



Г Л А В А 5

ВВЕДЕНИЕ

§ 1. Вводные замечания и исторический обзор

В этом разделе рассматриваются физические процессы, протекавшие во Вселенной в прошлом в ходе ее расширения, в предположении, что геометрия и динамика эволюции Вселенной описываются однородной изотропной моделью.

Физические процессы, протекавшие в прошлом, зависят от состава вещества, заполнявшего Вселенную. Эти процессы протекают в условиях определенного закона расширения Вселенной (отчасти процессы сами влияют на закон расширения), подробно изученного в первом разделе, но полностью геометрией и динамикой отнюдь не определяются, а зависят еще от состава вещества.

В следующих главах изложение ведется применительно к тому составу, который со значительной уверенностью следует из современных экспериментальных данных. Важнейшим наблюдательным фактом, служащим для определения состава, является открытие так называемого реликтового электромагнитного излучения (РИ), — смысл названия будет разъяснен ниже. Наличие РИ приводит к картине Вселенной, в которой в среднем на один барион (протон или нейтрон, свободный или связанный в ядре) приходится около $7 \cdot 10^7$ фотонов, $\gamma/V \approx 7 \cdot 10^7$ *). РИ имеет, по-видимому, равновесный спектр с $T \approx 2,7^\circ\text{K}$. Может ли это излучение возникнуть в каких-либо астрономических объектах? Несложный анализ, на котором мы остановимся далее в этом параграфе, показывает, что этого быть не могло, что излучение присутствовало во Вселенной всегда, начиная с самых ранних этапов расширения. Отсюда и название — реликтовое. Знания отношения $\gamma/V = 7 \cdot 10^7$ оказывается достаточным для того, чтобы охарактеризовать состав вещества на каждом этапе расширения Вселенной; более детальные соотношения между количеством водорода и гелия, фотонами и нейтрино оказываются

*) Значение этого отношения зависит от плотности вещества во Вселенной. Величина в тексте дана для $\Omega=1$. При $\Omega=0,03$ было бы $\gamma/V \approx 2 \cdot 10^9$.

следствиями теории (при простейших дополнительных предположениях).

Дело в том, что наличие РИ свидетельствует о высокой температуре вещества в начале расширения («горячая Вселенная»), а при высокой температуре и плотности в начале расширения быстро происходили различные процессы превращения одних элементарных частиц и ядер в другие. Поэтому количества частиц различных сортов не являются независимыми, свободными переменными, они обусловлены закономерностями быстро происходящих процессов. Лишь одно число — отношение η/V (оно находится из наблюдений) — должно быть задано *).

На более специальном языке говорят, что в начальной стадии имеет место термодинамическое равновесие, для задания которого нужно знать удельную энтропию вещества, сохраняющуюся при медленном (равновесном, адиабатическом), по сравнению с протекающими процессами, расширении. Вторая термодинамическая переменная — плотность материи или удельный объем — плавно меняется в ходе расширения с течением времени; соответствующая зависимость от времени может считаться известной (см. раздел I). Теории равновесия при высоких температурах посвящена гл. 6. По мере понижения температуры реакции протекают все медленнее, и наконец достигаются условия, когда скорость протекания какого-либо процесса сравнивается со скоростью расширения, и результат процесса определяется его кинетикой. Наиболее важным процессом такого рода является нуклеосинтез на ранних стадиях расширения Вселенной; в космологических условиях, в дозвездном веществе можно ожидать превращения 25—30% барионов в гелий-4, тогда как 75—70% барионов оказываются в виде протонов.

По-видимому, такой результат не противоречит наблюдениям, что усиливает доверие к горячей модели в целом. Проблемы кинетики и, в частности, нуклеосинтеза обсуждаются в гл. 7. Здесь же, в гл. 5, общая ситуация излагается крайне схематизированно и более однозначно и определенно, чем это имеет место в действительности. В отношении многих немаловажных вопросов (например, существуют ли еще не открытые частицы типа нейтрино) нет ясности, и в детальном изложении приходится рассматривать целый ряд вариантов. Сопоставление полученных результатов с наблюдениями приводит подчас к выводам, интересным для теории элементарных частиц.

