

цип, согласно которому в больших пространственных масштабах во Вселенной нет преимущественных выделенных областей или направлений. Иногда этот принцип называют «принципом Коперника», который первым в новой истории отказался от геоцентрической системы мира. Он означает, что во Вселенной нет выделенных наблюдателей, и ее глобальные характеристики в фиксированный момент времени одинаковы во всех точках пространства.

Космологический принцип подтверждается астрономическими наблюдениями. Из них следует, что распределение материи во Вселенной в больших масштабах ($\gtrsim 100$ Мпк) *однородно и изотропно*. Последнее подтверждается тем, что с точностью до $\sim 10^{-5}$ (уровень относительных флуктуаций температуры реликтового фона) во Вселенной отсутствуют выделенные направления. Свойств однородности и изотропии оказывается достаточно, чтобы из всего многообразия в принципе возможных математических моделей, описывающих Вселенную в целом, выбрать весьма узкий класс однородных изотропных пространств (т. н. модели Фридмана–Робертсона–Уокера; см. подробнее в монографии С. Вейнберга «Гравитация и космология», М.: Мир, 1975, Гл. 13 и далее).

12.5. Однородные и изотропные космологические модели

12.5.1. Выбор системы координат

Расширение Вселенной не следует понимать как изменение всех существующих масштабов расстояний и размеров, в противном случае вместе с расстоянием до галактик изменялись бы и все эталоны длины, и расширение оставалось бы незамеченным. Расширение проявляет себя в систематическом уменьшении средней плотности вещества в любой локальной области, в которой материя не связана гравитационными или иными силами. Так, расширению не подвержены ни отдельные галактики, ни их системы, при условии, что они являются гравитационно связанными.

Для математического описания изменения масштабов Вселенной можно использовать различные системы координат, и, естественно, выбирается та система, где уравнения имеют более простой вид. Сетку координат удобно выбрать таким образом, чтобы средние скорости разлета галактик в этой системе координат зависели только от расстояния, но не от направления (условие изотропности рас-

ширения). Последнее условие требует, чтобы яркость реликтового излучения в этой системе также не зависела от направления (с точностью до случайных флуктуаций, о которых речь шла выше). Солнце, как и центр нашей Галактики, движется в такой системе со скоростью в несколько сотен километров в секунду — очень небольшой по космологическим масштабам. В ньютоновской механике для описания расширения было бы логично выбрать инерциальную систему координат с жесткими, недеформируемыми осями. Такую систему действительно можно использовать, но только локально, ограничив рассмотрение областью, где скорости расширения много меньше световых. Однако эту систему координат нельзя распространить на всю Вселенную, плотность материи в которой не равна нулю. Мало пригодна здесь и специальная теория относительности, поскольку она не может описывать гравитационные эффекты или связанные с гравитацией изменения топологических свойств безграничного пространства. Для этой цели пригодна лишь ОТО, поэтому современная космология началась именно с ее использования.

В ОТО изотропно расширяющуюся среду удобно рассматривать в системе координат, расширяющейся вместе с материей. В этом случае расширение Вселенной формально сводится к изменению масштаба всей координатной сетки, происходящей по определенному закону, а отдельные галактики при этом остаются как бы «вмороженными» в нее — с точностью до случайных скоростей собственных движений. Такую систему отсчета называют *сопутствующей*. Грубой двумерной моделью расширения в этом случае является растягиваемая резиновая пленка в форме плоскости или шара, на которой изображены точки — галактики и нанесена координатная сетка, расширяющаяся вместе с пленкой. В сопутствующей системе можно ввести координату времени так, что время будет единым для всех гипотетических наблюдателей, имеющих фиксированные пространственные координаты, с какой бы скоростью они ни удалялись друг от друга. Для количественной оценки времени, по которому такие наблюдатели могли бы сверять свои часы, можно использовать, например, локальную плотность вещества или значение постоянной Хаббла, меняющиеся со временем одинаковым образом для всех наблюдателей ввиду равноправия всех областей Вселенной. Другой особенностью деформируемой системы координат является возможность существования сверхсветовых скоростей, с которыми очень далекие объекты удаляются друг от друга вследствие рас-

ширения Вселенной. Здесь нет противоречия с теорией относительности, поскольку скорость взаимного удаления двух любых тел — это не обязательно скорость их движения относительно какой-либо системы отсчета (например, два фотона, летящие вдоль одной прямой в противоположных направлениях, удаляются друг от друга или сближаются со скоростью $2c$). В каждой точке, неподвижной в сопутствующей системе, распространяющаяся электромагнитная волна все равно будет иметь предельно допустимую скорость в соответствии с теорией относительности.

