пределение материи можно считать однородным, а все направления во Вселенной равноправными. В фридмановских космологич. моделях, основывающихся на этих фактах, материя рассматривается как непрерывная среда, равномерно заполняющая пространство и в каждый момент времени имеющая определ. значения плотности ρ и давления P. Для анализа движения этой среды обычно используют *сопутствующую систему отсчёта*, аналогичную лагранжевым координатам в классич. *гидродинамике*. В этой системе вещество неподвижно, деформацию вещества отражает деформация системы отсчёта, так что задача сводится к описанию деформации системы отсчёта.

Трёхмерное пространство сопутствующей системы отсчёта наз. сопутствующим пространством. В случае однородного изотропного пространства квадрат элемента длины dl может быть записан в виде

$$dl^2 = R^2 \frac{(dx^2+dy^2+dz^2)}{1+k\,(x^2+y^2+z^2)/4}\,, \qquad (1)$$

а квадрат четырёхмерного интервала ds — в виде

$$ds^2 = c^2\,dt^2 - dl^2. \qquad (2)$$

Здесь t — время, x, y, z — безразмерные пространственные координаты, R — радиус кривизны пространства (он не зависит от пространственных координат), c — скорость света, коэф. k может принимать значения 0, ± 1. При $k=0$ пространство евклидово, при $k=+1$ пространство имеет положительную кривизну, при $k=-1$ — отрицательную. [В случае $k=0$, R — произвольный масштабный множитель (*масштабный фактор*).] Изменение R с течением времени описывает расширение или сжатие сопутствующей системы отсчёта, а значит, и вещества.

Для решения задачи о деформации системы отсчёта остаётся найти единств. неизвестную ф-цию $R(t)$. Ур-ния ОТО в рассматриваемом случае сводятся к след. двум ур-ниям для $R(t)$:

$$\frac{\ddot{R}}{R} = -\frac{4\pi G}{3}\left(\rho + \frac{3P}{c^2}\right) + \frac{\Lambda c^2}{3}\,, \qquad (3)$$

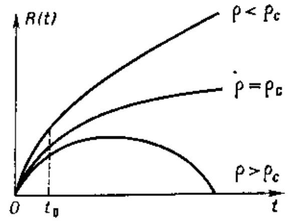
$$\frac{1}{2}\left(\frac{\dot{R}}{R}\right)^2 - \frac{4\pi G\rho}{3} = -\frac{kc^2}{2R^2} + \frac{\Lambda c^2}{3}\,. \qquad (4)$$

Здесь точка над R обозначает дифференцирование по t, Λ — *космологическая постоянная*, описывающая гравитацию вакуума. Величина $\dot{R}/R$ определяет скорость относит. изменения линейных масштабов в системе отсчёта, она обозначается $\dot{R}/R \equiv H$ и наз. постоянной Хаббла (поскольку H зависит от времени, её правильнее называть параметром Хаббла). Ур-ния (3), (4) определяют зависимость R от t и из них следует выражение

$$\dot{\rho} + 3\frac{\dot{R}}{R}\left(\rho + \frac{P}{c^2}\right) = 0. \qquad (5)$$

Ур-ние (3) описывает замедление темпа расширения Вселенной под действием тяготения. При этом учитывается, что в ОТО тяготение создаётся также и давлением вещества. Поскольку в однородной Вселенной нет градиентов давления, в ней нет и гидродинамич. сил, определяемых перепадом давления и могущих влиять на движение вещества. Давление проявляется только в гравитации. Для решения ур-ний (3), (4) надо знать зависимость между ρ и P (*уравнение состояния* вещества). На разных этапах эволюции Вселенной эта зависимость различна.

