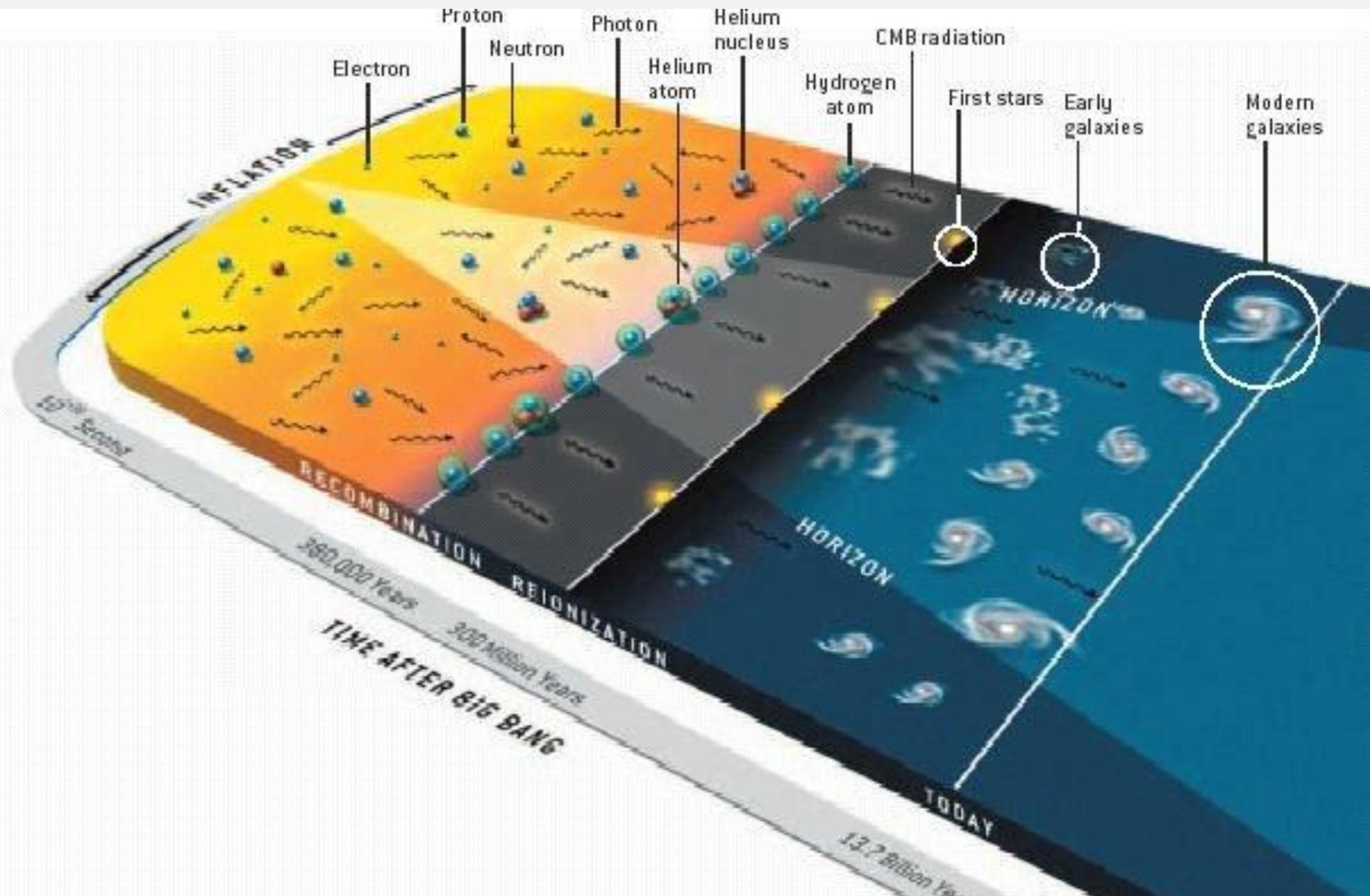
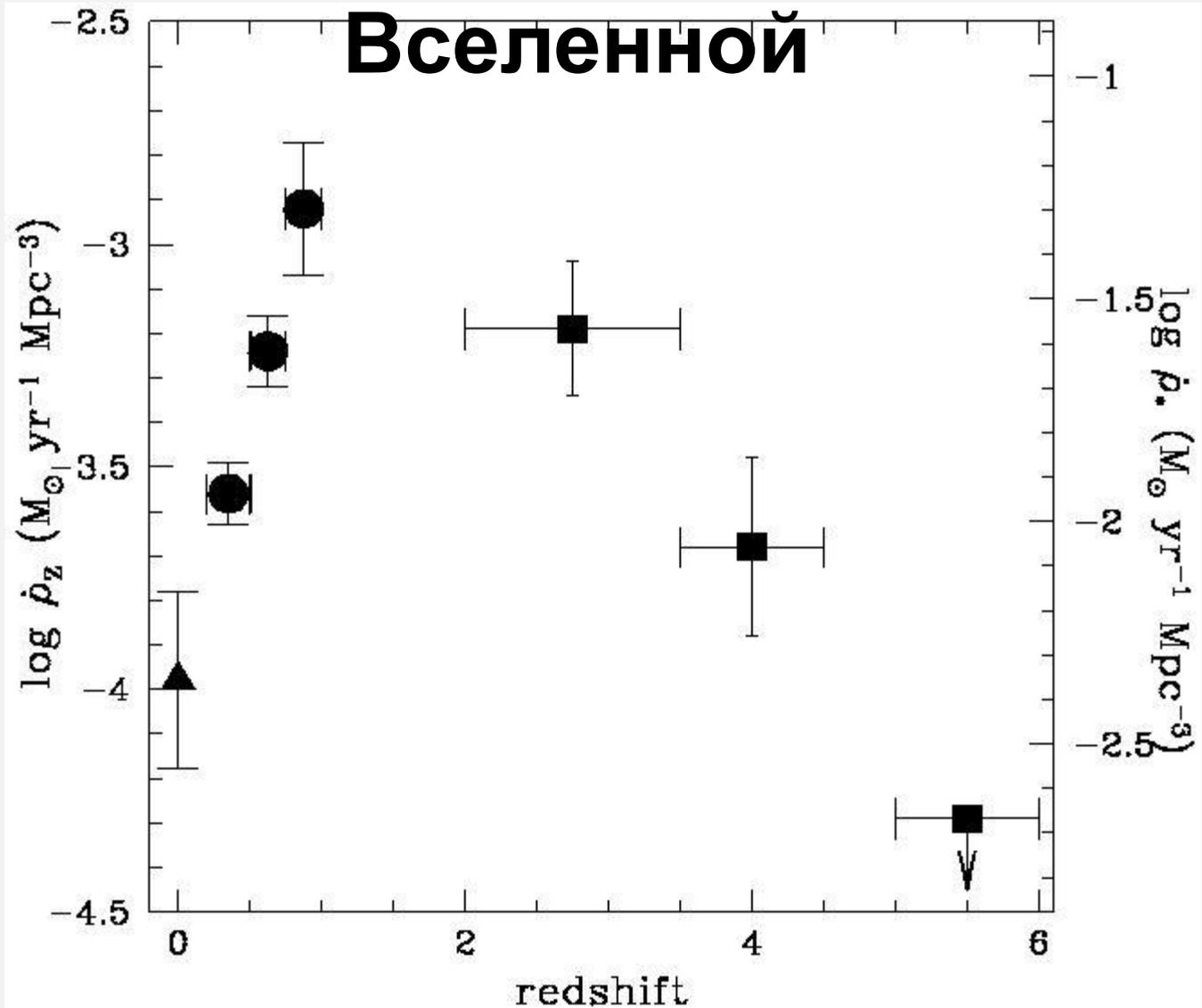


