



2.9. Современные представления об эволюции Вселенной. Теория Большого взрыва и горячей Вселенной

Прежде чем рассматривать модель Большого взрыва, рассмотрим примерный временной масштаб событий в нашем мире, который приведен на *рис. 95*.

Огромный скачок в познании Космоса, произошедший за последние десятилетия, объясняется главным образом глубоким внедрением в сферу наук о природе ведущей науки современного естествознания – физики. Современные астрономия и астрофизика – тесно связанные между собой науки. Все космические явления, как в ближайшем околоземном пространстве, так и в глубинах Вселенной, объясняются на основе успехов современной физики, каждая новая область физики – атомная, ядерная и субъядерная, физика материальных квантованных полей и т.д. – немедленно находит себе широкое применение в изучении Космоса, поскольку физические законы на Земле такие же, как и в Космосе. Так мы изучаем Солнечную систему, звезды, нашу Галактику, другие галактики, наконец, приходим к учению о Вселенной как целом, основанному на изучении Метагалактики, т.е. той части Вселенной, которая охвачена астрономическими наблюдениями. Теоретическим фундаментом космологии являются основные физические теории и прежде всего теория тяготения Эйнштейна. Эмпирические сведения доставляются, главным образом, внегалактической астрономией, а выводы и обобщения имеют важное общенаучное и философское значение.

До 1965 года лишь *два* важнейших экспериментальных факта подтверждали наши представления об однородности и изотропности Вселенной. Во-первых, факт изотропного характера разбегающихся скоплений галактик и, во-вторых, их довольно равномерное распределение в пространстве. В 1965 году американскими физиками Пензиасом и Вильсоном было сделано открытие третьего важнейшего опытного факта – *реликтового излучения*. Это радиоизлучение оказалось равновесным, т.е. распределение энергии в нем соответствовало закону излучения абсолютно черного тела (*рис. 96*) при температуре, равной 2,7 К. Возможность существования в Метагалактике такого излучения была предсказана теоре-



Объект	Продолжительность существования, годы
Технологическая культура	100
Цивилизация	5 тыс.
Человечество	5 млн.
Млекопитающие	200 млн.
Жизнь на Земле	3 млрд.
Земля	4, 2 млрд.
Вселенная	10-20 млрд.



Рис. 95. История Вселенной: верхняя часть таблицы – взгляд из нашего времени в прошлое; нижняя часть таблицы – история от Большого взрыва до наших дней.

тически еще в 1946–1948 гг. русским физиком Г. Гамовым, жившим тогда в США. Он только ошибся численно, определив равновесную температуру излучения в 6 К. Все говорило о том, что обнаруженное излучение с длинами волн от 3 мм



до 50 см не может быть получено от звезд, галактик, внегалактических радиоисточников, оно может представлять собой только остывшее первоначальное излучение, возникшее при рождении Вселенной.

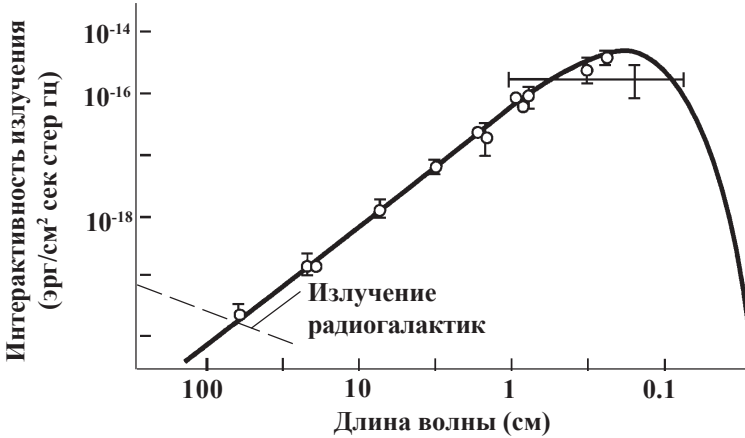


Рис. 96. Спектр реликтового излучения. Сплошная кривая – спектр абсолютно черного тела с температурой 2,7 К.

