

# ГЛАВА 13

## Проблема энтропии в циклической Вселенной

В последней главе мы займемся космологией. Основой для наших исследований послужат релятивистская механика и термодинамика. Здесь мы вступаем на увлекательный путь, на котором нас ждут опасные, но интересные проблемы.

*Р. Толмен (1934)*

### 13.1. Энтропия Вселенной

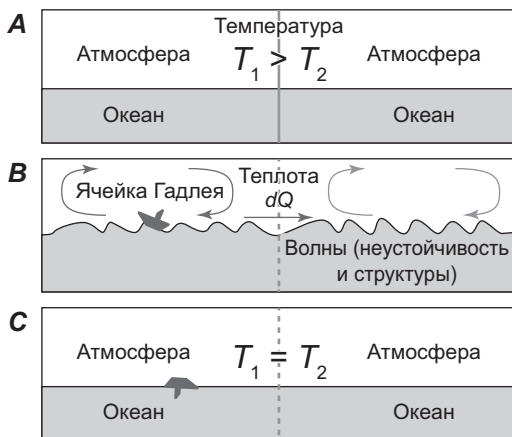
Мир горит, как огромная печь; энергия, хотя она и сохраняется, непрерывно рассеивается.

*И. Пригожин и И. Стенгерс. «Порядок из хаоса» (1986)*

Энтропию можно назвать характеристикой мертвой энергии. Энергия низкоэнтропийной системы является «живой силой», которая может преобразовывать систему и вызывать в ней новые структуры. Например, перепад температур в атмосфере вызывает ветер, который в свою очередь порождает волновую структуру на поверхности океана (рис. 7). Если температура в замкнутой системе выровняется, то ее суммарная энергия не изменится, но эта энергия станет бесплодной, «мертвой». Именно для ее характеристики и служит энтропия, которая становится максимальной для замкнутой системы с одинаковой температурой. Термин «мертвая энергия» не просто художественный образ, недаром Клаузиус пророчил остывающей Вселенной «тепловую смерть».

В классической термодинамике, не учитывающей гравитацию и подчиняющейся закону сохранения энергии, тепловая смерть замкнутой Вселенной неизбежна. Для анализа космологических моделей Ричарду Толмену в 1934 году пришлось отклониться от классической

термодинамической модели Клаузиуса, потому что гравитирующие системы ведут себя по-особенному. Например, если рассмотреть поведение газа в комнате при отсутствии любых внешних источников (или стоков) энергии, то через некоторое время температура газа в различных частях комнаты сравнивается.



Энергия:  $E_C = E_B = E_A$  Изменение энтропии S:

Энтропия:  $S_C > S_B > S_A$

$$dS = \frac{dQ}{T}$$

**Рис. 7.** Взаимоотношение энтропии, энергии и самоорганизации системы. Стадия А: изолированная модельная система из океана и атмосферы разделена непроницаемой перегородкой на две части. Температура левой части выше, чем правой:  $T_1 > T_2$ . Каждая из частей находится в тепловом равновесии, поэтому в них нет ветра и на океане штиль; стадия В — перегородка стала проводить тепло, отчего из левой части в правую устремилось тепло  $dQ$ . В результате энтропия левой части стала уменьшаться, а правой — расти (см. формулу для изменения энтропии внизу рисунка). За счет меньшей температуры правой части суммарная энтропия всей системы растет. Атмосфера в правой части нагревается возле перегородки, а в левой — остывает. Это вызывает атмосферную циркуляцию типа ячеек Гадлея, ветер и волны на поверхности океана; стадия С — температура левой и правой части выровнялась, суммарная энтропия стала максимальной и самоорганизация в системе прекратилась. Хотя энергия в состоянии С остается такой же, как и в стадиях А и В, она стала мертвой

Если же взять самогравитирующий газ, например, в объеме Солнечной системы, то система отказывается покорно двигаться к состоянию «тепловой смерти» и равномерного распределения температуры и может образовать сжимающуюся и саморазогревающуюся газовую структуру — протозвезду.

Тем самым гравитирующие системы ведут себя необычно, будто для них не выполняется второй закон термодинамики или закон сохранения энергии. Толмен связывает это с «общеизвестным нарушением закона сохранения энергии в релятивистской теории, если не введена потенциальная гравитационная энергия». Введя псевдотензор энергии гравитационного поля, Толмен и ряд других ученых считают, что в гравитирующих системах закон сохранения энергии спасен, хотя бы в нековариантном виде. С их точки зрения, законы сохранения в негравитирующих и гравитирующих системах ничем принципиально не отличаются.

Но мы видим, что с точки зрения способности к самоорганизации замкнутые гравитирующие и негравитирующие системы ведут себя так, как будто закон сохранения в первых не выполняется, в отличие от вторых. Природа не согласна с учеными, которые считают гравитационную энергию аналогичной обычной энергии — с точки зрения закона сохранения.

Гравитационная самоорганизация приводит к образованию галактик, звезд и созданию приемлемых для биологической жизни условий возле этих звезд (илл. 16). Необычность энергетических характеристик гравитационного поля является важнейшим физическим фактором для существования жизни во Вселенной. Итак, природа солидарна с Эйнштейном и Эддингтоном: отрицает реальный характер потенциальной энергии гравитационного поля и не признает попытки спасения закона сохранения с помощью псевдотензора гравитационной энергии. Отказ от физической реальности локальной гравитационной энергии лишает всякого смысла попытки преодоления нетензорности ее описания, а также рассмотрения ее в качестве дополнительного источника гравитационного поля. После признания условности локальной гравитационной псевдоэнергии (Эддингтон считал ее математической фикцией), общая теория относительности в своей версии 1919 года становится абсолютно стройной, элегантной и непротиворечивой теорией.

