

VEcordia

Извлечение R-PENRO4

Открыто: 2010.08.28 02:21
Закрито: 2011.01.03 14:49
Версия: 2016.12.10 15:45

ISBN 9984-9395-5-3

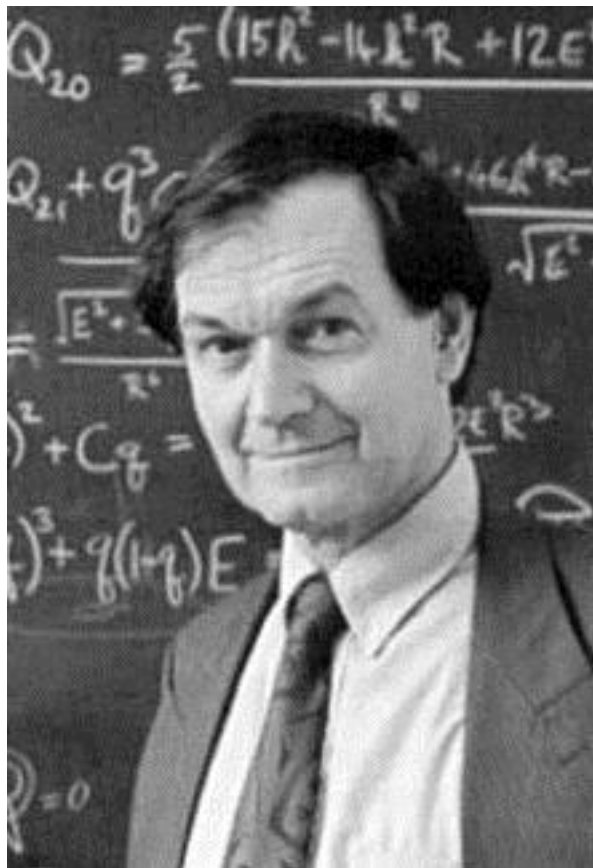
Дневник «VECORDIA»

© Valdis Egle, 2016

ISBN 5-354-00005-X

Роджер Пенроуз. «НРК», том IV

© Роджер Пенроуз, 1989



Roger Penrose

Роджер Пенроуз

НОВЫЙ РАЗУМ КОРОЛЯ

Том 4

(главы 7 – 8)

С комментариями Валдиса Эгле

Impositum

Grīziņkalns 2016

Talis hominis fuit oratio,
qualis vita

Роджер Пенроуз. «Новый Разум Короля»

(Продолжение; предыдущее в книге {PENRO3})

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 на с. 167 – 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

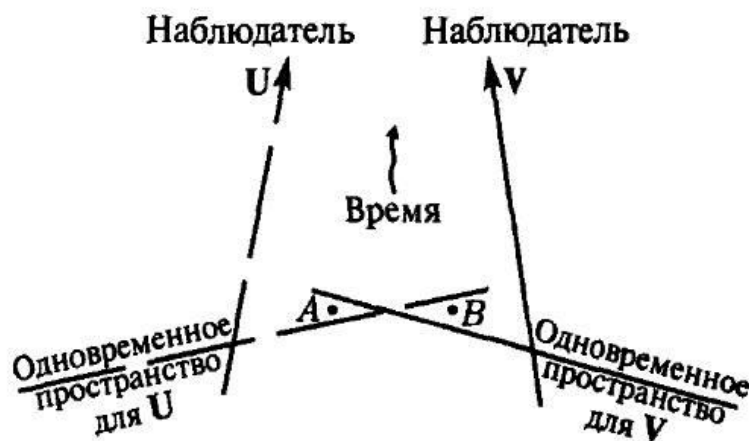


Рис. 7.1. Может ли время действительно «течь»? Для наблюдателя U , B может находиться в «фиксированном» прошлом, в то время как A лежит еще в «неопределенном» будущем. Наблюдатель V придерживается противоположной точки зрения!

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 {PENRO3}). 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 {PENRO3} (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, которая теряется стаканом с водой при его падении со стола. Таким образом, этой маленькой

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 {PENRO3}). 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.

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 которых частицы движутся скоординированным образом после некоторого крупномасштабного изменения физического состояния (в нашем случае – разбивания стакана и расплескивания

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 другу. 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».

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-болтунья 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-болтунье 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-болтунья 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, 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 большим 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.

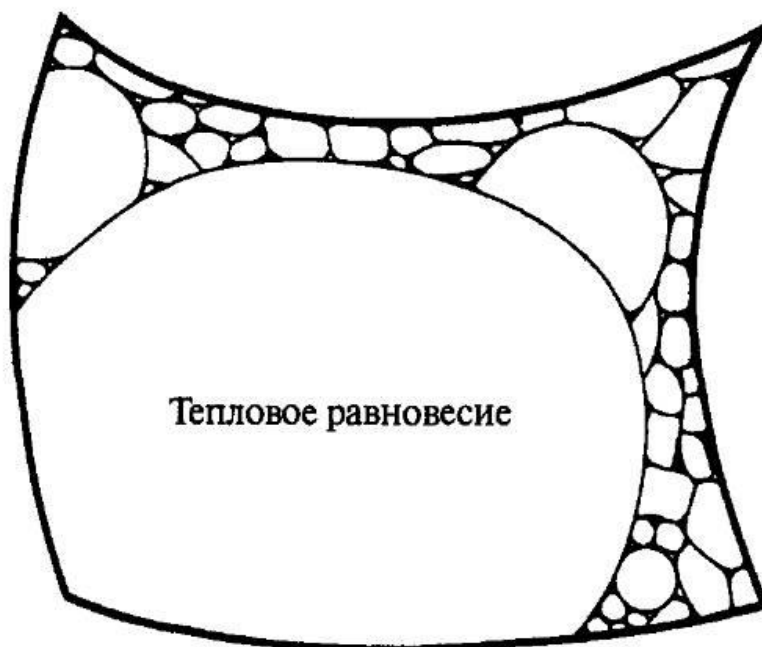


Рис. 7.3. Гранулирование фазового пространства на области, соответствующие макроскопически неотличимым состояниям. Энтропия пропорциональна логарифму фазового объема

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).

