

## ВВЕДЕНИЕ



Научная космология появилась значительно позже других астрономических дисциплин, но, несмотря на это, — а может быть, именно вследствие этого — в настоящее время разрабатывается особенно интенсивно и приносит открытия огромного значения.

В настоящем введении мы попытаемся показать структуру и логические связи современной космологии, полностью отказываясь от исторического порядка изложения (а заодно и от ссылок на литературу, которые будут приведены в соответствующих местах, при подробном изложении вопроса). Выражаясь кратко, прошлое Вселенной бесконечно интереснее прошлого науки о Вселенной.

Важнейшим фактом является наблюдаемая изотропия свойств Вселенной, независимость видимой картины Вселенной от направления луча зрения. Этот факт относится как к общему радиоизлучению, пронизывающему всю Вселенную («реликтовый фон», о котором подробнее см. ниже), так и к длинноволновому радиоизлучению отдельных источников (усредненному по площадкам на небе, содержащим много источников) и к рентгеновскому излучению, происхождение которого еще не вполне ясно. Эти виды излучения приходят к нам с наибольших расстояний; отклонения от изотропии в их интенсивности не превышают  $1\%—0,1\%$ .

Следующий шаг к пониманию структуры Вселенной содержит гравитационную экстраполяцию. Мы знаем, что вместе со всей Солнечной системой находимся в спиральной галактике, которая в свою очередь входит в скопление галактик. Мы видим другие скопления галактик, рассеянные в пространстве. Однако изотропия реликтового и других видов излучений, приходящих издалека, является более фундаментальной, чем неоднородность ближайших нам окрестностей: распределение скоплений галактик на небе тоже представляется в среднем изотропным. Естественно предположить, что Вселенная однородна в больших масштабах, хотя и неоднородна в малом. Наблюдаемую изотропию излучения можно привлечь для того, чтобы дать количественную оценку степени однородности; отклонения от однородности оказываются меньше  $1\%—0,1\%$  в масштабе порядка  $10^{10}$  световых лет.

Нужно подчеркнуть, что наблюдательные данные на первый взгляд сами по себе не противоречат предположению о сферической

симметрии мира. Можно предположить, что в центре находится Земля (Солнечная система, Галактика), средняя плотность вещества во Вселенной зависит от расстояния до центра, но не от направления. Выбор однородной модели вместо модели с центром в Галактике происходил на первых шагах развития современной космологии по общефилософским причинам: в средние века естественным казалось как раз предположение о центральном положении Земли. С тех пор господствующие философские взгляды изменились, мы стали скромнее. Конечно, углубленный анализ всех наблюдательных данных приводит к выводу об однородности Вселенной без каких-либо ссылок на общие концепции и аналогии из истории науки.

Приняв однородную модель Вселенной, нужно сделать выводы, следующие для этой модели из известных физических законов. Здесь уместно спросить: насколько правомерно пользование известными, установленными в лаборатории законами? Не следует ли ожидать, что при переходе к грандиозным масштабам Вселенной сами эти законы придется менять? Такое изменение законов физики в больших масштабах произошло, когда возникли общая теория относительности (ОТО) и представление о кривизне пространства-времени. Ясно, что в больших космологических масштабах должна проявляться кривизна. Уже в пределах Солнечной системы (а в наиболее изоциренных, точных опытах — и в лаборатории) ОТО дает специфические поправки и находит экспериментальное подтверждение. Тем самым доказывается справедливость ОТО, а значит, и следующее из нее искривление пространства-времени в больших масштабах Вселенной. Кроме доказанного факта кривизны пространства и времени есть и не выясненный до настоящего времени вопрос, специфический для больших масштабов, — вопрос о космологической постоянной. Космологическая постоянная описывает определенную (положительную или отрицательную) плотность энергии и соответствующее давление, приписываемое вакууму. Это приводит к появлению дополнительного относительного ускорения (положительного или отрицательного) между любыми двумя частицами, зависящего только от расстояния между ними (но не от их массы). Это очень небольшое изменение закона тяготения не может быть замечено в лабораторных опытах, однако для динамики Вселенной как целого из-за огромности расстояний космологическая постоянная может быть существенной.

Появление новых законов и новых обобщений в физике всегда было связано с тем, что старые законы вступали в непримиримое противоречие с опытом или оказывались логически, внутренне незамкнутыми и непригодными в новой области. Так было, когда доквантовая физика столкнулась с ультрафиолетовой катастрофой в законе излучения и с необъяснимой стабильностью атомов. Так было и тогда, когда потребовалось релятивистское обобщение уравнения Шредингера для больших скоростей. Подойдем с такой мер-

кой к общей теории относительности: применяя ее к безграничной Вселенной, мы не сталкиваемся ни с внутренними логическими противоречиями самой теории, ни с какими-либо вопиющими противоречиями между теорией и наблюдениями. Поэтому представляются необоснованными предположения о необходимости изменения ОТО при применении ее к космологии (если не считать вопроса о космологической постоянной — вопроса, стоящего в рамках ОТО). Нет никаких наблюдательных данных, указывающих на ограниченность применения ОТО к масштабам Вселенной \*).