В гл. 9 рассматриваются процессы на той относительно поздней стадии расширения, когда «выжили» только фотоны, электроны и ядра, а также слабо взаимодействующие с веществом нейтрино (и гипотетические гравитоны). Исчезли за счет аннигиляции и

*) Уточнение этого положения см. далее.

(или) распались антинуклоны, мезоны и позитроны, закончились ядерные реакции. На этой стадии рассмотрению подлежит взаимодействие фотонов с электронами, а конкретно — поглощение, испускание и рассеяние фотонов.

Нейтрино и гравитоны на этой стадии не исчезли, они присутствуют, но присутствуют «незримо» и не влияют на фотонные процессы. Существенно, что здесь, в этом разделе, рассматривается изотропное «по Фридману» расширение, без учета пространственной неоднородности, которая предполагается малой в ту эпоху, а к настоящему времени приводит к образованию галактик (см. об этом следующий раздел). Наблюдаемые свойства РИ согласуются с теми выводами, которые следуют из картины эволюции горячей Вселенной, т. е. *подтверждают* ее. Но поставим более острый вопрос: в какой мере исследование РИ *доказывает* теорию горячей Вселенной? И еще точнее: какую часть теории горячей Вселенной можно считать доказанной? Для ответа на эти вопросы весьма важны исследования, изложенные в гл. 7.

Взаимодействие РИ с электронами стерло бы отклонения (если таковые были) в распределении энергии в спектре РИ от равновесного, предсказываемого теорией горячей Вселенной, если эти отклонения имели место достаточно рано — при $z > 10^8$ или 10^6 , т. е. при $t < 0,3-30$ лет с начала расширения. Более поздние отклонения, связанные с процессами выделения энергии в веществе и меняющие спектр РИ, были бы обнаружены.

Были попытки объяснения РИ выделением энергии в отдельных небесных источниках [Парийский (1968), Бэрбидж (1971), Лайзер (1968)].

Интегральная плотность РИ $\epsilon_{\text{рел}} = 4 \cdot 10^{-13}$ эрг/см³ почти в 100 раз больше, чем интегральная плотность излучения источников (звезды галактик, радиогалактики, квазары), подсчитанная с учетом их вероятной эволюции в прошлом. РИ с большой точностью изотропно.

Если разделить плотность энергии $\epsilon_{\text{рел}} = 4 \cdot 10^{-13}$ эрг/см³ на плотность материи $3 \cdot 10^{-31}$ г/см³ (средняя плотность вещества, входящего в состав галактик, по данным Оорта), то получим $\sim 10^{18}$ эрг/г. Таким образом, горение $\approx 20\%$ всего водорода даст достаточно энергии, чтобы наполнить пространство излучением с температурой $\sim 3^\circ$. Однако мы знаем, что горение ядерного топлива в звездах дает спектр, очень далекий от трехградусного равновесного излучения, которое наблюдается, и угловое распределение излучения было бы дискретным, а не равномерным. Если горение имело место в далеком прошлом, то испущенное источниками высокотемпературное излучение может, в принципе, превратиться в низкотемпературное излучение, но из-за космологического расширения энергия уменьшается и требуется выделение энергии в прошлом больше разумного предела.

Наблюдаемое сейчас РИ можно попытаться объяснить выделением в прошлом энергии в празвездах только при очень невероятном соединении многих предположений. Так, надо предполагать высокую современную среднюю плотность вещества $\rho_0 \geq 2 \cdot 10^{-29} \text{ г/см}^3$. Надо к тому же сделать предположение о выделении практически всей ядерной энергии всего вещества, излученной в гипотетических «празвездах» за короткий период в прошлом ($t = 3 \cdot 10^6 \text{ лет}$), и далее о поглощении, а затем переизлучении света пылью, которая составляет не менее 10^{-5} всего вещества по весу. Указанную возможность объяснения РИ можно считать совершенно невероятной [см. Зельдович, Новиков (1967а)].