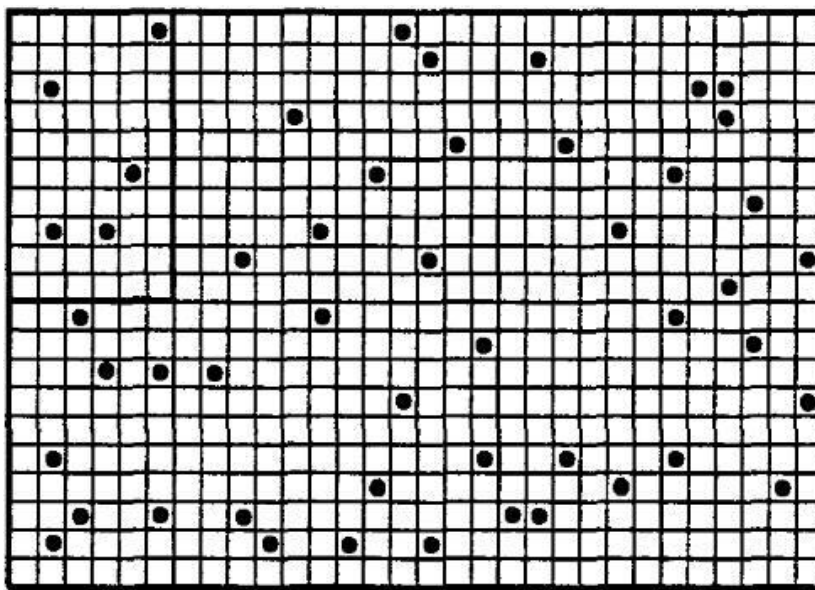


Рис. 7.4. Модель газа в ящике: некоторое количество шаров распределено по значительно большему числу ячеек. Одна десятая часть ячеек отмечены как особые. Эти ячейки выделены в левом верхнем углу

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 вероятность становится равной $1/10\,000$. Для пяти шаров – $1/100\,000$ и т.д. Для m шаров в пределе бесконечного числа ячеек вероятность стремится к $1/10^m$; т.е. для «газа» из m атомов

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

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 ($1/1\,000\,000$) 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 $1/1\,000\,000^m$, 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 $1/10^{60\,000\,000\,000\,000\,000\,000\,000\,000\,000}$

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 $10\,000\,000$ 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:

$$k = 1.$$

§7.4. 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

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. 83).

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.

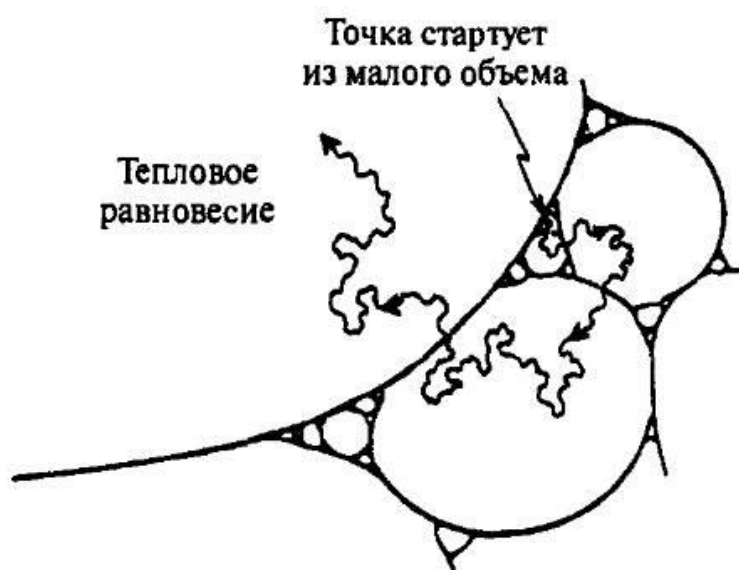


Рис. 7.5. Второе начало термодинамики в действии: с течением времени точка фазового пространства попадает в области всё больших и больших объемов. Следовательно, энтропия постоянно возрастает

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

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

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

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 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 удастся 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.

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 высокоэнтро-

пийной 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.



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

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 $E = h\nu$, приведенную на с. 191. 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 низкоэн-

тропийной 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 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

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.

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.

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 удаленные 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

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.

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

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.

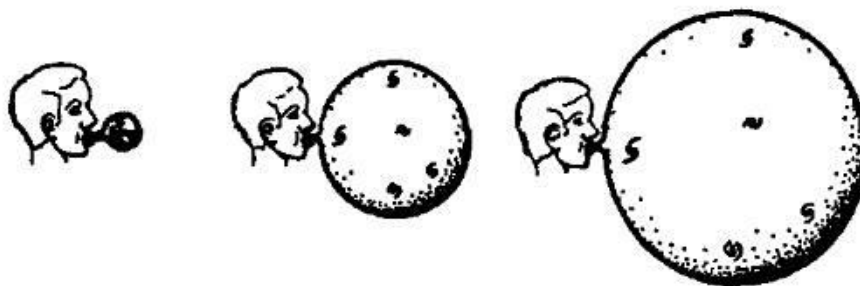


Рис. 7.8. Расширяющаяся вселенная очень напоминает поверхность надуваемого шара. Все галактики удаляются друг от друга

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. 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

полагались в качестве оценки возраста Вселенной сразу после открытия ее расширения Эдвином Хабблом приблизительно в 1930 году.

