

лучаем:  $T = \frac{D}{(H_0 \cdot D)} = \frac{1}{H_0}$ . Учитывая, что  $1 \text{ Мпк} \approx 3 \cdot 10^{19} \text{ км}$ , можно найти  $T \approx 4 \cdot 10^{17} \text{ с}$ , или немногим более 10 млрд лет. Конечно, это лишь приблизительная оценка: значение  $H_0$  может меняться со временем, чего простая формула не учитывает. Более строгие расчёты приводят к выводу, что *расширение Вселенной* началось 13,5—14,0 млрд лет назад.

## 41

## Модели расширяющейся Вселенной

Любая физическая модель — это упрощённое описание реальности. Новые исследования всегда развивают и дополняют модель, если она в общих чертах правильно описывает поведение системы, либо же отвергают её как вошедшую в противоречие с наблюдениями или экспериментом. Построить модель безграничной Вселенной, пусть упрощённую, которая описывала бы ожидаемое с точки зрения физики поведение вещества, обладающего гравитацией и заполняющего всё пространство, стало возможным только после создания современной теории гравитации (общей теории относительности), основа которой была заложена **Альбертом Эйнштейном**. Первые физически обоснованные космологические модели Вселенной принадлежат российскому (советскому) физику, математику и метеорологу **Александру Александровичу Фридману** (рис. 190).

В моделях Фридмана не рассматривались ни отдельные звёзды, ни галактики, ни какие-либо другие неоднородности, которые в действительности существуют. Поэтому такие модели пригодны для описания поведения материи только на больших масштабах, где нет каких-либо выделенных областей или направлений, и распределение материи в пространстве можно считать более или менее однородным. Эти модели так и называются — **однородные** и **изотропные**. Позднее разрабатывались и более сложные модели, чем модели Фридмана, для описания поведения материи вблизи самого начала расширения.

Самый важный **вывод**, вытекающий из теоретических построений Фридмана, состоит в том, что *из-за существования гравитации,*

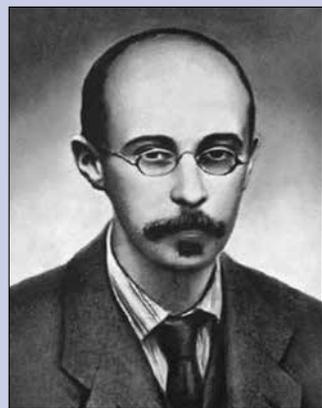


Рис. 190. Александр Александрович Фридман (1888—1925)

*присущей любой материи, Вселенная не может находиться в стационарном состоянии. Она должна либо расширяться, либо сжиматься. В то время закон Хаббла ещё не был известен, но его открытие очень хорошо вписалось в представление о расширяющейся Вселенной.*

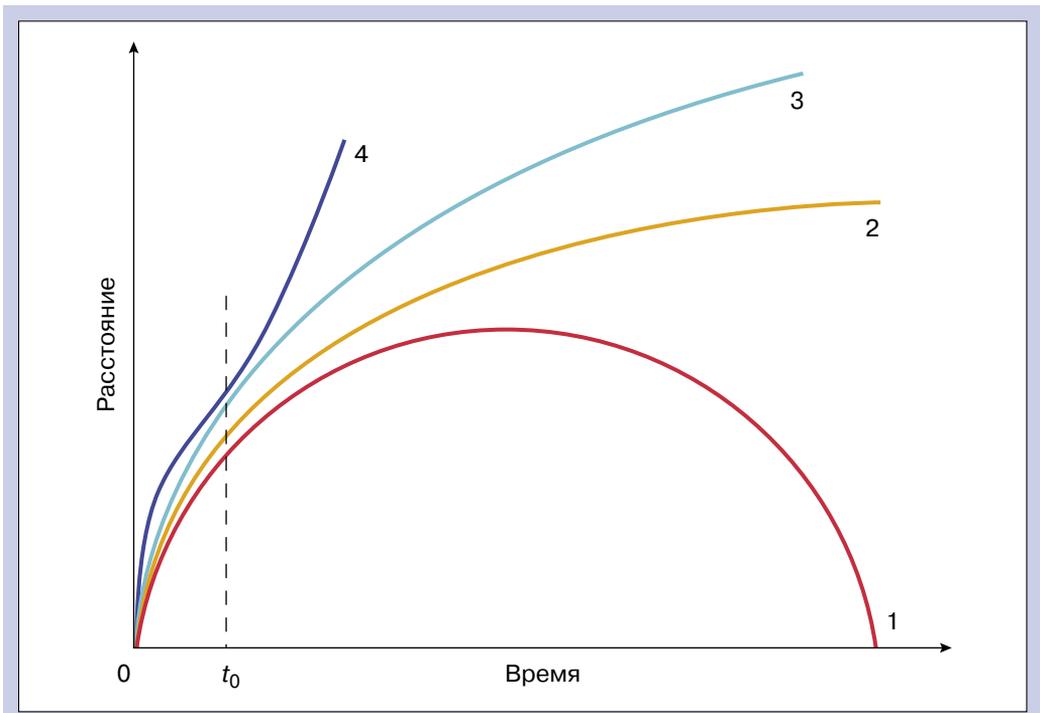
Основными параметрами, определяющими характер эволюции Вселенной, в моделях Фридмана являются *плотность материи и постоянная Хаббла* в любой заданный момент времени. Они определяют и скорости изменения расстояний, и *геометрические свойства пространства* (так называемую кривизну пространства, которая равна нулю для геометрии Евклида). Значения плотности материи и геометрические свойства пространства в реальной Вселенной из теории вывести нельзя, они могут быть оценены только из наблюдений.