Авторы хотят подчеркнуть «ортодоксальность» своей точки зрения. Мы не согласны с появляющимися время от времени теориями о нарушении фундаментальных законов физики, например теориями о постоянном рождении вещества «из ничего», (и притом вдали от сингулярности — теория стационарной Вселенной), или с теориями об уменьшении постоянной тяготения. Конкретные причины нашего несогласия и критика таких теорий даются в V разделе книги.

Итак, однородная и изотропная Вселенная может быть рассмотрена в рамках ОТО.

Как известно, существует обширное семейство решений уравнений Эйнштейна, для которых характерна эволюция Вселенной и в то же время свойства однородности и изотропии сохраняются с течением времени.

Наблюдения показывают, что мы живем в эволюционирующей и притом расширяющейся Вселенной. Красное смещение спектральных линий света, приходящего к нам от далеких галактик, есть следствие доплер-эффекта, связанного с тем, что эти галактики удаляются от нас. Новейшие измерения подтверждают пропорциональность скорости и расстояния:  $u = Hr$ , где величина  $H$  называется постоянной Хаббла. Во всей книге мы принимаем ее равной  $\approx 75 \text{ км/сек} \cdot \text{Мегапарсек} \approx (4 \cdot 10^{17} \text{ сек})^{-1} = (1,3 \cdot 10^{10} \text{ лет})^{-1}$ . Стоящая в скобках величина размерности времени приблизительно соответствует времени расширения от состояния с большой плотностью. Заметим, что постоянная Хаббла известна из наблюдений с точностью по крайней мере до 50%. По последним данным, вероятно  $H = 50 \text{ км/сек} \cdot \text{Mpc} = (2 \cdot 10^{10} \text{ лет})^{-1}$ .

---

\*) Как мы увидим, релятивистская космология приводит к выводу о необходимости в прошлом во Вселенной состояния, в котором вещество имеет огромную плотность, а пространство-время — огромную кривизну, так называемого сингулярного состояния. В таких ситуациях ОТО в ее настоящей форме, возможно, уже неприменима.

Итак, вся совокупность теоретических, экспериментальных и наблюдательных фактов говорит о применимости физических законов и общей теории относительности для описания эволюции Вселенной «почти с самого начала расширения» — с моментов, когда плотность вещества была много больше ядерной, т. е.  $\rho > 10^{14} \text{ г/см}^3$  (уточнение этого «почти» см. далее), и до настоящего времени. Н об этом подробно говорится далее.

Решения уравнений ОТО согласуются с линейным законом  $u = Hr$ . Именно такой закон расширения необходим для того, чтобы на протяжении всей эволюции сохранялись самые общие свойства решения — однородность и изотропия. При этом предполагается также, что плотность и давление вещества везде одинаковы, не зависят от пространственных координат, но при этом зависят от времени. Однако для полного решения задачи недостаточно задать эти свойства и значение  $H$ ; необходимо знать численное значение плотности вещества и давления в настоящее время, т. е. знать свойства вещества, заполняющего пространство, и значение космологической постоянной  $\Lambda$ .

Весьма вероятно, что  $\Lambda \cong 0$ . В этом случае можно показать, что при любой плотности вещества длительность эволюции в прошлом меньше, чем  $H^{-1}$ . Будущая эволюция существенно зависит от современной плотности вещества: существует критическое значение плотности  $\rho_c$ , зависящее от  $H$  (для  $H = 75 \text{ км/сек} \cdot \text{Мпс}$  это критическое значение  $\rho_c = 10^{-29} \text{ г/см}^3$ ), такое, что при  $\rho < \rho_c$  расширение будет продолжаться неограниченно, а при  $\rho > \rho_c$  расширение сменится сжатием.

От значения плотности зависит также важное свойство Вселенной — ее общая геометрическая структура: конечность или бесконечность. При  $\rho > \rho_c$  Вселенная конечна, хотя и безгранична, подобно тому как конечна, но не имеет границ поверхность шара. При  $\rho \leq \rho_c$  Вселенная бесконечна и в этом смысле не отличается от классического трехмерного евклидова пространства. Следовательно, плотность, будущее и геометрическая структура Вселенной связаны между собой. В случае космологической постоянной, отличной от нуля, ситуация сложнее: например, при определенных соотношениях  $\Lambda$  и  $\rho$  возможен случай конечной Вселенной, которой тем не менее в будущем предстоит неограниченное расширение. Здесь во введении было бы неуместно вдаваться в полную классификацию таких решений.

Как мы увидим далее, определение средней плотности материи во Вселенной прямо из наблюдений различных объектов — это задача очень сложная, так как многие виды материи наблюдать очень трудно.

В принципе можно определить кривизну пространства (а значит, и среднюю плотность всей материи) и решить вопрос о структуре Вселенной, наблюдая, как меняется яркость источника (например, галактики) с известной абсолютной светимостью в зависимости от его расстояния или от его красного смещения (поскольку оно непосредственно связано с расстоянием). В моделях с разной кривизной пространства эта зависимость разная.

