюсь донести до моего сознания определенную мысль; и, наверное, я научился адаптировать свой стиль изложения, каждый раз подстраиваясь под конкретного слушателя. Однако, в сущности, всё осталось по-прежнему.

Для меня часто является загадкой, как вообще возможно подобное общение, но теперь я всё же осмелюсь дать некоторое объяснение, которое, как мне кажется, могло бы иметь самое непосредственное отношение к уже затронутым ранее вопросам. Суть здесь заключается в том, что при общении математиков происходит не только обмен фактами. Чтобы состоялась передача ряда фактов от одного собеседника другому, первому из них необходимо излагать эти факты достаточно понятно, а второму – воспринять каждый из них в отдельности. Но в математике фактическое содержание играет второстепенную роль. Математические утверждения являются с необходимостью истинными (или же с необходимостью ложными!), и даже если первый математик своим утверждением только нащупывает искомую истину, то именно эту истину воспримет его собеседник (конечно, если исходное утверждение будет им правильно понято). Ментальные конструкции второго математика могут в деталях отличаться от тех образов, которые возникают у первого, равно как могут отличаться и их словесные описания – но соответствующая математическая идея в результате все-таки будет передана.¹⁴³

посещал зоопарк, я вообще ни разу не видел, чтобы крокодил двигался; с таким же успехом вместо него можно было бы поставить чучело). У крокодила рандомгенератора либо нет совсем, либо он крайне неразвит. (И, соответственно, крокодил снов не видит!). А собака активна, когда не спит. (Посмотрите на собак в парке: как они бегают и всем интересуются, ко всему подбегают, всё обнюхивают). Откуда в системе программ (в данном случае – собачьей) берется эта не вызванная внешними раздражителями активность? – От рандомгенератора (он имитирует события внешнего мира). Потому собаки и видят сны.

¹⁴³ В.Э.: Это черта вообще всего – не только математического – общения людей посредством языка. Если оба разговаривающих видят одну и ту же картину, то им сравнительно легко одному закодировать, а другому декодировать словесное сообщение. Слушающий смотрит на картину и (сравнительно) легко идентифицирует те объекты и отношения, о которых говорится в сообщении, даже если они закодированы

Такой тип общения был бы совершенно невозможен, если бы не то обстоятельство, что интересные или глубокие математические истины растворены (с небольшой плотностью) в массе всех возможных математических истин. Если бы передаваемая истина заключала в себе, скажем, неинтересное утверждение наподобие $4897 \times 512 = 2\,507\,264$, то второму собеседнику, естественно, придется полностью понять первого, иначе это точное утверждение не сможет быть передано. Но при сообщении математически интересного утверждения часто удается понять его интуитивно, даже если для его описания использовались расплывчатые образы и понятия.

Это может показаться парадоксальным, поскольку математика – это предмет, где точность всегда ставится превыше всего. В самом деле, в письменных отчетах большое внимание уделяется точной формулировке и завершенности всех утверждений. Однако, чтобы передать математическую идею (обычно посредством словесного описания), такая точность иной раз является помехой, так что вначале может потребоваться менее четкая описательная форма. А как только будет понята самая суть идеи – тогда можно уже переходить и к деталям.

Как же получается, что математические идеи могут передаваться подобным образом? Лично мне представляется, что всякий раз, когда ум постигает математическую идею, он вступает в контакт с миром математических понятий Платона. (Вспомним, что, по Платону, математические идеи имеют собственное бытие и населяют некий идеальный мир, доступ в который осуществляется только благодаря работе интеллекта (см. с. 118 [МОИ № 14](#), с. 12 [МОИ № 15](#)).) Когда человек «видит» математическую истину, его сознание пробивается в этот мир идей и устанавливает с ним кратковременный прямой контакт (т.е. осуществляет «доступ посредством интеллекта»). Я описал это «видение» в связи с теоремой Гёделя, хотя, вообще говоря, здесь заключена сущность математического понимания. Общение математиков становится возможным постольку, поскольку у каждого из них в этот момент есть прямой путь к истине, а сознание каждого способно при этом постигать математические истины непосредственно, путем «видения». (В самом деле, часто акт понимания сопровождается словами типа «О, я вижу!»¹⁴⁴.) Так как каждый математик может установить непосредственный контакт с миром идей Платона, то общение их друг с другом проходит значительно легче, чем это можно было бы ожидать. Ментальные образы, возникающие у каждого из них, когда осуществляется соприкосновение с миром Платона, могут быть существенно различными, но общение тем не менее возможно, поскольку каждый находится в прямом контакте с одним и тем же существующим вне нас миром Платона!¹⁴⁵

В соответствии с этой точкой зрения, наш ум всегда способен на подобный прямой контакт. Но за один раз можно продвинуться лишь на немного. Математическое открытие как раз и состоит в расширении области контакта. Поскольку математические истины являются с необходимостью истинами, никакой содержательной «информации» в общепринятом смысле этого слова исследователь не получает. Вся информация уже находилась там изначально.¹⁴⁶ Всё, что требовалось – это соединить разные части друг с другом и «увидеть» ответ! Это очень хорошо согласуется с представлениями самого Платона о том, что (скажем, математическое) открытие – это всего лишь одна из форм воспоминания! В самом деле, меня часто поражало

не совсем безупречно с точки зрения логики (двусмысленны, неоднозначны и т.п.). А если картина имеется только перед говорящим, а у слушающего ее нет (или она другая), то понимание становится практически невозможным. Таким образом, помимо словесного сообщения, при разговоре должна присутствовать еще и общая для обоих собеседников картина предмета разговора. И утверждение Пенроуза сейчас будет состоять в том, что у математиков такая общая картина имеется – и существует она в Платоновском мире.

¹⁴⁴ В английском языке фраза *Oh, I see!* («О, я вижу!») по смыслу эквивалентна возгласу «О, я понимаю!». – *Прим. ред.*

¹⁴⁵ **В.Э.:** Да – понимание возможно потому, что оба говорящие видят одну и ту же картину из «платоновского мира». Но следует только отдавать себе отчет в том, что из себя представляет этот «платоновский мир». А это – «мир» потенциальных продуктов мозговых программ. Иными словами, если мы хотим рассуждать в терминах более точных, чем «соприкосновение с миром Платона» и т.п., то описание ситуации будет выглядеть так. У каждого из говорящих в мозге имеется свой экземпляр программы, построенной по одному алгоритму; каждый из них проводит анализ этой программы (или, что то же самое, этого алгоритма), и они приходят к одинаковым выводам: «видят» одни и те же потенциальные продукты этого алгоритма. Это и есть их «одновременное соприкосновение с миром Платона».

¹⁴⁶ **В.Э.:** Нет – это неверно. Субъект исследует мозговую программу в принципе так же, как он исследует далекую звезду, – и получает информацию об исследуемом объекте. А когда он изобретает новый алгоритм (для новой программы), тогда он создает объект для нового исследования. (Всё очень просто).

сходство между двумя состояниями, когда ты мучительно стараешься вспомнить чье-то имя – и когда пытаешься найти адекватное математическое понятие. В обоих случаях искомое в некотором смысле уже присутствует в голове, хотя во втором случае «вспоминание» математической идеи связано с необычной формой вербализации.

Чтобы такие идеи были полезны для объяснения принципов математического общения, нужно представить себе, что интересные и глубокие математические идеи отличаются способностью к более «основательному» существованию, чем неинтересные или тривиальные.¹⁴⁷ Эти соображения пригодятся нам при рассмотрении ряда умозрительных заключений, приведенных в следующем разделе.

§10.9. Взгляд на физическую реальность

Любой подход к вопросу о возникновении сознания в царстве физической реальности неявно подразумевает необходимость определения природы самой физической реальности.

Концепция «сильного» ИИ, например, заключается в том, что «разум» возникает через воплощение достаточно сложного алгоритма, по мере того, как этот алгоритм реализуется различными объектами физического мира. При этом, сущность этих объектов, согласно данной теории, значения не имеет. Нервные сигналы, электрический ток, идущий по проводам, винтики, приводные ремни или водопроводные трубы – всё это одинаково подходит в качестве «аппаратной части». Алгоритм рассматривается как нечто самодостаточное. Однако, для предоставления алгоритму возможности «существовать» вне зависимости от любой физической реализации совершенно необходимо разделять воззрения Платона на природу математики. Сторонникам «сильного» ИИ было бы нелегко согласиться с альтернативной точкой зрения о том, что «математические понятия существуют только лишь в умах», поскольку при этом образуется замкнутый круг, где для возникновения умов требуется наличие алгоритмов, а для изначального существования алгоритмов – наличие умов!¹⁴⁸ Они могли бы попытаться придерживаться иного мнения, согласно которому алгоритмы могут существовать как знаки на листе бумаги, или как магнитные силовые линии в кусках железа, или как смещения зарядов в памяти компьютера. Но такое упорядочение материала само по себе не есть алгоритм. Чтобы стать алгоритмом, оно должно иметь интерпретацию, т.е. должна существовать возможность декодирования этого порядка;¹⁴⁹ а это будет зависеть от «языка», на котором написан алгоритм. Снова оказывается, что нужен заранее существующий разум, чтобы «понимать» этот язык, и мы возвращаемся к исходной точке. Предположив затем, что алгоритмы населяют мир Платона, и именно там обитает разум (согласно теории «сильного» ИИ), мы оказываемся перед вопросом отношения между физическим миром и миром Платона. Что, на мой взгляд, является в теории «сильного» ИИ аналогом проблемы «ум–тело»!

Я же придерживаюсь иной точки зрения, поскольку считаю, что (сознательный) ум существенно неалгоритмичен. Но меня несколько смущает то, что между взглядами сторонников «сильного» ИИ и моими собственными существует большое число точек соприкосновения. Я уже указывал, что считаю сознание тесно связанным со способностью воспринимать несомненные истины, и тем самым осуществлять прямой контакт с миром математических понятий Платона. Это неалгоритмическая процедура – и отнюдь не алгоритмы должны населять тот мир, который так важен для нас – и вновь проблема «ум–тело», если следовать этой точке зрения, оказывается тесно связанной с вопросом об отношении мира Платона к «реальному» миру существующих физических объектов.

¹⁴⁷ В.Э.: В таком предположении нет необходимости.

¹⁴⁸ В.Э.: Ну, этот «замкнутый круг» существует только в представлениях Пенроуза.

¹⁴⁹ В.Э.: Уточним: программой называются определенные изменения в материальной системе, которые определяют ход какого-то (материального) процесса. И никакая «интерпретация» здесь не нужна. Обыкновенный полный детерминизм: есть состояние системы, и согласно этому состоянию произойдет физический процесс как результат причинно-следственных отношений. Другая материальная система будет содержать другую программу и т.д. Но между разными программами может быть нечто общее (существовать изоморфизм). Это общее (если программы построены по одному принципу) называется алгоритмом. И опять не надо никакой «интерпретации» и не требуется никакой «интеллект». Сперва есть материальные системы, определяющие материальные процессы, потом есть общее между некоторыми системами; это общее называется «алгоритмом», а смотрит ли кто-нибудь на эти системы и на это «общее», или не смотрит – Природе безразлично.

В главах 5 и 6 мы видели, насколько хорошо реальный физический мир согласуется с некоторыми исключительно точными математическими теориями (ПРЕВОСХОДНЫЕ теории, см. с. 129). И эта поразительная точность неоднократно подчеркивалась многими исследователями (см., в частности, Вигнер [1960]). Мне трудно поверить – хотя многие считают это неоспоримым – в справедливость утверждения о том, что ПРЕВОСХОДНЫЕ теории могли возникнуть просто в результате случайного естественного отбора идей, при котором «выживают» только лучшие. В это трудно поверить потому, что уж слишком они хороши для того, чтобы оказаться среди идей, возникших случайным образом.¹⁵⁰ На самом деле должна быть какая-то фундаментальная взаимосвязь между математикой и физикой, т.е. между миром Платона и физическим миром.¹⁵¹

Говоря о «мире Платона», мы приписываем ему некоторый вид реальности, которая определенным образом сравнима с реальностью физического мира.¹⁵² С другой стороны, сама реальность физического мира кажется уже менее очевидной, чем она представлялась до появления теорий относительности и квантовой механики (относящихся к ПРЕВОСХОДНЫМ теориям) (см. с. 129, 130 и, в особенности, §6.19). Сама точность этих теорий обеспечивает почти математический абстрактный уровень существованию нашей физической реальности. Не является ли это своего рода парадоксом? Как может конкретная реальность превратиться в абстрактную, да еще и математическую? Возможно, это оборотная сторона вопроса о том, как абстрактные математические понятия могут становиться почти ощутимо реальными в мире Платона. Возможно, в каком-то смысле, эти два мира, на самом деле – один и тот же мир? (См. Вигнер [1960], Пенроуз [1979a], Барроу [1988], а также Эткинс [1987].)

Хотя я с большой симпатией отношусь к идее такого отождествления двух миров, вопрос этим далеко не исчерпывается. Как я уже упоминал в главе 3, и выше в этой главе, некоторые математические истины в мире Платона кажутся «более реальными» («более глубокими», «более интересными», «более многообещающими?»), чем остальные. Такими должны быть все те истины, которые наиболее тесно связаны с явлениями физической реальности.¹⁵³ (Примером здесь может служить система комплексных чисел (см. главу 3), которая является основной составляющей квантовой механики, ибо амплитуды вероятности выражаются через комплексные числа.) Если принимать в расчет возможность такого отождествления, то становится более понятным, как «разум» мог бы играть роль таинственного связующего звена между физическим миром и математическим миром Платона. Вспомним также (см. главу 4), что есть много областей математического мира – более того, наиболее глубоких и интересных его областей – которым присущ неалгоритмический характер. Поэтому было бы разумным, основываясь на той точке зрения, которую я здесь излагаю, предположить, что неалгоритмические процессы должны играть в физическом мире весьма существенную роль.¹⁵⁴ И я склоняюсь к тому, что эта роль тесно связана с самим понятием «разума».

¹⁵⁰ В.Э.: Двойной отбор: до рождения – дарвинский; после рождения – осуществленный самим индивидуумом. И даже еще и тройной: отбор идей разных индивидов на протяжении истории цивилизации.

¹⁵¹ В.Э.: Такая взаимосвязь существует. Во-первых, вся математика начинается с соответствия между материальными множествами с одной стороны и программами, обрабатывающими информацию об этих множествах. Потом математика уходит в море «вторичных алгоритмов» (работающих с обозначениями чисел, вычислительных), но соответствие (изоморфизм) между материальными множествами физического мира с одной стороны и вычислительными алгоритмами математики с другой – продолжает существовать, сохраняется.

¹⁵² В.Э.: С точки зрения мозгового компьютера оба «мира» одинаково реальны: и в том, и в другом случае компьютер непосредственно работает с номиналиями объектов этих «миров», существующими в компьютере (в виде структур данных).

¹⁵³ В.Э.: Сами по себе «истины платоновского мира» (т.е. потенциальные продукты алгоритмов) все одинаковы по степени своей «реальности». Действительно, некоторые из них оказываются изоморфными физическому миру, другие не находят таких соответствий (или пока не находят), но это зависит от устройства физического мира, а не от платоновского мира. Комплексные числа отображают ротацию, и их широкое применение в квантовой механике означает только то, что в этой области ротация имеет большое значение.

¹⁵⁴ В.Э.: Ну, здесь неточности пенроузовских представлений и выражений досуммировались уже до такой степени, что всё теперь пошло окончательно «не в ту степь»...