По классическим представлениям, основная энтропия Вселенной содержится в барионах, фотонах и нейтрино. Как показывают оценки (см. Приложение II), энтропия фотонов и нейтрино на 8 порядков превышает энтропию барионной составляющей нашего мира. Когда Ричард Толмен в 30-х годах прошлого века поднял проблему роста энтропии в моделях циклической Вселенной, то о термодинамике черных дыр ничего не было известно. Черные дыры долго рассматривались как редкая и экзотичная компонента нашей Вселенной. Общепринятым был взгляд на черные дыры как на неизлучающие объекты. Но Стивен Хокинг опубликовал в 1974 году в *Nature* статью с названием «Взрывы черных дыр?», где сделал следующее заключение: «любая черная дыра будет создавать и излучать частицы, такие как нейтрино или фотоны, с той скоростью, которую можно было бы ожидать, если бы черная дыра была телом с температурой...  $\approx 10^{-6}(M_{\odot}/M)$  К... Поскольку черная дыра испускает это тепловое излучение, можно ожидать, что она потеряет массу. Это, в свою очередь, увеличило бы поверхностную гравитацию и, таким образом, увеличило бы скорость излучения. Следовательно, у черной дыры будет конечный срок жизни порядка  $10^{71}(M_{\odot}/M)^{-3}$  с».

Бекенштейн и Хокинг в 1973–1975 годах ввели понятие энтропии черных дыр, которая пропорциональна их площади и тесно связана с понятием температуры черной дыры и феноменом ее излучения. Энтропия, как и площадь черных дыр, может только расти (для черных дыр звездных и более масс можно не учитывать медленное испарение Хокинга на космологических временах). Необходимость введения энтропии черных дыр следует из второго закона термодинамики, согласно которому энтропия системы не может уменьшаться. Но черная дыра, проглатывая вещество, делает энтропию этого вещества невидимой для внешнего наблюдателя. Чтобы выполнить требования второго закона термодинамики, нужно, чтобы черная дыра «забирала» себе энтропию поглощаемого вещества.

Таким образом, термодинамика стала рассматривать черные дыры звездных масс как экстремально холодные и медленно излучающие объекты с огромной энтропией. Современные оценки (см. Приложение II и табл. II) показывают, что энтропия, которая содержится в черных дырах звездной массы, на 8 порядков превосходит энтропию фотонно-нейтринной компоненты Вселенной.

Энтропия сверхмассивных дыр еще больше — она превосходит энтропию газа из фотонов и нейтрино на 15 порядков. Если же оценить энтропию Большой Черной Дыры, которая в максимуме сравнима с космическим горизонтом событий, то окажется, что она содержит львиную долю энтропии Вселенной, превосходя энтропию барионно-фотонной компоненты на 30 с лишним порядков, а энтропию всех черных дыр меньшей массы — почти на 20 порядков (см. Приложение II). Поэтому при обсуждении проблемы энтропии циклической Вселенной нужно, в первую очередь, рассматривать энтропию Большой Черной Дыры. Проблема энтропии тесно связана с судьбой этой дыры, которая рассматривалась в разделе 12.2.

**Таблица II.** Энтропия основных компонент Вселенной\*

	$Ent_1[k]$	$Ent_2[k]$
Звезды	$9,5 \times 10^{80}$	$3,5 \times 10^{78}$
Межзвездная среда и межгалактический газ	$7,1 \times 10^{81}$	$2,7 \times 10^{80}$
Реликтовые нейтрино	$5,2 \times 10^{89}$	$1,9 \times 10^{88}$
Фотоны	$5,4 \times 10^{89}$	$2,0 \times 10^{88}$
Черные дыры ( $2,5-5 M_{\odot}$ )	$5,9 \times 10^{97}$	$2,2 \times 10^{96}$
Сверхмассивные черные дыры	$3,1 \times 10^{104}$	$1,2 \times 10^{103}$
Космический горизонт событий	—	$2,6 \times 10^{122}$

\* Данные воспроизводятся с разрешения авторов (Egan & Lineweaver, 2010) и Американского астрономического общества. Два вида энтропии, указанные в таблице II, соответствуют разным моделям расчета (Egan & Lineweaver, 2010).

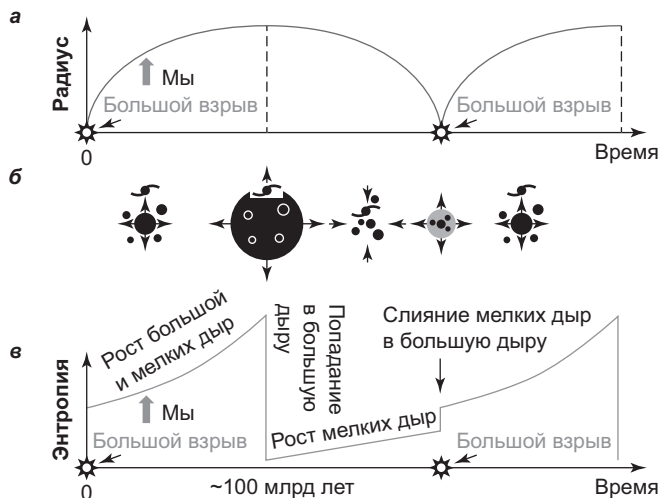
Легко убедиться, что решение, найденное нами для стационарности популяции черных дыр, то есть проникновение всех наблюдателей внутрь Большой Черной Дыры, является и решением проблемы энтропии. Здесь снова нужно рассмотреть точки зрения двух наблюдателей: внешнего и внутреннего. Энтропия черной дыры определена только для внешнего наблюдателя. С точки зрения внутреннего наблюдателя у черной дыры нет энтропии (Gorkavui, 2023). Следовательно, попав внутрь черной дыры, мы сбрасываем