Строение и эволюция звезд I



История звздообразования во Вселенной





Формирование звезд из пыли

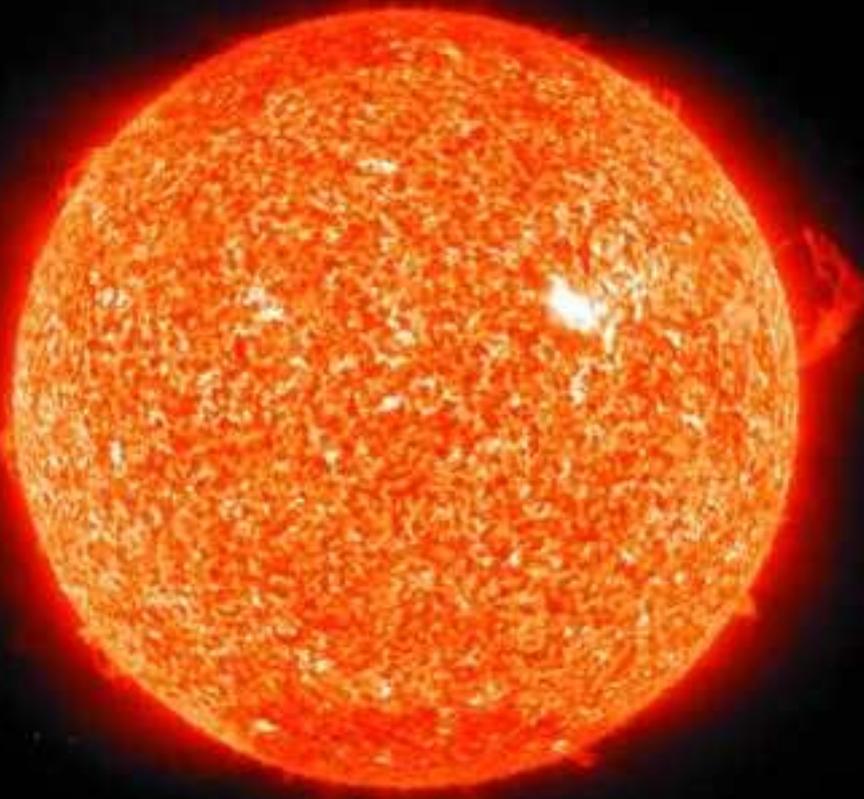
Неустойчивость Джинса

$$t_{ff} \sim \frac{R}{v_{ff}} \sim \frac{R}{\sqrt{GM/R}} \sim \frac{1}{\sqrt{G\rho}}$$

При массе больше некоторой вещество
сколлапсирует

$t_s \sim \frac{R}{c_s} \sim \frac{R}{\sqrt{3kT/2m_p}}$ быстрее, чем тепловое давление помешает это
сделать

$$M_J = \frac{\pi}{6} \frac{c_s^3}{G^{3/2} \rho^{1/2}} \sim 3M_{Sun} \left(\frac{c_s}{0.2 \text{ км/сек}} \right)^3 \left(\frac{n}{10^3 \text{ см}^{-3}} \right)^{-1/2}$$



Светимость

Солнца

2×10^{33} эрг/сек

Масса

Солнца

$\sim 2 \times 10^{33}$

грамм

Размер

Солнца

7×10^{10} см

Источник энергии –

сжатие?
Время Кельвина-

Гельмгольца
Время, за которое излучится
гравитационная энергия
Солнца

$$E \sim \frac{GM^2}{R}$$

$$t_{KH} = \frac{GM^2}{LR} = 30 \text{ млн. лет}$$

**Возраст Земли миллиарды лет
(>700 млн.лет уже в 1904 г.,
Резерфорд)**

Уравнения

гидростатического

равновесия

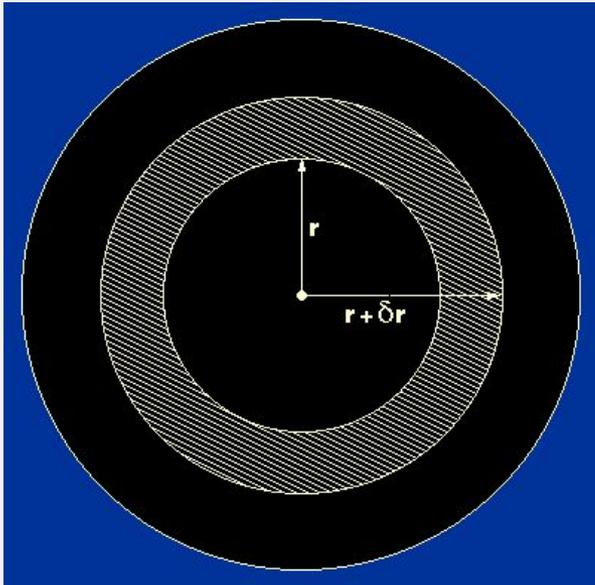
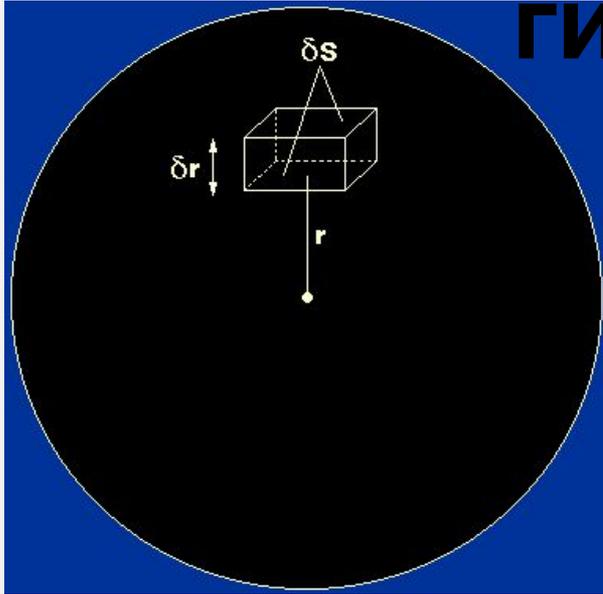
$$\frac{dP}{dx} = F$$

$$\frac{dP(r)}{dr} = -\frac{GM(r)\rho(r)}{r^2}$$

$$\delta V = 4\pi r^2 \delta r$$

$$\Rightarrow \delta M = \delta V \rho(r) = 4\pi r^2 \delta r \rho(r)$$

$$\Rightarrow \frac{dM(r)}{dr} = 4\pi r^2 \rho(r)$$



Минимальное давление в центре Солнца

$$\frac{dP(r)}{dr} = -\frac{GM(r)\rho(r)}{r^2}$$

$$\frac{dM(r)}{dr} = 4\pi r^2 \rho(r)$$

Поделим эти два уравнения:

$$\frac{dP(r)}{dr} / \frac{dM(r)}{dr} \equiv \frac{dP}{dM} = -\frac{GM}{4\pi r^4}$$