§10.10. Детерминизм и жесткий детерминизм

До сих пор было мало сказано о вопросе «свободы воли», который обычно считается неотъемлемым при рассмотрении активной составляющей проблемы «ум–тело». Вместо этого я уделил основное внимание предположению о наличии существенно неалгоритмической составляющей в той роли, которую играет осознанное действие. Обычно тема свободы воли обсуждается в связи с детерминизмом в физике. Вспомним, что в большинстве существующих ПРЕВОСХОДНЫХ теорий типа¹⁵⁵ существует явно выраженный детерминизм: если известно состояние системы в определенный момент времени,¹⁵⁶ то оно полностью определяется в любой более поздний (или ранний) момент из уравнений теории. Таким образом, по-видимому, для «свободы воли» не остается места, поскольку будущее поведение системы кажется полностью обусловленным физическими законами. Даже U-часть квантовой механики имеет такой же полностью детерминистский характер. Однако R-часть, связанная с «квантовым скачком», не является детерминистской, внося элемент случайности в эволюцию системы во времени. Был момент, когда исследователи старались найти именно здесь свободу воли, полагая, что действие сознания может непосредственно влиять на «скачок» отдельной квантовой системы. Но если R-часть действительно случайна, то это тоже нам не слишком поможет, если мы хотим конструктивное применение нашей свободе воли.

Моя собственная точка зрения (правда, не очень четко сформулированная в этом случае) заключается в том, что должен быть применен некий новый подход (ПКТГ; см. главу 8), который работал бы на границе между квантовой и классической физикой, интерполируя между U и R (каждая из которых теперь рассматривается как аппроксимация); и этот подход должен содержать существенно неалгоритмический элемент. А это подразумевает, что будущее не будет вычислимым на основе настоящего, даже если оно им и определяется. Я пытался по возможности наиболее ясно определить смысловые различия терминов «вычислимость» и «детерминизм» в главе 5. Мне кажется, что ПКТГ может быть детерминистской, но невычислимой теорией.¹⁵⁷ (Вспомним невычислимую «игрушечную модель», которую я описал в главе 5, с. 22 [МОИ № 15](#)).

Многие при этом считают, что даже классический (или U-квантовый) детерминизм не является детерминизмом в полном смысле этого слова, поскольку исходные условия в принципе не могут быть известны с такой точностью, которая действительно позволила бы просчитать будущее. Иногда совсем небольшие изменения исходных условий могут привести к очень значительным различиям в конечном результате. Именно так возникает «хаос» в (классической) детерминистской системе – явление, приводящее, например, к неопределенностям в прогнозе погоды. Однако очень трудно поверить, что этот вид классической неопределенности может позволить нам сохранять (иллюзорную?) веру в существование свободы воли. Будущее поведение всё равно будет детерминированным в каждый момент времени, начиная с Большого взрыва, даже если мы окажемся не в состоянии его вычислить (см. с. 25 [МОИ № 15](#)).

То же самое возражение может быть выдвинуто и против моей идеи о том, что невычислимость связана скорее с особенностями законов динамики – которые в этом случае считаются исходно неалгоритмическими – чем с нехваткой информации о начальных условиях. Невычислимое будущее, согласно этой точке зрения, всё равно будет полностью обусловлено прошлым – вплоть до момента Большого взрыва. На самом деле я не настолько привержен догмам, чтобы настаивать на том, что методы ПКТГ должны быть по сути детерминистскими, но невычислимыми. Я полагаю, что искомая теория должна иметь более тонкий характер, вследствие чего подобное грубое описание будет к ней просто неприменимо. Единственное, на чем я настаиваю – так это на необходимости присутствия в ней существенно неалгоритмических элементов.

Завершая этот раздел, я хотел бы упомянуть еще об одном представлении о природе детерминизма, причем из числа весьма радикальных. Я называю его жестким детерминизмом¹⁵⁸ (Пенроуз [1987]). Согласно этой теории, не просто будущее предопределяется прошлым – вся

¹⁵⁵ В.Э.: Что за «ПРЕВОСХОДНЫЕ теории типа»? Видимо, надо: «теории типа ПРЕВОСХОДНЫЕ». (В оригинале по-английски: *Recall that in most of our SUPERB theories there is a clear-cut determinism...*).

¹⁵⁶ В случае специальной или общей теории относительности под «временами» следует понимать «одновременные пространства» или «пространственно-подобные поверхности» (с. 47, 58 [МОИ № 15](#)).

¹⁵⁷ Стоит отметить, что существует по меньшей мере один подход к квантовой теории гравитации, который, по-видимому, включает элемент невычислимости (Герох, Хартли [1986]).

¹⁵⁸ В.Э.: В оригинале: *strong determinism*.

история вселенной оказывается раз и навсегда определенной в соответствии с некоторой точной математической схемой. Такая концепция могла бы привлечь тех, кто склонен каким-нибудь образом отождествлять мир Платона с физическим миром – ибо застывший навеки мир Платона с его однозначной определенностью не оставляет в этом случае вселенной никаких «альтернативных возможностей»! (Я иногда задаю себе вопрос: мог ли Эйнштейн иметь в виду подобную схему, когда он писал: «Что меня собственно интересует, это следующее: мог ли Бог сотворить мир другим, оставляет ли какую-то свободу требование логической простоты» (письмо Эрнсту Штрауссу; см. Кузнецов [1980], с. 363).)

С одним из вариантов жесткого детерминизма мы сталкиваемся в квантово-механической концепции «множественности миров» (см. главу 6, с. 118 [МОИ № 15](#)). В соответствии с ней, вышеупомянутая точная математическая схема определяла бы не единственную отдельную историю вселенной, а всю совокупность из мириадом мириадом «возможных» историй вселенной. Несмотря на малопривлекательный характер (по крайней мере для меня) такой схемы и множество проблем и несоответствий, которые она в себе несет, мы всё же не имеем права сбрасывать ее со счетов как потенциально возможную.

Мне кажется, что, если принять жесткий детерминизм, но без множественности миров, то математическая схема, которая управляет структурой вселенной, вероятно, должна быть неалгоритмической.¹⁵⁹ Ибо в противном случае можно было бы, в принципе, просчитать свои будущие действия, а затем вдруг «решить» сделать нечто совершенно другое – получаем очевидное противоречие между «свободой воли» и жестким детерминизмом нашей теории.¹⁶⁰ Вводя не-вычислимость, можно избежать этого противоречия, хотя должен признаться, что я не вполне уверен в адекватности решения такого типа и предвижу в будущем гораздо более тонкое описание «реально действующих» (неалгоритмических) правил, которым подчиняется наш мир!

§10.11. Антропный принцип

Насколько важно сознание для вселенной в целом? Могла бы вообще вселенная существовать без населяющих ее сознательных существ? Намеренно ли законы физики задумывались такими, чтобы обеспечить существование сознательной жизни? Является ли наше место во вселенной – как в пространстве, так и во времени – каким-то особенным? Вот вопросы, которые ставит перед нами научная гипотеза, известная как «антропный принцип».

Этот принцип может принимать различные формы (см. Барроу, Типлер [1986]). Наиболее приемлемая из них затрагивает только вопрос пространственно-временного расположения сознательной (или «разумной») жизни во вселенной. Это – «мягкий» антропный принцип. Он может использоваться для объяснения того, почему условия оказались именно такими, что в современную эпоху стала возможна жизнь на Земле. Ответ прост: ведь если бы не было подходящих условий, то мы должны были бы находиться где-то в другом месте, и в иное (благоприятное) время. Этот принцип был очень эффективно использован Брэндоном Картером и Робертом Диком, чтобы разрешить вопрос, остававшийся для физиков загадкой на протяжении многих лет. Вопрос касается существования определенных числовых соотношений между физическими константами (гравитационная постоянная, масса протона, возраст вселенной и т.д.). Интригующим в этих закономерностях был тот факт, что некоторые из них сложились только в настоящую эпоху истории Земли, тем самым указывая на некую – быть может, случайную – исключительность нашего положения во времени (с точностью до нескольких миллионов лет, разумеется!). Впоследствии Картер и Дик нашли этому следующее объяснение: предположили, что эта эпоха совпадает с временем жизни так называемых звезд главной последовательности, одной из которых является наше Солнце. В любую другую эпоху, согласно их утверждениям, нигде и близко не было бы разумной жизни, чтобы измерить те самые физические константы –

¹⁵⁹ Однако в случае пространственно-бесконечной вселенной есть затруднения, поскольку тогда возникает (как и в случае множественных миров) бесконечное количество копий наблюдателя и его непосредственного окружения! Будущее поведение каждой копии может несколько отличаться, и никто не в состоянии сказать наверняка, какой из приблизительных копий самого себя, смоделированных математическим путем, он мог бы на самом деле «быть»!

¹⁶⁰ **В.Э.:** Вообще у Пенроуза такие кувыркания мысли! КАК «просчитать свои будущие действия»?! (Мир действительно жестко детерминирован, природа мышления действительно алгоритмична, но КАК при этом можно «просчитать свои будущие действия» и «затем вдруг решить сделать нечто совершенно другое»? КАК это Пенроуз себе представляет?!)

так что совпадение должно было иметь место просто потому, что разумная жизнь возникла бы только в то время, когда есть подобное совпадение!

«Жесткий» антропоцентрический принцип идет еще дальше. В этом случае мы рассматриваем наше уникальное положение в пространстве-времени не только этой вселенной, но и бесконечного множества других возможных вселенных. Исходя из этого, мы можем сделать ряд предположений относительно того, почему физические константы – или, в более широком смысле, законы физики – как будто специально были спроектированы так, чтобы разумная жизнь вообще могла существовать. Допустим, что константы (или законы) отличались бы от наблюдаемых – тогда мы просто не могли бы появиться в этой вселенной и должны были бы оказаться в некоторой другой! По моему мнению, достоинства «жесткого» антропного принципа несколько сомнительны, и теоретики прибегают к нему всякий раз, когда не находят адекватной теории для объяснения наблюдаемых фактов (в первую очередь, это касается теорий физики частиц, где за отсутствием разумного объяснения массам частиц, предполагается, что если бы их значения отличались от настоящих, то жизнь, вероятнее всего, была бы вообще невозможна, и т.д.). С другой стороны, «мягкий» антропный принцип представляется мне безупречным при условии, что им пользуются крайне осмотрительно.

Взяв на вооружение антропный принцип – либо в «жесткой», либо в «мягкой» формах, – можно попытаться показать, что зарождение сознания было неизбежно благодаря тому факту, что сознательные существа, то есть «мы», должны были присутствовать, чтобы наблюдать этот мир – так что нет необходимости предполагать, как это делал я, будто способность осознавать дает какое-то преимущество в процессе естественного отбора! По моему мнению, этот довод технически корректен, и доказательство, опирающееся на «мягкий» антропный принцип (по крайней мере), могло бы указать на причину, по которой сознание существует в нашем мире независимо от благоволения к нему естественного отбора. С другой стороны, я не могу поверить в то, что антропный принцип и есть та настоящая (или единственная) причина, которая обеспечивает эволюцию сознания. Существует достаточно много самых разнообразных свидетельств, способных утвердить меня во мнении, что сознание на самом деле является сильным преимуществом в процессе естественного отбора, и что, следовательно, совсем необязательно апеллировать к антропному принципу.

§10.12. «Плиточные» структуры и квазикристаллы

Теперь я отойду от масштабных обсуждений последних нескольких разделов и сосредоточусь на обсуждении вопросов, которые, хотя и являются до некоторой степени дискуссионными, всё же гораздо более научны и «осязаемы». Возможно, вначале эти рассуждения покажутся отклонением от темы, однако, их важность для нас станет очевидной уже в следующем разделе.

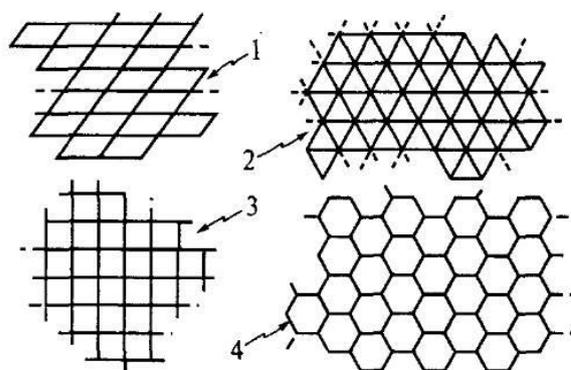


Рис. 10.2. Периодические плиточные замощения с разными типами симметрии (где в каждом случае центр симметрии совпадает с центром плитки): 1) с осью второго порядка; 2) с осью третьего порядка; 3) с осью четвертого порядка; 4) с осью шестого порядка

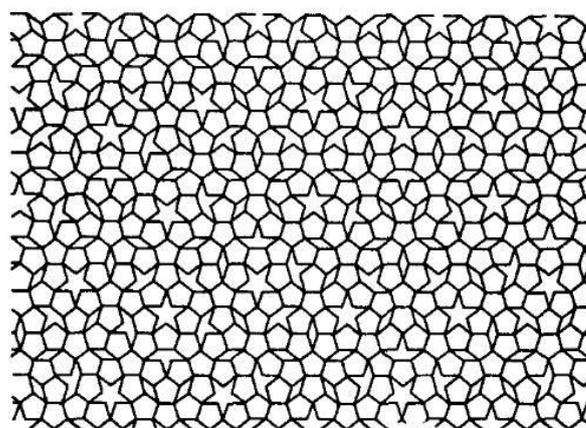


Рис. 10.3. Квазипериодическая плиточная структура (следует заметить, что она образована посредством объединения образцов с рис. 4.11) с кристаллографически «невозможной» квазисимметрией с осью пятого порядка

Вспомним примеры «плиточных» замощений, изображенные на рис. 4.12 (МОИ № 14 с. 151). Эти образцы интересны потому, что они «почти» нарушают общепринятую математическую теорему о кристаллических решетках, которая утверждает, что для кристаллических решеток возможны только симметрии с осью второго, третьего, четвертого и шестого порядков. Под кристаллической решеткой я подразумеваю дискретную систему точек, которая обладает трансляционной симметрией. Это означает, что можно определенным образом перемещать решетку без вращения так, чтобы она переходила сама в себя (иными словами, в результате такого сдвига она не изменяется) – а, значит, у такой решетки будет существовать параллелограмм периодов (см. рис. 4.8 {МОИ № 14 с.148}). Примеры «плиточных» замощений с этими разрешенными теорией типами вращательной симметрии показаны на рис. 10.2. С другой стороны, покрытия на рис. 4.12, как и изображенные на рис. 10.3 (которые, в сущности, представляют собой замощения, образованные соединением решеток, изображенных на рис. 4.11, с. 150 МОИ № 14), почти имеют трансляционную симметрию и почти обладают симметрией вращения с осью пятого порядка, где «почти» означает, что можно найти такие движения решеток (соответственно, трансляционные и вращательные), при которых решетка переходит сама в себя с любой наперед заданной точностью (кроме 100 %-ной). Не стоит углубляться, что точно означает это утверждение. Единственное, что нам здесь важно – это если в нашем распоряжении есть вещество, в котором все атомы расположены в узлах кристаллической решетки с подобной структурой, то оно будет выглядеть как кристалл, обладая при этом запрещенной симметрией с осью пятого порядка!

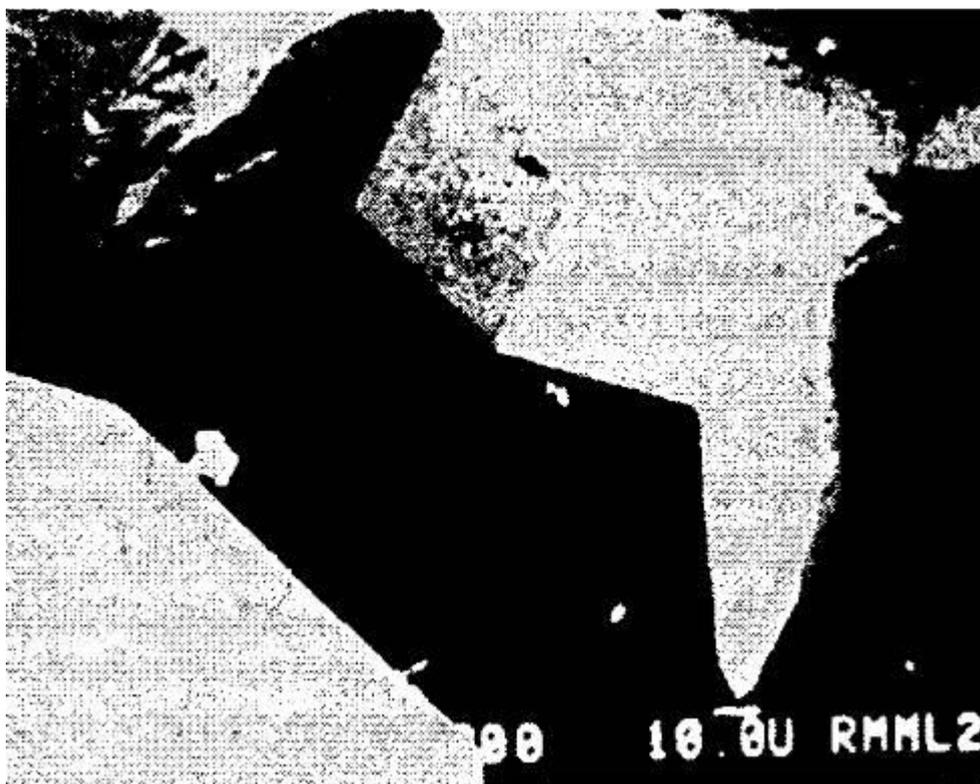


Рис. 10.4. Квазикристалл (сплав Al–Li–Cu) с, казалось бы, невозможной кристаллической симметрией. (Из Гэйл [1987].)