Таким образом, мы приходим к модели «большого взрыва», или «горячей Вселенной», которую теоретически предложил Гамов. На схематическом чертеже *рис. 95* показана картина Большого взрыва из сингулярности (начальной точки) и следующие за ним первые этапы жизни Вселенной. Эта эволюция Вселенной может быть прослежена современной наукой от первых ничтожных долей секунды до нашего времени. Вне зависимости от того, как оценивать самые ранние стадии расширения Вселенной, для большинства космологов фридмановские модели являются основным рабочим аппаратом. Возможность проследить развитие Вселенной на протяжении первоначальных мгновений – бесспорно одно из самых величайших, захватывающих дух дерзаний, которые когда-либо предпринимались наукой. Поистине невероятно, что удастся осмыслить состояние Вселенной в возрасте, значительно меньшем одной секунды.

На первых этапах Большого взрыва Вселенная была очень горячей, так как находилась в очень сжатом состоянии.



Ее называют «*первичным огненным шаром*». В нем не могло существовать ни одной из структур, наблюдаемых сегодня во Вселенной – ни звезд, ни галактик. Даже атомы там должны были быть разделенными на части под действием колоссальных температур и давлений. Такой первичный огненный шар следует представлять себе как своеобразную жидкость, состоящую из сильно взаимодействующих микрочастиц различных типов, находящихся в тепловом равновесии. Некоторые космологи пытаются обсуждать состояние огненного шара во времена еще более ранние, чем одна микросекунда, но мы начнем рассмотрение эволюции Вселенной с того момента, когда температура составляла около триллиона градусов. Хотя по нашим масштабам одна миллионная секунды – очень краткий момент времени, по атомным масштабам он представляет собой довольно большой промежуток.

Итак, это была первая краткая эра бурной активности, когда произошло подавляющее большинство актов взаимодействия между экзотическими микрочастицами, многие из которых так и не удалось пока наблюдать в лабораториях физиков. Природа таких неведомых микрочастиц сейчас еще недостаточно ясна, однако к концу первой микросекунды огненный шар уже состоял только из знакомых нам микрочастиц, остальные уже все исчезли, распавшись. Следовательно, был в мире короткий миг, когда Вселенная была заполнена миллиардами миллиардов необычных микрочастиц. Затем он минул, и многие из этих микрочастиц, возможно, уже никогда не обнаружатся.

При быстром падении температуры ниже 10^{12} К огненный шар вступил в так называемый *лептонный период*, когда знакомые нам протоны, нейтроны и электроны, а вместе с ними мюоны, нейтрино и антинейтрино и электромагнитное излучение в виде гамма-квантов оказались перемешанными и находились в тепловом равновесии. Энергия излучения была столь высока, что могли рождаться электронно-позитронные пары. С понижением температуры исчезали сначала мюоны, а потом позитроны. Примерно через 0,1 секунды температура Вселенной упала до нескольких миллиардов градусов и тогда главную роль стали играть протоны, нейтроны и электроны.

Началась новая важная эра – *плазменная*. Температура снизилась настолько, что бешено носящиеся протоны и нейт-



роны начали объединяться, образуя атомные ядра изотопов водорода, гелия и других легких химических элементов. Как показывают детальные расчеты, почти четвертая часть всех протонов вошла в атомные ядра гелия и только незначительная часть – в атомные ядра дейтерия и лития. Таким образом, около 10% атомных ядер, выделившихся из огненного шара, составляют ядра атомов гелия, остальные представляют собой водородные ядра (отдельные протоны). Это просто удивительно соответствует наблюдаемому сейчас распространению названных легчайших химических элементов во Вселенной. Отсюда напрашивается вывод, что первичный огненный шар и есть одна из фабрик по синтезу химических элементов. Кроме того, указанное обстоятельство следует рассматривать как ценное подтверждение того, что процессы, происходившие в плазменную эру в реальной Вселенной, не слишком отличаются от описываемых моделью огненного шара в теории Фридмана.