Интегрирование дает

$$P_c - P_s = \int_0^{M_s} \frac{GM}{4\pi r^4} dM$$

Используя верхний предел на радиус (размер Солнца):

$$\int_0^{M_s} \frac{GM}{4\pi r^4} dM > \int_0^{M_s} \frac{GM}{4\pi r_s^4} dM = \frac{GM_s^2}{8\pi r_s^4}$$

Давление в центре

Солнца

$$P_c > \frac{GM_s^2}{8\pi r_s^4}$$

$$P_{c\odot} > 4.5 \times 10^8 \text{ атмосфер}$$

Мин. температура в центре

Солнца

$$T_c > \frac{GM_s \mu m_p}{6kr_s} = 2.3 \cdot 10^6 \text{ K}$$

Теорема вириала для звезд

$$\frac{dP(r)}{dr} / \frac{dM(r)}{dr} \equiv \frac{dP}{dM} = -\frac{GM}{4\pi r^4}$$

$$4\pi r^3 dP = -\frac{GM}{r} dM$$

Интеграл по всей звезде:

$$3 \int_{P_c}^{P_s} V dP = - \int_0^{M_s} \frac{GM}{r} dM$$

Интегрируем по частям:

$$3[PV]_c^s - 3 \int_{V_c}^{V_s} P dV = - \int_0^{M_s} \frac{GM}{r} dM$$

$$P/\rho = U(\gamma - 1)$$

$$2U = -\Omega$$

Ω - гравитационная
энергия

Для
 $\Gamma=5.3$

Отрицательная теплоемкость

Полная

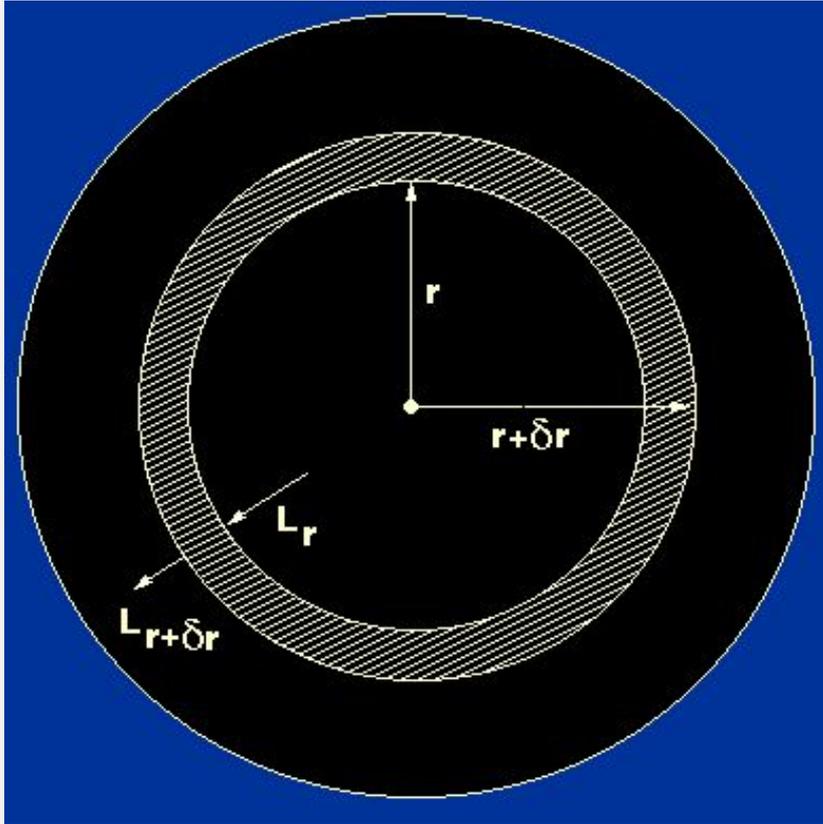
энергия

$$E = U + \Omega = -U, \Delta E = -\Delta U$$

Добавление энергии звезде
приводит к ее остыванию (и
наоборот)

Аналогичный эффект в любой
стационарной
системе в поле тяготения – *пример?*

Производство энергии



$$\delta V(r) = 4\pi r^2 \delta r$$

$$\delta m(r) = 4\pi r^2 \rho(r) \delta r$$

ε - производство энергии на единицу массы и объема

В слое

$$4\pi r^2 \rho(r) \delta r \varepsilon$$

$$\frac{dL(r)}{dr} = 4\pi r^2 \rho(r) \varepsilon$$

Термоядерные реакции и ...

Кулоновский барьер

$$U_c \sim \frac{z_1 z_2 e^2}{4\pi r} \sim 1 \text{ МэВ}$$

($r \sim 10^{-13}$ см) Температура в центре

Солнце

$$T_c \sim \frac{GM_s \mu m_p}{6kr_s} = 10^7 \text{ К} \sim 1 \text{ кэВ}$$

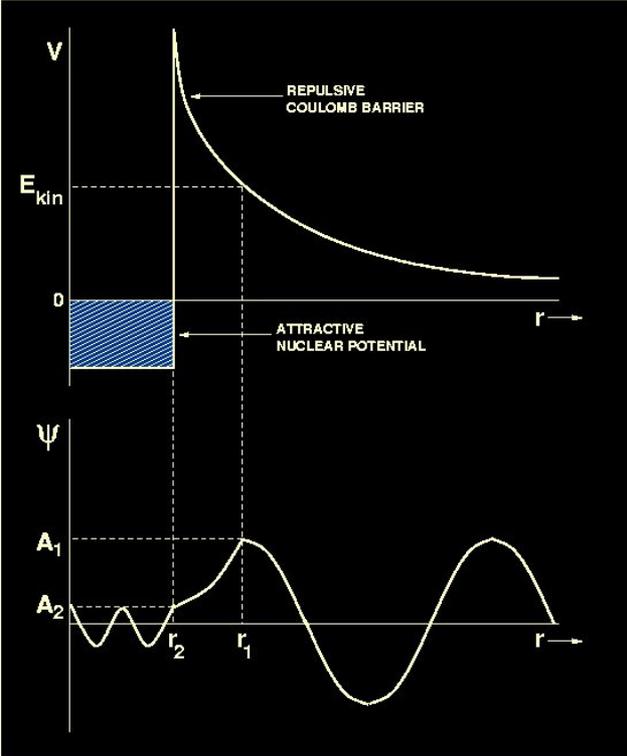
Максвелловское распределение

электронов

$$f(E)dE \sim 2 \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{1}{(kT)^{3/2}} e^{-E/kT} dE \quad E > U_c$$

$$e^{-(1 \text{ кэВ} / 1 \text{ МэВ})} \sim e^{-1000} \sim 10^{-430}$$

?