В декабре 1984 года израильский физик Дэни Шехтман, работавший вместе с коллегами в Национальном бюро стандартов в США, в Вашингтоне, объявил об открытии фазы алюминиево-марганцевого сплава, который был похож на кристаллоподобное вещество – теперь называемое квазикристаллом – с осью пятого порядка. На самом деле, у этого квазикристаллического вещества наблюдалась симметрия не только на плоскости, но и в трех измерениях – так что в итоге получалась запрещенная икосаэдральная симметрия (Шехтман и др. [1984]). (Икосаэдральный трехмерный аналог моей плоской «плиточной» структуры с осью пятого порядка был открыт Робертом Амманом в 1975 году; см. Гарднер [1989].) Сплавы Шехтмана образовывали

только крошечные микроскопические квазикристаллы, достигавшие примерно 10^{-3} мм в поперечном сечении, но позднее были найдены другие квазикристаллические вещества, в частности – алюминиево-литиево-медный сплав, у которого икосаэдрально симметричные образования могут вырастать до размеров порядка миллиметра, т.е. становятся вполне различимы невооруженным глазом (рис. 10.4).

Замечательным свойством этих квазикристаллических «плиточных» структур является то, что процесс их составления имеет существенно нелокальный характер. Иными словами: при построении подобного покрытия необходимо время от времени проверять состояние кристаллической решетки на расстоянии многих и многих «атомов» от места сборки, чтобы избежать серьезных ошибок при соединении составных частей. (Это чем-то напоминает то почти «сознательное нащупывание», которое я связывал с естественным отбором.) Наличие такого свойства является одной из причин серьезных разногласий, возникающих сегодня в связи с вопросом о квазикристаллических структурах и их выращивании, так что было бы неразумно пытаться делать окончательные выводы до тех пор, пока не будут разрешены некоторые основополагающие проблемы. Тем не менее, никто не запрещает нам выдвигать предположения; поэтому я рискну высказать здесь свою собственную точку зрения. Во-первых, я полагаю, что некоторые из этих квазикристаллических веществ действительно имеют сложное внутреннее строение, и что расположение атомов в их структуре довольно точно повторяет строение тех плиточных структур, которыми я занимался. Во-вторых, отсюда я делаю (всего лишь гипотетическое) заключение о том, что их образование не может совершаться за счет последовательного добавления атомов, как это происходит в рамках классической картины роста кристаллов – но с необходимостью должна опираться на не-локальные и непременно квантово-механические принципы построения.¹⁶¹

Механизм такого роста я представляю себе следующим образом: вместо присоединения отдельных атомов к постоянно движущейся линии роста (в случае классического роста кристаллов), происходит квантовая линейная суперпозиция большого числа различных альтернативных сочетаний присоединяющихся атомов (путем квантовой операции U). В самом деле, согласно квантовой механике, всё именно так и должно (почти всегда) происходить! В каждый момент времени существует не одна возможная структура, но множество альтернативных расположений атомов в сложной линейной суперпозиции. Некоторые из этих структур вырастают в гораздо более крупные образования, так что в определенный момент различия между гравитационными полями альтернативных структур превзойдут «одногравитонный предел» (или его более подходящий в данном случае аналог; см. главу 8, с. [298](#)). На этой стадии одна из них – или, скорее, это снова будет суперпозиция, но уже в несколько урезанном виде – выделится в качестве истинной структуры (квантовая операция R). В этот процесс роста, сопровождающийся последовательным отказом от наименее «значимых» на каждом этапе альтернатив, будут вовлекаться всё большее и большее количество исходного вещества, пока наконец не сформируется достаточно крупный квазикристалл.

Обычно, когда природа ищет кристаллическую конфигурацию, из всех возможных она выбирает ту, которая характеризуется наименьшим уровнем энергии (считая фоновую температуру нулевой). Нечто аналогичное, по-моему, должно происходить и в процессе роста кристаллов, с той только разницей, что такое состояние с наименьшей энергией гораздо труднее обнаружить, а «наилучшее» расположение атомов не может быть получено просто последовательным добавлением каждый раз одного атома в надежде на то, что индивидуальному атому для этого будет достаточно решить свою собственную задачу минимизации. Вместо этого нам предстоит решать эту же задачу для всей совокупности атомов, а значит, потребуются их совместное усилие. Такое взаимодействие, в моем представлении, должно иметь квантово-механическую природу; и достигаться оно должно при помощи множества различных комбинаций атомных структур, которые одновременно «проверяются» в линейной суперпозиции (примерно так же, как это, вероятно, происходит в квантовом компьютере, упомянутом в конце главы 9). Условием для выбора подходящего (хотя, возможно, не лучшего) решения задачи минимизации должно быть выполнение «одногравитонного критерия» (или приемлемой в

¹⁶¹ Даже в ходе реального роста некоторых кристаллов могут возникать подобные проблемы – например, там, где исходная клетка кристаллической решетки содержит несколько сот атомов (случай так называемых «фаз Фрэнк-Каспера»). С другой стороны, следует упомянуть, что теоретический «почти локальный» (хотя всё же нелокальный) процесс роста квазикристаллов с осью пятого порядка был предложен Онодой, Стайнхардтом, Ди Винченцо и Соколаром [1988].

данном конкретном случае альтернативы), что, предположительно, имеет место только при соответствующих физических условиях.

§10.13. Возможная связь с пластичностью мозга

Позвольте мне продолжить эти рассуждения и спросить, могут ли они иметь непосредственное отношение к процессам, происходящим в мозге. Насколько я могу судить, наиболее правдоподобно будет выглядеть связь с пластичностью мозга. Давайте вспомним, что мозг, на самом деле, похож скорее не на обычный компьютер, а на компьютер, который постоянно изменяется. За эти изменения, по-видимому, отвечают процессы активации или деактивации синапсов, которые, в свою очередь, происходят вследствие роста или сокращения дендритных шипиков (см. главу 9, с. 319; рис. 9.15). Здесь я наберусь смелости и выскажу предположение о том, что этот рост или сокращение теоретически могут подчиняться принципам наподобие тех, которые управляют квазикристаллическим ростом. При этом «тестируется» не одно из возможных альтернативных расположений, а сложная линейная суперпозиция большого числа таких расположений. До тех пор, пока эффект каждой из этих альтернатив не превышает «одногравитонного уровня» (или некоторого его аналога), они будут существовать одновременно (более того: должны сосуществовать, коль скоро справедливы законы U-квантовой механики). Пока не превзойден одногравитонный уровень, могут начать одновременно выполняться суперпозиции разных вычислений, что вполне соответствует принципам действия квантового компьютера. Однако, вряд ли такие суперпозиции смогут существовать достаточно долго, поскольку нервные сигналы создают электрические поля, которые должны вносить значительные возмущения в окружающую среду (хотя их миелиновые оболочки являются своего рода изоляторами). Давайте допустим, что такие суперпозиции расчетов все-таки способны существовать в течение определенного минимального времени, которое необходимо для получения какого-нибудь действительно важного результата, т.е. что вплоть до этого момента «одногравитонный уровень» (или что-то подобное) в системе не достигается. Успешное завершение такого расчета будет в нашем случае той самой «целью», которая представляет собой аналог более простой «цели» минимизации энергии при квазикристаллическом росте. Таким образом, достижение этой цели будет подобно успешному росту квазикристалла!

В этих рассуждениях, конечно, много неясного и спорного, но я верю, что они описывают принципиально возможную аналогию. Рост кристалла или квазикристалла существенно зависит от концентрации нужных атомов и ионов в окрестности точек роста. Точно также можно предположить, что процессы роста или сокращения семейств дендритных шипиков, в свою очередь, находятся в прямой зависимости от степени концентрации вокруг них различных нейромедиаторов (например, таких, чья концентрация зависит от испытываемых эмоций). Какие бы расположения атомов в конце концов ни были выделены в качестве реальной структуры получившегося квазикристалла – каждый раз этому должно предшествовать решение задачи минимизации энергии. Тогда я осмелюсь по аналогии предположить, что конкретная мысль, которая возникает на поверхности мозга, тоже возникает в результате решения некоторой задачи, только на сей раз не просто задачи минимизации энергии. Эта задача будет гораздо более сложной, требующей учета желаний и намерений, которые, в свою очередь, напрямую связаны с вычислительными свойствами и функциями мозга. Я полагаю, что сознательное мышление тесно связано с отсевом тех возможных альтернатив, которые прежде входили в линейную суперпозицию. Всё это имеет непосредственное отношение к неизвестным (пока!) физическим процессам, которые должны управлять пограничной областью между U и R, и которые, я уверен, будут описаны правильной теорией квантовой гравитации – ПКТГ, которую еще предстоит открыть!

Могло бы такое физическое действие быть по своей природе неалгоритмическим? Вспомним, что в общем случае задача о плиточных покрытиях, описанная в главе 4, не имеет алгоритмического решения. Можно предположить, что сходная задача в приложении к атомным структурам имеет такое же свойство «неалгоритмичности». Если эти задачи могут в принципе быть «решены» средствами, о которых я говорю, то тогда есть вероятность, что у рассматриваемого мной типа умственной деятельности действительно существует неалгоритмическая компонента. Однако для того, чтобы это было так, нам необходима определенная неалгоритмичность и в ПКТГ. Конечно, мы сейчас слишком вольно обращаемся с гипотезами – но всё же приведенные выше аргументы подсказывают мне, что здесь определено должно быть нечто, имеющее неалгоритмический характер.

Как быстро происходят подобные изменения в мозговых связях? На этот счет у нейрофизиологов нет единого мнения, однако, коль скоро устойчивые отпечатки в памяти могут формироваться за доли секунды, разумно предположить, что указанные изменения происходят примерно за то же время. Чтобы мои собственные идеи получили право на существование, требуется как раз примерно такая быстрота.

§10.14. Временные задержки в реакции сознания

Теперь я хочу рассказать о двух экспериментах (описанных в работе Харта [1982]), которые проводились на добровольцах и которые, как мне кажется, имеют прямое отношение к нашим рассуждениям. В ходе этих экспериментов изучалось характерное время, которое требуется сознанию для того, чтобы осуществить определенное действие и отреагировать на внешнее воздействие. Первый из них, таким образом, изучал активную деятельность сознания, а второй – пассивную. Связанные воедино, результаты этих экспериментов представляются еще более поразительными.



Рис. 10.5. Эксперимент Корнхубера. Решение согнуть палец принимается за начало отсчета, однако предшествующий сигнал (усредненный по многим опытам) свидетельствует о том, что сгибание пальца «предвиделось»

Первый эксперимент был проведен Корнхубером и его коллегами в Германии, в 1976 году (Дике и др. [1976]). Ряд испытуемых согласились на запись электрических сигналов, снятых с определенной точки поверхности головы (т.е. на электроэнцефалограмму, или ЭЭГ). Испытуемые должны были внезапно согнуть по своему усмотрению указательный палец. Идея заключалась в том, что на электроэнцефалограмме окажутся зафиксированы некие признаки мозговой активности, которая возникает в голове в момент принятия сознательного решения согнуть палец. Чтобы получить значимый сигнал с дорожек ЭЭГ, нужно было усреднить его по нескольким испытаниям, и результирующий сигнал при этом получался не очень «показательным». Но вот что оказалось примечательным, так это отмеченное на ленте постепенное нарастание электрического потенциала в течение целой секунды – а то и всех полутора – происходящее до того момента, как палец действительно сгибался. Это, по-видимому, означает, что сознательный процесс принятия решения занимает не менее секунды – и только затем следует его исполнение! Это очень сильно отличается по времени от куда более короткого промежутка времени реакции на внешнее раздражение, если способ реакции задан заранее (например, если испытуемый должен согнуть палец не «по собственному хотению», а исключительно в ответ на вспышку светового сигнала). В этом случае нормальной является задержка реакции длительностью около одной пятой секунды, что примерно в пять раз быстрее, чем «волевое действие», отраженное в экспериментальных данных Корнхубера (рис. 10.5)¹⁶².

¹⁶² В.Э.: Этот эксперимент я уже комментировал по тому виду, как он был Пенроузом описан в {PENRS4 = МОИ № 18, стр.119}. Здесь эксперимент уже выглядит несколько иначе и вообще у Пенроуза он в целом описан довольно путанно. Что, например, означают слова в подписи к Рис. 10.5: «Решение согнуть палец принимается за начало отсчета»? Это момент действительного согнутия пальца? Тогда он не совпадает с моментом принятия решения. Если нет, то как Корнхубер и далее Пенроуз знают, когда именно в мозге принималось решение о согнутии пальца? В добавок к комментарию {PENRS4 = МОИ № 18, стр.119, сноска 105} и используя введенные там обозначения, можно сказать следующее. Когда