галактик, и эти кривые будут расходиться друг от друга в направлении будущего. И снова все мировые линии галактик оказываются равноправными.

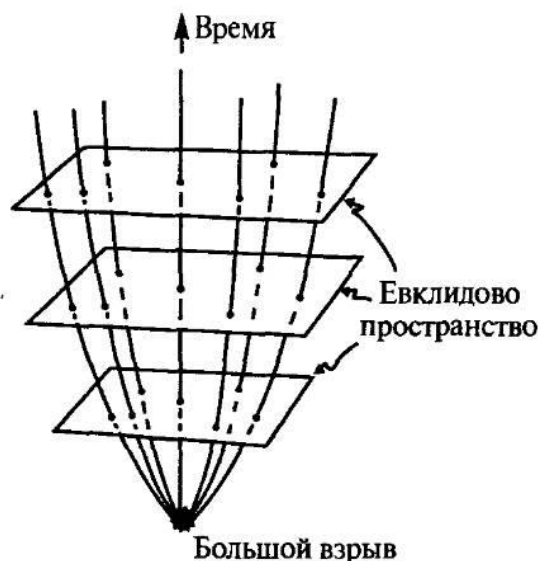


Рис. 7.9. Пространственно-временная картина расширяющейся вселенной с евклидовыми пространственными сечениями (показаны только два пространственных измерения)

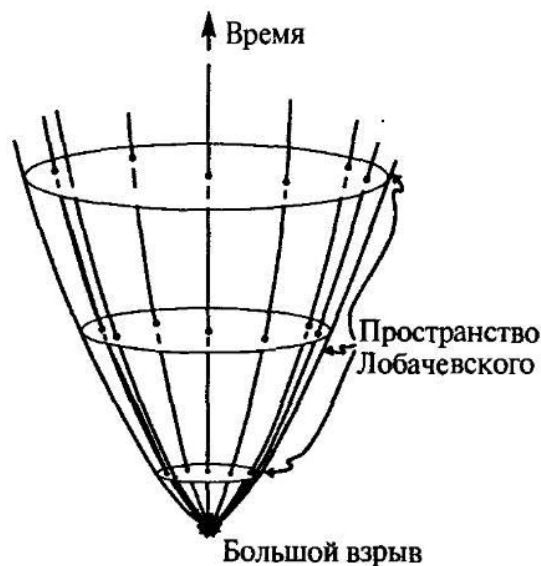


Рис. 7.10. Пространственно-временная картина расширяющейся вселенной с пространственными сечениями Лобачевского (показаны только два пространственных измерения)

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. 134). 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. 163). 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. 7.11a).

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

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.

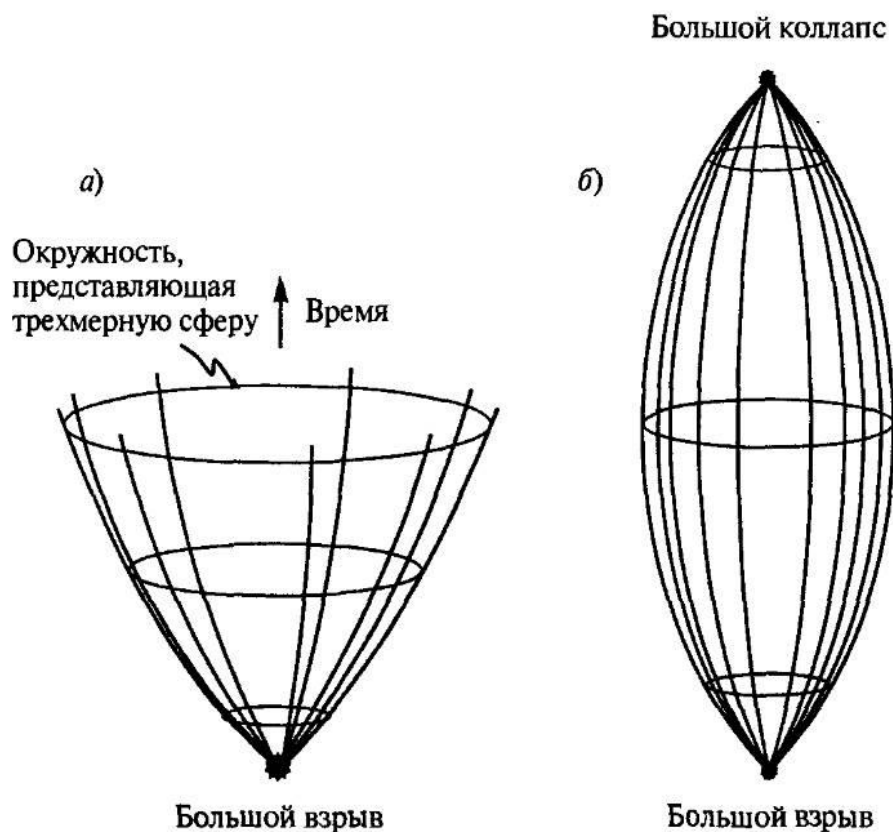


Рис. 7.11. а) Пространственно-временная картина расширяющейся вселенной со сферическими пространственными сечениями (показано только одно пространственное измерение); б) На конечной стадии вселенная испытывает большой коллапс

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 материи» – должно быть раз в тридцать больше того количества видимой материи, которую мы наблюдаем в телескопы. Имеются надежные косвенные свидетельства в пользу того, что

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».

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 десятилетия 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 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.

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!

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).

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.