...
туннелирование

$$\Delta x \Delta p \sim \hbar, \Delta x \sim 10^{-13} \text{ см}$$

$$\Delta E = \frac{\Delta p^2}{2m_p} = \frac{\hbar^2}{2\Delta x^2 m_p} \sim 20 \text{ МэВ}$$

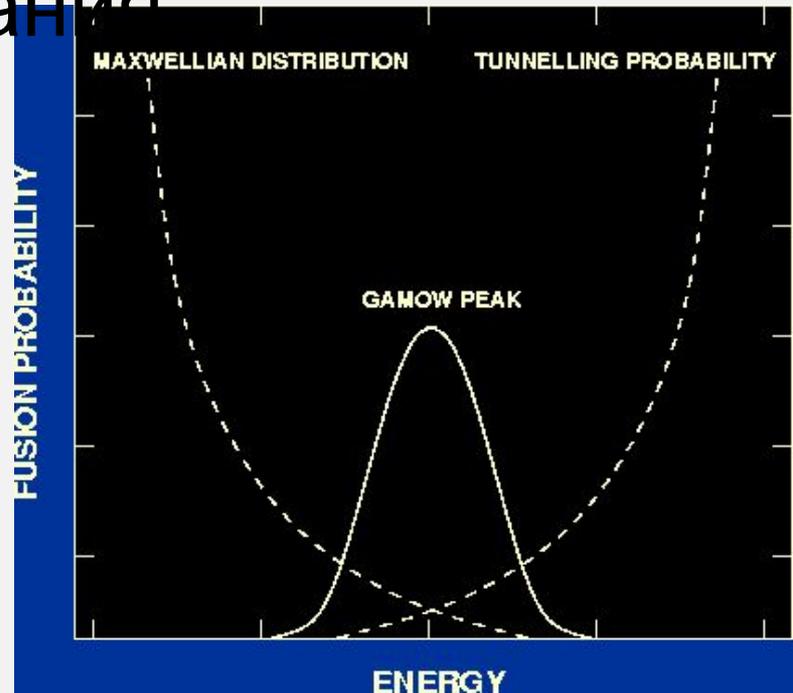
Вероятность
 туннелирования

$$P \sim e^{\frac{-e^2}{\hbar v}}$$

$$P(\text{реакции}) \propto e^{\frac{-e^2}{\hbar v}} e^{-\frac{mv^2}{2kT}}$$

Пик

Г



Перенос излучения,

Поток энергии при
рассеянии

$$dF = -\kappa\rho F dr$$

κ -

непрозрачность
Изменение импульса (изменение давления) при
рассеянии

$$dp = -\kappa\rho F dr / c$$

Давление чернотельного
излучения

$$\frac{dp}{dT} = \frac{4}{3} \sigma T^3 = \frac{dp}{dr} \frac{dr}{dT}$$

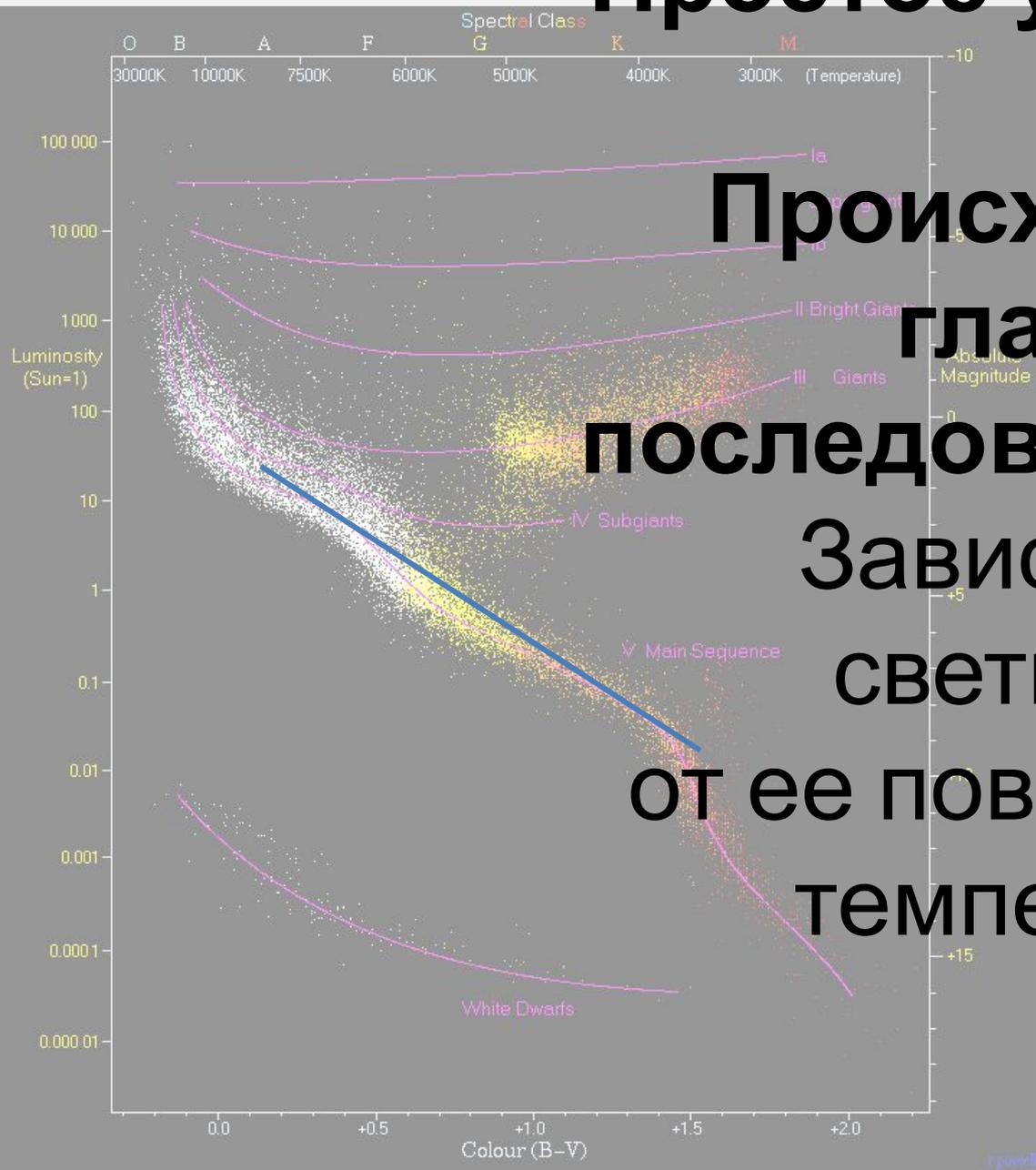
$$F = -\frac{4}{3} \frac{\sigma c T^3}{\kappa\rho} \frac{dT}{dr}$$

$$p = \sigma T^4 / 3$$

$$L = 4\pi R^2 F$$

Простое упражнение

Происхождение
главной
последовательности
Зависимость
светимости
от ее поверхностной
температуры