Теория распространения света и теория, указывающая связь между свойствами далеких объектов и наблюдаемыми величинами, является тем разделом космологии, который разработан с наибольшей полнотой. В принципе достаточно было бы измерить красные

смещения спектра и поток света всего двух далеких объектов с известной абсолютной светимостью — и можно найти постоянную  $H$  и плотность  $\rho$  (при условии, что  $\Lambda=0$ ; если  $\Lambda \neq 0$ , нужно еще одно наблюдение). Для того чтобы установить структуру Вселенной, вместо светимости можно измерять число объектов данного типа в данном элементе телесного угла и в заданном интервале красного смещения, но опять-таки для объектов, для которых нечто известно — именно плотность которых в пространстве известна из независимых соображений. Однако эта простая и ясная программа до сих пор не проведена, и не только по причине технических трудностей. Существует глубокая принципиальная трудность, связанная с тем, что все небесные тела эволюционируют. Наблюдая далекие объекты, мы наблюдаем их в далеком прошлом и поэтому не можем даже для объектов известного типа (галактики, квазары) указать с уверенностью их абсолютную светимость и число в единице объема в момент, когда было испущено излучение, принимаемое нами сегодня.

Поэтому сопоставление теории с наблюдениями не привело к установлению структуры Вселенной. Вместо этого получены доказательства того, что удельная плотность \*) наиболее мощных источников энергии во Вселенной — квазаров и радиосточников — в прошлом была существенно (до тысячи раз!) больше современной; последние 8—9 миллиардов лет квазары вымирают, рождение новых квазаров не компенсирует угасание старых. Для обычных галактик можно предвидеть гораздо большую стабильность, эволюционные эффекты меньше. Расстояния, на которых можно наблюдать галактики, малы по сравнению с космологическими масштабами, и эволюция их за время распространения света даже от наиболее далеких до нас не очень велика, но меньше и космологические эффекты. Поэтому окончательно структура Вселенной до сих пор не установлена.

Итак, для определения структуры Вселенной приходится вернуться к трудной задаче нахождения средней плотности материи путем непосредственных наблюдений различных небесных тел и излучений во Вселенной. Эти наблюдения необходимы еще по одной причине.

Развитие космологии неотделимо от вопроса о материальном составе Вселенной. Для динамики Вселенной достаточно знать одну лишь величину — среднюю плотность, но для понимания физических процессов нужно знать, *какие* частицы заполняют Вселенную.

Средняя плотность вещества, находящегося сейчас в галактиках, приблизительно известна. Если его «размазать» по всему пространству, то эта величина составляет около  $(3-5) \cdot 10^{-21} \text{ г/см}^3$ , т. е. в 20—30 раз меньше критической. В самое последнее время указывается, что галактики, возможно, окружены коронами, состоящими, веро-

---

\*) Количество источников, приходящихся на фиксированную массу вещества во Вселенной.

ятно, из звезд малой светимости, при учете которых средняя плотность может увеличиться в несколько раз. Масса галактик определяется из анализа движения звезд и газовых облаков в естественном предположении, что возраст галактик во много раз больше периода обращения по галактической орбите. Такой способ позволяет определить суммарную массу галактики, включая невидимые формы материи, например погасшие звезды \*). Масса галактики приблизительно равна сумме масс покоя барионов (нейтронов и протонов), входящих в ее состав; таким образом можно получить среднюю плотность барионов во Вселенной — порядка  $3 \cdot 10^{-7} \text{ см}^{-3}$  в настоящее время.

Высказывалось предположение о зарядовой симметрии Вселенной, т. е. о существовании одинаковых в среднем количества частиц и античастиц. Нужно подчеркнуть, что априори с точки зрения теории элементарных частиц такое предположение возможно, но вовсе не обязательно. Специально предпринимались поиски эффектов аннигиляции частиц и античастиц в пространстве между галактиками, состоящими из вещества, и галактиками, состоящими из антивещества. Эти поиски дали отрицательный результат, и поэтому более вероятным в настоящее время представляется предположение о зарядово-несимметричной Вселенной, в которой антибарионы имеются лишь в ничтожном количестве в составе космических лучей.

Наблюдения показывают наличие интенсивного радиоизлучения в сантиметровом и миллиметровом диапазоне; это излучение нельзя приписать каким-либо отдельным источникам. Предполагается, что это излучение является первичным и существует, начиная с весьма ранней стадии эволюции Вселенной, так же как на ранней стадии уже имелись те барионы, которые затем вошли в галактики.

Основываясь на наблюдениях и небольшой теоретической экстраполяции, можно подсчитать плотность первичных (реликтовых) фотонов, она оказывается равной  $\sim 400$  в одном  $\text{см}^3$ , что в  $10^8$ — $10^9$  раз больше средней плотности барионов во Вселенной. Реликтовое излучение соответствует термодинамическому равновесию при  $2,7^\circ\text{К}$ . Средняя энергия фотонов около  $0,001 \text{ эв}$ , плотность энергии излучения  $\varepsilon = 4 \cdot 10^{-13} \text{ эрг/см}^3$ , и по принципу эквивалентности соответствующая плотность массы  $\rho_\gamma = \varepsilon/c^2 = 5 \cdot 10^{-34} \text{ г/см}^3$ . Таким образом, в настоящее время вклад излучения в общую плотность весьма мал.

Большая теоретическая и наблюдательная работа по определению плотности межгалактического газа в настоящее время еще не закончена. Содержание нейтрального водорода в этом газе весьма мало, газ практически полностью ионизован, его температура, предположительно, лежит в пределах  $2 \cdot 10^4 < T < 3 \cdot 10^6 \text{ К}$ . Такой газ

\*) Отметим, однако, что это относится к массе внутри галактики: масса в возможной короне, окружающей галактику, не повлияет на движение во внутренней части и, следовательно, не может быть определена по движению в этой части.