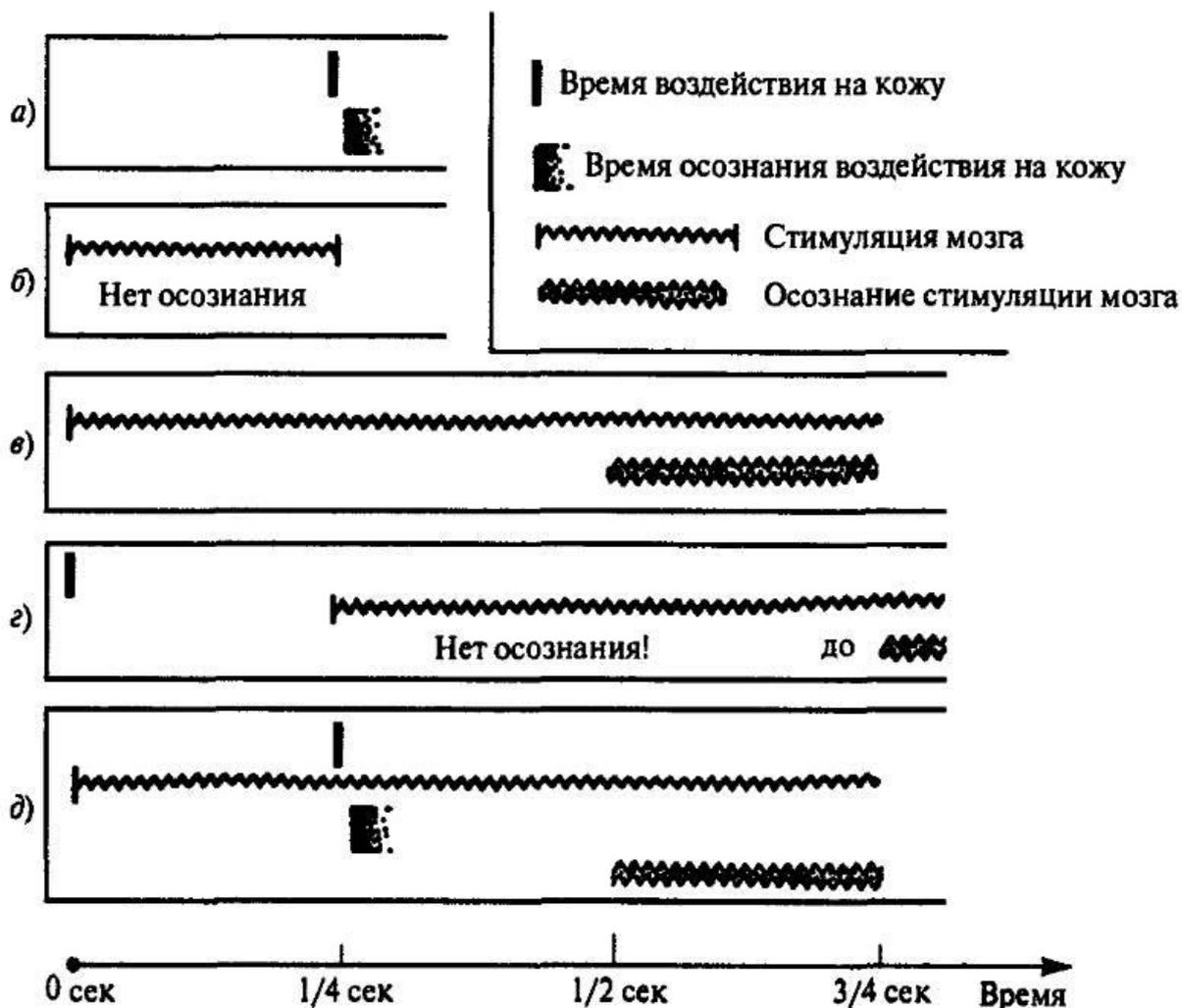


Рис. 10.6. Эксперимент Либета: а) воздействие на кожу, «как кажется», осознается практически без задержки; б) стимуляция коры, длящаяся меньше полсекунды, не осознается; в) стимуляция коры продолжительностью более, чем полсекунды, осознается примерно через полсекунды; г) такая стимуляция коры может приводить к «обратной маскировке» более раннего воздействия на кожу, показывая, что осознание этого воздействия, на самом деле, еще не имело места к моменту стимуляции коры; д) если стимуляция кожи произведена вскоре после такого воздействия на кору, то тогда реакция на стимуляцию кожи «сдвигается назад», хотя с реакцией на стимуляцию соматосенсорной коры этого не происходит

Во втором эксперименте Бенджамин Либет из Калифорнийского университета, в сотрудничестве с Бертрамом Фейнштейном из Нейрологического института в Сан-Франциско (Либет и др. [1979]) проводили опыты с добровольцами, которым по независимым причинам предстояла хирургическая операция на мозге и которые соглашались на имплантацию электродов в определенные точки соматосенсорной коры своего головного мозга. Эксперимент Либета показал, что между стимуляцией кожи этих пациентов и ее осознанием проходило примерно полсекунды, несмотря на то, что сам мозг должен был получить соответствующий сигнал примерно через одну сотую долю секунды; а заранее запрограммированный «рефлексивный»

программа А (сгибания пальца) готова и ждет только сигнала для запуска (например, вспышки света), запуск и выполнение ее, согласно рассказу Пенроуза, происходит за 1/5 долю секунды. Программа В (запуска программы А по «свободной воле») работает значительно дольше. Однако – почему? Но подумаем, каким может быть ее алгоритм. Как правило, тот субъект, который ее составляет (т.е. испытуемый в эксперименте Корнхубера) не будет предусматривать в программе В немедленный запуск программы А (иначе где же тут «свобода воли?»). Значит, В должна сначала некоторое время поциклить, ничего не делая, а потом по какому-то признаку запустить А. Вот, В и циклит полторы секунды или даже больше, а потом ищет признак, по которому можно было бы, наконец, запустить А (как правило, таким признаком будет ее решение «я уже достаточно долго ждала!»). Как видите, работа программы В «свободной воли» довольно сложна; уж гораздо труднее, чем работа программы С, которой надо просто запустить программу А в ответ на вспышку света.

ответ на этот раздражитель (см. выше) мог быть выработан мозгом примерно через одну десятую секунды (рис. 10.6).¹⁶³ Более того: несмотря на такое «запоздалое» осознание стимулирующего воздействия, субъективное впечатление, возникавшее у пациентов, позволяло им утверждать, что не было вообще никакой задержки! (Некоторые эксперименты Либета предусматривали стимулирование зрительного бугра, см. с. 307.¹⁶⁴ Результат был тот же, что и при воздействии на сенсорную кору головного мозга.)

Напомним, что соматосенсорная кора – это область головного мозга, куда поступают сигналы от органов чувств. Так, электрическая стимуляция зоны соматосенсорной коры, соответствующей некоторому определенному участку поверхности кожи, воспринимается испытуемым в точности так, как если бы что-то действительно коснулось его кожи в этом месте.¹⁶⁵ Однако оказалось, что если эта электрическая стимуляция длится менее, чем примерно полсекунды, то испытуемый не получает никакого ощущения вообще.¹⁶⁶ В противоположность этому, прямая стимуляция точки на самой поверхности кожи может ощущаться даже в том случае, когда она мгновенна.¹⁶⁷

Теперь предположим, что сначала тронули кожу, а затем подвергли электрической стимуляции соответствующую точку в соматосенсорной коре. Что чувствует пациент? Если электростимуляция производится примерно через четверть секунды после касания кожи, тогда касание кожи не ощущается вообще!¹⁶⁸ Этот эффект получил название обратной маскировки. Каким-то образом стимулирование коры мозга препятствует осознанию обычного ощущения от касания кожи. Сознательное восприятие может быть предотвращено («замаскировано») более поздним событием, если это событие происходит не позднее, чем через полсекунды. Это говорит о том, что сознательное восприятие такого воздействия проявляется примерно через полсекунды после самого воздействия!¹⁶⁹

Однако, по всей видимости, испытуемые не осознавали столь долгой задержки своего восприятия.¹⁷⁰ Найти разумное объяснение этому удивительному открытию можно было бы, предположив, например, что «время» всех наших «восприятий» действительно отличается примерно на полсекунды от «реального времени» – как будто наши внутренние часы просто «неверны» и отстают на полсекунды или около того. Время восприятия некоторого события в этом случае должно всегда отстоять на полсекунды от того момента, когда указанное событие произошло. Это дало бы возможность представить последовательную, хотя и неудовлетворительно замедленную картину нашего чувственного восприятия.

Возможно, что-то подобное происходило во второй части эксперимента Либета, где он вначале стимулировал кору мозга, продолжая эту стимуляцию гораздо дольше, чем полсекунды –

¹⁶³ В.Э.: Эту серию экспериментов трудно комментировать, потому что они недостаточно хорошо описаны. КАК, например, фиксировался факт, что пациент «осознал» событие (каким образом установили, что прошло именно полсекунды от стимуляции кожи до «осознания» и т.п.)? Вообще нормальный ход «осознания» при касании к коже состоит из таких основных этапов: 1) передача сигналов от кожи в кору головного мозга; 2) обработка этих сигналов в коре; 3) запись результатов обработки в память. Только когда завершен этап (3), можно с уверенностью говорить, что пациент «осознал» событие, так как он после этого будет способен об этом событии рассказывать, оценивать его и т.п. В экспериментах Либета в этот нормальный ход дела вмешивалась «стимуляция мозга», т.е. посторонние сигналы, в общем-то – сбивающие процесс с нормального русла.

¹⁶⁴ В.Э.: Эта страница относится к концу §9.1 выше в этом томе, но «зрительный бугор» там не упоминается.

¹⁶⁵ В.Э.: Но ниже Пенроуз скажет, что пациенты различали, когда стимулировался их мозг и когда было действительное прикосновение к коже. Значит, стимуляция воспринимается всё же не «в точности так, как если бы что-то действительно коснулось его кожи».

¹⁶⁶ В.Э.: Значит, примерно полсекунды мозгу нужно, чтобы переориентироваться с обработки нормальных сигналов от кожи на обработку этих необычных сигналов «стимуляции».

¹⁶⁷ В.Э.: Это показывает, что «стимуляция соматосенсорной коры» всё же для мозга не то же самое, что настоящие сигналы от кожи.

¹⁶⁸ В.Э.: Своей «стимуляцией» сбили нормальные сигналы от кожи и расстроили их обработку.

¹⁶⁹ В.Э.: Может именно этим путем и установили ту полсекунду, о которой я спрашивал выше? В таком случае требуется полсекунды, чтобы пройти все три этапа «осознания» и чтобы информация о событии записалась в память.

¹⁷⁰ В.Э.: Естественно – а как же они могут осознавать это? Это ж должна тогда была быть в мозговых программах специальная корректировка, учитывающая время отработки самих мозговых программ! Как (и зачем?) Естественный отбор мог такую корректировку встроить в своих творениях?

и касался кожи во время этой стимуляции, но ранее, чем через полсекунды после ее начала. И стимуляция коры, и касание кожи воспринимались раздельно, так что пациенту было ясно, какой именно стимул он воспринимал. Однако, когда его спрашивали, какой стимул он ощутил первым, он обычно отвечал, что это было касание кожи,¹⁷¹ тогда как, на самом деле, стимуляция коры всегда предшествовало ему! Таким образом, испытуемый и вправду сдвигал свое восприятие прикосновения к коже назад во времени примерно на полсекунды (см. рис. 10.6). Однако это представляется не просто глобальной «ошибкой» внутреннего ощущения времени, но более тонкой структурной перестройкой временной шкалы восприятия событий. Поскольку в случае стимуляции коры (учитывая, что она в действительности воспринимается не позднее, чем через полсекунды после ее начала), такая задержка не наблюдается.¹⁷²

Опираясь на данные первого из вышеописанных экспериментов, мы, по всей видимости, можем сделать вывод о том, что сознательному действию необходимо примерно около секунды или полутора секунд на то, чтобы быть приведенным в исполнение; а в соответствии со вторым экспериментом – что осознание внешнего события, по-видимому, не происходит раньше, чем через полсекунды после момента события. Представим себе, что происходит, когда человек реагирует на некоторое неожиданное внешнее событие. Предположим также, что ответ требует моментального сознательного действия. Если принять в расчет открытие Либета, то должно пройти полсекунды прежде, чем сознание «включится»; и после этого, как следует из опытов Корнхубера, потребуется еще секунда, а то и более, прежде чем человек «осознанно» отреагирует на это событие. Таким образом, весь процесс – от сенсорного восприятия до моторного отклика – занимает примерно две секунды! Очевидный вывод из этих двух экспериментов, если рассматривать их вместе, напрашивается сам собой: сознание вообще не может быть задействовано там, где ответная реакция на внешнее событие должна занимать не более пары секунд!

§10.15. Странная роль времени в сознательном восприятии

Можно ли доверять результатам этих экспериментов? Если это так, мы с необходимостью приходим к выводу, что мы действуем как «автоматы», когда, чтобы изменить реакцию, требуется менее одной или двух секунд. Становится несомненным, что сознание, по сравнению с другими механизмами нервной системы, работает довольно медленно. Я и сам замечал, как иной раз моя рука продолжала захлопывать дверцу машины еще несколько мгновений спустя после того, как я заметил, что в машине осталось что-то нужное, и как сознательный приказ остановить движение руки патологически не успевает за ним – так медленно всё это происходит. Но требует ли это и впрямь целую секунду, а то и две? Такой длительный промежуток времени кажется мне невероятным. Разумеется, мое сознательное восприятие забытой вещи в машине вместе с моим воображаемым «свободно-волевым» приказом остановить руку вполне могли случиться уже после обоих этих событий. Возможно, сознание – это просто наблюдатель, который воспринимает происходящее не иначе, как повторное исполнения всего спектакля. Аналогично, опираясь на результаты вышеописанных опытов, можно считать, что какая бы роль не отводилась сознанию, например, при отбивании теннисного мяча – не говоря уже об игре в пинг-понг – у него просто не хватило бы времени на ее исполнение! Несомненно, что у опытных игроков все наиболее важные приемы игры наиболее подробно образом запрограммированы на уровне мозжечка. Но вот чтобы сознание не играло никакой роли в принятии решения относительно того, какой удар должен быть выполнен в конкретный момент – в это я могу поверить с большим трудом. Конечно, многое заложено в интуитивном угадывании следующего движения соперника, и наличии множества заранее просчитанных и приготовленных вариантов ответа на каждое из них – но такой сценарий, при котором сознание вообще не участвует в формировании ответной реакции, кажется мне неэффективным и маловероятным.¹⁷³ Эти возражения были бы еще более уместны в случае обычного разговора. Здесь также собеседники могут частично догадываться, что скажет другой, но в ответах оппонента должно достаточно часто присутствовать что-то

¹⁷¹ В.Э.: Ну понятно: мозг был настроен на обработку сигналов от кожи, поэтому не делал для них никакой предварительной подготовки, прошел обычный путь обработки и успел записать в память информацию о них первой; к обработке сигналов же «стимуляции» мозг готов не был, ему пришлось полсекунды переориентироваться на них, поэтому информацию о них в память записал позже.

¹⁷² В.Э.: Ошибочная интерпретация фактов.

¹⁷³ В.Э.: Как путанно и бесперспективно всё получается, если рассуждать в категориях «сознания», и как всё просто и ясно, если представить себе ансамбль взаимодействующих мозговых программ!

неожиданное, иначе беседа просто потеряла бы смысл! И вряд ли кто будет спорить, что в обычном разговоре на то, чтобы ответить собеседнику, требуется куда меньше, чем две секунды времени!

Похоже, есть основания сомневаться, что в экспериментах Корнхубера сознанию «действительно» нужно полторы секунды для выполнения задуманного действия. Хотя усредненная по всем записям ЭЭГ задержка между возникновением намерения согнуть палец и непосредственным действием дает как раз такую величину, тем не менее может оказаться, что только в некоторых случаях намерение проявлялось столь рано – причем часто не приводило в действительности к сгибанию пальца; тогда как во многих других случаях сознание приводило палец в движение гораздо быстрее.¹⁷⁴ (На самом деле, более поздние эксперименты, см. Либет [1987, 1989], позволяют сделать иные, чем у Корнхубера, выводы. Однако загадки, связанные с временными аспектами сознания, так и остались нерешенными.)

Давайте представим себе на минуту, что результаты обоих экспериментов справедливы. Тогда с необходимостью следует признаться в том, что мы могли до сих пор идти по глубоко ошибочному пути, используя при изучении работы сознания обычные физические правила для времени! В самом деле, есть нечто весьма странное в том, как время входит в наше сознательное восприятие, и я думаю, что для интерпретации этого феномена в рамках наших традиционных представлений может понадобиться совсем иная концепция. Сознание – это, в конце концов, единственное известное нам явление, согласно которому время «течет»! Способ рассмотрения времени в современной физике не отличается по существу от способа рассмотрения пространства¹⁷⁵; так что, на самом деле, «время» в физических процессах не «течет» – вместо этого рассматривается статичное «пространство-время», где фиксируются события, происходящие в нашей вселенной¹⁷⁶! Однако, мы воспринимаем время текущим (см. главу 7). Я полагаю, что и здесь присутствует некая иллюзия, и что, на самом деле, время нашего восприятия не течет линейно в одном направлении (что бы это ни значило!). «Кажущуюся» временную упорядоченность воспринимаемых событий мы, по-моему, привносим в наши ощущения сами¹⁷⁷ для того, чтобы как-то согласовать их с единым для окружающего нас физического мира поступательным движением во времени.

Некоторые могли бы усмотреть в подобных замечаниях изрядную долю беспочвенного «философствования» – и их обвинения, конечно же, были бы справедливы. Как можно «ошибаться» относительно того, что ты действительно воспринимаешь? Ясно, что ощущения – это (по определению) то, что непосредственно осознается; поэтому они просто не могут быть «неправильными». Тем не менее, я думаю, что, на самом деле, мы все-таки «ошибаемся», когда воспринимаем время как движущееся вперед – несмотря на неадекватность доступных мне языковых средств для описание моего убеждения; и что существуют свидетельства, подтверждающие справедливость такой гипотезы (см. Черчланд [1984]).