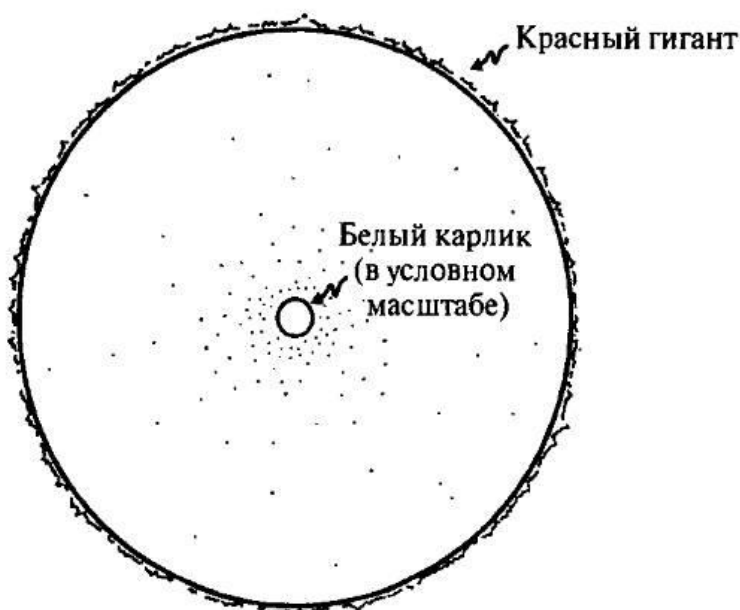


Рис. 7.12. Красный гигант с белым карликом в своей сердцевине

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 Субраманияном 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, 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

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.

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

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). Такую 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. 163). 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 размеров, для которого вторая космическая скорость превышает даже скорость света! Когда это происходит в действительности, мы и имеем черную дыру.²⁰

(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.

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].

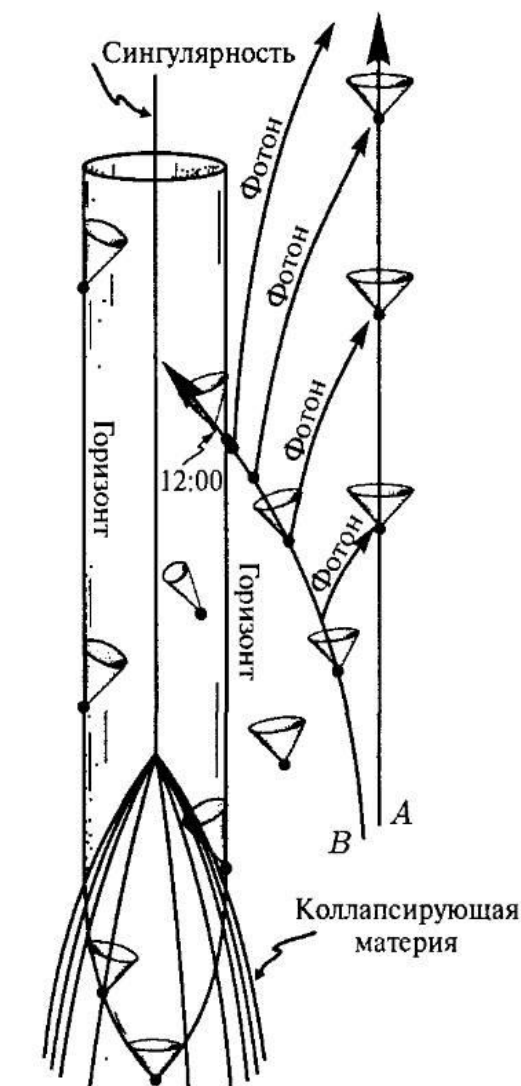


Рис. 7.13. Пространственно-временная диаграмма, демонстрирующая коллапс в черную дыру. Шварцшильдовский радиус обозначен как «горизонт»

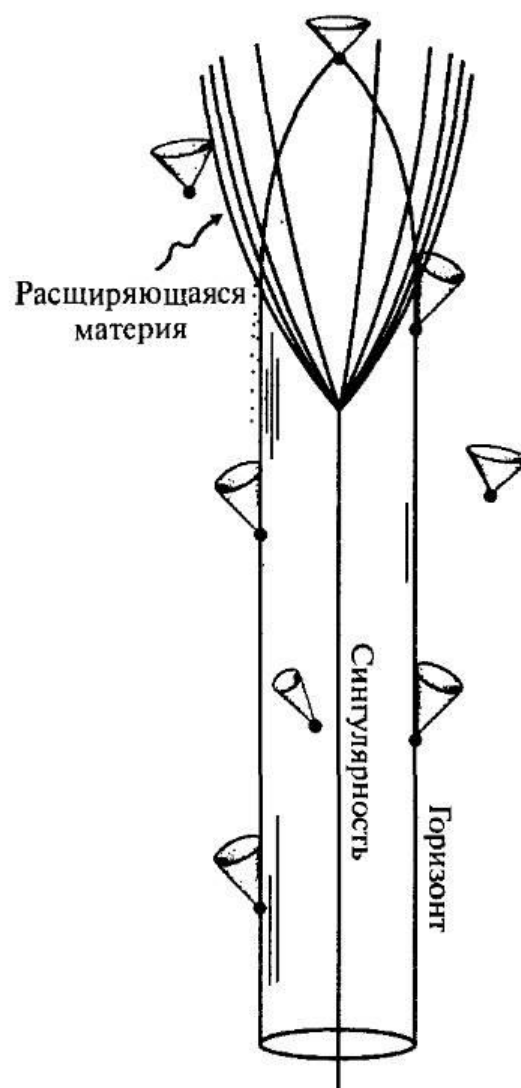


Рис. 7.14. Гипотетическая пространственно-временная конфигурация: белая дыра, эволюция которой приводит к расширяющейся материи (эта ситуация является обращением во времени рис. 7.13)

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. 173), 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.