прозрачен практически для всех длин волн, сам он излучает ультрафиолет и мягкий рентген. Лучшие оценки дают для плотности газа  $\rho_{\text{газ}} \leq 0,3 \rho_c$ .

Прямое определение таких форм материи, как нейтрино и гравитационные волны, весьма затруднительно; их плотность могла бы во много раз превышать плотность обычного вещества (барионов) во Вселенной, и при этом чувствительности прямых физических методов все еще не хватало бы для обнаружения нейтрино и гравитонов. Однако из косвенных оценок следует, что плотность таких частиц существенно меньше плотности обычного вещества.

В настоящее время нет надежных оценок возможного количества потухших квазаров, звезд и каких-либо других слабосветящихся или несветящихся объектов между галактиками.

Итак, в настоящее время достаточно надежно установлена средняя плотность во Вселенной вещества, входящего в галактики:  $\rho_{\text{гал}} \approx (3-5) \cdot 10^{-31} \text{ г/см}^3 \approx 0,03 \div 0,1 \rho_c$ . О других видах материи можно сказать лишь, что хорошо изученные виды (например, реликтовое излучение) имеют плотность существенно меньше  $\rho_c$ , плотность остальных известна очень плохо.

Таким образом, ответа на вопрос, больше ли средняя плотность, чем  $\rho_c$ , или нет и, следовательно, бесконечна ли Вселенная или конечна, до сих пор нет. Большинство исследователей склоняется к первой возможности.

Зная сегодняшний состав материи, можно проследить более ранние этапы эволюции Вселенной. Важнейший факт состоит в расширении Вселенной. С расширением температура реликтового излучения падает. Сегодняшнее значение этой температуры  $2,7^\circ \text{K}$ , в прошлом она была гораздо выше. На ранних этапах расширения плотное вещество было непрозрачным для излучения; вещество и излучение находились в термодинамическом равновесии и имели очень большую температуру. Отсюда название: «теория горячей Вселенной».

В целом можно считать твердо установленной общую картину эволюции, объединяемую названием «теория горячей Вселенной». Эта картина включает в себя изотропное (т. е. одинаковое во всех направлениях), однородное (одинаковое во всех точках пространства) расширение Вселенной. Вселенная заполнена материей, в которой численно преобладают фотоны. Зная закон расширения и используя законы физики, можно рассчитать состояние вещества и физические процессы в прошлом.

Плотность обычного вещества (барионов) падает с расширением обратно пропорционально объему, т. е.  $\rho_b \sim V^{-1}$ , плотность реликтового излучения  $\rho_{\text{рел}} \sim V^{-4/3}$ , т. е. падает быстрее, чем  $\rho_b$ . Следовательно, в прошлом, на ранней стадии, фотоны преобладали не только по числу, но и по массе, а обычное вещество состояло из водорода и гелия, полностью ионизованных. Эту стадию называют РД-стадией (радиационно-доминированной).

Из уравнений механики и из известного сейчас соотношения между числом квантов и атомов можно найти температуру и состав в зависимости от времени (будем отсчитывать время  $t$  от момента  $\rho = \infty$  в космологической модели). Так, например, в момент  $t = 1$  сек температура была около  $1$  Мэв, т. е.  $10^{10}$  градусов, плотность  $10^6$  г/см<sup>3</sup>. Кроме квантов, в равновесии было почти столько же пар электронов и позитронов. При этом сложные ядра не могли существовать. Существовали протоны и нейтроны в почти одинаковом числе; столкновения с электронами и позитронами приводили к взаимным превращениям протонов и нейтронов.

По мере расширения исчезали позитроны. Часть нейтронов распалась, остальные нейтроны соединились с протонами и в конечном счете дали состав: 70% водорода и 30% гелия, следы дейтерия и гелия-3. Практически полностью отсутствуют более тяжелые элементы. Это предсказание теории не противоречит скудным данным о возможном составе первичного вещества (т. е. вещества, не прошедшего стадию нуклеосинтеза в звездах). От этого периода должны оставаться также нейтрино и антинейтрино в количестве, примерно равном количеству квантов, и с той же средней энергией, соответствующей сегодня нескольким градусам, т. е. около  $10^{-3}$  эв.

На стадии расширения, следующей за РД-стадией, т. е. уже в близкую к нам эпоху, плотность массы обычного вещества превышает плотность фотонов, вещество находится в виде нейтральных атомов. В этой общей картине отсутствуют некоторые важные детали — в частности, не объяснены отклонения от однородности (галактики, их скопления), не хватает трактовок самых ранних стадий, когда наряду с фотонами присутствовали разнообразные частицы и античастицы и квантовые явления были существенны.

Как мы увидим дальше, между двумя этими вопросами — неоднородность и самые ранние стадии — есть определенная связь \*).

