

# Физика космоса

кружок

Занятие 6

Тепловая эволюция.

Согласно первому закону термодинамики

$$dE = -pdV$$

Уравнение эквивалентности массы и энергии

$$E = Mc^2$$

$$E = (\rho_m + \rho_r)Vc^2 = \rho Vc^2$$

Тогда

$$\frac{d}{dt}(\rho R^3) + \frac{p}{c^2} \frac{d}{dt}(R^3) = 0$$

Вселенная, содержащая только вещество

$$\frac{d}{dt}(\rho_m R^3) = 0$$

$$\rho_m \propto R^{-3}$$

$$\frac{d}{dt}(\rho R^3) + \frac{p}{c^2} \frac{d}{dt}(R^3) = 0$$

Вселенная, содержащая только излучения

$$p_r = \rho_r c^2 / 3$$

$$\frac{d}{dt}(\rho_r R^3) + \frac{1}{3} \rho_r \frac{d}{dt}(R^3) = 0$$

$$3\rho_r R^2 \dot{R} + \dot{\rho}_r R^3 + \rho_r R^2 \dot{R} = 0$$

$$\frac{d}{dt}(\rho_r R^4) = 0$$

$$\rho_r = \rho_{r,0} (R(t)/R_0)^{-4}$$

Вселенная с излучением и веществом.

$$\frac{d}{dt}(\rho R^3) + \frac{p}{c^2} \frac{d}{dt}(R^3) = 0$$

Если пренебречь вкладом в общее давление нерелятивистского вещества

$$\frac{d}{dt}(\rho_m R^3) + \frac{1}{R} \frac{d}{dt}(\rho_r R^4) = 0$$

Если допустить полное сохранение вещества (допустить отсутствие превращения вещества в излучение, то)

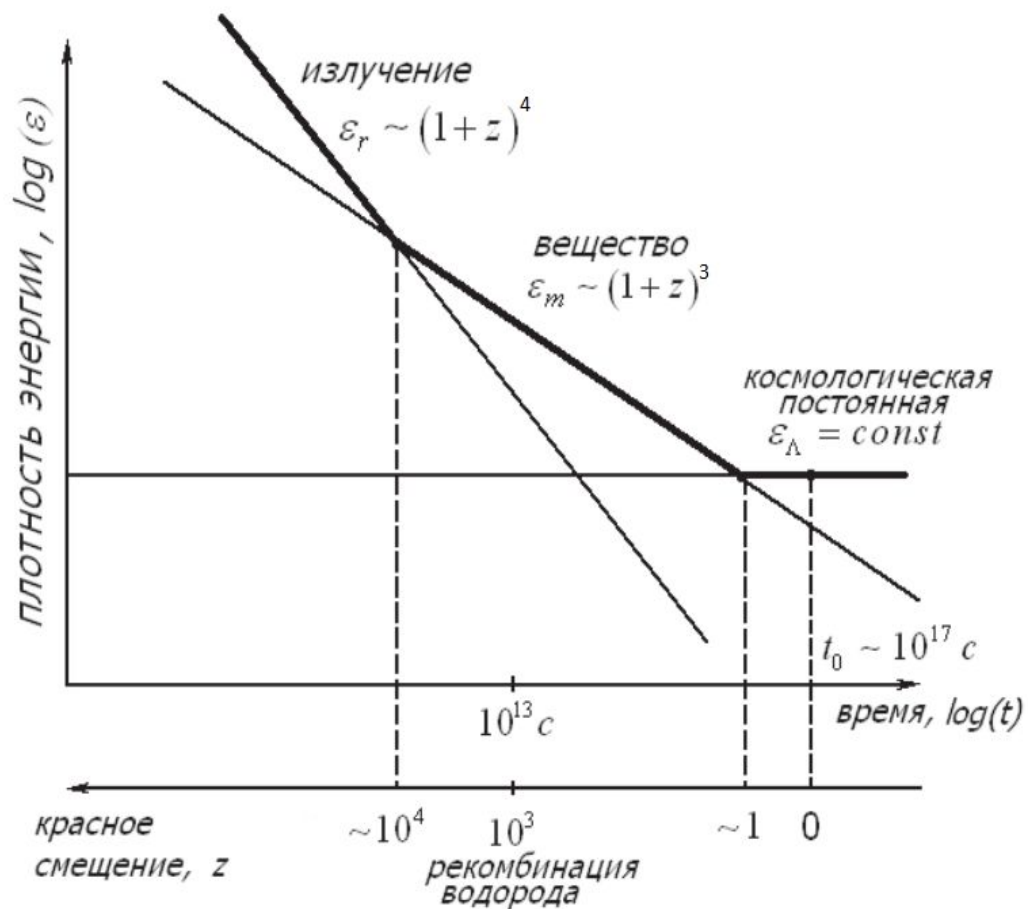
$$\frac{d}{dt}(\rho_m R^3) = 0 \quad \frac{d}{dt}(\rho_r R^4) = 0$$

$$\rho_m = \rho_{m,0} (R/R_0)^{-3} \quad \rho_r = \rho_{r,0} (R/R_0)^{-4}$$

Т.е. в прошлом была эпоха, когда доминировало излучение

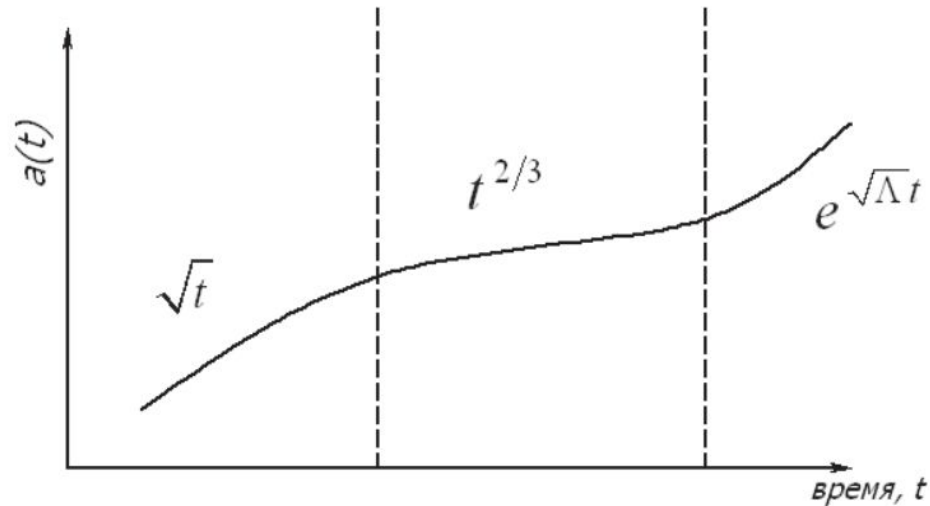
$$R_{crit} = \frac{\rho_{r,0}}{\rho_{m,0}} R_0$$

# Тепловая эволюция



Изменение плотности энергии различных компонентов Вселенной со временем, отсчитываемым от начала расширения.

# Тепловая эволюция



Расширение шкалы времени во время радиационно-доминированной эпохи

$$t_{exp} \approx (G\rho)^{-1/2} \propto a^2$$

Расширение шкалы времени во время пылевой стадии происходит медленнее

$$t_{exp} \propto a^{3/2}$$

- Если предположить, что в самой ранней Вселенной существует тепловое равновесие между фотонами и частицами (лептонами, барионами, тёмной материей), то с ростом размеров Вселенной их температуры будут значительно различаться как только какая-то компонента выходит из теплового равновесия.
- По этой причине говорить о температуре Вселенной не имеет смысла. Каждая компонента имеет свою температуру.