примерно двадцать порядков энтропии и начинаем новый цикл с низкоэнтропийного состояния. Это уменьшение энтропии для видимой части Вселенной, поглощенной черной дырой, не является формальным математическим трюком: очевидна разница между расширяющейся, остывающей и постепенно замедляющейся Вселенной с высоким уровнем энтропии (Вселенная внешних наблюдателей) и сжимающейся с ускорением и нагревающейся Вселенной с низкой энтропией (Вселенной внутренних наблюдателей). В настоящее время мы находимся в статусе внешних по отношению к БЧД наблюдателей, но рано или поздно перейдем в статус внутренних наблюдателей. Интересно, что в момент этого перехода время на нашей Земле (и в Галактике) резко замедлится с точки зрения внешних наблюдателей. С нашей же точки зрения время будет течь как обычно, и весь процесс перехода внутрь черной дыры будет достаточно быстрым. Но по часам тех, кто наблюдает из безопасной галилеевской дали, поглощение Млечного Пути Большой Черной Дырой займет примерно сто тысяч лет, и то лишь благодаря тому, что поверхность Дыры быстро движется, иначе мы могли бы вообще навсегда застыть на ее границе (по часам внешних наблюдателей, конечно).

С термодинамической точки зрения новый цикл Вселенной начинается не с Большого взрыва, а именно с этой точки перехода внутрь Большой Черной Дыры, с момента резкого сброса энтропии, которая отмечает кардинальную смену динамики Вселенной. Видимо, эта точка является точкой минимума энтропии в космологическом цикле, потому что при фазе сжатия Вселенной рост сверхмассивных черных дыр будет продолжаться, что приведет к увеличению суммарной энтропии Вселенной при ее коллапсе (рис. 8).

Интересен вопрос об энтропии, которую несут с собой гравитационные волны. Если они увеличивают массу и площадь черной дыры, то увеличивают и энтропию черной дыры, значит, гравитационное излучение тоже обладает энтропией. Представляется логичным ввести понятие «гравитационной энтропии» или «псевдоэнтропии», которая содержится в гравитационном излучении (которое не разбивается на гравитоны, как бы этого ни хотелось квантовым гравитационистам). Полагаем, что свойства гравитационной энтропии схожи с характеристиками «гравитационной энергии»: эта псевдоэнтропия превращается в реальную только после взаимодействия гравитолны

с черной дырой или детектором волн — при тех же условиях, при которых псевдоэнергия гравизлучения превращается в реальную.



**Рис. 8.** Циклическая эволюция: радиуса пульсирующей Вселенной (а), галактик и размера Большой Черной Дыры (б) и энтропии наблюдаемой части Вселенной (в). В качестве начала цикла берется не Большой взрыв, а поглощение поля галактик растущей Большой Черной Дырой, из-за чего энтропия наблюдаемой Вселенной падает на много порядков. Черные дыры, растущие в сжимающейся Вселенной, увеличивают энтропию мира. При максимальном сжатии (перед моментом Большого взрыва) энтропия растет скачком из-за образования начальной большой дыры. Рост черных дыр, включая большую дыру, в расширяющейся Вселенной снова увеличивает глобальную энтропию.

Если псевдоэнтропия гравитационного излучения будет учитываться в балансе реальной энтропии после прохождения границы Большой Черной Дыры, то минимум энтропии после этого перехода не будет достигнут. И наоборот — без учета гравитационной энтропии и гравитационной энергии гравизлучения внутри Большой Черной Дыры, что мы полагаем правильным, Вселенная в черной дыре в начальный момент будет иметь минимальную энтропию (как и гравитирующую плотность среды меньше, чем полагается для дыры данного размера, потому что локальная гравитационная плотность гравизлучения равна нулю).

В каждом цикле Вселенной возникает Большая Черная Дыра, которая потом уходит на периферию, унося с собой весь груз энтропии, накопленный в данном цикле, и превращаясь во внешнюю максимальную дыру, которую мы называем Мегадырой. Она стационарна и может иметь размер в триллион световых лет, что заметно отличает ее от растущей Большой Черной Дыры, которая имеет начальный размер порядка светового года. Можно представить два варианта эволюции энтропии Вселенной:

1. Она растет с каждым циклом, что проявляется в медленном росте Мегадыры. Если предположить, что в каждом цикле накапливается энтропии на уровне  $10^{90}$  (энтропия фотонно-нейтринно-барионной составляющей) или  $10^{104}$  (суммарная энтропия черных дыр, за исключением БЧД) — см. Приложение II, то Мегадыра с энтропией  $10^{122}$  будет увеличивать свой радиус за каждый цикл на  $10^{-18}$  или  $10^{-32}$  часть радиуса. Это составляет (при радиусе Мегадыры в триллион световых лет) в первом случае около 30 световых секунд, или 10 миллионов километров, а во втором — 0,1 миллиметра. Характерное время изменения параметров такой квазициклической системы составит  $10^{20-30}$  циклов, что практически не отличается от идеальной циклической системы.
2. Если закон сохранения энергии в рамках всей Вселенной выполняется, то масса и радиус Вселенной (то есть радиус Мегадыры) меняться не должны. Следовательно, энтропия не растет, а только циклически меняется. Уход энтропии на периферию мира исключает ее из наблюдаемых параметров Вселенной, тем самым гипотетическое накопление энтропии где-то за горизонтом событий для нас не играет никакой роли. В этом смысле замкнутая Вселенная предстает как идеальная термодинамическая система, которая работает бесконечно благодаря таким абсолютно непроницаемым (изнутри) мембранам, как поверхность черной дыры. Эта термодинамическая идеальная циклическость не исключает того, что внутренность Мегадыры (то есть состав Вселенной) может меняться от цикла к циклу, стремясь, например, к стационарному, устойчивому балансу между различными компонентами мира.