Решающим экспериментом было бы измерение фона нейтрино, который, согласно горячей модели, должен иметь $T \approx 2^\circ$ (см. далее гл. 7, § 1). Однако этот «эксперимент века» лежит пока далеко за рамками возможного *).

При выделении ядерной энергии в «празвездах» образующиеся нейтрино имели бы, очевидно, неравновесный спектр, а их «термализация» невозможна, так как вещество для них прозрачно. Их плотность (число штук/см³) должна быть порядка плотности нуклонов, а современная энергия — сотые доли $M\text{эв}$ **). Попытки объяснения РИ как совокупности излучения радиоисточников [Парийский (1968), Бэрбидж (1971)] противоречат как статистике радиоисточников, так и соответствию спектра РИ планковскому спектру в исследованной длинноволновой области.

Итак, можно сказать, что общая картина горячей Вселенной прямо доказана наблюдениями для периода, начиная от нескольких лет, отсчитанных от сингулярности, до сегодняшнего дня, т. е. для периода $10 \text{ лет} < t < 10^{10} \text{ лет}$ ***).

Излагаемая ниже классическая картина является зарядово-несимметричной. Предполагается, что в настоящее время во Вселенной представлены только барионы (вещество), но практически нет антибарионов (антивещества). Предполагается, что далекие галактики и межгалактический газ также состоят из вещества.

*) Подобный эксперимент, обнаруживающий нейтрино с $T \approx 2^\circ \text{К}$. доказывал бы не только горячую модель, но одновременно и то, что расширение с первых же секунд протекало изотропно. Дело в том, что в случае анизотропной деформации на ранней стадии космологического расширения сегодняшний спектр реликтовых нейтрино может сильно отличаться от равновесного с $T = 2^\circ$ [Дорошkevич, Зельдович, Новиков (1967а—г)], см. раздел IV.

**) Определение числа нейтрино позволило бы оценить выделившуюся энергию, а определение сегодняшней энергии нейтрино дало бы момент в прошлом, когда выделение энергии произошло, и показало бы, возможно ли таким образом объяснить фон.

***) О возможности анизотропного начала расширения Вселенной и связанных с этим искажениях реликтового излучения см. раздел IV. Кроме того, в нарисованной картине не вполне выяснены процессы в период образования галактик, квазаров и т. п. — об этом см. раздел III.

В литературе встречается и противоположная точка зрения, согласно которой Вселенная в среднем зарядово-симметрична. Возможны различные варианты предположений о том, насколько удалены друг от друга области с веществом и антивеществом. Так, в одних вариантах теорий есть звезды из антивещества и в нашей Галактике. В других вариантах есть галактики и антигалактики в одном скоплении галактик, наконец, в третьих вариантах вещество и антивещество разделены на еще большее расстояние. Ниже приводятся аргументы, в силу которых зарядово-симметричная модель представляется нам не соответствующей действительности.

Авторам и защитникам симметричной теории [Клейн (1961), Альвен (1971), Омнес (1969, 1971 а — в), новые данные см. Лонгейр (1974)] нельзя отказать в логической последовательности и остроумии. С точки зрения законов физики, изученных в лаборатории, с точки зрения «естественности» и «здравого смысла» нельзя выбрать между симметричной и несимметричной теориями Вселенной.

Аргументы в пользу несимметричной теории существенно опираются на данные астрономических наблюдений (красное смещение, реликтовое излучение).

Защитники тех или иных неортодоксальных концепций хорошо усвоили тезис, согласно которому лучший способ защиты — это нападение. Бэрбидж, Хойл, Альвен подчеркивают «экзотичность», малую вероятность, «удивительность» классической модели с однородной и изотропной структурой и динамикой расширения в начальном сингулярном состоянии, с зарядовой несимметрией.