Исключительно ярким примером (см. с. 342) является способность Моцарта «охватывать единым взглядом» всю музыкальную композицию, даже когда «она бывает довольно длинной». Исходя из описания самого Моцарта, можно предположить, что этот «взгляд» охватывал все существенные стороны произведения – и что, тем не менее, интервал времени (в обычном физическом смысле), необходимый для подобного сознательного восприятия композиции, оказывался заведомо короче того, который потребовался бы для ее исполнения.¹⁷⁸ Кто-то может

¹⁷⁴ В.Э.: Эти эксперименты фиксировали в основном работу вышеупомянутой программы В, а это программа главным образом – ожидания.

¹⁷⁵ Эта симметрия между временем и пространством становится еще более удивительной в случае двумерного пространства-времени. Уравнения двумерной физики пространства-времени оказываются существенно симметричны относительно взаимозамены координат пространства и времени – однако, в двумерной физике никто не стал бы требовать от пространства, чтобы оно «текло». Трудно поверить, что «реальное течение» времени в нашем восприятии окружающего мира обусловлено разве что асимметрией между числом измерений пространства (3) и измерений времени (1), характерной для нашего пространства-времени.

¹⁷⁶ В.Э.: Всё же физика тоже не может обойтись без чего-то, соответствующего «течению времени». Уравнения Эйнштейна и др. не показатель. Это просто математические конструкции, изоморфные реальности (но соответствующие ей только до некоторой степени).

¹⁷⁷ В.Э.: Субъективное, «человеческое» время – это порядок (последовательность) записи кадров в память.

¹⁷⁸ В.Э.: Пример с Моцартом в общем-то не имеет никакого отношения к восприятию времени. Моцарт «видел» (или «слышал») одновременно всё дерево своей мозговой программы (структуры данных),

считать, что всё воспринималось совсем по-другому, и Моцарт «видел» свое будущее произведение в форме пространственно-распределенных образов или, допустим, готовой музыкальной партитуры. Но и для внимательного прочтения партитуры таких размеров необходимо довольно много времени – и, к тому же, я сильно сомневаюсь в том, что исходное восприятие Моцартом своей композиции могло принимать указанную форму (иначе он бы наверняка об этом сказал!). Образное восприятие кажется более вероятным; однако, (как и в большинстве случаев визуализации в математике, с которыми я лично сталкивался) я сильно сомневаюсь, что в сознании Моцарта мог совершаться прямой перевод музыки на язык зрительных образов. Мне кажется, что интерпретировать «взгляд» Моцарта правильнее всего с чисто музыкальной точки зрения, с четким временным распределением, которое обычно возникает при прослушивании (или исполнении) музыкального произведения. Ведь музыка состоит из звуков, воспроизведение которых требует определенного времени – времени, которое, со слов самого Моцарта, «...*позволяет мое воображение*».

Послушайте четырехчастную фугу из последнего раздела *Искусства фуги* И.С. Баха. Знатоки Баха не могут не переживать стресс, когда музыка останавливается после десяти минут звучания, сразу же после вступления третьей темы. Кажется, что композиция каким-то образом всё еще существует «там, вовне» – просто сейчас она внезапно замерла. Бах покинул этот мир, не успев закончить свою работу и не оставив нам ни единого намека на то, как он намеревался продолжить ее. Однако, она начинается с такой уверенностью и бесспорным мастерством, что невозможно представить себе, чтобы у Баха в то время не было ясного представления о всех ключевых моментах своего будущего произведения. Нужно ли ему было мысленно исполнять композицию в обычном темпе, каждый раз «проигрывая» ее заново по мере возникновения новых идей и различных поправок? Я не могу себе представить, что это происходило таким образом. Как и Моцарт, он должен был представлять себе работу целиком, связывая в голове воедино как ее сложнейшую структуру, так и многочисленные замысловатые украшения – всё то, без чего не мыслимо создание фуг. При том, что и временные характеристики музыки важны никак не меньше. Ибо как музыка может оставаться музыкой, если она не исполняется «в реальном времени»?

Рождение замысла романа или истории можно было бы рассматривать как аналогичный (хотя, на первый взгляд, и менее непостижимый) процесс. Охватывая внутренним взором всю жизнь персонажа, необходимо продумывать различные события, которые автор, как кажется, просто не сможет вставить в сюжет, не проиграв предварительно в «реальном времени». Однако это далеко не всегда необходимо. Даже сохранившиеся в памяти впечатления от лично пережитых событий оказываются настолько «сжатыми», что их можно мысленно «пережить» вновь за доли секунды!

Видимо, существует определенное (и при том значительное) сходство между сочинением музыки и математическим мышлением.¹⁷⁹ Многие, вероятно, уверены, что математическое доказательство строится в виде цепочки последовательных утверждений, где каждый шаг вытекает из предыдущего. Но, на самом деле, замысел доказательства едва ли когда возникает подобным образом. Общее представление и лишь интуитивно понятное концептуальное содержание – вот что в действительности необходимо для построения математического доказательства; и это едва ли можно соотнести с тем временем, которое потребовалось бы в дальнейшем для его полного последовательного изложения.

Предположим далее, что мы допускаем отсутствие соответствия между внутренней шкалой времени нашего сознания – с одной стороны, и течением времени в окружающем нас физическом мире – с другой. Не рискуем ли мы при этом столкнуться с парадоксом? Предположим к тому же, что в природе наших сознательных действий заложено что-то неуловимо телеологическое, позволяющее будущим впечатлениям от действия в прошлом оказывать влияние на само это действие. Ясно, что это могло бы привести нас к противоречию, подобному парадоксальным следствиям из предположения о возможности распространения сигнала со скоростью, превышающей скорость света, которое мы рассматривали – и совершенно обоснованно отвергли – в конце главы 5 (см. с. 55 [МОИ № 15](#)). Я считаю, что никакого парадокса здесь быть не должно

кодирующее его музыкальную композицию (а не «пространственно-распределенные образы» или «готовую музыкальную партитуру»).

¹⁷⁹ В.Э.: Разумеется! Оба процесса представляют собой в первую очередь самопрограммирование (хотя конечный видимый результат – симфония или теорема – сами по себе не программы).

– как это непосредственно следует из моих утверждений, касающихся самого понятия сознания и его возможностей. Если вы помните, я выдвигал предположение о том, что сознание, в сущности, есть способность «видеть» непреложную истину; и что оно может представлять собой своеобразный контакт с миром идеальных математических идей Платона. Напомню, что мир Платона сам по себе имеет вневременную природу. Восприятие истины Платона не несет подлинной информации – имея в виду технический аспект понятия «информации», связанный с возможностью ее передачи; так что, на самом деле, не будет никакого противоречия даже в том случае, если бы подобное сознательное восприятие распространялось обратно во времени!

Но даже если мы согласимся с тем, что сознание связано со временем таким причудливым образом – и что благодаря сознанию происходит своего рода контакт между нашим физическим миром и определенной вневременной сущностью – как тогда быть с физически обусловленным и упорядоченным во времени действием материального мозга? И снова мы, по-видимому, вынуждены отводить сознанию роль простого «зрителя» – в противном случае нам придется так или иначе подтасовывать физические законы, чтобы не нарушить естественное развитие событий. Однако я всё же отстаиваю активную роль сознания, которая дает ему преимущество в ходе естественного отбора. Ответ на эту дилемму, как мне кажется, может заключаться в том странном способе, как должна действовать ПКТГ, разрешая конфликт между двумя квантово-механическими процедурами U и R (см. с. 286 {с.42 здесь}, 297 {с.52 здесь}).

Вспомним о проблемах со временем, которые возникали в результате наших попыток согласовать R-процедуру со (специальной) теорией относительности (главы 6, 8, с. 232 = 110 МОИ № 15, 301 {с.56 здесь}). При описании этой процедуры в обычных пространственно-временных терминах она, кажется, вообще теряет всякий смысл. Рассмотрим квантовое состояние пары частиц. Как правило, такое состояние должно быть коррелированным (т.е. описываться не простым выражением $|\psi\rangle|\chi\rangle$, где каждый из сомножителей $|\psi\rangle$ и $|\chi\rangle$ описывает только одну частицу, но представляет собой сумму вида $|\psi\rangle|\chi\rangle + |\alpha\rangle|\beta\rangle + \dots + |\zeta\rangle|\sigma\rangle$). Тогда наблюдение за одной из частиц окажет на другую нелокальное воздействие, которое не может быть описано в обычных пространственно-временных терминах, согласующихся со специальной теорией относительности (ЭПР; эффект Эйнштейна–Подольского–Розена). Подобные нелокальные эффекты должны неявным образом присутствовать в предложенной мною «квазикристаллической» аналогии для роста и сокращения дендритов.

Под «наблюдением» я здесь понимаю усиление действия каждой наблюдаемой частицы до тех пор, пока не достигается некий уровень, соответствующий, например, «одногравитонному критерию» в рамках ПКТГ. В более «стандартной» терминологии «наблюдение» – это крайне нечетко определенное понятие; и, согласитесь, трудно себе представить, как можно начинать теоретические исследования в области квантово-механического описания работы мозга, если приходится считаться с необходимостью рассматривать мозг в качестве объекта, который постоянно «наблюдает сам себя»!

Моя собственная идея заключается в том, что концепция ПКТГ, напротив, должна дать нам объективную физическую теорию редукции вектора состояния (R-процедуры), которая никак не будет зависеть от нашего взгляда на сознание. У нас пока нет такой теории, но, по крайней мере, можно быть уверенным, что ее создатели не будут спотыкаться о фундаментальные вопросы, связанные с точным определением сознания!

Я полагаю, что именно после открытия теории ПКТГ у нас в конце концов появится возможность описания с ее помощью феномена сознания. Вообще говоря, я склонен считать, что априори предполагаемые свойства ПКТГ окажутся на самом деле еще менее удобными для их адекватного описания в обычных пространственно-временных терминах, чем упомянутые выше загадочные явления ЭПР в системе двух частиц. Если я прав, и сознание напрямую связано с будущей теорией ПКТГ, то лишь с большой натяжкой нам удастся применить к нему наши привычные пространственно-временные описания.

§10.16. Заключение: точка зрения ребенка

В этой книге я привел множество доводов, призванных показать несостоятельность точки зрения – как выясняется, одной из наиболее распространенных в современной философии – согласно которой наше мышление в основе своей идентично действию очень сложного компьютера. Когда в явном виде делается предположение о том, что простое выполнение алгоритма может привести к возникновению осознанного восприятия, то используется термином

логия концепции «сильного ИИ» Серла. В другие термины (такие, как «функционализм») подчас вкладывают более широкий смысл.

Некоторые читатели, возможно, с самого начала считали «сторонников сильного ИИ» законченной деревенщиной¹⁸⁰! Разве не «очевидно», что обычные вычисления не могут вызвать удовольствие или причинить боль; что они не способны понимать поэзию, наслаждаться красотой вечернего неба или магией звуков; что они не могут надеяться, любить или отчаиваться; что у них не может возникнуть настоящей независимой цели существования? Однако наука, кажется, заставляет нас поверить в то, что все мы – просто ничтожные частички мира, полностью управляемого (пусть даже только вероятностно) очень точными математическими законами. Равно как и наш мозг, который, казалось бы, контролирует все наши действия, но, в свою очередь, точно так же подчиняется тем же самым законам. Возникает ощущение, что вся эта скоординированная физическая активность является, на самом деле, ничем иным, как выполнением некоторого всеобъемлющего (возможно, по своей природе вероятностного) вычислительного процесса – и, следовательно, наш мозг и наш разум нужно рассматривать исключительно в терминах такого вычисления. Может быть, когда степень сложности подобного алгоритма становится чрезвычайно высокой, он приобретает те поэтические или субъективные качества, которые мы привыкли ассоциировать с понятием «разум». Однако трудно избавиться от навязчивого ощущения, что в такой картине всегда будет чего-то не хватать.

В своих рассуждениях я пытался найти обоснование своей уверенности в том, что и вправду должно быть нечто важное и существенное, остающееся за рамками любой «алгоритмической» картины мира. Тем не менее, я по-прежнему связываю свои надежды на разгадку тайны разума с наукой в целом, и математикой в частности. Здесь возникает очевидная дилемма – однако, я старался показать, что из этой ситуации есть совершенно естественный выход. Свойство вычислимости – не то же самое, что математическая точность. Сколько тайны и красоты в точном математическом мире Платона – а ведь большая непознанная часть этого мира связана с понятиями, которые находятся за пределами той сравнительно небольшой его части, где располагаются алгоритмы и вычисления.

Сознание представляется мне таким важным явлением, что я просто не могу поверить в возможность его «случайного» возникновения в результате сколь угодно сложных вычислений. Ведь именно благодаря ему мы можем говорить о самом существовании вселенной. Некоторые считают, что вселенная, законы которой не допускают зарождение сознания, вообще не является вселенной. Я бы даже сказал, что все математические описания вселенной, которые до сих пор были сделаны, не должны удовлетворять этому критерию. Только сознание могло вызвать предполагаемую «теоретическую» вселенную к жизни!

Некоторые доводы, приведенные мной в этих главах, могут показаться чересчур сложными для понимания, другие представляются слишком спорными – хотя, по-моему, немало здесь и таких, которые, наоборот, никак нельзя оставить без внимания. Тем не менее, за всеми этими техническими рассуждениями стоит одно – ощущение «очевидности» предположения о том, что разум, наделенный сознанием, просто не может работать подобно компьютеру, несмотря на алгоритмическую природу многих составляющих нашей умственной деятельности.

Это тот тип очевидности, который доступен и ребенку – хотя со временем этот ребенок, став уже взрослым, будет вынужден поверить в то, что очевидные проблемы – это «не проблемы», что они могут быть сведены на нет при помощи тщательно подобранных рассуждений и удачных определений. Дети иногда ясно видят многие вещи, которые в более зрелые годы теряют для них свою очевидность. Мы часто забываем чувство восхищения, которое мы испытывали в детстве, когда впоследствии на наши плечи ложится груз повседневных забот «мира взрослых». Дети не боятся задавать самые элементарные вопросы из числа тех, которые нам, взрослым, задавать уже «стыдно». Что происходит с каждым из потоков нашего сознания после смерти; где было сознание до нашего рождения; могли бы мы стать, или уже были, кем-то еще; почему мы вообще воспринимаем мир; почему мы здесь; и почему, в конце концов, есть такая вселенная, в которой мы можем существовать? Это загадки, которые имеют обыкновение возникать в момент пробуждения способности осознавать в каждом из нас – и, несомненно, с первыми проблесками подлинного самосознания в любом живом существе.

¹⁸⁰ В.Э.: В оригинале: *a straw man*.

Я помню свои собственные попытки разрешить для себя многие из этих загадок, когда я был ребенком. Допустим, думал я, мое сознание имеет возможность внезапно поменяться с чьим-то другим – как в таком случае я могу быть уверен, что нечто подобное уже не произошло со мной раньше, предполагая, что каждый человек хранит в памяти только то, что относится к нему лично? Как я мог бы тогда объяснить такой опыт «обмена» кому-то еще? Или всё это вообще не имеет никакого смысла? А что если я просто проживаю те же самые десять минут жизни снова и снова – и каждый раз с одними и теми же впечатлениями? Может быть, для меня «существует» только настоящее? Может быть, «я» завтрашнего или вчерашнего дня – это в действительности совершенно иная личность с независимым сознанием? Может быть, я на самом деле живу «задом наперед» во времени, и мой поток сознания направлен в прошлое, так что моя память говорит не о том, что уже произошло со мной, но о том, что еще только должно произойти – и неприятности в школе еще впереди и, к сожалению, уже не за горами? Есть ли вообще какое-нибудь значимое различие между таким и обычным течением времени, которое позволило бы считать одно из них «правильным», а второе – нет? Для того, чтобы иметь принципиальную возможность получать ответы на подобные вопросы, необходима теория сознания. Но как можно даже начинать объяснять сущность таких проблем тому, кто сам не обладает сознанием?..