Плазменная эра продолжалась 700 тысяч лет, после чего температура Вселенной опустилась до 4000 градусов, что несколько ниже температуры Солнца, и электроны начали захватываться атомными ядрами – возникали обычные атомы. Далее осуществилась возможность локальной конденсации вещества под действием гравитационного притяжения. Массы газа образовывали вихри, которые, скапливаясь, медленно сжимались, превращаясь в галактики, а затем и в звезды и планеты. Температура огненного шара продолжала падать вследствие непрекращавшегося космологического расширения. Теперь уже, по прошествии 10 миллиардов лет после большого взрыва, она составляла всего лишь 2,7 К, т.е. значительно меньше, чем температура жидкого воздуха. Как мы уже говорили, Пензиас и Вильсон в 1965 году обнаружили именно этот слабый, едва теплящийся огонек первичного огненного шара. Обнаружение фонового реликтового излучения следует рассматривать как одно из величайших открытий в науке о Космосе. Название «реликтовое излучение» предложил советский астрофизик И.С. Шкловский, за рубежом его чаще называют фоновым излучением. Этот реликт (т.е. память!) огненного рождения Вселенной более или менее свободно и беспрепятственно путешествует по Космосу от конца плазменной эры до наших дней. Реликтовое излучение падает на Землю со всех сторон. Оно имеет световые кванты с энергией $h\nu$ в две тысячи раз меньше энер-



гии квантов видимого света, но число квантов реликтового излучения огромно. На каждый атом во Вселенной их приходится 100 миллионов или 400 квантов в каждом см^3 мирового пространства. А само существование такого излучения подкрепляет нашу уверенность в правильности основных предположений модели большого взрыва.

Однако необходимо сказать, что гипотеза большого взрыва не является пока общепризнанной. Например, появление сингулярности с плотностью материи, равной бесконечности, по мнению многих ученых, в том числе и В.Л. Гинзбурга, указывает на какое-то неблагоприятное, неприменимость или ограниченность теории. К сожалению, пока в рамках общей теории относительности освободиться от сингулярности не удалось. Может быть, создание квантовой теории тяготения поможет разрешить эту проблему. Отметим еще, что проблема сингулярности может существенно измениться, если существует в природе некая фундаментальная длина порядка 10^{-17} см, которая ограничивает возможности классической эволюции Вселенной.

Выясним теперь вопрос о возможной модели смерти Вселенной. Когда речь идет об асимметрии течения времени, большинство ученых вполне допускает существование в прошлом некоего момента, при котором возникли все объекты природы, ныне существующие. Но немногие задумываются о том, что может наступить такой момент в будущем, когда все природные тела придут к своему концу. Но с точки зрения физики Космоса, всякая эволюция обратима, и проблема наступления конца Вселенной приведет к тому, что может существовать крупномасштабное движение, которое вызовет обращение времени теперешнего хода развития. Прежде чем обсуждать гибель Вселенной, необходимо рассмотреть условия, необходимые для такой катастрофы.

В моделях Фридмана об эволюции Вселенной (Рис. 94) предполагается два варианта возможного будущего Вселенной. В модели 1 и 2 расширение Метагалактики продолжается вечно, а в модели 3 расширение на некотором этапе прекращается, после чего начинается сжатие. Если принять последнюю модель за действительность, то такое сжатие заканчивается уничтожением Вселенной в конечной сингулярной точке, тождественной начальной точке рождения Вселенной. Таким образом, Вселенная, конечная в пространстве, конечна и во времени – и, естественно, симметрична



во времени. Необходимое условие для наступления *коллапса* фактически аналогично критерию Шварцшильда (т.е. гравитационному радиусу при возникновении черной дыры). Если плотность массы во Вселенной достаточно велика, то коллапс становится неизбежным. Для осуществления сжатия необходимо знать два параметра: плотность материи и скорость замедления расширения Вселенной. Видимо, все же следует считать, что вопрос о том, будет ли Вселенная сжиматься, остается пока открытым.