По современным оценкам, средняя плотность Вселенной, включая все виды существующей материи, очень низка, всего лишь около  $10^{-26}$  кг/м<sup>3</sup>. Будь она существенно выше, расширение Вселенной уже миллиарды лет назад сменилось бы сжатием и вместо красного смещения галактик было бы фиолетовое. Кривизна пространства, если его рассматривать в больших масштабах, оказалась нулевой или очень близкой к нулю.

Расширение Вселенной и «разбегание» галактик во многом сходно с разлётом вещества в результате взрыва. Поэтому теорию расширяющейся Вселенной часто называют **теорией Большого взрыва**. Но эта аналогия поверхностная, поскольку на любой стадии расширения у Вселенной не существовало ни границ, за которыми пустота, ни какой-либо особой точки в пространстве, откуда началось расширение.

Любой взрыв подразумевает наличие выделенной точки в пространстве, где он произошёл. Но во Вселенной такой точки не наблюдается, и теоретически она не требуется. Любую галактику с равным правом можно рассматривать в качестве центра расширения. К тому же продукты обычного взрыва в пустоте всегда будут распределены неравномерно: то вещество, которое получило более высокую скорость, в любой момент времени будет находиться дальше от центра взрыва, а его средняя плотность по этой причине окажется ниже, чем у вещества с более медленным движением, ближе к центру. В моделях Фридмана для такой картины нет места: в процессе расширения вещество остаётся однородно распределённым. Да и наблюдения свидетельствуют об однородности распределения галактик на больших масштабах: число галактик в единице объёма в различных направлениях от нас на любом расстоянии в среднем более или менее одинаково.

Модели Фридмана позволяют рассчитать, как со временем меняются масштабы расстояний, средняя плотность вещества и излучения (или количество их энергии в единице объёма пространства), а также геометрические свойства пространства. Различные варианты расширения графически представлены на рисунке 191, где показаны возможные зависимости от времени масштабного фактора, пропорционально которому меняются расстояния между галактиками (здесь  $t_0$  — современный возраст Вселенной). Может быть несколько вариантов: расширение, которое со временем сменится сжатием (*кривая 1*), безостановочное расширение с постепенным замедлением (*кривая 2*), расширение с выходом на постоянную скорость (*кривая 3*) и расширение, скорость которого сначала уменьшалась со временем, а ближе к современной эпохе  $t_0$  начала возрастать (*кривая 4*). Эти модели дают различные предсказания для далёкого будущего, но картина того, как происходило расширение вскоре после своего начала, для различных моделей почти одинакова.



**Рис. 191.** Характер изменения расстояний между далёкими объектами со временем в различных моделях расширяющейся Вселенной

Современные данные о расширении Вселенной на различных расстояниях от нас всё же заставляют склоняться к варианту убыстряющегося расширения Вселенной (*кривая 4*), которое не остановится никогда. В пользу этого говорят наблюдения очень далёких галактик, предпринятые в последние десятилетия: они показывают, что в современную эпоху расширение Вселенной, по-видимому, действительно ускоряется со временем. Причину этого связывают с вероятным существованием так называемой **тёмной энергии** (формально её присутствие также допустимо в моделях Фридмана). Её иногда интерпретируют как необычную среду очень низкой плотности, которая пронизывает всю Вселенную, но сама не принимает участия в расширении Вселенной. Тёмная энергия проявляет себя в форме *антигравитации*, то есть в стремлении всех тел (например, галактик) оттолкнуться друг от друга. В этом причина постепенного *ускорения расширения*. Однако из-за низкой плотности тёмной энергии её отталкивающее действие ощутимо только на больших масштабах, а внутри галактик и в их ближайших окрестностях она не ощущается. Природа тёмной энергии остаётся пока неясной и является предметом серьёзных научных обсуждений.

Ускорение расширения Вселенной было открыто по измерениям расстояний и красных смещений сверхновых звёзд в галактиках, расположенных дальше миллиарда световых лет от нас. Это открытие, сделанное в самом конце XX в., оказалось неожиданным, хотя оно вполне вписывается в возможные теоретические варианты фридмановских моделей, следующих из общей теории относительности. Физическая интерпретация причин ускорения расширения заключается в теоретически ожидаемых необычных свойствах вакуума, то есть «пустого» пространства: даже в отсутствие обычной материи вакуум может характеризоваться некоторой скрытой в нём энергией крайне низкой плотности. Энергия вакуума получила название тёмная энергия, поскольку не связана с наличием вещества или излучения. Эта тёмная энергия должна действовать в противовес гравитации, стремясь не сблизить, а, наоборот, расталкивать все объекты. До Фридмана возможность такой «антигравитации» рассматривал Эйнштейн, хотя впоследствии он отказался от этого варианта. Но плотность тёмной энергии настолько низкая, что в обычной практике её можно считать равной нулю, и только на гигантских масштабах Вселенной она проявляет свою расталкивающую силу и определяет ускоренный характер расширения Вселенной.