С наблюдательной точки зрения возможность исследования ранних стадий ограничена рассеянием электромагнитных волн на электронах. Все принимаемое сегодня на Земле излучение заведомо рассеивалось на электронах в эпоху, когда масштаб Вселенной был приблизительно в 1000 раз меньше теперешнего, т. е. при красном смещении  $\Delta\lambda/\lambda = z \sim 1000$ . В эту эпоху вещество представляло собой ионизованную плазму с температурой больше  $4000^\circ$ . Только в более близкую к нам эпоху температура упала настолько, что произошла рекомбинация водорода, плазма стала нейтральной и прозрачной для излучения. Следовательно, непосредственно «видеть» с помощью электромагнитных волн более далекое прошлое нельзя. Утверждение об однородности и изотропии мира, следующее из отсутствия

---

\*) Отметим еще не решенные вопросы о плотности энергии гравитационных волн разной длины и о том, можно ли считать равными плотности нейтрино и антинейтрино.



видимых флуктуаций температуры реликтового излучения на небесной сфере, относится к моменту рекомбинации водорода, соответствующему  $z \sim 1000$ , т. е.  $\sim 10^6$  лет с момента начала расширения Вселенной (напомним, что наша эпоха соответствует  $10^{10}$  лет).

Область пространства, охваченная электромагнитными волнами, вышедшими при  $t = 10^6$  лет и пришедшими к нам без рассеяния, мало отличается от «горизонта» — от максимально возможной области наблюдения в расширяющейся Вселенной при пользовании излучением, которое бы абсолютно не рассеивалось и возникло в момент сингулярности (бесконечной плотности вещества), т. е. в момент начала расширения.

Радиус наблюдения, таким образом, велик: он составляет около 97% радиуса «горизонта», и объем, охваченный наблюдением с помощью реликтового излучения, составляет 90% максимально возможного видимого объема (объема внутри «горизонта»). Таким образом, однородность в большом масштабе доказана. Однако возможность неоднородности Вселенной и анизотропии расширения до момента рекомбинации водорода, т. е. при  $z \sim 1000$ ,  $t < 10^6$  лет с начала расширения, не исключена. Более того, сегодняшняя структура окружающей нас Вселенной — существование отдельных галактик и скоплений галактик — с определенностью доказывает и настоятельно требует отклонений от идеальной картины однородной во всех масштабах и изотропной Вселенной.

Общая картина расширяющейся «горячей Вселенной», изложенная выше, надежно установлена и является одним из важнейших завоеваний науки XX века. Теперь мы переходим к более тонким вопросам — таким, как проблема происхождения галактик и проблема начала космологического расширения. Здесь мы обращаемся к проблемам, лежащим на самом переднем крае исследований сегодняшних дней. Не удивительно, что здесь мы будем говорить в менее определенном тоне и перечислять разные гипотезы. Всесторонний анализ отклонений от идеальной картины однородной изотропной Вселенной является важнейшей задачей современной космологии. В этом анализе необходимо комбинировать наблюдения и теорию. Прочный фундамент для исследований дает теория малых возмущений. Самое общее свойство Вселенной, близкой к идеальной, заключается в том, что отклонения от идеальности (возмущения) можно расклассифицировать на отдельные виды («моды»), развивающиеся независимо друг от друга. Такая теория представляет огромную ценность для анализа наблюдений, она дает тот язык, ту систему понятий и взглядов, без которой невозможно было бы продвижение в познании Вселенной.

В самом деле, сравним идеальную однородную изотропную модель и теорию малых возмущений. Идеальную модель удастся рассмотреть полностью благодаря ее совершенно исключительным свойствам, резко упрощающим математическую сторону дела. Идеальная модель в каждый момент характеризуется всего несколькими числами

ми (радиус мира, скорость расширения, плотность вещества, температура и т. д.). Вся эволюционная картина в таком приближении характеризуется зависимостью этих нескольких чисел от времени, т. е. несколькими функциями переменной  $t$ . Следовательно, задача не сложнее механической задачи о движении одной частицы. Это упрощение достигнуто за счет ограничения однородной задачей; как выражаются математики, — за счет рассмотрения «вырожденного» случая. Между тем противоположный случай — наиболее общая постановка задачи — требует рассмотрения функций по крайней мере от четырех переменных — от времени и трех координат. В такой постановке задача необычайно сложна. Сложность усугубляется еще и тем, что нам неизвестны начальные условия — условия в начале расширения. Либо нужно просчитывать множество вариантов начального состояния, либо, имея (неполное!) представление о сегодняшнем состоянии, надо решать уравнения для прошлого. Оба подхода связаны с большими трудностями.

Теория малых возмущений замечательна тем, что она соединяет общность постановки задачи с математической простотой решения.

Действительно, однородное изотропное решение с наложенными возмущениями уже не является вырожденным: возмущения зависят от координат, возмущенное решение описывает неоднородную Вселенную.

С другой стороны, благодаря малости возмущений, или, как говорят математики, благодаря линейности задачи о малых возмущениях, рассмотрение каждой моды возмущений снова сводится к нахождению нескольких функций только от времени, т. е. задача имеет тот же класс сложности, что и задача о движении точки. Это замечательное соединение общности и простоты объясняет, почему значительная часть книги посвящена теории малых возмущений идеальной Вселенной.

Теория малых возмущений рассматривает эволюцию отдельных мод, и она неполна в том смысле, что абсолютное значение амплитуды различных мод остается за рамками этой теории — его нужно брать извне, из других теоретических соображений или из наблюдений. Теория дает, например, что возмущение плотности, охватывающее массу больше  $10^{15} M_{\odot}$ , растет в 100 раз за время, когда масштаб Вселенной также возрастает в 100 раз (например, от  $t=10^6$  лет после начала расширения до  $t=10^8$  лет). Однако есть ли в природе такого рода возмущения, какова их амплитуда — это остается в теории неизвестным.