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 застревает 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 осуществ-

вляться 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, порождаемая 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, 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

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!

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

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. 171), 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 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 Снайdera (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

(§7.11 – $B.Э.$) – будет предшествовать окончательный коллапс вселенной; второе допущение – (весьма правдоподобное), известно под названием «космическая цензура» (с. 178).

относительности с разумными источниками гравитации, пространственно-временные сингулярности неизбежны в случае гравитационного коллапса.

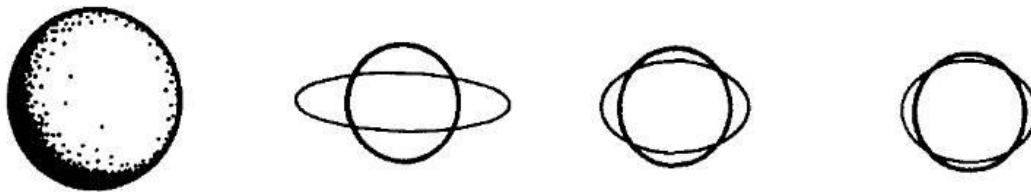


Рис. 7.15. Приливное воздействие, оказываемое сферическим притягивающим телом, возрастает по мере того, как другое тело приближается к нему, по закону обратного куба расстояния между центрами тел

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. 171). 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 намного 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.

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:

$$\text{ВЕЙЛЬ} = 0.$$

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

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.

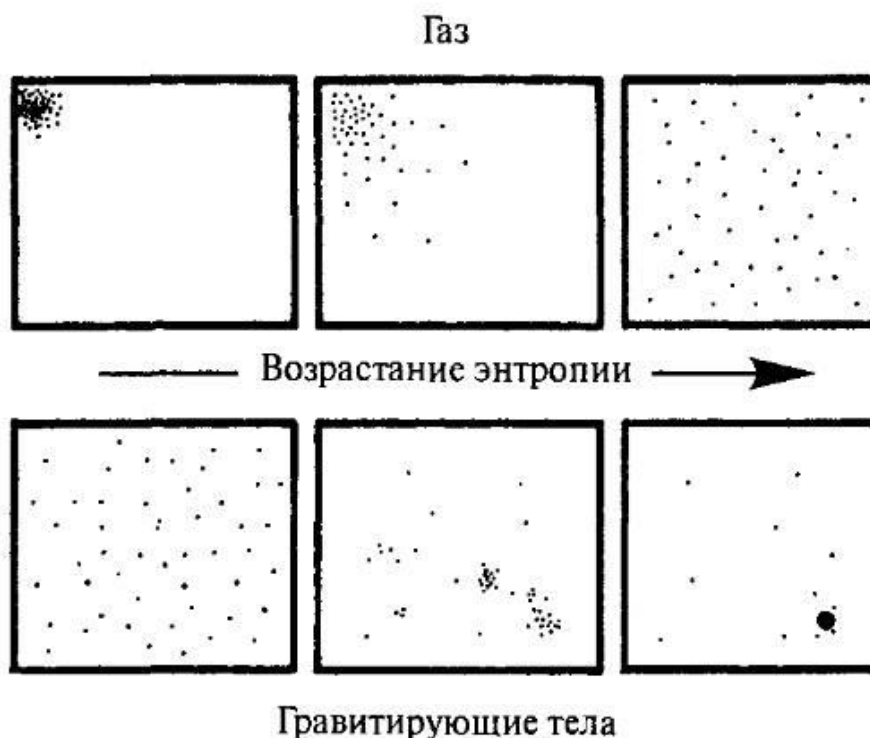


Рис. 7.16. Для обычного газа повышение энтропии связано с увеличением степени однородности его распределения внутри ящика. Для гравитирующих систем имеет место обратная ситуация. Высокая энтропия соответствует гравитационному конденсату, а максимальная – образованию черной дыры

Если мы исследуем сингулярность схлопывания в точной коллапсирующей ФРУ-модели, мы и здесь обнаружим, что в момент схлопывания $ВЕЙЛЬ = 0$, 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,

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

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!

§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

говоря, должна была бы обладать нелокальными свойствами.) К счастью, в наших рассуждениях мы можем обойтись и без нее.

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

(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!

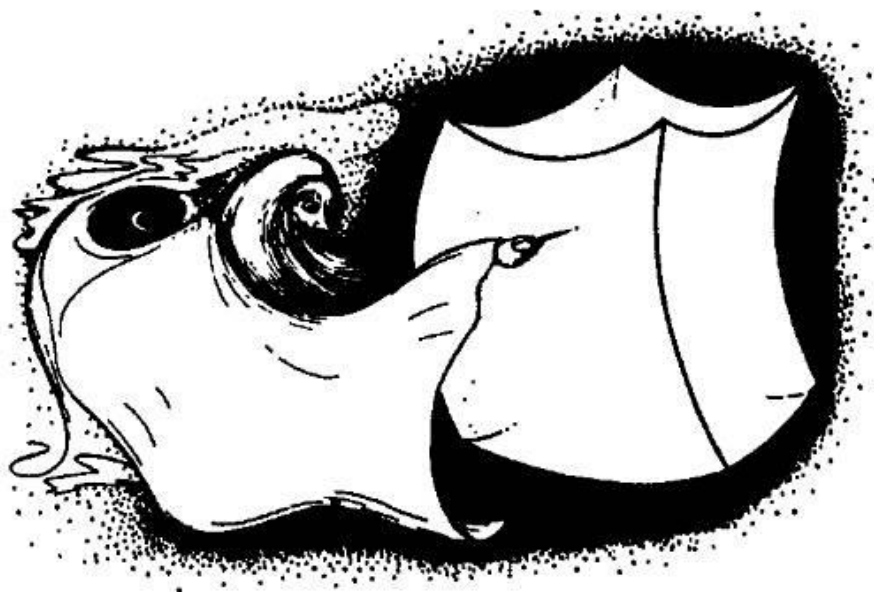


Рис. 7.19. Для сотворения вселенной, близкой по своим свойствам к той, в которой мы живем, Творец ограничивает свой выбор исчезающе малым объемом в фазовом пространстве возможных вселенных, в рассматриваемом случае – всего около $1/10^{10^{123}}$ объема всего пространства. (Этот объем и нацеленная на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