Мы склоняемся к тому, что более реален второй вариант энтропийной эволюции Вселенной. Таким образом, Большая Черная Дыра

не только важный динамический механизм циклической модели, но и идеальный энтропийный маятник Вселенной.

## 13.2. Циклический баланс основных компонент Вселенной

Сегодня принято считать, что современное расширение — это один из многих циклов, через которые проходит закрытая Вселенная.

*Дж. Силк (1980)*

Дж. Силк в своей книге «Большой взрыв» (1980) предполагал, что Вселенная могла испытать около сотни циклов. Мы полагаем, что число космологических циклов гораздо больше — как минимум много сотен, иначе нельзя достичь наблюдаемого распределения черных дыр и других компонент Вселенной (см. Приложение II).

Приверженцы одноразовой модели Вселенной могут придумать механизм создания темной материи любой природы и на этом успокоиться. Перед сторонниками циклической космологии стоит гораздо более сложная задача: все компоненты осциллирующей Вселенной, включая темную материю, должны существовать в условиях изменения размеров мира на 10–11 порядков. Эти компоненты (и темная материя) не должны нарастать или уменьшаться от цикла к циклу — они в среднем должны быть стационарными. Под космологической стационарностью мы будем понимать приблизительное сохранение компонент Вселенной от цикла к циклу: например, в момент максимального сжатия состав и состояние Вселенной в разных циклах будут практически одинаковыми. Внутри цикла все составляющие Вселенной безусловно меняются в определенных пределах, взаимодействуя или перетекая друг в друга (см. рис. 8). Рассмотрим циклические преобразования материи в осциллирующей Вселенной.

### Барионно-фотонный цикл

Этот красивый цикл атомов, барионов и фотонов, который реализуется в циклической Вселенной, был найден в середине XX века. Он был первым открытым космологическим циклом, который одновременно является самым важным для нас — живых существ, состоящих из атомов. В настоящий момент этого цикла в результате термоядерных

реакций в звездном водороде во Вселенной образуются и накапливаются атомы достаточно тяжелых элементов, например углерода и кислорода, кремния и железа. Одновременно во Вселенной существует холодный фон из квантов электромагнитного реликтового излучения с температурой около 3 градусов Кельвина. Когда Вселенная остынет и начнет сжиматься, то температура реликтового излучения тоже начнет расти. При коллапсе Вселенной до размера в несколько световых лет температура фонового излучения увеличится до десятков миллиардов градусов. Это будут уже не фотоны, а гамма-кванты, которые обладают настолько большой энергией, что разбивают ядра любых химических элементов, включая самые прочные ядра атомов железа. Все атомные ядра распадаются в этой огненной среде и снова становятся газом из отдельных барионов — протонов и нейтронов (фактически «улемом» Гамова). «Улем» разбрасывается в ходе очередного Большого взрыва. Когда температура излучения достаточно упадет, то из протонов, нейтронов и электронов образуется водород и небольшое количество дейтерия и гелия. Из этой газовой среды возникнут звезды, которые снова будут накапливать ядра тяжелых элементов, необходимых для жизни и разума. Барионно-фотонный цикл замыкается — надежный и безотходный.

### **Барионно-чернодырный цикл**

В осциллирующей (периодической) Вселенной все должно начинаться циклам, причем взаимосвязанным. Например, барионное вещество не только взаимодействует с фотонами и друг с другом, оно, как было установлено в первой половине XX века, еще и порождает черные дыры в процессе звездной эволюции, а потом само поглощается растущими черными дырами. Как достигается стационарность барионной компоненты, если она проваливается в черные дыры?

В модели, где видимая Вселенная избавляется от самой Большой Черной Дыры, достигается и равновесие между черными дырами и барионным веществом: небольшие дыры все время поглощают его, но самая Большая Дыра снова освобождает почти все барионное вещество мира (для наблюдателей, которые попали внутрь этой самой большой дыры). На первый взгляд барионное вещество, которое попало в черные дыры звездных масс и в сверхмассивные дыры, не возвращается в наше пространство и остается невидимым, спрятанным внутри

черных дыр. Но на самом деле, это вещество постепенно переходит от маломассивных дыр в самые массивные, а когда самые массивные из них сливаются в самую большую черную дыру, то значительная доля ранее поглощенного барионного вещества возвращается в кругооборот видимого вещества Вселенной. Таким образом, барионное вещество нашего мира существует как в виде видимого вещества звезд и туманностей, так и в виде невидимых барионов, спрятанных внутри черных дыр. При коллапсе и Большом взрыве границы черных дыр сливаются и перекрываются — видимо, в ходе этого малоизученного процесса часть барионов внутри крупных дыр освобождается из-под горизонта событий внутренних, более мелких дыр.

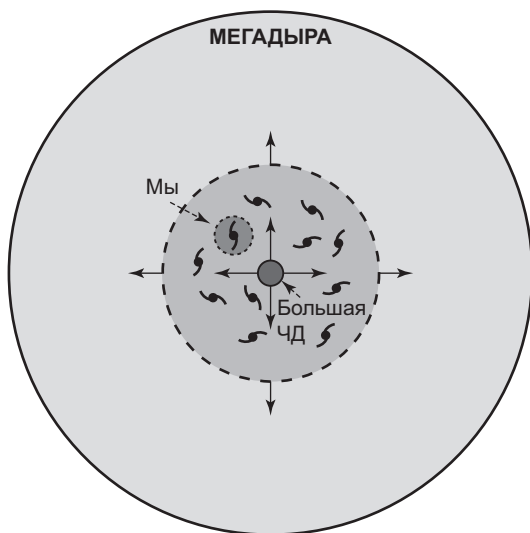
Точно такое же рассуждение применимо и к ответу на вопрос: почему не растет (или не падает) количество фотонов от цикла к циклу? Или не увеличивается плотность гравитационных волн? Потому что суммарный объем популяции черных дыр не меняется от цикла к циклу (если его замерять в определенный момент цикла, например при максимальном сжатии), следовательно, они не могут вместить барионов, фотонов и гравитационных волн больше определенного количества.