О чем же говорят наблюдения?

Прямые наблюдения распределения вещества путем фотографирования неба крупнейшими телескопами свидетельствуют о том, что в масштабе порядка  $10 Mpc$  (примерно таково среднее расстояние между соседними скоплениями галактик) и меньше неоднородность велика. Средняя масса вещества в шаре диаметром  $10 Mpc$  лежит

в пределах  $10^{16} - 3 \cdot 10^{13} M_{\odot}$  (в зависимости от того, равна ли плотность критической,  $\rho = \rho_c$ , или она равна  $\rho = 3 \cdot 10^{-31} \text{ г/см}^3$ ). В этом масштабе в настоящее время возмущения плотности  $\delta\rho/\rho \sim 1$ . Когда образовались такие большие возмущения? По-видимому, в недалеком прошлом при красном смещении  $z \approx 5$  \*).

В самом деле, совсем грубо можно считать, что плотность вещества в скоплениях галактик порядка средней плотности в тот момент, когда они обособились от расширяющегося фона и превратились в связанные образования. Наглядно можно представить себе, что до определенного  $z_1$  (т. е. при  $z > z_1$ ) вещество расширялось, а затем (при  $z < z_1$ ) распалось на отдельные части — скопления галактик. Расстояние между этими частями продолжало увеличиваться, но сами эти части — или куски — «законсервировались», они поддерживаются в состоянии динамического равновесия без изменения средней плотности.

«Законсервированная» средняя плотность скоплений примерно совпадает со средней плотностью вещества во Вселенной в момент их образования и позволяет дать оценку этого момента, приведенную выше. Отсюда, пользуясь теорией возмущений, можно сделать вывод об амплитуде возмущений плотности и других величин в далеком прошлом.

Для состояния плазмы на РД-стадии получается амплитуда возмущений плотности  $\delta\rho/\rho \sim 10^{-3} - 10^{-4}$ ; соответственно того же порядка и скорость движения отдельных элементов вещества, выраженная в единицах скорости света, на фоне общего расширения ( $u/c \sim 10^{-3} - 10^{-4}$ ) и безразмерные возмущения метрики пространства-времени. Все это относится к масштабам, соответствующим сегодняшнему масштабу скоплений галактик.

Радионаблюдения флуктуаций реликтового излучения и его спектра после привлечения теоретических соображений позволяют дать оценку величины возмущений как функции масштаба (или массы), т. е. оценить спектр возмущений. Мы подробно остановимся на этом в соответствующем месте книги.

Резюмируя, можно сказать, что вырисовывается картина Вселенной, представляющей собой слабовозмущенный (почти однородный) расширяющийся мир с определенной (большой) начальной энтропией. В поддержку этой картины говорит измерение спектра и пространственного распределения реликтового радиоизлучения. Таков важнейший итог наблюдений и развития теории последних лет.

---

\*) Каждому красному смещению  $z$  соответствует определенный момент в прошлом. Этот момент отстоит от нашей эпохи на интервал времени, необходимый для того, чтобы лучи света приобрели соответствующее красное смещение. Для читателя удобно запомнить, что величина  $z+1$  показывает, во сколько раз увеличились масштабы расширяющегося мира от рассматриваемой эпохи до нашей.

В обрисованной выше схеме образование галактик и других структурных особенностей объясняется отклонением от однородности, впрочем, достаточно малым для того, чтобы не испортить перечисленные выше привлекательные черты однородной модели. Однако такая концепция не общепризнана. Прежде всего, высказывались сомнения, может ли эта концепция объяснить некоторые конкретные свойства наблюдаемой картины. Имелось в виду прежде всего вращение галактик и магнитные поля галактического масштаба. Кроме того, к списку трудностей теории слабовозмущенного однородного мира добавляли еще вопрос о происхождении квазаров. Однако для серьезного рассмотрения этого вопроса нужно, чтобы сама природа квазаров — их строение и источники энергии в настоящее время — была установлена с определенностью.

Несколько лет тому назад проблема зарождения и усиления магнитных полей в космических масштабах была в трудном положении. Общеизвестна высокая электропроводность плазмы и следующее отсюда сохранение магнитных потоков — так называемая «вмороженность» магнитного поля в плазму. Для поддержания магнитного поля нет необходимости во внешних источниках электрического тока: так велико время затухания тока в плазме в космических масштабах. Казалось, что та же «вмороженность» мешает возникновению упорядоченных полей в плазме, первоначально свободной от магнитного поля.

В связи с этим рассматривались «магнитные» космологические модели с первичным полем; поскольку поле выделяет определенное направление в пространстве, такие модели отличались изначальной анизотропией.

В настоящее время этот этап поисков решения проблемы галактических магнитных полей можно считать преодоленным. Среди сложных трехмерных движений плазмы в процессе формирования вращающихся галактик есть и такие движения, которые способны генерировать и усиливать магнитные поля до наблюдаемых в настоящее время. Гипотеза изначального магнитного поля стала ненужной, повисла в воздухе, хотя, разумеется, доказать отсутствие малого начального поля (соответствующего, например,  $10^{-10}$  гс после расширения до сегодняшнего состояния) было бы очень трудно.