Эпилог

«...СЕБЯ ЧУВСТВУЕШЬ? О... весьма интересный вопрос, мой мальчик... э-э... я и сам хотел бы знать ответ», – сказал Главный конструктор. – «Давайте посмотрим, что может сказать наш друг об этом... странно... э-э... Ультроник говорит, что он не понимает, что... он не может даже понять, что ты имеешь в виду!» Отдельные смешки в аудитории переросли в громовой хохот. Адам чувствовал себя крайне неловко. Они могли отреагировать как угодно, но только не смеяться.

Литература

- Ааронов, Альберт [1981] Aharonov, Y. and Albert, D.Z. (1981). *Can we make sense out of the measurement process in relativistic quantum mechanics?* Phys. Rev., D24, 359–70.
- Ааронов, Бергманн, Лебовиц [1964] Aharonov, Y., Bergmann, P., and Lebowitz, J.L. (1964). *Time symmetry in the quantum process of measurement*. Опубликовано в *Quantum theory and measurement* (ed. J.A. Wheeler and W.H. Zurek), Princeton University Press, 1983; первоначально опубликовано в Phys. Rev., 134B, 1410–16.
- Адамар [1945] Hadamard, J. (1945). *The psychology of invention in the mathematical field*. Princeton University Press. (Рус. пер.: Адамар Ж. *Исследования психологии процессов изобретательства в области математики*. М.: Педагогика, 1970.)
- Аспект, Гранжьер [1986] Aspect, A. and Grangier, P. (1986). *Experiments on Einstein–Podolsky–Rosen-type correlations with pairs of visible photons*. Опубликовано в *Quantum concepts in space and time* (ed. R. Penrose and C.J. Isham), Oxford University Press.
- Аштекар, Балашандран, Санг [1989] Ashtekar, A., Balachandran, A.P., and Sang Jo (1989). *The CP problem in quantum gravity*. Int. J. Mod. Phys., A6, 1493–514.
- Барба [1989] Barbour, J.B. (1989). *Absolute or relative motion? Volume 1: The discovery of dynamics*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Барроу [1988] Barrow, J.D. (1988). *The world within the world*. Oxford University Press.
- Барроу, Типлер [1986] Barrow, J.D. and Tipler, F.J. (1986). *The anthropic cosmological principle*. Oxford University Press.
- Бекенштейн [1972] Bekenstein, J. (1972). *Black holes and entropy*. Phys. Rev., D7, 2333–46.
- Белинский, Халатников, Лифшиц [1970] Belinskii, V.A., Khalatnikov, I.M., and Lifshitz, E.M. (1970). *Oscillatory approach to a singular point in the relativistic cosmology*. Adv. Phys. 19, 525–73.
- Белифанте [1975] Belinfante, F.J. (1975). *Measurement and time reversal in objective quantum theory*. Pergamon Press, New York.
- Белл [1987] Bell, J.S. (1987). *Speakable and unspeakable in quantum mechanics*. Cambridge University Press.

- Бенасерраф [1967] Benacerraf, P. (1967). *God, the Devil and Gödel*. The Monist, 51, 9–32.
- Блэйкмор, Гринфилд [1987] Blakemore, C. and Greenfield, S. (eds.) (1987). *Mindwaves: thoughts on intelligence, identity and consciousness*. Basil Blackwell, Oxford.
- Блюм, Шуб, Смэйл [1989] Blum, L., Shub, M., and Smale, S. (1989). *On a theory of computation and complexity over the real numbers: NP completeness, recursive functions and universal machines*. Bull. Amer. Math. Soc, 21, 1–46.
- Бови [1982] Bowie, G.L. (1982). *Lucas' number is finally up*. J. of Philosophical Logic, 11, 279–85.
- Бом [1951] Bohm, D. (1951). *The paradox of Einstein, Rosen and Podolsky*. Опубликовано в *Quantum theory and measurement* (ed. J.A. Wheeler and W.H. Zurek), Princeton University Press, 1983; первоначально опубликовано в *Quantum theory*, D. Bohm, Ch. 22, sect. 15–19. Prentice-Hall, Englewood-Cliffs.
- Бом [1952] Bohm, D. (1952). *A suggested interpretation of the quantum theory in terms of 'hidden' variables, I and II*. Опубликовано в *Quantum theory and measurement* (ed. J.A. Wheeler and W.H. Zurek), Princeton University Press, 1983; первоначально опубликовано в Phys. Rev., 85, 166–93.
- Бонди [1960] Bondi, H. (1960). *Gravitational waves in general relativity*. Nature (London), 186, 535.
- Брукс, Мателски [1981] Brooks, R. and Matelski, J.P. (1981). *The dynamics of 2-generator subgroups of PSL(2, C), Riemann surfaces and related topics*: Proceedings of the 1978 Stony Brook Conference, edited by I. Kra and B. Maskit, Ann. Math Studies, 97. Princeton University Press, Princeton.
- Бэйлор, Лам, Яу [1979] Baylor, D.A., Lamb, T.D., and Yau, K.-W. (1979). *Responses of retinal rods to single photons*. J. Physiol., 288, 613–34.
- Вайнберг [1977] Weinberg, S. (1977). *The first three minutes: A modern view of the origin of the universe*. André Deutsch, London. (Рус. пер.: Вайнберг С. *Первые три минуты*. М.: Энергоиздат, 1981.)
- Вайскранц [1987] Weiskrantz, L. (1987). *Neuropsychology and the nature of consciousness*. Опубликовано в *Mindwaves* (ed. C. Blakemore and S. Greenfield), Blackwell, Oxford.
- Валтц [1982] Waltz, D.L. (1982). *Artificial intelligence*. Scientific American, 247 (4), 101–22.
- Вестфолл [1980] Westfall, R.S. (1980). *Never at rest*. Cambridge University Press.
- Вигнер [1960] Wigner, E.P. (1960). *The unreasonable effectiveness of mathematics*. Commun. Pure Appl. Math., 13, 1–14. (Рус пер.: Вигнер Э. *Непостижимая эффективность математики в естественных науках* // Вигнер Э. *Инвариантность и законы сохранения. Этюды о симметрии*. М.: Едиториал УРСС, 2002. С. 182–198.)
- Вигнер [1961] Wigner, E.P. (1961). *Remarks on the mind–body question*. Опубликовано в *The scientist speculates* (ed. I.J. Good), Heinemann, London. Перепечатано в E. Wigner (1967), *Symmetries and reflections*, Indiana University Press, Bloomington, и в *Quantum theory and measurement* (ed. J.A. Wheeler and W.H. Zurek), Princeton University Press, 1983.
- Вильсон, Ривз, Газзанига, Калвэр [1977] Wilson, D.H., Reeves, A.G., Gazzaniga, M.S., and Culver, C. (1977). *Cerebral commissurotomy for the control of intractable seizures*. Neurology, 27, 708–15.
- Виноград [1972] Winograd, T. (1972). *Understanding natural language*. Cognitive Psychology, 3, 1–191. (Рус. пер.: Виноград Т. *Программа, понимающая естественный язык*. М.: Мир, 1976.)
- Вуттерс, Цурек [1982] Wootters, W.K. and Zurek, W.H. (1982). *A single quantum cannot be cloned*. Nature, 299, 802–3.
- Газзанига [1970] Gazzaniga, M.S. (1970). *The bisected brain*. Appleton-Century-Crofts, New York.
- Газзанига, Леду, Вильсон [1977] Gazzaniga, M.S., LeDoux, J.E., and Wilson, D.H. (1977). *Language, praxis, and the right hemisphere: clues to some mechanisms of consciousness*. Neurology, 27, 1144–7.
- Галилей [1638] Galilei, G. (1638). *Dialogues concerning two new sciences*. Macmillan edn 1914; Dover Inc. (Рус. пер.: Галилей Г. *Диалог о двух главнейших системах мира – Птолемеевской и Коперниковой*. М.–Л.: Гостехиздат, 1948.)
- Ганди [1988] Gandy, R. (1988). *The confluence of ideas in 1936*. Опубликовано в *The universal Turing machine: a half-century survey* (ed. R. Herken), Kammerer & Unverzagt, Hamburg.
- Гарднер [1958] Gardner, M. (1958). *Logic machines and diagrams*. University of Chicago Press.
- Гарднер [1983] Gardner, M. (1983). *The whys of a philosophical scrivener*. William Morrow and Co., Inc., New York.
- Гарднер [1989] Gardner, M. (1989). *Penrose tiles to trapdoor ciphers*. W.H. Freeman and Company, New York. (Рус. пер.: Гарднер М. *От мозаик Пенроуза к надежным шрифтам*. М.: Мир, 1993.)
- Гёдель [1931] Gödel, K. (1931). *Über formal unentscheidbare Sätze der Principia Mathematica und verwandter Systeme I*. Monatshefte für Mathematik und Physik, 38, 173–98.
- Герох, Хартли [1986] Geroch, R. and Hartle, J.B. (1986). *Computability and physical theories*. Found. Phys., 16, 533.
- Гирарди, Римини, Вебер [1980] Ghirardi, G.C., Rimini, A., and Weber, T. (1980). *A general argument against superluminal transmission through the quantum mechanical measurement process*. Lett. Nuovo. Chim., 11, 293–8.
- Гирарди, Римини, Вебер [1986] Ghirardi, G.C., Rimini, A., and Weber, T. (1986). *Unified dynamics for microscopic and macroscopic systems*. Phys. Rev., D34, 470.
- Грэгори [1981] Gregory, R.L. (1981). *Mind in science; A history of explanations in psychology and physics*. Weidenfeld and Nicholson Ltd.

Грюнбаум, Шепард [1981] Grünbaum, B. and Shephard, G.C. (1981). *Some problems on plane tilings*. Опубликовано в *The mathematical Gardner* (ed. D.A. Klarner), Prindle, Weber and Schmidt, Boston. (Рус. пер.: Грюнбаум Б., Шепард Дж.Ч. *Некоторые проблемы, связанные с плоскими мозаиками // Математический цветник: Сборник статей и задач*. М.: Мир, 1983.)

Грюнбаум, Шепард [1987] Grünbaum, B. and Shephard, G.C. (1987). *Tilings and patterns*. W.H. Freeman.

Гуд [1969] Good, I.J. (1969). *Gödel's theorem is a red herring*. Brit. J.Philos. Sci., 18, 359–73.

Гэйл [1987] Gayle, F.W. (1987). *Free-surface solidification habit and point group symmetry of a faceted icosahedral Al–Li–Cu phase*. J. Mater. Res., 2, 1–4.

де Бройль [1956] de Broglie, L. (1956). *Tentative d'interprétation causale et nonlinéaire de la mécanique ondulatoire*. Gauthier-Villars, Paris.

Де Витт, Грэхем [1973] De Witt, B.S. and Graham, R.D. (eds.) (1973). *The many-worlds interpretation of quantum mechanics*. Princeton University Press.

Дельбрюк [1986] Delbrück, M. (1986). *Mind from matter?* Blackwell Scientific Publishing, Oxford.

Деннетт [1978] Dennett, D.C. (1978). *Brainstorms. Philosophical Essays on Mind and Psychology*, Harvester Press, Hassocks, Sussex.

Джейнс [1980] Jaynes, J. (1980). *The origin of consciousness in the breakdown of the bicameral mind*. Penguin Books Ltd., Harmondsworth, Middx.

Дике, Грётцингер, Корнхубер [1976] Deeke, L., Grotzinger, B., and Kornhuber, H.H. (1976). *Voluntary finger movements in man: cerebral potentials and theory*. Biol. Cybernetics, 23, 99.

Дирак [1928] Dirac, P.A.M. (1928). *The quantum theory of the electron*. Proc. Roy. Soc. (Lond.), A117, 610–24; ditto, part II, *ibid.*, A118, 361. (Рус. пер.: Дирак П.А.М. *Квантовая теория электрона // Дирак П.А.М. К созданию квантовой теории поля*. М.: Наука, 1990. Ч. 1, 2. С. 113–141.)

Дирак [1938] Dirac, P.A.M. (1938). *Classical theory of radiating electrons*. Proc. Roy. Soc. (Lond.), A167, 148.

Дирак [1939] Dirac, P.A.M. (1939). *The relations between mathematics and physics*. Proc. Roy. Soc. Edinburgh, 59, 122. (Рус. пер.: Дирак П.А.М. *Отношение между математикой и физикой // Дирак П.А.М. К созданию квантовой теории поля*. С. 245–254.)

Дирак [1947] Dirac, P.A.M. (1947). *The principles of quantum mechanics* (3rd edn). Oxford University Press. (Рус. пер.: Дирак П.А.М. *Принципы квантовой механики*. М.: Наука, 1979.)

Дирак [1982] Dirac, P.A.M. (1982). *Pretty mathematics*. Int. J. Theor. Phys., 21, 603–5.

Дойч [1985] Deutsch, D. (1985). *Quantum theory, the Church–Turing principle and the universal quantum computer*. Proc. Roy. Soc. (Lond.), A400, 97–117.

Доукинс [1986] Dawkins, R. (1986). *The blind watchmaker*. Longman, London.

Дрэйк [1953] Drake, S. (trans.) (1953). *Galileo Galilei: dialogue concerning the two chief world systems – Ptolemaic and Copernican*. University of California, Berkeley, 1953.

Дрэйк [1957] Drake, S. (1957). *Discoveries and opinions of Galileo*. Doubleday, New York.

Дэвис [1974] Davies, P.C.W. (1974). *The physics of time-asymmetry*. Surrey University Press.

Дэвис [1988] Davis, M. (1988). *Mathematical logic and the origin of modern computers*. Опубликовано в *The universal Turing machine: a half-century survey* (ed. R. Herken), Kammerer & Unverzagt, Hamburg.

Дэвис и др. [1987] Davies, R.D., Lasenby, A.N., Watson, R.A., Daintree, E.J., Hopkins, J., Beckman, J., Sanchez-Almeida, J., and Rebolo, R. (1987). *Sensitive measurement of fluctuations in the cosmic microwave background*. Nature, 326, 462–5.

Дэвис, Браун [1988] Davies, P.C.W. and Brown, J. (1988). *Superstrings: a theory of everything?* Cambridge University Press.

Дэвлин [1988] Devlin, K. (1988). *Mathematics: the new golden age*. Penguin Books, London.

Кандел [1976] Kandel, E.R. (1976). *The cellular basis of behaviour*. Freeman, San Francisco.

Каройхази [1974] Károlyházy, F. (1974). *Gravitation and quantum mechanics of macroscopic bodies*. Magyar Fizikai Folyóirat, 12, 24.

Каройхази, Френкель, Лукач [1986] Károlyházy, F., Frenkel, A., and Lukács, B. (1986). *On the possible role of gravity on the reduction of the wave function*. Опубликовано в *Quantum concepts in space and time* (ed. R. Penrose and C.J. Isham), Oxford University Press.

Картан [1923] Cartan, É. (1923). *Sur les variétés à connexion affine et la théorie de la relativité généralisée*. Ann. Sci. Ec. Norm. Sup., 40, 325–412.

Катленд [1980] Cutland, N.J. (1980). *Computability: an introduction to recursive function theory*. Cambridge University Press.

Кин [1988] Keene, R. (1988). *Chess: Henceforward*. The Spectator, 261 (№8371), 52.

Клаузер, Хорн, Шимони, Холт [1969] Clauser, J.F., Home, A.H., Shimony, A., and Holt, R.A. (1969). *Proposed experiment to test local hidden-variable theories*. Опубликовано в *Quantum theory and measurement* (ed. J.A. Wheeler and W.H. Zurek), Princeton University Press, 1983; первоначально опубликовано в Phys. Rev. Lett., 23, 880–4.

Клос [1983] Close, F. (1983). *The cosmic onion: quarks and the nature of the universe*. Heinemann, London.