Итак, если Вселенную ожидает коллапс, то она должна вернуться в сингулярную точку. Этот возврат очень медленный и должен длиться многие миллиарды лет. Крупномасштабные изменения Вселенной, происходящие на большей части периода сжатия, должны были бы сопровождаться почти незаметными с виду запаздываниями света, распространяющегося с конечной скоростью из удаленных ее областей. Наконец, проявилась бы общая картина «проваливания»: галактики начали бы медленно падать друг на друга и сталкиваться. Температура фонового теплового излучения по мере сжатия должна медленно расти за счет излучения звезд, и на поздних этапах она поднимется настолько, что звезды в конце концов испарятся. Тогда по мере все ускоряющегося разрушения вещества Вселенной началось бы быстрое и безжалостное сожжение всего на свете, а огненный шар возник снова, пройдя в обратном порядке все стадии описанной выше последовательности. Все кончилось бы падением Вселенной как целого в сингулярную точку, причем гравитация выступает гробовщиком Вселенной.

Альтернативные фридмановские модели 1 и 2 (Рис. 94) дают другую картину смерти Вселенной – замерзшую пустыню. При бесконечном продолжении расширения Вселенной полное термодинамическое равновесие не может быть достигнуто никогда. Когда запасы ядерного горючего будут исчерпаны, звезды потухнут или взорвутся, или сколлапсируют в черные дыры. Такой процесс займет миллиарды лет, но в конечном счете в этих моделях он гарантирован. При дальнейшем расширении вещества потухшие галактики станут невидимыми. Все будет остывать до фоновой температуры, когда в холодном, темном, пустом мире мало что может произойти. Лишь изредка какая-либо катастрофа, вроде столкновения двух нейтронных звезд или черных дыр на миг возродит активность материи, которая выльется во вспышку гравитационного излучения.



В науке мало столь гнетущих предсказаний, как эта мертвая пустыня.

Были предложены и другие модели, например, статическая модель, но она оказалась отвергнутой. Однако возможна модель с периодически повторяющимися циклами модели номер 3 по Фридману (рис. 97). В ней в конце каждого цикла расширения и последующего сжатия Вселенная должна попадать в сверхплотное сингулярное состояние, а затем снова совершать переход в следующий цикл расширения и сжатия, подобно первому. Указанный процесс может повторяться бесконечно, т.е. мы имеем дело с осциллирующей Вселенной. Тогда бы она не имела ни начала, ни конца, но катастрофические процессы, приходящие в сингулярных точках, уничтожали всю информацию о предыдущем цикле. В результате эволюция мира могла бы начинаться всякий раз по-новому в каждом цикле. Может быть, и законы физики после этих катастроф совсем бы изменились. Здесь возникает очень много дополнительных вопросов, например, как ведет себя энтропия или она вообще может отсутствовать и т.п.

Остановимся на двух вопросах, очень важных для нашего понимания учения о Космосе. Во-первых, необходимо выяснить вопрос о происхождении различных химических элементов в природе. И, во-вторых, познакомиться с так называемым *антропным принципом*, который возникает при попытке ответить на вопрос: почему Вселенная такая, что мы можем в ней жить?

Начнем с рассмотрения *первой* проблемы о происхождении химических элементов, для чего вернемся вновь к приведенному выше рис. 93, который дает кривую распространения химических элементов в зависимости от их атомного номера Z в Периодической таблице Менделеева. Приведем некоторые данные о процессах ядерного синтеза в звездах. Его часто называют «нуклеосинтезом», т.е. цепочкой ядерных реакций, ведущих к образованию атомных ядер тяжелых химических элементов из атомных ядер более легких элементов. Теория нуклеосинтеза стремится объяснить распространенность изотопов химических элементов в природе. Рассмотрим ее результаты, используя данные ядерной астрофизики. Как видно из рис. 93, наибольшую распространенность имеет самый легкий химический элемент водород, а именно его изотоп ^1H . Следующий по количеству в мире идет гелий ^2He , а потом углерод ^{12}C , кислород ^{16}O , неон ^{20}Ne , магний



^{12}Mg , кремний ^{14}Si , аргон ^{18}Ar и железо ^{26}Fe , причем в мире на водород и гелий приходится 99,9% вещества.