Сложнее обстоит дело с вращением. Вращение значительной части галактик является важнейшей их особенностью; именно вращением, центробежной силой, обусловлена дискообразная, плоская их форма. Возникновение отдельных рукавов и спиральной структуры является уже дальнейшим следствием неустойчивости плоского вращающегося диска. Итак, вращение, несомненно, имеет место и играет важную роль; теория, игнорирующая вращение, была бы заведомо неполна и неприемлема.

Известным аналогом понятия «вмороженности» магнитного поля являются свойства вращательного движения. Сюда относятся сохра-

нение момента вращения изолированной системы и сохранение циркуляции скорости в сплошной среде на РД-стадии. Если галактики возникают в результате роста небольших неоднородностей плотности за счет сил самогравитации, т. е. из «потенциальных» (безвихревых) возмущений, как это предполагается в схеме, описанной выше, то на первый взгляд трудно понять, как возникло вращение галактик. Простейшее объяснение наблюдаемого в настоящее время вращения заключается в предположении об изначальном вращении элементов среды, имевшем место на РД-стадии. Так формулируется гипотеза турбулентной Вселенной и первичных фотонных вихрей, которая противопоставляется теории потенциальных возмущений. Современная теория турбулентности используется для получения более детальных закономерностей корреляции момента вращения и массы галактики и т. п.

Однако происхождение вращения галактик можно объяснить и в рамках потенциальной теории. В момент формирования галактик из вещества, которое было почти однородным, будущие галактики сильнейшим образом взаимодействуют и закон сохранения момента к ним неприменим. Отнюдь не исключено, что вращение возникло самопроизвольно, спонтанно, в ходе развития возмущений, которые первично были потенциальными, безвихревыми; в частности, это возможно при сжатии вещества ударными волнами, возникшими из таких возмущений (речь идет о локальном вращении).

Острота дискуссии между сторонниками потенциальной и вихревой теорий, дискуссии, не законченной в настоящее время, связана с двумя трудностями вихревой теории. Первая из них заключается в том, что из вихревой теории следует, по-видимому, слишком раннее обособление галактик из расширяющегося вещества, обособление в момент, когда средняя плотность материи во Вселенной была еще довольно высока — около  $10^{-23}$ — $10^{-25}$  г/см<sup>3</sup>. Это приводит к некоторым свойствам галактик, трудно согласуемым с наблюдениями. В частности, велики ожидаемые возмущения реликтового радиозлучения. Вторая проблема связана с тем, что предположение о существовании первичных вихревых движений требует изменения самого характера начала космологического расширения. Даже скромные дозвуковые вихревые движения требуют разрыва с теорией изотропного расширения, с теорией слабовозмущенного однородного мира. Согласно этой теории, по крайней мере первые  $10^6$  сек расширения мира не описывались однородной изотропной моделью. Признав вихревую теорию, придется отказаться и от теории химического состава дозвездного вещества, ибо синтез элементов проходил в первые 100 сек расширения.

Наконец, нельзя не упомянуть еще одну точку зрения на происхождение галактик. Согласно этой концепции, галактики образуются не из разреженного расширяющегося газа путем гравитационной конденсации малых неоднородностей, а путем взрывов из сверхплотных

тел. Достоинством такой точки зрения является ее непосредственная связь с мощными взрывами, наблюдаемыми в настоящее время в мире галактик. Однако трудности такой концепции чрезвычайно велики. Не останавливаясь в кратком обзоре на этих трудностях, упомянем только, что сторонникам этой теории приходится говорить о нарушении в этих догалактических телах фундаментальных законов физики, например таких, как закон сохранения углового момента или даже закон сохранения энергии. Мы не думаем, что решение проблемы образования галактик лежит на пути отказа от основ современной физики.

Выше нами обрисована в общих чертах картина «горячей» расширяющейся Вселенной от первых секунд расширения до образования галактик. Затронутые проблемы подводят нас к задаче огромной важности, к вопросу о самом начале космологического расширения. С чего началось расширение? Как расширился мир в самом начале? Была ли бесконечная плотность материи в начале расширения? Что было до начала наблюдаемого расширения?

Может быть, самые ранние стадии расширения Вселенной (например, еще до процесса синтеза химических элементов, т. е. до  $t < 1$  сек с начала расширения) действительно сильно отличались от однородной и изотропной модели и характеризовались, например, резко анизотропным расширением, описываемым анизотропными космологическими моделями, которые усиленно изучаются в последнее время. Еще совсем недавно дискутировался вопрос: была ли действительно сингулярность, бесконечная плотность вещества в начале расширения? Может быть, сингулярность характерна только для идеальной однородной изотропной модели, а в общем несимметричном, невырожденном решении сжатие вещества в предыдущую эпоху сменилось расширением без прохождения через сингулярность? В настоящее время строго доказано, что сингулярность в реальной Вселенной в прошлом была, даже если ранние стадии расширения резко отличались от однородного изотропного расширения. Мы остановимся подробно на этих проблемах в соответствующих местах книги. Здесь мы хотим подчеркнуть следующее. Рассмотрение различных типов космологических моделей, претендующих на описание Вселенной вблизи начала космологического расширения, и рассмотрение конкретных теорий различного типа возмущений на более поздней стадии подводят нас к фундаментальному вопросу: можно ли по данным всех возможных сейчас наблюдений, используя законы физики, однозначно восстановить прошлое Вселенной, в том числе и самые ранние стадии расширения, саму сингулярность и эпоху «до расширения» (если это выражение вообще имеет смысл)?