Несмотря на большие скорости далеких галактик, в космологии их никогда не рассчитывают по релятивистской формуле для эффекта Доплера. Скорость или расстояние до далекого объекта в расширяющейся Вселенной для заданного момента времени зависит как от выбранной системы отсчета, в которой они измеряются, так и от того, по какому закону происходит расширение Вселенной, то есть, как менялось расстояние между объектами за время движения фотона. Последнее в свою очередь связано с ее плотностью и рядом других параметров. Таким образом, значения лучевых скоростей очень далеких галактик, а также расстояния до них оказываются зависящими от выбранной модели расширения Вселенной. Поэтому вместо этих двух параметров обычно используют один, однозначно связанный с ними, но измеряемый непосредственно и модельно независимый — красное смещение далекого объекта z . Значение $z = 0$ соответствует современной эпохе, а $z = \infty$ — моменту начала расширения Вселенной.

12.5.2. Метрика Фридмана–Робертсона–Уокера

В современной космологии образование галактик и крупномасштабной структуры Вселенной рассматривается как результат развития малых флуктуаций плотности вещества (темной материи и барионной составляющей), которые возникли в очень ранней Вселенной из квантовых флуктуаций заполняющих Вселенную физических полей. Эти малые флуктуации рассматриваются на плавно эволюционирующем во времени гладком «фоне», который может быть описан однородными и изотропными космологическими моделями. Вся динамика Вселенной в этих моделях может быть сведена к простым дифференциальным уравнениям для масштабного фактора $a(t)$ — величины с размерностью длины, которая описывает изменение пространственных расстояний в однородно расши-

ряющихся (или сжимающихся) пространствах. Например, в случае пространства с постоянной положительной кривизной с топологическими свойствами, схожими со свойствами поверхности сферы, $a(t)$ может быть истолкован как «радиус» сферы. В однородных и изотропных моделях интервал между двумя событиями может быть записан в виде:

$$ds^2 = c^2 dt^2 - a^2(t) dR^2, \quad (12.1)$$

где c — скорость света, а dR^2 описывает геометрические свойства пространства (безразмерный элемент длины). Для 3-мерного евклидова пространства

$$dR^2 = dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2 = dr^2 + r^2(\sin^2 \theta d\phi^2 + d\theta^2) \quad (12.2)$$

(в последнем равенстве от декартовых координат x_1, x_2, x_3 мы обычным образом перешли к сферическим r, θ, ϕ).

Несложно обобщить (12.2) на пространства с постоянной положительной (отрицательной) кривизной (см. Приложение Е). В результате получаем:

$$dR^2 = \frac{dr^2}{1 - kr^2} + r^2(\sin^2 \theta d\phi^2 + d\theta^2), \quad (12.3)$$

где параметр $k = 0$ для плоского (евклидова) пространства с нулевой кривизной, $k = +1$ для однородного пространства с положительной кривизной и $k = -1$ для однородного пространства с отрицательной кривизной. В математике доказывается, что это единственно возможный выбор метрики однородных изотропных трехмерных пространств с постоянной кривизной. Интервал (12.1) с элементом длины (12.3) и единственным зависящим от времени параметром $a(t)$ называют *метрикой Фридмана–Робертсона–Уокера*, по имени ученых, впервые применивших его для построения космологических моделей.

Далее мы обсудим простейшие однородные и изотропные космологические модели Вселенной, впервые рассмотренные А. А. Фридманом в 1922–1924 гг. и заслуженно носящие его имя.

12.6. Кинематика Вселенной

12.6.1. Закон Хаббла

Безграничное пространство, однородно заполненное обычной материей, не может быть стационарным. Это утверждение строго сле-