Предположим выделение
энергии

$$\varepsilon \sim \rho T^\alpha$$

и перенос излучения в виде

$$\kappa \sim \rho^\beta T^\gamma$$

$$L \sim \rho \varepsilon R^3 \sim \frac{M^2}{R^3} T^\alpha$$

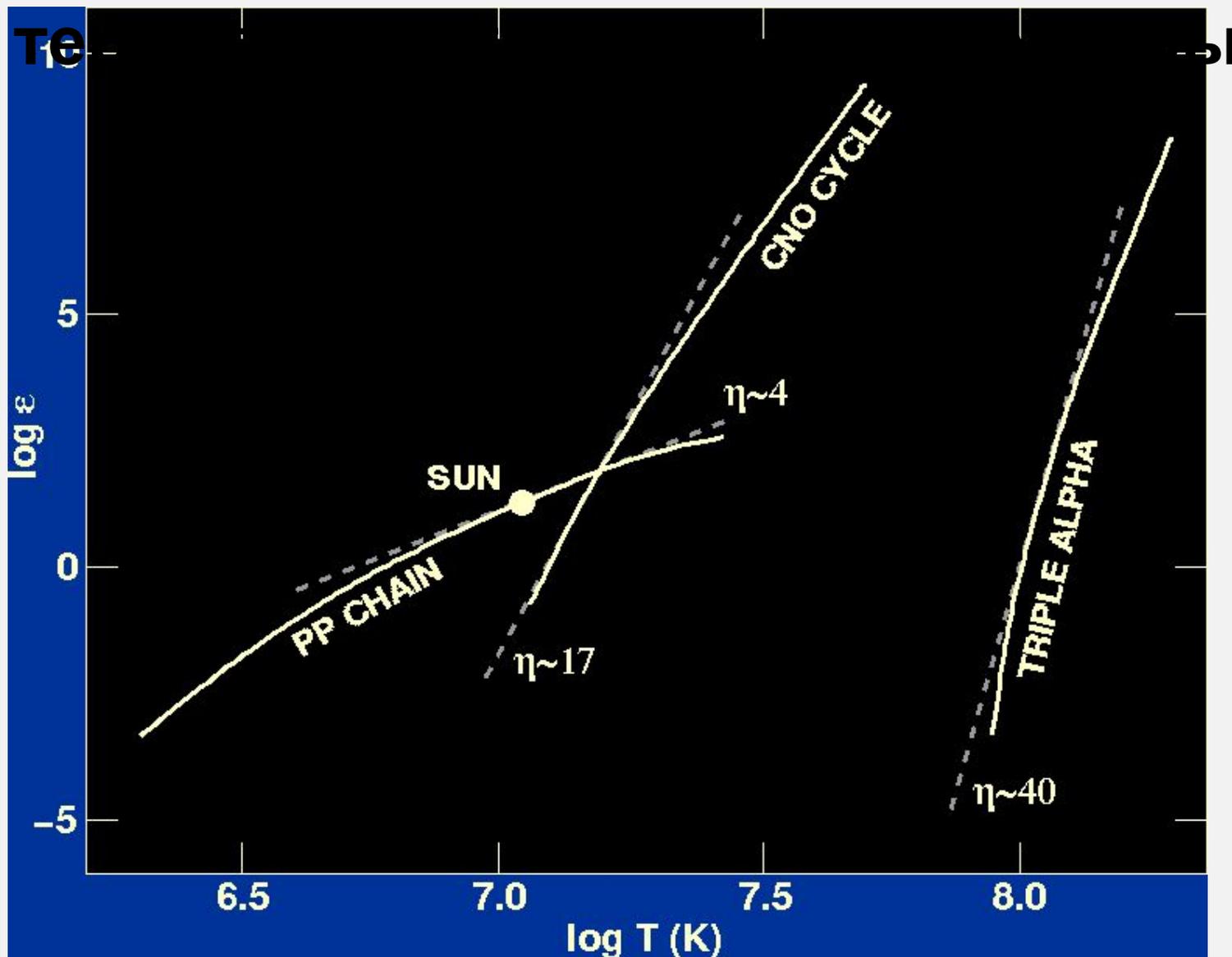
**производство
энергии**

$$L \sim \frac{RT^4}{\kappa \rho} \sim \frac{T^{4-\beta} R^{4+3\gamma}}{M^{1+\gamma}}$$

**перенос
излучения**

$$R \sim M^{-a}, a = \frac{1 - \alpha - \beta - \gamma}{3 + \alpha + \beta + 3\gamma}$$

Зависимости производства энергии при



Для

$$\alpha = 4$$

Солнца

$$\gamma = 1$$

$$R \sim M^{1/13}$$

$$T_c \sim M^{12/13}$$

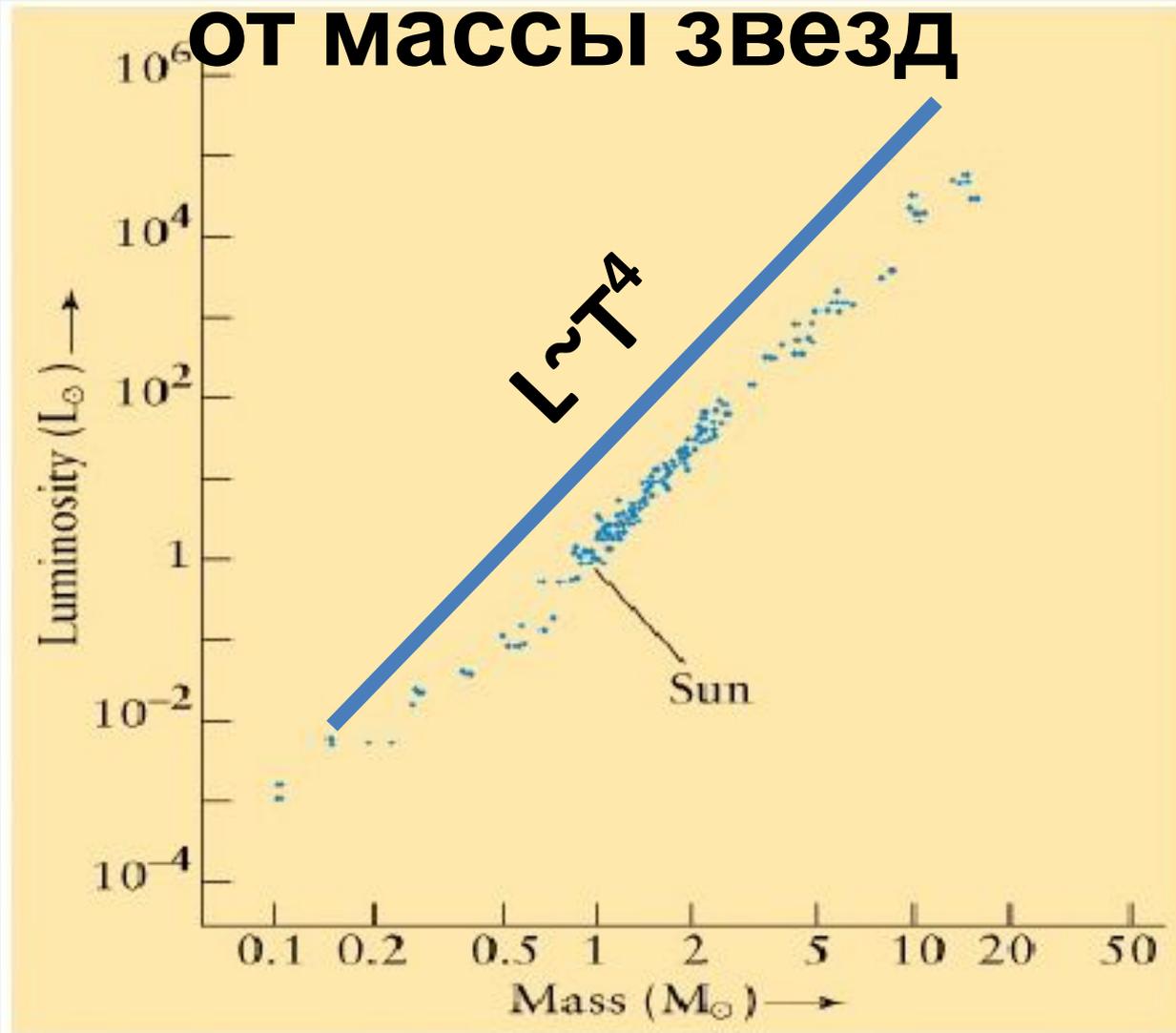
$$L \sim M^{71/13}$$

$$T_{\text{эфф}} \sim \left(\frac{L}{R^2} \right)^{1/4} \sim \left(M^{71/13} M^{-2/13} \right)^{1/4} \sim M^{69/52}$$