В духе термодинамики легко представить себе, что в определенных условиях широкий класс начальных состояний будет быстро приводить к одному и тому же равновесному состоянию, которое

уже в свою очередь послужит начальным состоянием для дальнейшей эволюции. Тогда начальное состояние «забывается».

На наших глазах возникает новое направление в космологии: теоретическое исследование ненаблюдаемых ранних стадий. Ставится вопрос о той космологической модели, которая могла бы получиться из самого широкого класса начальных ранних состояний.

Так, например, оказывается, что целый ряд анизотропных начальных состояний в силу уравнений общей теории относительности асимптотически приходит в состояние изотропного расширения. Является ли это обстоятельство объяснением того, что Вселенная расширяется изотропно? Может быть, это значит, что из множества «в принципе возможных» вселенных (кошунственное словосочетание!) большая часть будет такой, как наша — единственная наблюдаемая и исследуемая нами.

Но Вселенная одна, и поэтому статистические аргументы кажутся неприменимыми. Наряду с вопросом о том, почему Вселенная расширяется однородно и изотропно, перед космологией стоит и вопрос, почему энтропия Вселенной велика и Вселенная была в начале расширения горячей, а также почему малые возмущения таковы, что привели к образованию галактик в нашу эпоху, а не много раньше или много позже. Возможно, что новая теоретическая постановка вопроса возникнет от рассмотрения квантовой космологии.

В заключение еще раз напомним и подчеркнем вопрос о том фундаменте, на котором строится теоретическая космология, — о физических законах. Было бы соблазнительно провозгласить необходимость новых законов для нового (по сравнению с лабораторными) масштаба Вселенной, подобно тому как новые квантовые законы возникли в микромире. Однако такая аналогия представляется поверхностной и упрощенной.

Микромир сигнализировал о недостаточности классической теории за 50 лет до ее создания. В космологии до сих пор мы не сталкиваемся с каким-либо неразрешимым противоречием теории и опыта или внутренними логическими трудностями теории. Более того, теория расширяющейся Вселенной была создана до фактического открытия удаления галактик, доказавшего расширение Вселенной; теория же горячей Вселенной была создана задолго до открытия реликтового излучения, подтвердившего эту теорию. Это говорит о правильности наших теорий, об их применимости к масштабам Вселенной. Нужно только подчеркнуть, что речь идет не об исключении нового: необычайное и принципиально новое, никогда не наблюденное в лаборатории, возникает в космологии как результат применения существующей теории.

Общая теория относительности приводит к принципиально новой ситуации в релятивистском коллапсе. Новые явления возникают при комбинации квантовой теории материи с теорией тяготения. Неоднократно выдвигались теории рождения частиц, повсеместного и

всегда происходящего в разреженном пространстве в нарушение лабораторных законов физики. Это направление можно уважать как поэтическое предвидение, но не как научное предсказание. Такие теории непрерывного рождения вещества опровергнуты наблюдениями. Между тем в эволюционной космологии есть период — окрестности сингулярности, когда частицы рождаются в гравитационном поле огромной напряженности. При этом оказывается, что интенсивное рождение частиц происходит лишь при анизотропном расширении,— факт отнюдь не очевидный. Наконец, новые явления в тот же период, возможно, возникнут при учете квантования самих уравнений эволюции метрики Вселенной. Это — возможное новое развитие теории в применении к условиям, совершенно неизвестным современной физике. Таким образом: 1) основные положения современной физики, основанные на точнейших опытах и логической замкнутости; 2) развитие их в принципиальных новых условиях в самой сингулярности и 3) наблюдательные данные, полученные с помощью как наземных инструментов, так и с помощью космических аппаратов,— вот тот фундамент, на котором основывается или должна быть основана современная космология.

В заключение мы считаем необходимым сделать замечание исторического характера. Общеизвестно, что теория эволюционирующей Вселенной была создана в 1922—1924 гг. А. А. Фридманом. Однако в зарубежной литературе иногда высказывается точка зрения, что только Леметр (1927) независимо обосновал формулы расширяющейся космологической модели, связал их с открытым Хабблом разбеганием галактик и что Леметра следует считать отцом теории расширяющейся Вселенной, а саму космологическую модель следует называть моделью Леметра.

Не умаляя научных заслуг Леметра, мы решительно не согласны с такой точкой зрения. Все основные формулы теории однородной изотропной Вселенной имеются в работах Фридмана. Эти работы были опубликованы на русском и немецком языках и не остались незамеченными. Эйнштейн сначала не согласился с результатами советского математика, но после переданных ему разъяснений Фридмана полностью их признал. В дальнейшем Эйнштейн в 1931 г., говоря о теории расширяющейся Вселенной, ссылаясь на Фридмана: «Первым... на этот путь вступил Фридман.» [Эйнштейн (1966)]\*).

Теория однородной изотропной Вселенной по праву носит имя Фридмана.

---

\*) Здесь и в дальнейшем мы ссылаемся на «Собрание научных трудов» А. Эйнштейна, вышедшее в издательстве «Наука».