Гравитационные волны генерируются черными дырами и образуют с ними отдельный цикл.

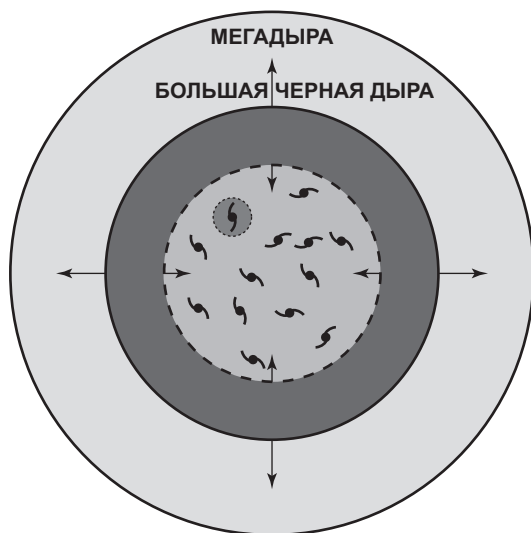
### **Чернодырно-гравволновой цикл?**

Этот цикл самый новый и фундаментальный, потому что черные дыры и гравитационные волны являются основными компонентами пульсирующей Вселенной. При сжатии Вселенной черные дыры сливаются друг с другом, порождая всплеск гравитационного излучения и уменьшение гравитационной массы Вселенной. Это уменьшение гравитационной массы обеспечивает антигравитацию, которая является динамической пружиной Большого взрыва. При расширении Вселенной черные дыры снова растут по массе, поглощая гравитационные волны и вызывая эффект гипергравитации. Черные дыры являются основной гравитирующей компонентой Вселенной, а гравитационные волны — ее основным энергетическим ресурсом, наоборот, не имеющим собственной гравитационной массы. Вселенная представляет собой своеобразный маятник в виде системы «черные дыры — гравитационные волны».

В случае обычного маятника реальная кинетическая энергия переходит в потенциальную гравитационную энергию (которая является псевдоэнергией), после чего происходит обратный процесс — и это обеспечивает циклическое колебание маятника. В случае Вселенной гравитационная масса популяции черных дыр быстро уменьшается, сбрасывая энергию в резервуар гравитационных волн, после чего происходит медленный обратный процесс превращения энергии гравитационных волн в гравитационную массу черных дыр. Первая часть этого циклического процесса обеспечивает Большой взрыв и расширение Вселенной, а вторая — растяжение поля галактик, характеризующееся эффектом положительной космологической постоянной, остановку расширения Вселенной и ее коллапс (рис. 8 и рис. 9 а, б, в).



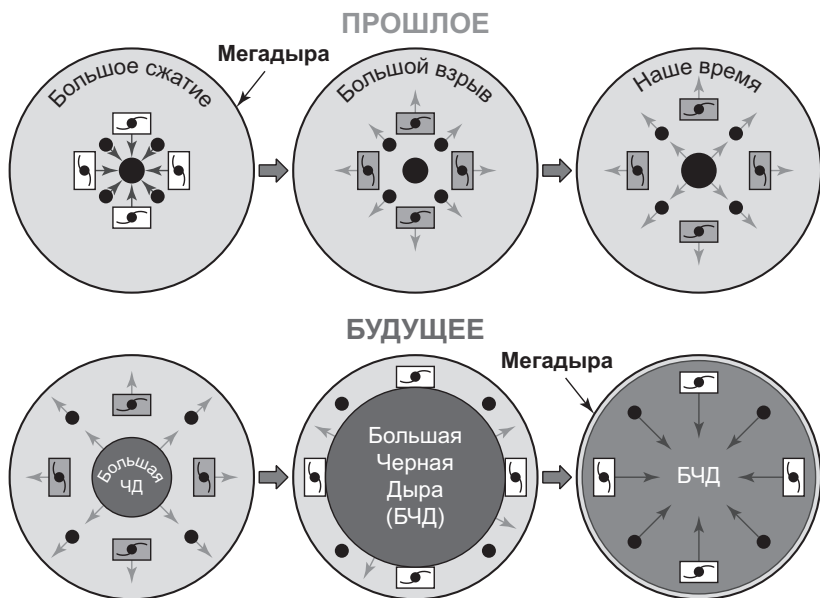
**Рис. 9а.** Модель циклической Вселенной в черной дыре (современная стадия расширения). Стационарная черная Мегадыра содержит пульсирующую часть Вселенной с полем галактик, которая расширяется (ее граница отмечена штрихованной линией). Мы будем называть эту часть Вселенной Мегагалактикой. Окружающая нас часть Вселенной показана кружком другого оттенка с границей из точек. Большая Черная Дыра в центре Вселенной пока мала, но расширяется, увеличивая свою массу



**Рис. 96.** Модель циклической Вселенной в черной дыре (стадия сжатия). Большая Черная Дыра в ходе своего расширения остановила разбегание поля галактик (метагалактики), поглотила их и заставила двигаться к центру Вселенной. Сама БЧД продолжает расширяться, поглощая фоновые гравитационные волны, и асимптотически (в пределе) стремясь к размеру (и статусу) Мегадыры

Гравитационные волны рождаются при слиянии черных дыр, а при поглощении большими черными дырами они не уничтожаются, а «прячутся» внутри горизонта событий. Следовательно, должен существовать механизм, который физически уничтожает гравитационные волны. Таким механизмом может быть эффективная диссипация высокочастотных гравитационных волн в плотной среде максимально сжатой Вселенной.