Этот упрек был бы справедлив, если бы теория горячей Вселенной была абстрактным творением «чистого разума». Но все дело в том, что эта картина в настоящее время (так было не всегда!) является необходимой с наблюдательной точки зрения. Неизбежность странного мира — формулировка писателя Данина, высказанная по другому поводу, но замечательно точно характеризующая космологию.

Вкратце остановимся на истории развития тех идей, которые в настоящее время объединяются в понятие горячей Вселенной.

Доказательство расширения Вселенной было дано примерно в то же время, когда возникла современная ядерная физика [работы Фридмана — 1922—1924 гг., открытие Резерфордом ядерных реакций в 1919 г., работы Хаббла — 1929 г., открытие нейтрона Чадвиком в 1932 г.]. Таким образом, почти одновременно возник вопрос о том, что же собой представляют вблизи сингулярности Вселенная и вещество, ее заполняющее, и возникли физические предпосылки для ответа на этот вопрос. Уже самое общее представление о сингулярности, о бесконечной плотности в начале расширения приводило к идее первичного дозвездного вещества более или менее однородного — в отличие от разнообразия строения и

состава звезд и других небесных тел сегодня. Появились звучные, но туманные формулировки: Вселенная была одним «первичным атомом», или — вся Вселенная была одним ядром или каплей ядерной жидкости [Леметр (1933)].

Дальнейший этап, когда возникла идея горячей Вселенной, является замечательным примером плодотворного развития теории, в возникновении которой существенную роль играла цепь ошибок.

Гамов (1948) поставил перед собой задачу космологического объяснения распространенности различных ядер и изотопов. Постановка этой задачи была связана с ошибочным значением постоянной Хаббла $H \sim 500 \text{ км/сек} \cdot \text{Мпс}$, что соответствовало времени от момента сингулярности меньше чем $2 \cdot 10^9 \text{ лет}$. Но возраст Земли оценивается в $4 \cdot 10^9 \text{ лет}$! Даже допуская ошибки в этих величинах, естественно было предположить, что Земля, так же как и Солнце, сконденсировалась одновременно из первичного дозвездного вещества и их химический состав определялся составом этого вещества. Не только водород и гелий — главные составные части звезд, в частности Солнца, но и все тяжелые ядра, вплоть до железа, свинца, урана, по гипотезе Гамова, получились в процессе реакций при расширении дозвездного первичного вещества.

Таблица распространенности различных элементов и изотопов обнаруживает общую закономерность: в природе преобладают изотопы с избытком нейтронов. Отсюда был сделан вывод о том, что в первичном веществе долго сохранялись свободные нейтроны (захват которых ядрами приводил к возникновению указанных изотопов), для этого нужна высокая температура. Так появилась идея горячей Вселенной.

С сегодняшней точки зрения, можно указать на ряд несоответствий. Постоянная Хаббла уменьшилась в 5—10 раз, время с начала расширения Вселенной оценивается в 10^{10} — $2 \cdot 10^{10} \text{ лет}$, Солнце есть звезда второго или третьего поколения. Сперва образовались звезды первого поколения, в массивных звездах первого поколения произошел нуклеосинтез тяжелых ядер (тяжелее He); при взрывах этих звезд тяжелые ядра рассеялись в галактическом газе, из которого конденсировались Солнце и Земля. Верно то, что для синтеза тяжелых ядер нужны и свободные нейтроны. Однако эти нейтроны появляются как на медленных, так и на взрывных этапах эволюции массивных звезд. С другой стороны, в первичном дозвездном веществе, несмотря на наличие свободных нейтронов, синтез тяжелых элементов не происходит. Не удастся «перескочить» барьер атомного веса 5: ядро He⁴ не присоединяет к себе нейтроны.