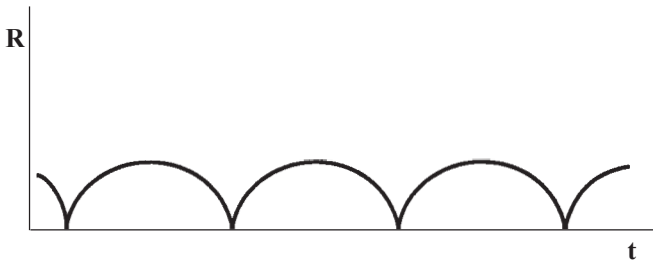
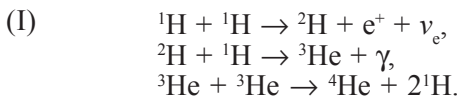


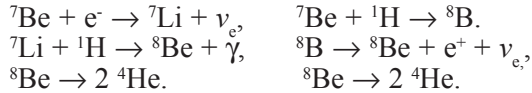
Рис. 97. К фридмановской модели эволюции Вселенной с периодическими пульсирующими циклами рождения и смерти Вселенной.

Среди звездных термоядерных реакций надо упомянуть прежде всего так называемый водородный цикл, приводящий к превращению водорода в гелий без участия посредников – катализаторов. Первичная реакция состоит в столкновении двух протонов p с образованием атомного ядра тяжелого изотопа водорода дейтрона ^2H и испускания позитрона $+e$ и нейтрино ν_e . Дейтрон далее реагирует с протоном и образует легкий изотоп гелия ^3He с испусканием гамма-кванта γ . Эта реакция весьма скоростная, поэтому дейтерий не накапливается в сколько-нибудь заметных количествах. Легкий изотоп гелия ^3He может взаимодействовать дальше двумя различными путями: либо два ядра ^3He , сталкиваясь, образуют ядро основного изотопа гелия ^4He и два протона p , либо изотоп ^3He сталкивается с изотопом ^4He и образует атомное ядро изотопа бериллия ^7Be , которое распадается двумя способами, захватывая электрон или протон. В обоих случаях в конечном результате получается очень неустойчивый изотоп ^8Be , мгновенно распадающийся на два устойчивых ядра гелия ^4He . На схеме водородный цикл выглядит так:

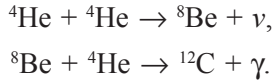




2.9. Современные представления об эволюции...



Следующий цикл гелиевый, в его термоядерных реакциях участвуют атомные ядра ${}^4\text{He}$ и для их протекания требуются температуры, превышающие 10^8 К. Такие условия создаются в звездах-гигантах на последних стадиях их эволюции, когда водород в результате термоядерных реакций водородного цикла превратился в гелий. При гелиевом цикле три атомных ядра гелия ${}^4\text{He}$ (альфа-частицы) образуют устойчивое атомное ядро изотопа углерода ${}^{12}\text{C}$ в резонансной реакции, когда энергия образующегося атомного ядра изотопа углерода ${}^{12}\text{C}$ близка к сумме энергий исходной системы ядер ${}^8\text{Be}$, ${}^4\text{He}$. Таким образом, процесс идет в две стадии:



Мы видим, что во второй стадии атомное ядро неустойчивого изотопа атома бериллия ${}^8\text{Be}$ захватывает третье ядро атома ${}^4\text{He}$ и образует вполне устойчивое атомное ядро изотопа углерода ${}^{12}\text{C}$. Это и есть наиболее замечательная особенность данной реакции, которая способствует появлению в нашей Галактике углерода, так необходимого для структуры всех растений и животных, обитающих на Земле. Углерод далее реагирует опять с гелием ${}^4\text{He}$ и образует устойчивый изотоп атома кислорода ${}^{16}\text{O}$. В свою очередь, реакция гелия с кислородом образует ядро атома изотопа неона: ${}^{16}\text{O} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^{20}\text{Ne}$. При достаточно высоких температурах таким путем можно дойти до образования ядер атомов изотопа кальция ${}^{40}\text{Ca}$. Но здесь синтез очередного тяжелого изотопа кальция с участием альфа-частицы требует все более высоких температур, т.е. высоких энергий реагирующих атомных ядер, чтобы преодолеть возрастающий барьер потенциальной кулоновской энергии с ростом порядкового номера химического элемента Z . Поэтому более тяжелые химические элементы образуются, скорее всего, в реакциях с участием нейтронов, лишенных электрического заряда, а не заряженных микрочастиц.

В реакциях с нейтронами нет противодействующего влияния кулоновского потенциального барьера. В ядерной астро-



физике различают два вида реакций с нейтронами: (1) реакции на медленных нейтронах и (2) реакции на быстрых нейтронах. Первые приводят к образованию атомных ядер примерно до устойчивого изотопа висмута ^{200}Bi . Второй путь может привести к образованию самых тяжелых химических элементов Таблицы Менделеева – тория и урана (Th, U).

Следует указать, что в природе наблюдается особенно низкая распространенность атомных ядер лития Li, бериллия Be и бора B, а также дейтрона ^2H , поскольку они легко разрушаются при термоядерных реакциях. Кроме того, существует еще до 30 изотопов так называемых «обойденных» атомных ядер, которые не могут быть получены при медленном и быстром процессах захвата нейтронов. Это самые легкие изотопы тяжелых атомных ядер. Их существование заставляет ядерных астрофизиков искать процессы образования таких тяжелых атомных ядер, не связанные с захватом нейтронов.

Перейдем к рассмотрению второго из поставленных выше вопросов – об антропном принципе. Хотя картина, которая складывается в связи с представлением о Большом взрыве и горячей Вселенной, охлаждающейся по мере своего расширения, на сегодняшний день согласуется с результатами почти всех наблюдений, ряд вопросов остается невыясненным. Английский ученый Хокинг указывает четыре таких важных вопроса:

1. Почему ранняя Вселенная была такой горячей?
2. Почему наша Вселенная так однородна и изотропна по среднему распределению в ней массы вещества?
3. Почему Вселенная идет по какому-то из трех возможных фридмановских путей эволюции?
4. Почему на фоне крупномасштабной однородности во Вселенной существуют неоднородности в виде звезд и галактик? Считается, что они образовались из-за небольших различий в плотности ранней Вселенной. Так что же было причиной флуктуаций этой плотности?

Теория тяготения Эйнштейна сама по себе не может дать ответы на поставленные вопросы, ибо они «упираются» в сингулярную точку большого взрыва, где была бесконечная по величине плотность материи, и поэтому невозможно предсказать, что выйдет из сингулярности. Все, что было до взрыва, не имеет как будто бы смысла и не может повлиять на то, что мы наблюдаем сегодня во Вселенной. Следуя



2.9. Современные представления об эволюции...

Хокингу, можно сформулировать антропный принцип, задавая себе вопрос: почему Вселенная такая, а не другая? И ответить на него так: «Мы видим Вселенную так, как мы ее видим, потому, что мы в ней существуем».

Следует помнить, что жизнь на Земле могла и не появиться, если энергия возбуждения уровня в атомном ядре изотопа углерода ^{12}C была бы несколько иной, или же отношение массы покоя электрона к массе покоя протона другим, или электрический заряд электрона был бы чуть-чуть иным, другой по величине была бы постоянная Планка и т.д. Неизвестно, почему они такие, какими мы их знаем, но настанет день, когда мы сможем, создав единую теорию для всех сил природы, узнать, как они могут изменяться, и поэтому узнаем, каковы другие Вселенные, где нас нет.