Нужно отметить, что понятие черной дыры хорошо определяется для покоящегося внешнего наблюдателя. Для падающего наблюдателя ввести понятие черной дыры или горизонта событий уже значительно сложнее — он легко проникает сквозь поверхность черной дыры. В парадоксальное положение попадают наблюдатели в сжимающейся Вселенной (мы рано или поздно тоже окажемся в их роли): для небольших дыр, мимо которых эти наблюдатели пролетают, они — внешние, поэтому эти дыры для них обладают классическими



**Рис. 9в.** Шесть этапов одного цикла нашей Вселенной: верхние три соответствуют периоду от Большого сжатия до нашего времени, а нижние три — будущему развитию Вселенной вплоть до начала нового коллапса. Одна из интересных проблем: сольется ли поверхность Большой Черной Дыры с поверхностью Мегадыры? Теоретически Мегадыра может немного подрастать благодаря поглощению излучения из внешнего пространства. Возможно, граница нашей Вселенной представляет собой многослойную структуру, медленно увеличивающую свой радиус

свойствами черных дыр. Внутренняя часть Мегагалактики, куда летят все коллапсирующие наблюдатели, уже не является чем-то сторонним для них. Поэтому им трудно решить, является ли черной дырой какое-то скопление вещества впереди них.

Падающий наблюдатель будет легко преодолевать все встречающиеся на пути горизонты Шварцшильда в своем стремлении добраться до точки сингулярности, а вернее, до самого сжатого состояния Вселенной, за которым последует Большой отскок или Большой взрыв.

При обсуждении топологии Вселенной обычно утверждается, что гравитации наблюдаемого вещества недостаточно для замыкания на-

шего мира, даже с учетом темной материи. Оценки гравитирующей материи делаются прямым подсчетом материальных объектов — по их излучению, или поглощению, или гравитационному линзированию. Кроме того, возмущения гравитирующей среды отражаются в неоднородностях реликтового излучения, что дает еще один способ оценки самогравитации Вселенной.

Такой анализ приводит к выводу, что гравитационные волны, в предположении их самогравитации, являются несущественной космологической примесью. Но гравитационное излучение — весьма нетривиальный феномен, оно, согласно трактовке Эйнштейна — Эддингтона — Шрёдингера, не обладает собственным гравитационным полем и не дает вклада в флуктуации самогравитирующей среды, тем самым выпадает из такого анализа. Одновременно при взаимодействии с детектором гравитационная волна переводит свою негравитирующую псевдоэнергию в реальную энергию детектора, которая гравитирует.

Примерами гравитационных детекторов являются, например, свободно подвешенные зеркала в детекторе LIGO и такие абсолютные поглотители гравволн, как черные дыры. Черная дыра поймает гравитационное излучение и соответственно увеличит свою массу. Поэтому когда Большая Черная Дыра проглотит Млечный Путь, то мы по-прежнему будем считать, что плотность среды недостаточна для черной дыры. Но если учесть весь спектр фонового гравитационного излучения и подсчитать его энергию (с математической помощью псевдотензора), то полученная энергия будет достаточной для образования черной дыры. Фактически гравитационное излучение является недостающей и трудноуловимой компонентой для замыкания Вселенной.

Циклическая Вселенная похожа на великолепно отлаженный часовой механизм, в котором все жестко взаимосвязано и взаимозависимо. Выше мы рассмотрели три главные шестеренки этого механизма — три наиболее важных цикла, в которые вовлечены основные компоненты Вселенной:

1. Барионы — фотоны.
2. Барионы — черные дыры.
3. Черные дыры — гравитационные волны.

Конечно, космологические циклы существуют для всего — например, для атомов железа или золота, для галактик, звезд и т. д. Обычно они являются частью главных циклов, но могут образовывать и отдельные циклы.

Примечательной особенностью обсуждаемой модели является то, что она полностью построена на классической теории гравитации с привлечением хорошо проверенных фактов из квантовой механики и ядерной физики — как в случае эффекта фотодиссоциации атомных ядер. Для создания данной космологической теории не было сделано ни одного предположения вроде существования неизвестных сил, полей или размерностей, а также не было введено ни одной новой фундаментальной константы. Если в предполагаемых зависимостях и появляются феноменологические величины, то они имеют временный характер и будут в дальнейшем заменены на физические параметры, вычисленные в рамках более детальных моделей.

Квантовая гравитация оказалась ненужной для построения космологии и решения проблемы сингулярности. Это не означает, что квантовая гравитация не может быть построена. Вполне возможно, что такая теория будет создана и выявит новые глубинные связи между бозонами Хигса, гравитирующей материей и искривленным пространством-временем. Но все основные пружины динамики Вселенной могут быть объяснены в рамках теории гравитации Эйнштейна (и даже ньютоновской динамики с обобщением на конечность скорости распространения гравполя) и уже развитой теории квантов и атомов. Вероятнее всего, любые будущие углубленные теории гравитации не окажут существенного влияния на развиваемые ныне космологические модели Вселенной. Рецепт кипячения воды в чайнике не зависит от развития квантовой механики и от знания, что вода состоит из молекул.

### **13.3. Альтернативные циклические космологии**

В настоящее время опубликованы десятки различных моделей пульсирующей Вселенной. Для их детального обзора потребуется как минимум отдельная книга. Поэтому мы рассмотрим только четыре современные модели осциллирующей Вселенной, которые хорошо демонстрируют диапазон идей в данной области.