- Кнут [1981] Knuth, D.M. (1981). *The art of computer programming*, Vol. 2 (2nd edn). Addison-Wesley, Reading, MA. (Рус. пер.: Кнут Д. *Искусство программирования*. М.: Издательский дом «Вильямс», 2000.)
- Комар [1964] Komar, A.V. (1964). *Undecidability of macroscopically distinguishable states in quantum field theory*. Phys. Rev., 133B, 542–4.
- Комар [1969] Komar, A.V. (1969). *Qualitative features of quantized gravitation*. Int. J. Theor. Phys. 2, 157–60.
- Коэн [1966] Cohen, P.C. (1966). *Set theory and the continuum hypothesis*. Benjamin, Menlo Park, CA.
- Кузнецов [1980] Кузнецов Б.Г. *Эйнштейн: Жизнь. Смерть. Бессмертие*. М.: Наука, 1980.
- Леви [1984] Levy, D.W.L. (1984). *Chess computer handbook*. Batsford.
- Леду [1985] LeDoux, J.E. (1985). *Brain, mind and language*. Опубликовано в *Brain and mind* (ed. D.A. Oakley), Methuen, London and New York.
- Либет [1987] Libet, V. (1987). *Consciousness: Conscious subjective experience*. Опубликовано в *Encyclopedia of neuroscience*, Vol. 1 (ed.) G. Adelman. Birkhauser; pp. 271–5.
- Либет [1989] Libet, V. (1989). *Conscious subjective experience vs. unconscious mental functions: A theory of the cerebral process involved*. Опубликовано в *Models of brain function* (ed. R.M.J. Cotterill), Cambridge University Press, Cambridge; pp. 35–43.
- Либет, Райт, Файнштейн, Перл [1979] Libet, V., Wright, E.W.Jr., Feinstein, V., and Pearl, D.K. (1979). *Subjective referral of the timing for a conscious sensory experience*. Brain, 102, 193–224.
- Лоренц [1972] Lorenz, K. (1972). Цитируется по *From ape to Adam*, by H. Wendt, Bobbs Merrill, Indianapolis.
- Лукас [1961] Lucas, J.R. (1961). *Minds, machines and Gödel*. Philosophy, 36, 120–4. Перепечатано в Alan Ross Anderson (1964), *Minds and machines*, Englewood Cliffs.
- Льюис [1969] Lewis, D. (1969). *Lucas against mechanism*. Philosophy, 44, 231–3.
- Льюис [1989] Lewis, D. (1989). *Lucas against mechanism II*. Can. J. Philos. 9, 373–6.
- Майерс [1974] Myers, D. (1974). *Nonrecursive tilings of the plane, II*. J. Symbolic Logic, 39, 286–94.
- Майорана [1932] Majorana, E. (1932). *Atomi orientati in campo magnetico variabile*. Nuovo Cimento, 9, 43–50.
- МакКей [1987] MacKay, D. (1987). *Divided brains – divided minds?* Опубликовано в *Mindwaves* (ed. C. Blakemore and S. Greenfield), Basil Blackwell, Oxford.
- Максвелл [1865] Maxwell, J.C. (1865). *A dynamical theory of the electromagnetic field*. Philos. Trans. Roy. Soc. (Lond.), 155, 459–512. (Рус. пер.: Максвелл Дж.К. *Динамическая теория поля*. Ч. VI. *Электромагнитная теория света*. Избр. соч. по теории электромагнитного поля: М.: Гостехтеориздат, 1952.)
- Мандельброт [1986] Mandelbrot, B.B. (1986). *Fractals and the rebirth of iteration theory*. Опубликовано в *The beauty of fractals: images of complex dynamical systems*, Н.-О. Peitgen and Р.Н. Richter, Springer-Verlag, Berlin; pp. 151–60. (Рус. пер.: Мандельброт Б. *Фракталы и возрождение теории итераций* // Пайтген Х.О., Рихтер П.Х. *Красота фракталов*. М.: Мир, 1993.)
- Мандельброт [1989] Mandelbrot, B. B. (1989). *Some 'facts' that evaporate upon examination*. Math. Intelligencer, 11, 12–16.
- Мермин [1985] Mermin, D. (1985). *Is the moon there when nobody looks? Reality and the quantum theory*. Physics Today, 38 (№ 4), 38–47.
- Мизиер [1969] Misner, C.W. (1969). *Mixmaster universe*. Phys. Rev. Lett., 22, 1071–4.
- Мики [1988] Michie, D. (1988). *The fifth generation's unbridged gap*. Опубликовано в *The universal Turing machine: a half-century survey* (ed. R. Herken), Kammerer & Unverzagt, Hamburg.
- Мински [1968] Minsky, M.L. (1968). *Matter, mind, and models*. Опубликовано в *Semantic information processing*, (ed. M.L. Minsky), MIT Press, Cambridge, Mass.
- Мирс, Сперри [1953] Myers, R.E. and Sperry, R.W. (1953). *Interocular transfer of a visual form discrimination habit in cats after section of the optic chiasm and corpus callosum*. Anatomical Record, 175, 351–2.
- Моравец [1989] Moravec, H. (1989). *Mind children: the future of robot and human intelligence*. Harvard University Press.
- Моруцци, Магун [1949] Moruzzi, G. and Magoun, H.W. (1949). *Brainstem reticular formation and activation of the EEG*. Electroencephalography and Clinical Neurophysiology, 1, 455–73.
- Мотт [1929] Mott, N.F. (1929). *The wave mechanics of a-ray tracks*. Опубликовано в *Quantum theory and measurement* (ed. J.A. Wheeler and W.H. Zurek), Princeton University Press, 1983; первоначально опубликовано в Proc. Roy. Soc. (Lond.), A126, 79–84.
- Мотт, Месси [1965] Mott, N.F. and Massey, H.S.W. (1965). *The theory of atomic collisions*. Clarendon Press, Oxford. (Рус. пер.: Мотт Н., Месси Г. *Теория атомных столкновений*. М.: Мир, 1969.)
- Нагель, Ньюман [1958] Nagel, E. and Newman, J.R. (1958). *Gödel's proof*. Routledge & Kegan Paul Ltd.
- Нельсон, Халперин [1985] Nelson, D.R. and Halperin, B.I. (1985). *Pentagonal and icosahedral order in rapidly cooled metals*. Science, 229, 233.

Ньютон [1687] Newton, I. (1687). *Principia*. Cambridge University Press. (Рус. пер.: Ньютон И. *Математические начала натуральной философии* / Пер. с лат. А.И. Крылова. Петроград, 1916 (соврем. изд.: М.: Наука, 1989.))

Ньютон [1730] Newton, I. (1730). *Opticks*. 1952, Dover, Inc. (Рус. пер.: Ньютон И. *Оптика*. М.–Л., 1954.)

О'Кифи [1985] O'Keefe, J. (1985). *Is consciousness the gateway to the hippocampal cognitive map? A speculative essay on the neural basis of mind*. Опубликовано в *Brain and mind* (ed. D.A. Oakley), Methuen, London and New York.

О'Коннелл [1988] O'Connell, K. (1988). *Computer chess*. Chess, 15.

Окли [1985] Oakley, D.A. (ed.) (1985). *Brain and mind*, Methuen, London and New York.

Окли, Имз [1985] Oakley, D.A. and Eames, L.C. (1985). *The plurality of consciousness*. Опубликовано в *Brain and mind* (ed. D.A. Oakley), Methuen, London and New York.

Онода, Стайхардт, Ди Винченцо, Соколар [1988] Onoda, G.Y, Steinhardt, P.J., DiVincenzo, D.P., and Socolar, J.E.S. (1988). *Growing perfect quasicrystals*. Phys. Rev. Lett., 60, 2688.

Оппенгеймер, Снайдер [1939] Oppenheimer, J.R. and Snyder, H. (1939). *On continued gravitational contraction*. Phys. Rev. 56, 455–9.

Пайс [1982] Pais, A. (1982). *'Subtle is the Lord...': the science and the life of Albert Einstein*. Clarendon Press, Oxford.

Пайтген, Заупе [1988] Peitgen, H.-O. and Saupe, D. (1988). *The science of fractal images*. Springer-Verlag, Berlin.

Пайтген, Рихтер [1986] Peitgen, H.-O. and Richter, P.H. (1986). *The beauty of fractals*. Springer-Verlag, Berlin and Heidelberg. (Рус. пер.: Пайтген Х.-О., Рихтер П.Х. *Красота фракталов*. М.: Мир, 1993.)

Парис, Харрингтон [1977] Paris, J. and Harrington, L. (1977). *A mathematical incompleteness in Peano arithmetic*. Опубликовано в *Handbook of mathematical logic* (ed. J. Barwise), North-Holland, Amsterdam.

Пенроуз [1965] Penrose, R. (1965). *Gravitational collapse and space-time singularities*. Phys. Rev. Lett., 14, 57–9. (Рус. пер.: Пенроуз Р. *Гравитационный коллапс и пространственно-временные сингулярности // Альберт Эйнштейн и теория гравитации*. М.: Мир, 1979. С. 390–395.)

Пенроуз [1974] Penrose, R. (1974). *The role of aesthetics in pure and applied mathematical research*. Bull. Inst. Math. Applications, 10, № 7/8, 266–71.

Пенроуз [1979a] Penrose, R. (1979a). *Einstein's vision and the mathematics of the natural world*. The Sciences (March), 6–9.

Пенроуз [1979b] Penrose, R. (1979b). *Singularities and time-asymmetry*. Опубликовано в *General relativity: An Einstein centenary* (ed. S.W. Hawking and W. Israel), Cambridge University Press. (Рус. пер.: Пенроуз Р. *Сингулярности и асимметрия во времени // Общая теория относительности*. М.: Мир, 1983. С. 233–295.)

Пенроуз [1987a] Penrose, R. (1987a). *Newton, quantum theory and reality*. Опубликовано в *300 years of gravity* (ed. S.W. Hawking and W. Israel), Cambridge University Press.

Пенроуз [1987b] Penrose, R. (1987b). *Quantum Physics and Conscious Thought*. Опубликовано в *Quantum Implications: Essays in honour of David Bohm* (ed. B.J. Hiley and F.D. Peat), Routledge and Kegan Paul, London & New York.

Пенроуз [1989a] Penrose, R. (1989a). *Tilings and quasi-crystals; a non-local growth problem?* Опубликовано в *Aperiodicity and order 2* (ed. M. Jarič), Academic Press, New York.

Пенроуз [1989b] Penrose, R. (1989b). *Difficulties with inflationary cosmology*. Опубликовано в *The Fourteenth Texas Symposium on Relativistic Astrophysics* (ed. E.J. Fenyves), N.Y. Acad. Sci., New York, 571, 249–64.

Пенроуз, Риндлер [1984] Penrose, R. and Rindler, W. (1984). *Spinors and space-time*, Vol. 1: *Two-spinor calculus and relativistic fields*. Cambridge University Press. (Рус. пер.: Пенроуз Р., Риндлер В. *Спиноры и пространство-время*. М.: Мир, 1988.)

Пенроуз, Риндлер [1986] Penrose, R. and Rindler, W. (1986). *Spinors and space-time*, Vol. 2: *Spinor and twistor methods in space-time geometry*. Cambridge University Press. (Рус. пер.: Там же.)

Пенфилд, Джаспер [1947] Penfield, W. and Jasper H. (1947). *Highest level seizures*. Research Publications of the Association for Research in Nervous and Mental Diseases (New York), 26, 252–71.

Перл [1985] Pearle, P. (1985). *'Models for reduction'*. Опубликовано в *Quantum concepts in space and time* (ed. C.J. Isham and R. Penrose), Oxford University Press.

Перл [1989] Pearle, P. (1989). *Combining stochastic dynamical state-vector reduction with spontaneous localization*. Phys. Rev. A, 39, 2277–89.

Пур-Эль, Ричардс [1979] Pour-El, M.B. and Richards, I. (1979). *A computable ordinary differential equation which possesses no computable solution*. Ann. Math. Logic, 17, 61–90.

Пур-Эль, Ричардс [1981] Pour-El, M.B. and Richards, I. (1981). *The wave equation with computable initial data such that its unique solution is not computable*. Adv. in Math., 39, 215–39.

Пур-Эль, Ричардс [1982] Pour-El, M.B. and Richards, I. (1982). *Noncomputability in models of physical phenomena*. Int. J. Theor. Phys., 21, 553–5.

- Пур-Эль, Ричардс [1989] Pour-El, M.V. and Richards, I. (1989). *Computability in analysis and physics*. Springer-Verlag, New York.
- Ракер [1984] Rucker, R. (1984). *Infinity and the mind: the science and philosophy of the infinite*. Paladin Books, Granada Publishing Ltd., London (first published by Birkhauser Inc., Boston, Mass., 1982.).
- Пауз Болл [1892] Rouse Ball, W.W. (1892). *Calculating prodigies*. Опубликовано в *Mathematical recreations and essays*.
- Резников, Уэллс [1984] Resnikoff, H.L. and Wells, R.O. Jr. (1973). *Mathematics and civilization*. Holt, Rinehart and Winston, Inc., New York; перепечатано с дополнениями (1984) Dover Publications, Inc., Mineola, New York.
- Риндлер [1977] Rindler, W. (1977). *Essential relativity*. Springer-Verlag, New York.
- Риндлер [1982] Rindler, W. (1982). *Introduction to special relativity*. Clarendon Press, Oxford.
- Робинсон [1971] Robinson, R.M. (1971). *Undecidability and nonperiodicity for tilings of the plane*. Invent. Math., 12, 177–209.
- Рэй [1986] Rae, A. (1986). *Quantum physics: illusion or reality?* Cambridge University Press.
- Сакс [1962] Sachs, R.K. (1962). *Gravitational waves in general relativity*. VIII. *Waves in asymptotically flat space-time*. Proc. Roy. Soc. London, A270, 103–26.
- Серл [1980] Searle, J. (1980). *Minds, brains and programs*. Опубликовано в *The behavioral and brain sciences*, Vol. 3. Cambridge University Press. Перепечатано в *The mind's I* (ed. D.R. Hofstadter and D.C. Dennett), Basic Books, Inc., Penguin Books Ltd., Harmondsworth, Middx., 1981.
- Серл [1987] Searle, J.R. (1987). *Minds and brains without programs*. Опубликовано в *Mindwaves* (ed. C. Blakemore and S. Greenfield). Basil Blackwell, Oxford.
- Сквайерс [1985] Squires, E. (1985). *To acknowledge the wonder*. Adam Hilger Ltd., Bristol.
- Сквайерс [1986] Squires, E. (1986). *The mystery of the quantum world*. Adam Hilger Ltd., Bristol.
- Смит [1983] Smith, S.B. (1983). *The great mental calculators*. Columbia University Press.
- Сморински [1983] Smorynski, C. (1983). 'Big' news from Archimedes to Friedman. Notices Amer. Math. Soc, 30, 251–6.
- Сперри [1966] Sperry, R.W. (1966). *Brain bisection and consciousness*. Опубликовано в *Brain and conscious experience* (ed. J.C. Eccles), Springer, New York.
- Типлер, Кларк, Эллис [1980] Tipler, F.J., Clarke, C.J.S., and Ellis, G.F.R. (1980). *Singularities and horizons – a review article*. Опубликовано в *General relativity and gravitation* (ed. A. Held), Vol. 2, pp. 97–206. Plenum Press, New York.
- Трейман, Джекив, Зумино, Витген [1985] Treiman, S.B., Jackiw, R., Zumino, B., and Witten, E. (1985). *Current algebra and anomalies*, Princeton series in physics. Princeton University Press, Princeton, N.J.
- Тьюринг [1937] Turing, A.M. (1937). *On computable numbers, with an application to the Entscheidungsproblem*. Proc. Land. Math. Soc. (ser. 2), 42, 230–65; a correction 43, 544–6.
- Тьюринг [1939] Turing, A.M. (1939). *Systems of logic based on ordinals*. P. Lond. Math. Soc, 45, 161–228.
- Тьюринг [1950] Turing, A.M. (1950). *Computing machinery and intelligence*. Mind, 59, № 236. Перепечатано в *The mind's I* (ed. D.R. Hofstadter and D.C. Dennett), Basic Books, Inc.; Penguin Books, Ltd., Harmondsworth, Middx., 1981.
- Уилер [1983] Wheeler, J.A. (1983). *Law without law*. Опубликовано в *Quantum theory and measurement* (ed. J.A. Wheeler and W.H. Zurek), Princeton University Press, pp. 182–213.
- Уилер, Фейнман [1945] Wheeler, J.A. and Feynman, R.P. (1945). *Interaction with the absorber as the mechanism of radiation*. Revs. Mod. Phys., 17, 157–81.
- Уилер, Цурек [1983] Wheeler, J.A. and Zurek, W.H. (eds.) (1983). *Quantum theory and measurement*. Princeton University Press.
- Уилл [1987] Will, C.M. (1987). *Experimental gravitation from Newton's Principia to Einstein's general relativity*. Опубликовано в *300 years of gravitation* (ed. S.W. Hawking and W. Israel), Cambridge University Press.
- Уиттекер [1910] Whittaker, E.T. (1910). *The history of the theories of aether and electricity*. Longman, London. (Рус. пер.: Уиттекер Э. *История теории эфира и электричества*. Ижевск: РХД, 2001.)
- Уолтер [1953] Grey Walter, W. (1953). *The living brain*. Gerald Duckworth and Co. Ltd.
- Уорд, Уэллс [1990] Ward, R.S. and Wells R.O. Jr. (1990). *Twistor geometry and field theory*. Cambridge University Press.
- Фейнман [1985] Feynman, R.P. (1985). *QED: the strange theory of light and matter*. Princeton University Press. (Рус. пер.: Фейнман Р. *КЭД, странная теория света и вещества*. М.: Наука, 1988.)
- Фейнман, Лейтон, Сэндс [1965] Feynman, R.P., Leighton, R.B., and Sands, M. (1965). *The Feynman Lectures*. Addison-Wesley. (Рус. пер.: Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. *Фейнмановские лекции по физике*. М.: Мир, 1977.)
- Феферман [1988] Feferman, S. (1988). *Turing in the Land of O(z)*. Опубликовано в *The universal Turing machine: a half-century survey* (ed. R. Herken), Kammerer & Unverzagt, Hamburg.
- Фодор [1983] Fodor, J.A. (1983). *The modularity of mind*. MIT Press, Cambridge, Mass.