Попробуем представить себе фазовое пространство (с. 149) 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 существованием пространственно-временных сингулярностей, иногда сравнивают с другим тупиком: он имел место в начале XX века и был связан с проблемой устойчивости атомов (см. с. 189). В каждом из этих случаев хорошо обоснованная классическая теория приводит к ответу «бесконечность» и обнаруживает, тем самым, свою несостоятельность для решения соответствующей проблемы.

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 измеримое 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].)

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 $100\,000\,000\,000\,000\,000\,000\,000\,000\,000$ 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 неквантовая) 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 лишней 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. [203](#).)

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 расхожимости, 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.

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 иско-мой 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 впадать 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 четырех симметрий, обычно обозначаемых как T, PT, CT и CPT. Это (особенно нарушение CPT 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 начальные 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.

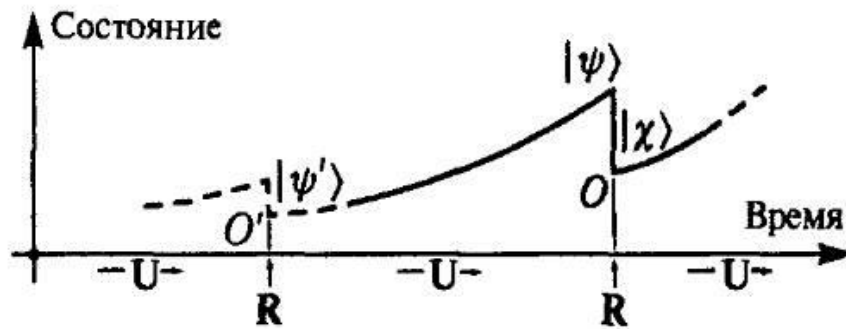


Рис. 8.1. Временная эволюция вектора состояния: гладкая унитарная эволюция U (в соответствии с уравнением Шрёдингера), перемежаемая с разрывной редукцией R вектора состояния

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

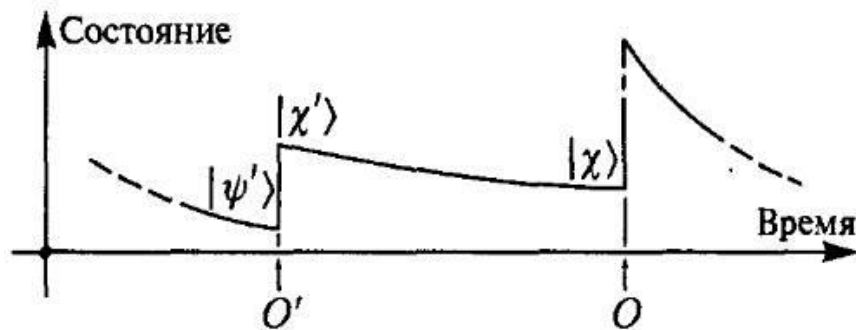


Рис. 8.2. Более экстравагантное изображение эволюции вектора состояния, описанное вспять по времени. Расчетная вероятность, связывающая наблюдение в точке O с наблюдением в точке O' , такая же, как и в случае, изображенном на рис. 8.1, но к чему относится это вычисленное значение?

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 [19796], 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 полупосеребрянное 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 $\langle\psi'|\chi\rangle = \langle\psi|\chi\rangle$, 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.

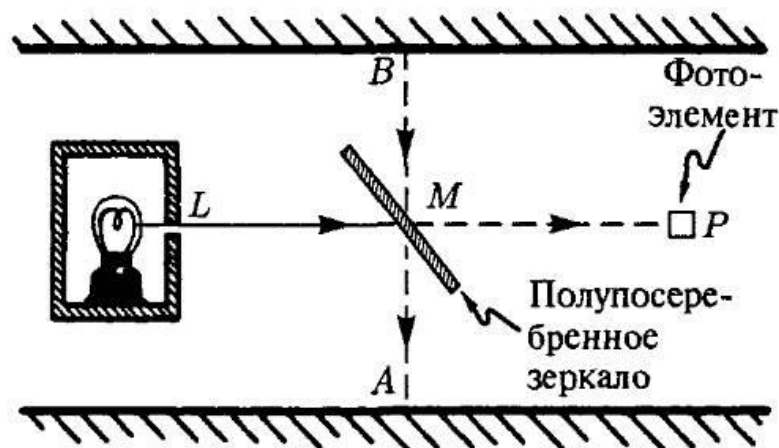


Рис. 8.3. Необратимость во времени R-процедуры в простом квантовом эксперименте. Вероятность регистрации фотона фотоэлементом при условии излучения фотона источником равна в точности одной второй, но вероятность излучения фотона источником при условии, что фотоэлемент зарегистрировал фотон, заведомо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

Свойства полупосеребренного 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 зафиксировали 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.) 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 большом), 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.