## 1. **Экспиротическая циклическая Вселенная** (модель Стейнхардта — Турока).

Авторы этой теории считают, что к концу XX века классические циклические модели Вселенной потеряли привлекательность, потому что получили сильные удары как от теоретиков, так и от наблюдателей (Стейнхардт и Турок, 2007). Стейнхардт и Турок перечислили эти возражения: аргумент Толмана, который отметил, что циклическая Вселенная должна увеличивать энтропию от цикла к циклу, следовательно, она не будет реально циклической. Целый ряд других теоретиков доказывали, что сжимающаяся Вселенная станет сильно неоднородной и хаотической, что исключает ее расширение в гладкую расширяющуюся Вселенную. При этом коллапс Вселенной должен непременно вызвать гравитационную сингулярность, где плотность станет бесконечной. Возражения со стороны наблюдателей заключались в том, что Вселенная при расширении не тормозится, как того требует цикличность, а ускоряется благодаря таинственной темной энергии. Кроме того, подсчеты астрономов показали, что наблюдаемой плотности гравитирующей среды не хватает для замыкания Вселенной.

Стейнхардт является известным критиком теории инфляции, поэтому он принялся за разработку новой модели, которая должна была найти аргументы против всех возражений теоретиков и наблюдателей. Согласно модели экспиротической Вселенной, наблюдаемое нами трехмерное пространство — это брана (производное от слова «мембрана»), или подпространство, погруженное в многомерное пространство (Стейнхардт и Турок, 2002, 2007). По оси времени в этом многомерном пространстве рядом с нашейбраной находится еще одна трехмерная брана. Две браны взаимодействуют друг с другом — сближаются и расходятся. При столкновении бран происходит Большой взрыв с рождением горячего вещества. Сингулярности при этом не возникает. Две браны притягиваются друг к другу, что объясняет феномен темной энергии и обеспечивает новое сближение и столкновение бран.

Теория экспиротической Вселенной сталкивается с рядом проблем — например, природа взаимодействия между бранами неизвестна. Само существование двух трехмерных бран в много-

мерном пространстве не следует из какой-либо теории, включая теорию струн, которая рассматривает многомерные пространства. Как в этой модели Стейнхардта — Турока решается проблема энтропийного аргумента Толмена? Каждая из бран расширяется, поэтому, хотя суммарная энтропия на каждой бране растет, плотность энтропии в каждом заданном участке пространства уменьшается. Поэтому при столкновении бран рождается новый мир с низкой энтропией. Пенроуз (2016) указал, что за время между циклами Вселенной (или столкновениями бран), например за триллион лет, сверхмассивные дыры в центрах галактик никуда не исчезнут, а именно они содержат в себе основную часть энтропии Вселенной: «Несмотря на то что в ходе экспоненциального расширения они будут сильно рассеяны, в ходе окончательного коллапса они снова соберутся вместе и, вероятно, они станут важной частью финального сжатия. Мне совершенно непонятно, почему их можно игнорировать в предложенном экипротическом переходе от сжатия к взрыву!» (Пенроуз, 2016). Отметим, что это возражение Пенроуза относится ко многим циклическим космологиям, которые игнорируют проблему перехода черных дыр в новый цикл Вселенной.

В более поздних работах (см.: Иджас и Стейнхардт, 2022 и ссылки в ней) было показано, что размер Вселенной увеличивается в течение одного цикла на 70 порядков. Возникает вопрос: можно ли считать столь стремительно увеличивающуюся Вселенную циклической?

Иджас и Стейнхардт (2022) утверждают, что теория экипротической циклической Вселенной решает целый ряд старых космологических проблем. К сожалению, в рамках этой модели не сделано ни одного оригинального (то есть присущего только данной теории) наблюдательного следствия, которое бы успешно подтвердилось.

## 2. **Модель Аштекара**, основанная на петлевой квантовой гравитации.

Теория петлевой квантовой гравитации строится на гипотезе о дискретности пространства-времени, которое поделено на ячейки размером в  $10^{-33}$  сантиметра. Движение тел представля-

ет собой возбуждение ячеек, или квантов, пространства. Время тоже квантовано и движется скачками в  $10^{-43}$  секунды (Аштекар и др., 2006; Смолин, 2006; Аштекар и Слоан, 2011). Согласно расчетам в рамках этой теории, фотоны различных энергий должны перемещаться с разными скоростями, но пока этот эффект не зарегистрирован. На основе петлевой квантовой гравитации была построена космологическая модель, которая избавлена от сингулярности, то есть сжатия в точку с бесконечной плотностью, — хотя бы потому, что в новой теории точки пространства заменились на ячейки объемом  $10^{-99}$  кубических сантиметров. Согласно этой модели, Большой взрыв является следствием отскока Вселенной, коллапсировавшей в прошлом, что допускает цикличность нашего мира. Космология, основанная на петлевой квантовой гравитации, применима как к открытой, так и к закрытой Вселенной (Аштекар и дел Рио, 2022).

### 3. **Модель Поплавского:** Вселенная, пульсирующая в черной дыре.

Эта теория основана на теории Эйнштейна — Картана, которая включает кроме классического гравитационного поля дополнительные физические поля, которые и объясняют Большой взрыв и ликвидируют сингулярности (Поплавский, 2016). Эта теория предполагает Вселенную анизотропной и использует квантовые поля в искривленном пространстве. Размещение Вселенной в черной дыре автоматически означает, что современное расширение рано или поздно сменится на сжатие, потому что ничего из черной дыры убежать не может. В данной теории время космологического цикла и размер Вселенной тоже увеличивается. Очевидно, что с ростом размера Вселенной ее энтропия тоже растет. Теория допускает возможность, что в нашей Вселенной могут существовать белые дыры — то есть такие антигравитационные дыры, которые не поглощают вещество, а выбрасывают его.