- фон Нейман [1955] von Neumann, J. (1955). *Mathematical foundations of quantum mechanics*. Princeton University Press. (Рус. пер.: Нейман И. *Математические основы квантовой механики*. М.: Наука, 1964.)
- Фредкин, Тоффоли [1982] Fredkin, E. and Toffoli, T. (1982). *Conservative logic*. Int. J. Theor. Phys., 21, 219–53.
- Фридман, Клаузер [1972] Freedman, S.J. and Clauser, J.F. (1972). *Experimental test of local hidden-variable theories*. Опубликовано в *Quantum theory and measurement* (ed. J.A. Wheeler and W.H. Zurek), Princeton University Press, 1983; первоначально опубликовано в Phys. Rev. Lett., 28, 938–41.
- Хаггетт, Тод [1985] Huggett, S.A. and Tod, K.P. (1985). *An introduction to twistor theory*. London Math. Soc. student texts, Cambridge University Press.
- Хайли, Пит [1987] Hiley, B.J. and Peat, F.D. (eds.) (1987). *Quantum implications. Essays in honour of David Bohm*. Routledge and Kegan Paul, London & New York.
- Ханф [1974] Hanf, W. (1974). *Nonrecursive tilings of the plane*, I. J. Symbolic Logic, 39, 283–5.
- Харт [1982] Harth, E. (1982). *Windows on the mind*. Harvester Press, Hassocks, Sussex.
- Хартли, Хокинг [1983] Hartle, J. B. and Hawking, S.W. (1983). *Wave function of the universe*. Phys. Rev., D31, 1777.
- Хебб [1954] Hebb, D.O. (1954). *The problem of consciousness and introspection*. Опубликовано в *Brain mechanisms and consciousness* (ed. J.F. Delafresnaye), Blackwell, Oxford.
- Херкен [1988] Herken, R. (ed.) (1988). *The universal Turing machine: a half-century survey*. Kammerer & Unverzagt, Hamburg.
- Хехт, Шлейер, Пирэн [1941] Hecht, S., Shlaer, S. and Pirenne, M.H. (1941). *Energy, quanta and vision*. J. of Gen. Physiol., 25, 891–40.
- Ходжис [1983] Hodges, A.P. (1983). *Alan Turing: the enigma*. Burnett Books and Hutchinson, London; Simon and Schuster, New York.
- Хокинг [1975] Hawking, S.W. (1975). *Particle creation by black holes*. Commun. Math. Phys., 43, 199–220. (Рус. пер.: Хокинг С. *Рождение частиц на черных дырах // Альберт Эйнштейн и теория гравитации*. М.: Мир, 1979. С. 479–510.)
- Хокинг [1987] Hawking, S.W. (1987). *Quantum cosmology*. Опубликовано в *300 years of gravitation* (ed. S.W. Hawking and W. Israel), Cambridge University Press.
- Хокинг [1988] Hawking, S.W. (1988). *A brief history of time*. Bantam Press, London. (Рус. пер.: Хокинг С. *Краткая история времени*. СПб.: Амфора, 2000.)
- Хокинг, Пенроуз [1970] Hawking, S.W. and Penrose, R. (1970). *The singularities of gravitational collapse and cosmology*. Proc. Roy. Soc. (London), A314, 529–48.
- Хофштадтер [1979] Hofstadter, D.R. (1979). *Gödel, Escher, Bach: an eternal golden braid*. Harvester Press, Hassocks, Sussex. (Рус. пер.: Хофштадтер Д. *Гёдель, Эшер, Бах: эта бесконечная гирлянда*. Самара: Издательский дом «Бахрах-М», 2001.)
- Хофштадтер [1981] Hofstadter, D.R. (1981). *A conversation with Einstein's brain*. Опубликовано в *The mind's I* (ed. D.R. Hofstadter and D.C. Dennett), Basic Books, Inc.; Penguin Books, Ltd., Harmondsworth, Middx.
- Хофштадтер, Деннетт [1981] Hofstadter, D.R. and Dennett, D.C. (eds.) (1981). *The mind's I*. Basic Books, Inc.; Penguin Books, Ltd., Harmondsworth, Middx.
- Хьюбел [1988] Hubel, D.H. (1988). *Eye, brain and vision*. Scientific American Library Series #22.
- Чандрасекар [1987] Chandrasekhar, S. (1987). *Truth and beauty: aesthetics and motivations in science*. University of Chicago Press.
- Черч [1941] Church, A. (1941). *The calculi of lambda-conversion*. Annals of Mathematics Studies, № 6. Princeton University Press.
- Черчланд [1984] Churchland, P.M. (1984). *Matter and consciousness*. Bradford Books, MIT Press, Cambridge, Mass.
- Шенк, Абельсон [1977] Schank, R.C. and Abelson, R.P. (1977). *Scripts, plans, goals and understanding*. Erlbaum, Hillsdale, N.J.
- Шехтман, Блех, Гратиас, Кан [1984] Shechtman, D., Blech, I., Gratias, D., and Cahn, J.W. (1984). *Metallic phase with long-range orientational order and no translational symmetry*. Phys. Rev. Lett., 53, 1951.
- Шрёдингер [1935] Schrödinger, E. (1935). *Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik*. Naturwissenschaften, 23, 807–12, 823–8, 844–9. (Translation by J.T. Trimmer (1980). Опубликовано в Proc. Amer. Phil. Soc., 124, 323–38.) Опубликовано в *Quantum theory and measurement* (ed. J.A. Wheeler and W.H. Zurek), Princeton University Press, 1983.
- Шрёдингер [1967] Schrödinger, E. (1967). *'What is life?' and 'Mind and matter'*. Cambridge University Press. (Рус. пер.: Шрёдингер Э. *Что такое жизнь? С точки зрения физика*. 2-е изд. М.: Атомиздат, 1972.)
- Эверетт [1957] Everett, H. (1957). *'Relative state' formulation of quantum mechanics*. Опубликовано в *Quantum theory and measurement* (ed. J.A. Wheeler and W.H. Zurek), Princeton University Press, 1983; первоначально опубликовано в Rev. of Mod. Phys., 29, 454–62.
- Эйнштейн, Подольский, Розен [1935] Einstein, A., Podolsky, B., and Rosen, N. (1935). *Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?* Опубликовано в *Quantum theory and measurement* (ed. J.A. Wheeler and W.H. Zurek), Princeton University Press, 1983; первоначально опубликовано в Phys. Rev., 47, 777–80.

Экклз [1973] Eccles, J.C. (1973). *The understanding of the brain*. McGraw-Hill, New York.

Эткинс [1987] Atkins, P.W. (1987). *Why mathematics works*. Oxford University Extension Lecture in series: Philosophy and the New Physics (13 March).

Иллюстративный материал, используемый в книге

• Рис. 4.6 и 4.9. Воспроизводится из *The Mathematical Gardner* (D.A. Klamer (ed.)) Wadsworth International, 1981.

• Рис. 4.7. Воспроизводится из *Tilings and Patterns* (B. Grünbaum and G.C. Shephard) © W.H. Freeman, 1987.

• Рис. 4.10. Воспроизводится из *Hermann Weyl 1885–1985* (K. Chandrasekharan) Springer, 1986.

• Рис. 4.11 и 10.3. Воспроизводится из *Pentalplexity: a class of non-periodic tilings of the plane*. The Mathematical Intelligence, 2, 32-7 (Springer, 1979).

• Рис. 4.12. Воспроизводится из *M.C. Escher: Art and Science* (H.S.M. Coxeter, M. Emmer, R. Penrose and M.L. Teuber (eds)) North-Holland, 1986.

• Рис. 5.2. Воспроизводится из *M.C. Escher: Heirs* © 2002 Cordon Art B.V. – Baarn – Holland. Все права защищены.

• Рис. 10.4. Воспроизводится из *Journal of Materials Research*, 2, 1–4 (Materials Research Society, 1987).

Все остальные рисунки (включая 4.10 и 4.12) принадлежат автору.

Роджер Пенроуз. «Новый ум короля»
О компьютерах, мышлении и законах физики

Roger Penrose. «The Emperor's New Mind»
Concerning Computers, Minds and The Laws of Physics
Foreword by Martin Gardner

Перевод с английского под общей редакцией В.О. Малышенко.
Москва, 2003. УРСС.

Монография известного физика и математика Роджера Пенроуза посвящена изучению проблемы искусственного интеллекта на основе всестороннего анализа достижений современных наук. Возможно ли моделирование разума? Чтобы найти ответ на этот вопрос, Пенроуз обсуждает широчайший круг явлений: алгоритмизацию математического мышления, машины Тьюринга, теорию сложности, теорему Гёделя, телепортацию материи, парадоксы квантовой физики, энтропию, рождение Вселенной, черные дыры, строение мозга и многое другое. Книга вызовет несомненный интерес как у специалистов гуманитарных и естественнонаучных дисциплин, так и у широкого круга читателей.

«The Emperor's New Mind» was originally published in English in 1989. This translation is published by arrangement with Oxford University Press.

Произведение «The Emperor's New Mind» впервые опубликовано на английском языке в 1989 г. Перевод на русский язык публикуется по соглашению с Oxford University Press.

Перевод на русский язык осуществлен с английского издания 1999 г.

Издатель – Доминго Марин Рикой.
Директор по системам – Виктор Романов.
Финансовый директор – Виктория Малышенко.
Директор по производству – Ирина Макеева.
Коммерческий директор – Наталья Финогенова.
Выпускающий редактор – Елена Ермолаева.
Книгоаналитик – Алексей Петяев.

Перевод и редакция – Андрей Дамбис,¹⁸¹ Юлий Данилов, Сергей Кокарев, Виктория Малышенко, Игорь Ольшевский, Леонид Яковенко.

Издательство «Едиториал УРСС». 117312, г. Москва, пр-т 60-летия Октября, 9.

¹⁸¹ В.Э.: латышская фамилия.

Лицензия ИД №05175 от 25.06.2001 г. Подписано к печати 06.11.2002 г.
Формат 70×100/16. Печ. л. 24. Зак. № 653.
Отпечатано в типографии ИПО «Профиздат». 109044, г.Москва, Крутицкий вал, 18.

© Oxford University Press, 1989

© Оригинал-макет, оформление: Едиториал УРСС, 2002

© Перевод на русский язык: Едиториал УРСС, 2002

Научно-популярное издание
«Мысли об Истине»
Выпуск № 16
Сформирован 28 июля 2014 года

Все читатели приглашаются принять участие в создании альманаха МОИ и присылать свои статьи и заметки для этого издания по адресу: Marina.Olegovna@gmail.com. Если присланные материалы будут соответствовать направлению Альманаха и минимальным требованиям информативности и корректности, то они будут опубликованы в нашем издании.

Основной вид существования Альманаха МОИ – в виде PDF-файлов в Вашем компьютере. Держите все выпуски МОИ в одной папке. Скачать PDF-ы можно с разных мест в Интернете, и не важно, откуда номер скачан. В Интернете нет одной фиксированной резиденции МОИ.

Содержание

Файл PENRO4	2
<i>Роджер Пенроуз. «Новый Разум Короля»</i>	3
Глава 7. Космология и стрела времени.....	3
§7.1. Течение времени	3
§7.2. Неумолимое возрастание энтропии	5
§7.3. Что такое энтропия?.....	9
§7.4. Второе начало в действии	13
§7.5. Источник низкой энтропии во Вселенной.....	16
§7.6. Космология и Большой взрыв.....	19
§7.7. Горячий протошар	23
§7.8. Объясняется ли второе начало Большим взрывом?.....	24
§7.9. Черные дыры	25
§7.10. Структура пространственно-временных сингулярностей.....	30
§7.11. Насколько особым был Большой взрыв?.....	34
Глава 8. В поисках квантовой теории гравитации.....	39
§8.1. Зачем нужна квантовая теория гравитации?	39
§8.2. Что скрывается за гипотезой о вейлевской кривизне?	40
§8.3. Временная асимметрия в редукции вектора состояния	43
§8.4. Ящик Хокинга: связь с гипотезой о вейлевской кривизне?	48
§8.5. Когда происходит редукция вектора состояния?.....	53
Файл PENRO5	58
<i>Роджер Пенроуз. «Новый Разум Короля»</i>	59
Глава 9. Реальный мозг и модели мозга.....	59
§9.1. Как же устроен мозг?.....	59
§9.2. Где обитает сознание?	65
§9.3. Эксперименты при разделенных больших полушариях мозга.....	67
§9.4. «Зрение вслепую»	69
§9.5. Обработка информации в зрительной коре	70
§9.6. Как работают нервные импульсы?	71
§9.7. Компьютерные модели.....	73
§9.8. Пластичность мозга	77
§9.9. Параллельные компьютеры и «единственность» сознания	78

§9.10. Имеет ли квантовая механика отношение к работе мозга?.....	79
§9.11. Квантовые компьютеры	80
§9.12. За пределами квантовой теории?.....	82
Глава 10. Где находится физика ума?	83
§10.1. Для чего нужны умы?.....	83
§10.2. Что в действительности делает сознание?.....	87
§10.3. Естественный отбор алгоритмов?	91
§10.4. Неалгоритмическая природа математической интуиции.....	93
§10.5. Вдохновение, озарение и оригинальность.....	95
§10.6. Невербальность мысли	100
§10.7. Сознание у животных?	101
§10.8. Соприкосновение с миром Платона	103
§10.9. Взгляд на физическую реальность	105
§10.10. Детерминизм и жесткий детерминизм.....	107
§10.11. Антропный принцип	108
§10.12. «Плиточные» структуры и квазикристаллы	109
§10.13. Возможная связь с пластичностью мозга	112
§10.14. Временные задержки в реакции сознания	113
§10.15. Странная роль времени в сознательном восприятии.....	116
§10.16. Заключение: точка зрения ребенка.....	119
Эпилог	121
Литература	121
Иллюстративный материал, используемый в книге	128
Содержание	130