$$L \sim T_{\text{эфф}}^{284/69} \sim T_{\text{эфф}}^{4.1}$$

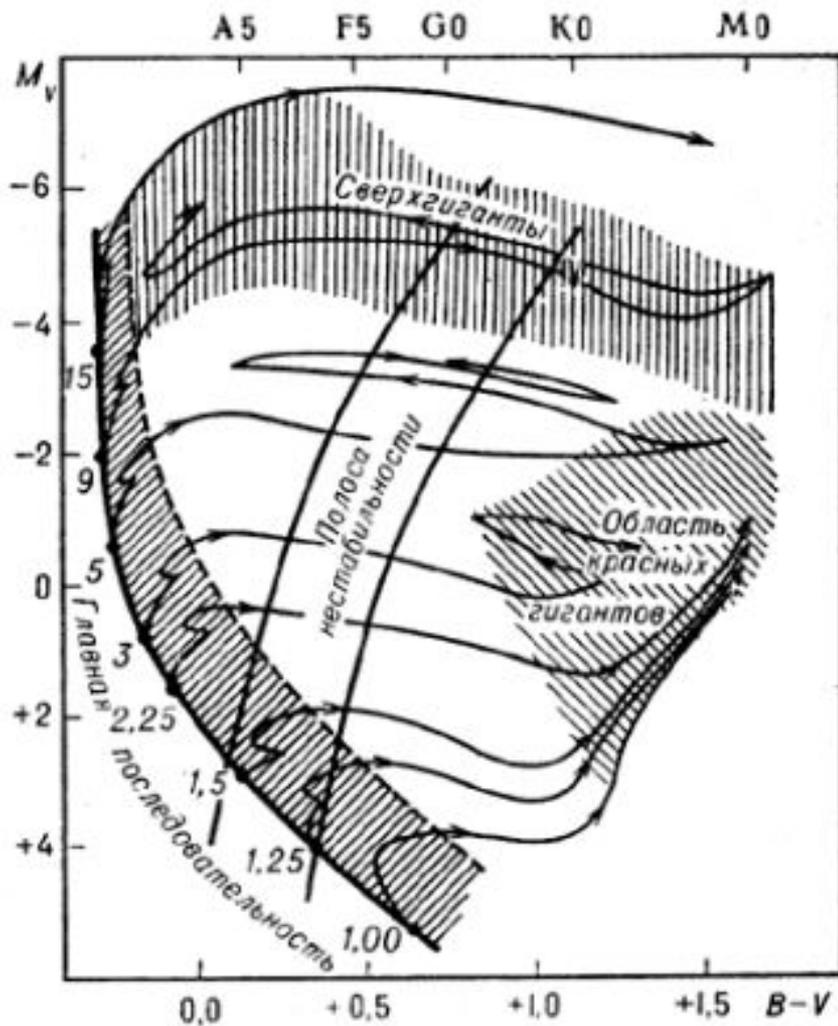
Зависимость СВЕТИМОСТИ

ОТ МАССЫ ЗВЕЗД



Переменные

Двойные переменные
звезды
звезды –
следующая лекция



Звезды
периодически
меняют свою
яркость,
Цефеиды, RR
Лиры...

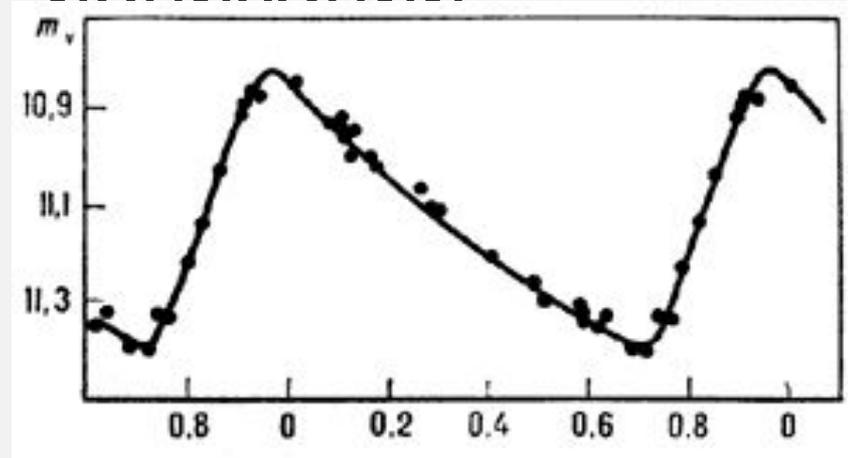
Цефеиды

ы

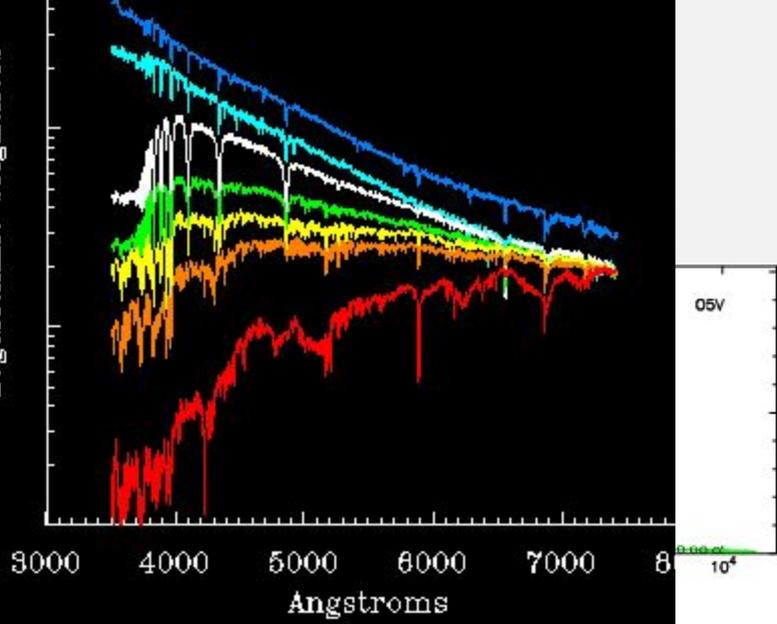
перенос излучения,
непрозрачность
слоев,
радиус-
температура