Тем не менее и Гамов и позднее Альфер и Херман (1953) полагали, что как-то (?) удастся преодолеть массовое число $A=5$ и получить средние и тяжелые элементы периодической системы путем последовательного присоединения нейтронов и бета-распада. Пре-

обладание в природе элементов с избытком нейтронов рассматривалось как подтверждение теории. Из того факта, что уцелели изотопы с большим сечением захвата медленных нейтронов, был сделан вывод о том, что нуклеосинтез, захват нейтронов, шел при высокой температуре. Так получена оценка температуры излучения около 6°K !

Для всей логики развития теории существенно было предположение о малом возрасте Вселенной. Современные данные о постоянной Хаббла оставляют вполне достаточно времени для нуклеосинтеза средних и тяжелых элементов в звездах.

Таким образом, вопрос о нуклеосинтезе тяжелых элементов был поставлен незакономерно, и поэтому ответ теории горячей Вселенной на этот вопрос не совпадает с наблюдениями. Но теории имеют свою судьбу, их развитие не описывается прямолинейной схемой «вопрос — ответ». Анализ условий при высокой температуре в начале космологического расширения привел к выводу, что плотность массы ($\rho_{\text{изл}} = \epsilon_{\text{изл}}/c^2$) лучистой энергии оказывается больше плотности обычной материи (РД-стадия, см. об этом введение к книге и следующую главу).

Эта необычная возможность, следующая из законов лабораторной физики, но не осуществимая в лаборатории *), заморозила исследователей. Фотонная плазма, радиационно-доминированное состояние вещества, его свойства, механика, термодинамика — короче, возникла новая область! Разработка этой области и различных следствий из концепции горячей Вселенной приобрела самостоятельный интерес. Проблема нуклеосинтеза в начале космологического расширения была тем временем правильно решена трудами Хаяши (1950) и Ферми, Туркевича (1950). Расчет предсказывал следующий состав дозвездного вещества: водород 75—65%, гелий-4 25—35%. Но другого и не требуется — остальные элементы синтезируются в звездах. Заметим, что работа Ферми и Туркевича так и не опубликована, по-видимому, они пользовались данными о реакциях изотопов водорода, которые в то время не подлежали оглашению. Позднее рассматривались и следы других элементов: D, He³, Li⁶, Li⁷, образующихся в космологическом нуклеосинтезе.

Любопытно, что авторов горячей модели интересовали главным образом интегральные свойства реликтового излучения: плотность, давление, температура, но не его спектр. Основываясь на не слишком надежных соображениях, Гамов в 1956 г. дал оценку температуры РИ для настоящего времени $\sim 5\text{—}6^{\circ}\text{K}$.

Главным образом в целях самокритики отметим альтернативную гипотезу о «холодной Вселенной». Было известно [Пейерльс и др.

*) Впрочем, в фокусе лазерного излучения в пикосекундных импульсах, может быть, удастся достичь такой ситуации.

(1952)], что холодное сверхплотное вещество такого состава, с которым мы встречаемся в звездах (нейтронные и гиперонные звезды, см. ТТ и ЭЗ), при расширении дает только тяжелые ядра, водорода не остается. Такой вариант гипотезы «холодной Вселенной» резко противоречит наблюдаемой картине (известно, что водород составляет не меньше 60% всего вещества).

Однако, по замечанию Зельдовича (1962б), холодное вещество с избытком нейтрино в ходе расширения превратится в чистый водород. Для этого нужно только, чтобы в смеси p , e^- , ν ферми-энергия холодных нейтрино все время превосходила ферми-энергию электронов.

В связи с этой гипотезой *), а также в связи с вопросом о средней плотности электромагнитной энергии во Вселенной Дорошкевич и Новиков (1964) провели — по-видимому, впервые — полный расчет широкого спектра электромагнитного излучения в эволюционирующей Вселенной — от самых длинных радиоволн до ультрафиолета. На кривые, полученные сложением вкладов излучения радиоисточников и звезд, был наложен планковский спектр РИ, который должен наблюдаться в случае горячей Вселенной.