### 4. **Конформная циклическая космология.**

Подавляющее большинство моделей циклической Вселенной основано на неэйнштейновских теориях гравитации (в основном квантовых) и на предположениях о новых физических полях, пространственно-временных измерениях и т. д. Конформная

модель пульсирующей Вселенной, развиваемая Пенроузом и его соавторами (Пенроуз, 2011; Гурздян и Пенроуз, 2013; Пенроуз, 2016), является одной из немногих циклических космологий, которые базируются на теории Эйнштейна и не предполагают экзотических субстанций с аномальными свойствами. Пенроуз скептически относится к современным веяниям в космологии и называет теорию инфляции «фантазией» (Пенроуз, 2016).

Пенроуз считает, что Вселенная проходит бесконечное количество циклов, или эонов. Он выдвинул интересную гипотезу о возможности получения из прошлых циклов информации черных дыр и гравитационного излучения, что убирает необходимость введения темной энергии. Влияние реликтовых (то есть пришедших из прошлых циклов) сверхмассивных черных дыр проявляется в виде кругов, следы которых Пенроуз и Гурздян нашли в реликтовом микроволновом излучении (Гурздян и Пенроуз, 2013). Возможно, в нашем цикле существуют и разумы из прошлых эонов.

Пенроуз вместе с Хокингом доказал в рамках теории Эйнштейна теорему о существовании сингулярности при коллапсе Вселенной. Но не в сингулярности Пенроуз видит главную проблему циклической космологии. Пусть существует какой-то, пусть квантовый, механизм, который предотвращает сингулярность и вызывает Большой взрыв. Ключевая проблема, которую постоянно обсуждает Пенроуз, лежит еще глубже: это проблема уменьшения энтропии при переходе от сжатия к расширению. Действительно, при сжатии Вселенной ее неоднородность растет из-за приливных сил и образования черных дыр. Пенроуз первым отметил, что при таком коллапсе образуется и самая крупная черная дыра. В конце коллапса материя Вселенной погружается в хаос и разогревается до высоких температур, которые разрушают даже ядра атомов. Энтропия мира достигает своего максимума. Зато после Большого взрыва мы видим разлетающуюся материю с низкой энтропией, о чем говорит высокая однородность реликтового излучения, рожденного веществом Вселенной всего спустя 380 тысяч лет после Большого взрыва. Это резкое падение энтропии, противоречащее второму закону термодинамики, и является главной проблемой, с которой борется Пенроуз.

Он предложил следующий выход: пусть Вселенная расширяется бесконечно — то есть настолько долго, что даже сверхмассивные черные дыры успевают испариться по механизму Хокинга. Пенроуз полагает, что массы элементарных частиц тоже уменьшаются, при этом протоны и электроны должны быть нестабильны. В бесконечно удаленный момент времени Вселенная будет представлять собой однородный газ из фотонов с низкой энтропией. Если во Вселенной нет частиц, из которых можно построить часы и рулетку, чтобы измерить время и пространство, то, как считает Пенроуз, исчезает всякая разница между огромной и маленькой Вселенной. В этот момент Пенроуз применяет к Вселенной оператор конформного преобразования. В геометрии такое преобразование пространства сохраняет форму фигур, которые были в этом пространстве. Оператор Пенроуза резко уменьшает размер Вселенной — вплоть до такого малого объема, который будет снова расширяться в Большом взрыве. Пенроуз не знает механизма такого резкого уменьшения размеров Вселенной, зато в его модели постулируется низкая энтропия перед Большим взрывом и парадоксальный скачок энтропии исчезает.

Вряд ли волшебный оператор Пенроуза существует в реальности. Решение энтропийного парадокса Пенроуза можно найти в рамках развиваемой нами космологии. Безусловно, что энтропия Вселенной при коллапсе растет, потому что все больше потенциальной и кинетической энергии движения галактик переходит в тепловую энергию — пока Вселенная не превратится в квази-однородный раскаленный шар из гамма-квантов и барионов с примесью электронов и нейтрино. В этот шар вкраплены черные дыры, которые тоже растут при коллапсе Вселенной за счет аккреции окружающего вещества и увеличивают свою энтропию. Как перейти от этого высокоэнтропийного состояния сжимающейся неоднородной Вселенной к низкоэнтропийному состоянию расширяющейся однородной Вселенной? Задача выглядит неразрешимой, но если мы имеем дело с природным процессом, то нужно учитывать, что природа всегда находит решение неразрешимых задач.

Большой взрыв и низкая энтропия расширяющегося однородного огненного шара оплачена резким ростом энтропии популяции черных дыр. Сливающиеся черные дыры вызывают антигравитацию, которая разворачивает коллапс вещества и одновременно скачком

увеличивают свою, а следовательно, и общую энтропию Вселенной. Благодаря этому «самопожертвованию» черных дыр энтропия огненного шара из барионов и излучения оказывается низкой. Аналогия: пусть на Земле стоит ракета с пороховым двигателем, обладающая определенной энтропией. Когда двигатель заработает, то ракета взлетит. Ее собственная энтропия уменьшится благодаря тому, что порох сгорел, то есть перешел в высокоэнтропийное состояние в виде пороховых газов. Так и Вселенная «взлетает» в момент Большого взрыва, используя сливающиеся черные дыры как топливо. Наблюдаемая в телескопы часть Вселенной из излучения, газа и звезд приобретает низкую энтропию полета благодаря тому, что невидимые черные дыры резко увеличивают свою энтропию. Их роль в общей картине мира долго не замечалась, поэтому и возник парадокс резкого сброса энтропии во Вселенной при переходе от Большого сжатия к Большому взрыву. На самом деле речь может идти лишь об уменьшении энтропии наблюдаемой среды из излучения и барионов. Суммарная энтропия Вселенной, подчиняясь второму закону термодинамики, выросла при Большом взрыве из-за роста энтропии популяции черных дыр. Самым большим носителем энтропии в этой популяции стала Большая Черная Дыра, которая играет ключевую роль в дальнейшей динамике Вселенной.