$$L \sim \frac{RT^4}{\kappa \rho}$$

вторичной
ионизации



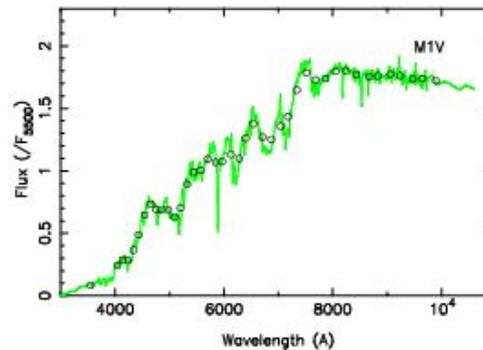
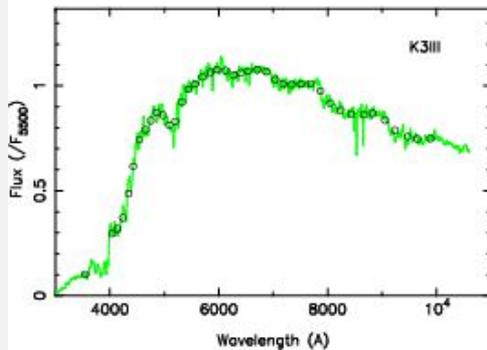
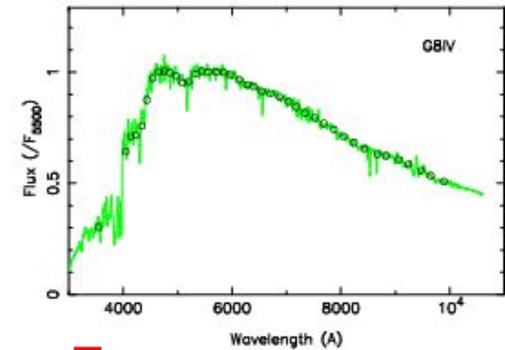
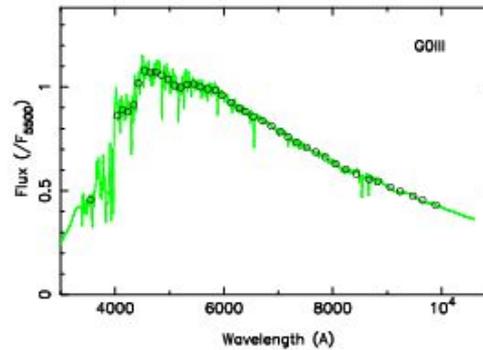
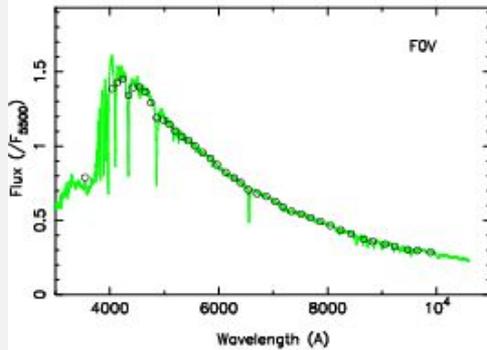
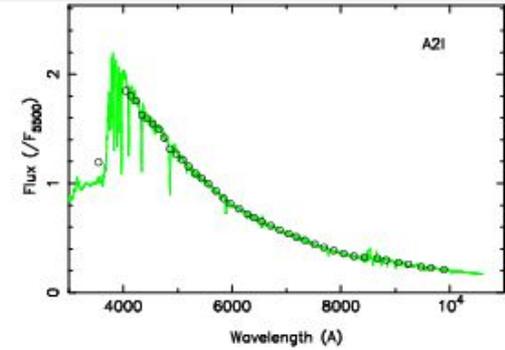
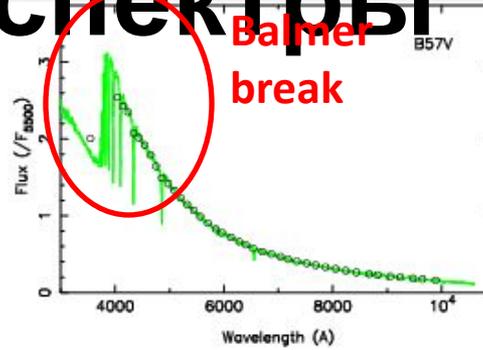
Logarithmic brightness



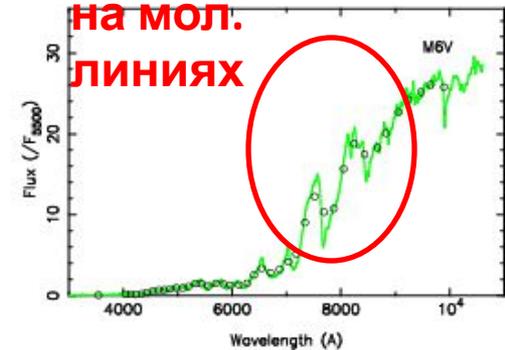
Звездные спектры

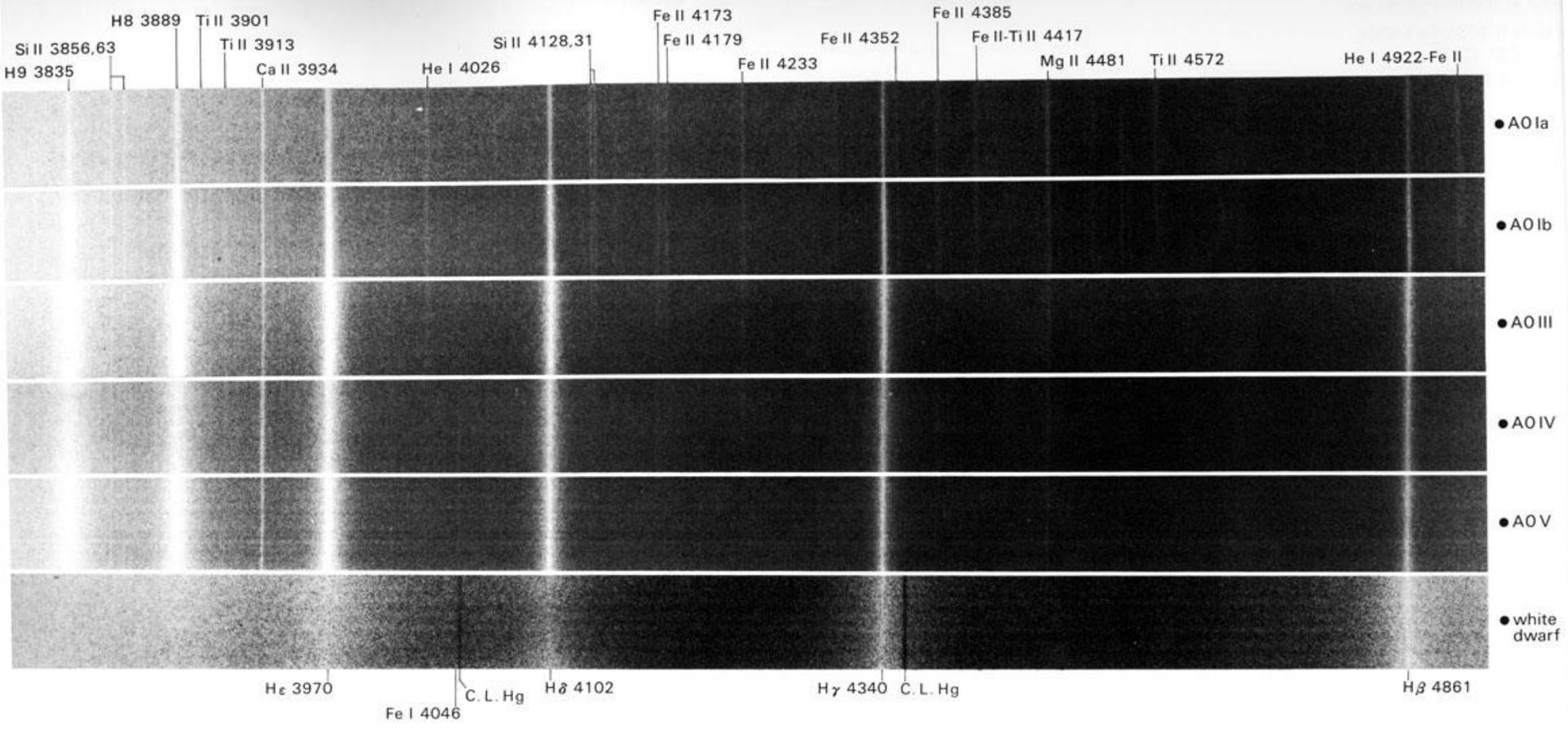
спектры

Balmer break



Поглощение на мол. линиях





Конвекция

Время выхода фотонов

из

области

$$t \sim \frac{R_{Sun}}{c} \times \frac{R_{Sun}}{\lambda}$$

энерговыведения

λ - длина
свободного
пробега фотонов

$$\lambda \sim \frac{1}{n\sigma}, \text{ где } \sigma - \text{сечение рассеяния}$$