Впервые в этой работе отмечено, что в определенном участке спектра планковский спектр РИ на несколько порядков интенсивнее суммы излучения от источников. Стала ясна возможность решающего опыта наблюдения РИ, от которого зависит выбор между горячей и холодной моделями Вселенной. В работе Дорошкевича и Новикова впервые появилась двугорбая кривая (график спектра с двумя максимумами — один соответствует излучению звезд, второй — РИ), которая потом, уже после открытия РИ, долго украшала рекламы фирмы «Белл».

Дальнейшая история хорошо известна: Пензиас и Вилсон (1965) наткнулись на необъяснимый равномерный радишум на длине волн 7,3 см. В это время Дикке, Пиблс, Ролл и Вилкинсон (1965) готовили аппаратуру для измерения радиофона на длине волны 3 см с сознательным намерением проверить теорию горячей Вселенной и определить температуру реликтового излучения. Работая независимо от Дорошкевича и Новикова, они, очевидно, имели в это время сходные оценки **). Узнав о результатах Пензиаса и Вилсона, Дикке и его группа немедленно интерпретировали эти результаты как подтверждение теории горячей Вселенной и назвали температуру РИ — около 3°К.

Дальнейшее развитие было бы неуместно излагать в рамках исторического обзора, так как последующие результаты подлежат систематическому изложению.

*) Еще один пример полезной ошибки; как сказал поэт про рюмки: «То, что бьется нечаянно, — к счастью, то, что бьется нарочно, — не в счет».

**). См. книгу Дикке (1970).

Здесь, для того чтобы дать завершенную картину, мы приведем лишь выводы: теория горячей Вселенной как теория огромного этапа эволюции Вселенной в настоящее время установлена окончательно. Решающим аргументом является существование и свойства РИ. Те уточнения, которые могут последовать (в силу того, что точность всех проделанных измерений не абсолютна), не изменят основного вывода о горячей Вселенной, а дадут информацию о деталях процессов, которые протекали в прошлом.

Поэтому уже сейчас ясно, что объяснять отклонения можно (и нужно) будет в рамках теории горячей Вселенной, с учетом небольшой неоднородности, образования галактик и квазаров и других аналогичных явлений. Нуклеосинтез (ситуация с которым не вполне ясна, так как не определена точно роль звезд в синтезе He и некоторых других элементов) не играет решающей роли в доказательстве теории горячей Вселенной, хотя то, что он дает результаты о количестве He^4 (а также отчасти и D), близкие к наблюдениям, несомненно является аргументом в ее пользу.

Сказанное не должно рассматриваться как догматизм. В рамках теории горячей Вселенной остается много невыясненных вопросов, которые, по мере разума, мы будем отмечать ниже. Остаются глубокие, принципиальные нерешенные вопросы о природе сингулярности в начале расширения (см. разделы IV и V).

§ 2. Электромагнитное излучение во Вселенной: обзор наблюдений

Широкий обзор наблюдений всего спектра электромагнитного излучения во Вселенной — от радиоволн до гамма-лучей — служит хорошим введением в детальное изучение реликтового излучения, которое наиболее важно в космологии. Полный обзор электромагнитного излучения дали недавно Лонгейр и Сюняев (1971); мы используем их рисунки и таблицу. Нас интересует средняя плотность излучения вдали от тех или иных источников, поэтому все величины (интенсивность F , плотность энергии ϵ и плотность квантов n) экстраполированы на внегалактическое пространство, вклад нашей Галактики вычтен из наблюдательных данных.

Сравнивая рис. 27 и табл. II, следует помнить очевидные соотношения:

$$\epsilon = \frac{4\pi}{c} \int F \, d\nu = \frac{4\pi}{c} \int \nu F \, d \log \nu,$$

$$n_\nu = \frac{4\pi}{ch} \int \frac{F}{\nu} \, d\nu = \frac{4\pi}{ch} \int F \, d \log \nu.$$

Интегралы (ϵ , n), данные в таблице, не равны площади под кривой на рис. 27 из-за логарифмической шкалы на рисунке; приблизи-