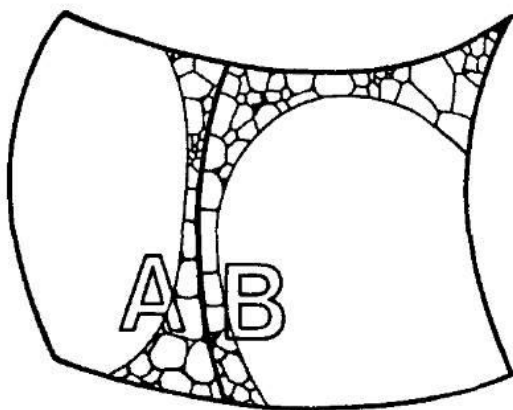


Рис. 8.4. Фазовое пространство $\mathbb{P}$ ящика Хокинга. Область $\mathbb{A}$ соответствует состояниям без черных дыр внутри ящика, а область $\mathbb{B}$ – состояниям, при которых внутри ящика есть хотя бы одна черная дыра

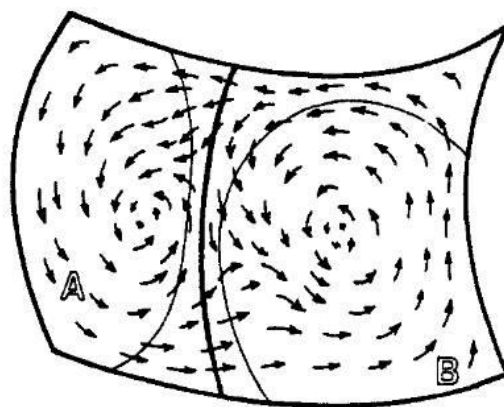


Рис. 8.5. «Гамильтонов поток» содержимого хокинговского ящика (см. рис. 5.11). Линии тока, пересекающие границу между областями в направлении от $\mathbb{A}$ к $\mathbb{B}$, соответствуют коллапсу в черную дыру, а линии, пересекающие границу от $\mathbb{B}$ к $\mathbb{A}$ – исчезновению черной дыры в 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. 150, 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

³⁶ В.Э.: Это §7.11 выше в этом томе.

³⁷ В.Э.: Это §8.2 выше в этом томе.

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 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 протаскать 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. 152) 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 изобретательность 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 дырной сингулярности в пространстве-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 $\mathbb{B}$!

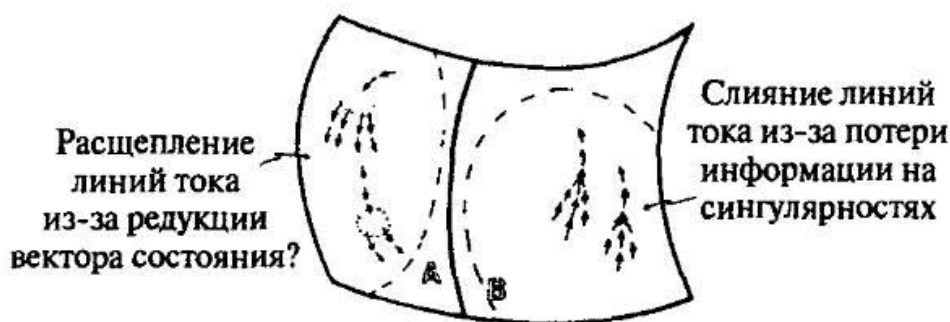


Рис. 8.6. В области $\mathbb{B}$ должно происходить слияние линий тока из-за потери информации на сингулярностях черных дыр. Компенсируется ли слияние порождением новых линий тока в результате R-процедуры (главным образом в области $\mathbb{A}$)?

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, 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 гильбертова, 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 оборотной 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. с. 234) 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,

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.

молекул и т.д., на котором хорошо действуют линейные правила (U) обычной квантовой механики, и «классическим уровнем» нашего повседневного опыта. Насколько «велик» 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. 208, и эксперименты типа ЭПР, проведенные Клаузером и Аспектом, с. 232.) Характерный масштаб массы в квантовой гравитации известен под названием планковской массы, приблизительно равной

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

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_{pl} 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).

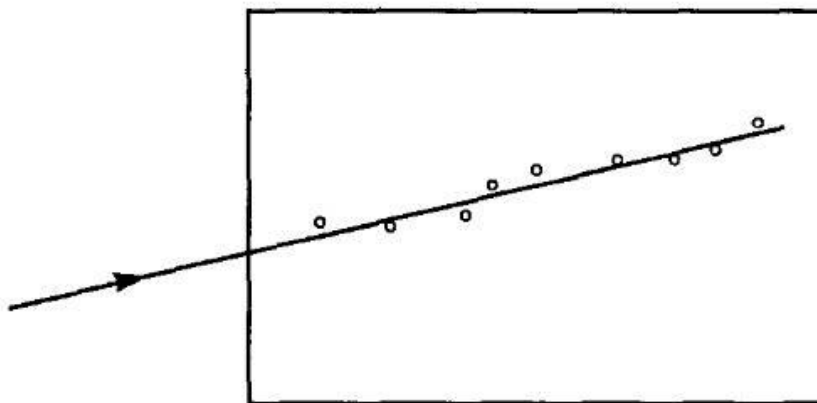


Рис. 8.7. Заряженная частица влетает в камеру Вильсона и вызывает конденсацию капелек на своем пути

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.