В совр. Вселенной космологич. постоянная Λ равна, по-видимому, нулю или очень мала, и ею в ур-ниях (3) и (4) можно пренебречь. Для случая $\Lambda=0$ и обычных для вещества ур-ний состояния $P=P(\rho)$ ф-ция $R(t)$ имеет вид, показанный на рисунке. График $R(t)$ всегда начинается с нуля (по определению $R(t)\geqslant 0$). Если $k\leqslant 0$, то при $t\to\infty$ ф-ция $R(t)$ неограниченно возрастает. Если же $k>0$, то возрастание $R(t)$ в определ. момент сменяется уменьшением и, в конце концов, $R(t)$ вновь обращается в нуль. Знак k определяется знаком разности $\rho - 3H^2/8\pi G$ [см. ур-ние (4) при $\Lambda=0$]. Величина $\rho_c \equiv 3H^2/8\pi G$ наз. *критической плотностью Вселенной*. Если $\rho<\rho_c$, то $k<0$ и $R(t)$ неограниченно нарастает, что означает неогранич. расширение системы отсчёта и вещества. В этом случае силы тяготения слишком слабы, чтобы затормозить и остановить расширение Вселенной. При этом плотность ρ меняется от $\rho=\infty$ при $t=0$ до $\rho\to 0$ при $t\to\infty$. Если $\rho>\rho_c$, то $k>0$, силы тяготения достаточно велики и расширение Вселенной через нек-рое время должно смениться сжатием. Плотность ρ сначала падает от бесконечно большого (при $t=0$) до нек-рого мин. значения; затем снова возрастает до бесконечности. Состояния с $\rho=\infty$, $R=0$ получили назв. сингулярностей. Случай $k=0$ является промежуточным, при этом значении k расширение происходит



Зависимость $R=R(t)$ для однородной изотропной Вселенной с $\Lambda=0$. При $\rho>\rho_c$ расширение Вселенной сменяется сжатием, при $\rho\leqslant\rho_c$ Вселенная неограниченно расширяется; t_0 — современная Вселенная.

неограниченно (рис.). Знак разности $\rho-\rho_c$ неизменен в ходе эволюции модели, хотя ρ и ρ_c меняются со временем. (О моделях с $\Lambda\neq 0$ см. в ст. *Космологические модели*.) Пространства космологич. моделей в зависимости от значения k имеют разл. геом. свойства.

При $k=0$ пространство евклидово, его объём бесконечен в любой момент времени. При $k<0$ пространство обладает постоянной отрицат. кривизной, геометрия его неевклидова и оно также имеет бесконечный объём. Модели, в к-рых пространства бесконечны, наз. открытыми. Если же $k>0$, то в такой модели пространство имеет постоянную положит. кривизну, оно не ограничено, но имеет конечный объём $V=2\pi^2R^3(t)$. Такие модели наз. закрытыми или замкнутыми.

Здесь рассмотрены только пространства с простейшими топологич. свойствами. В принципе топология может быть более сложной, она не определяется полностью ур-ниями ОТО и должна задаваться дополнительно.

Ур-ния для $R(t)$ — дифференц. ур-ния второго порядка, поэтому, чтобы найти ф-цию $R(t)$ и определить т. о. космологич. модель, необходимо при нек-ром t знать (задать) значения двух констант (в случае $\Lambda=0$). Напр., для сегодняшнего момента $t=t_0$ задать значение плотности $\rho(t_0)\equiv\rho_0$ и постоянной Хаббла $H(t_0)\equiv H_0$. Обычно вместо ρ_0 используют безразмерную величину $\Omega=\rho_0/\rho_c$. Для определения модели, соответствующей реальной Вселенной, эти величины (параметры модели) надо найти из наблюдений.

3. Наблюдательная космология

Определение значений H_0 и ρ_0 является одной из осн. задач наблюдательной К. начиная с её зарождения в кон. 20-х гг. 20 в. В однородной нестационарной (расширяющейся) Вселенной все объекты, слабо связанные силами тяготения (галактики и особенно скопления галактик), должны удаляться друг от друга со скоростью, пропорциональной расстоянию между ними. В 1929 Э. Хаббл установил, что далёкие галактики удаляются от нашей Галактики со скоростями v, пропорциональными расстоянию l:

$$v = H_0 l. \qquad (6)$$

Сложность определения H_0 из астр. наблюдений связана гл. обр. с трудностями измерения больших расстояний. Скорость удаления галактик измерить го-