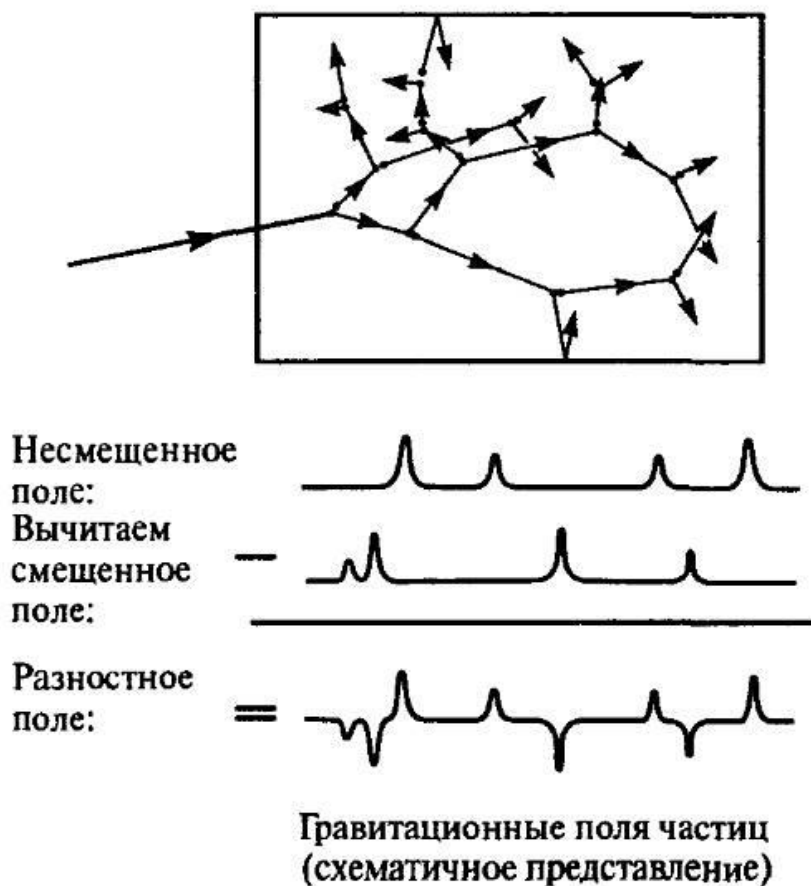


Рис. 8.8. Гравитационные поля частиц (условное изображение). При попадании частицы в ящик с газом через некоторое время практически все атомы газа оказываются охваченными порожденным частицей возмущением. Линейная квантовая суперпозиция частицы, попавшей в ящик, и частицы, не попавшей в ящик, подразумевает 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

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.

непосредственно наблюдаемым макроскопическим альтернативам. Я считаю, что R-процедура действительно может иметь место объективным образом даже в отсутствие столь ярко 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, отприкошетит 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 квантовомеханическое 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 квантовомеханического 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. 227 и 232), 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

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, Тод [1985], Уорд, Уэллс [1990]). Однако этой теории в лучшем случае недостает ряда существенных ингредиентов, и обсуждение ее здесь представляется неуместным.

убежден, что наше современное представление о физической реальности – особенно в том, что касается природы времени – нуждается в коренном пересмотре, пожалуй, 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 книге {[PENRO5](#)})

Векордия (VEcordia) представляет собой электронный литературный дневник Валдиса Эгле, в котором он цитировал также множество текстов других авторов. Векордия основана 30 июля 2006 года и первоначально состояла из линейно пронумерованных томов, каждый объемом приблизительно 250 страниц в формате A4, но позже главной формой существования издания стали «извлечения». «Извлечение Векордии» – это файл, в котором повторяется текст одного или нескольких участков Векордии без линейной нумерации и без заранее заданного объема. Извлечение обычно воспроизводит какую-нибудь книгу или брошюру Валдиса Эгле или другого автора. В названии файла извлечения первая буква «L» означает, что основной текст книги дан на латышском языке, буква «E», что на английском, буква «R», что на русском, а буква «M», что текст смешанный. Буква «S» означает, что файл является заготовкой, подлежащей еще существенному изменению, а буква «X» обозначает факсимилы. Файлы оригинала дневника Векордия и файлы извлечений из нее Вы **имеете право** копировать, пересылать по электронной почте, помещать на серверы WWW, распечатывать и передавать другим лицам бесплатно в информативных, эстетических или дискуссионных целях. Но, основываясь на латвийские и международные авторские права, **запрещено** любое коммерческое использование их без письменного разрешения автора Дневника, и **запрещена** любая модификация этих файлов. Если в отношении данного текста кроме авторских прав автора настоящего Дневника действуют еще и другие авторские права, то Вы должны соблюдать также и их.

В момент выпуска настоящего тома (обозначенный словом «Версия:» на титульном листе) главными представителями Векордии в Интернете были сайты: для русских книг – <http://vecordija.blogspot.com/>; для латышских книг – <http://vekordija.blogspot.com/>.

Оглавление

VEcordia	1
Извлечение R-PENRO4	1
Роджер Пенроуз	1
НОВЫЙ РАЗУМ КОРОЛЯ	1
Роджер Пенроуз. «Новый Разум Короля»	2
Глава 7. Космология и стрела времени	2
§7.1. Течение времени	2
§7.2. Неумолимое возрастание энтропии	4
§7.3. Что такое энтропия?	8
§7.4. Второе начало в действии	11
§7.5. Источник низкой энтропии во Вселенной	14
§7.6. Космология и Большой взрыв	18
§7.7. Горячий протошар	22
§7.8. Объясняется ли второе начало Большим взрывом?	23
§7.9. Черные дыры	24
§7.10. Структура пространственно-временных сингулярностей	29
§7.11. Насколько особым был Большой взрыв?	32
Глава 8. В поисках квантовой теории гравитации	38
§8.1. Зачем нужна квантовая теория гравитации?	38
§8.2. Что скрывается за гипотезой о вейлевской кривизне?	39
§8.3. Временная асимметрия в редукции вектора состояния	42
§8.4. Ящик Хокинга: связь с гипотезой о вейлевской кривизне?	47
§8.5. Когда происходит редукция вектора состояния?	52
Оглавление	57