Для $\lambda < 1 \text{ см}$

Солнца

$$t > 10^{10} \text{ лет}$$

Условие возникновения

конвекции

$$\rho + \delta\rho < \rho + \Delta\rho$$

$$\Delta\rho = \frac{d\rho}{dr} \Delta r (\text{наст.})$$

$$\frac{\delta P}{P} = \gamma \frac{\delta\rho}{\rho} (\text{адиаб.})$$

Приравниваем.

Получаем

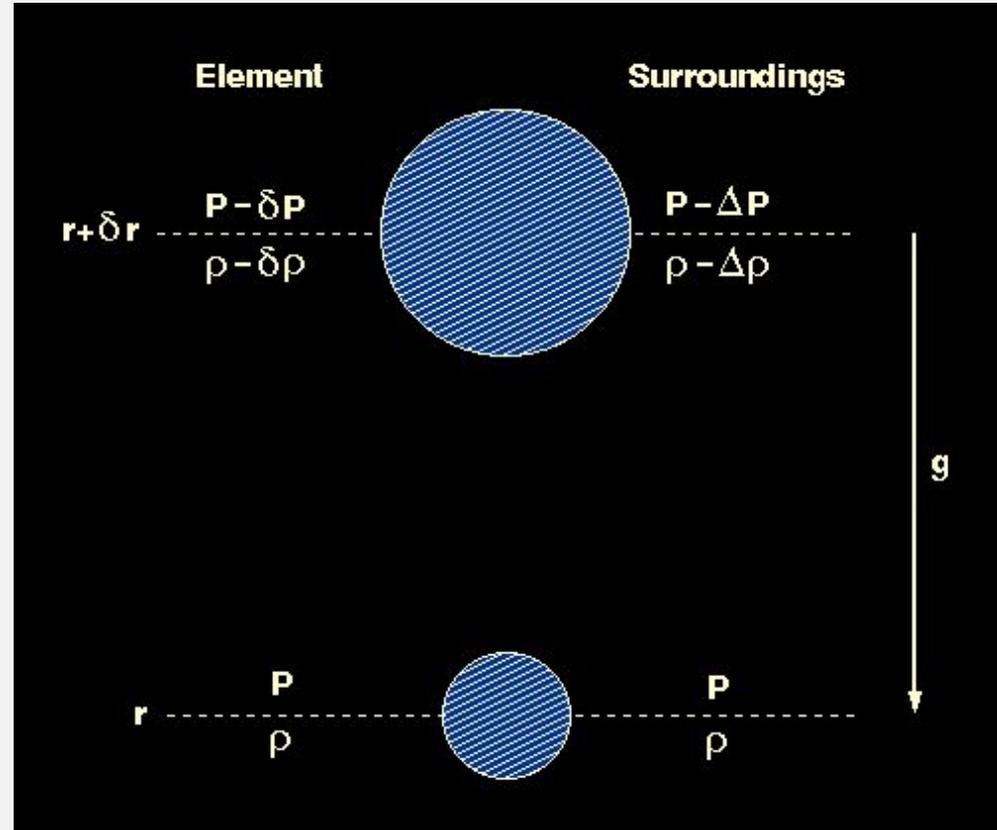
$$\left(\frac{P}{\rho}\right) \frac{dP}{d\rho} < \frac{1}{\gamma}$$

Для идеального газа:

$$\frac{dP}{P} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dT}{T}$$

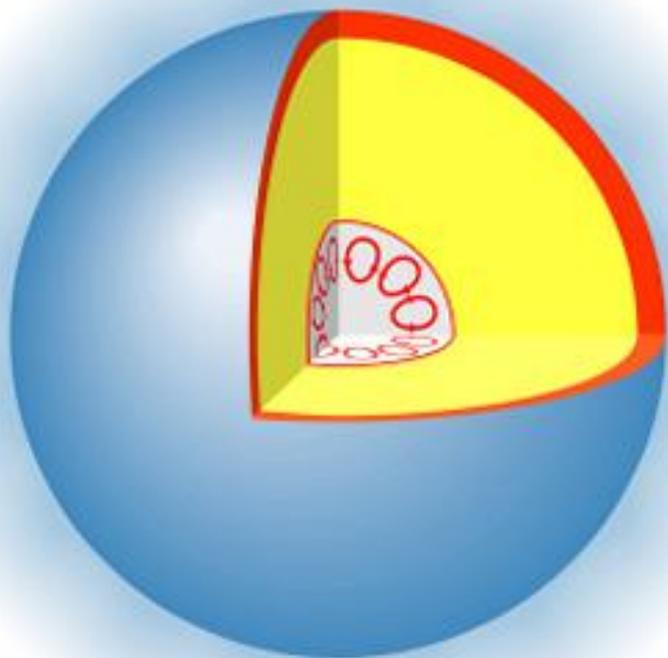
Условие возникновения конвекции

$$\frac{P}{T} \frac{dT}{dP} > \frac{\gamma - 1}{\gamma}$$

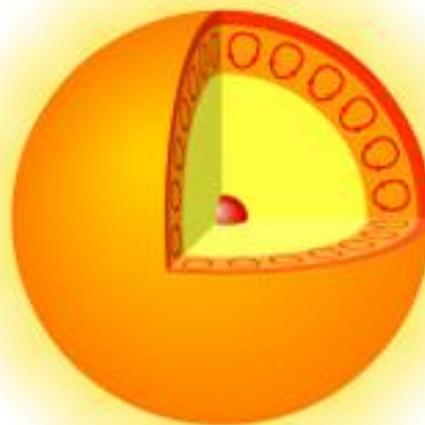


Внутренняя структура звезд. Конвективные и радиационные оболочки.

high-mass star



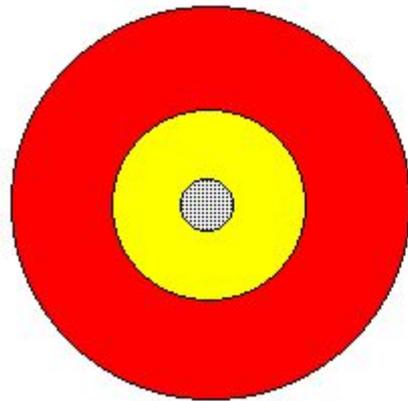
$1M_{\text{Sun}}$ star



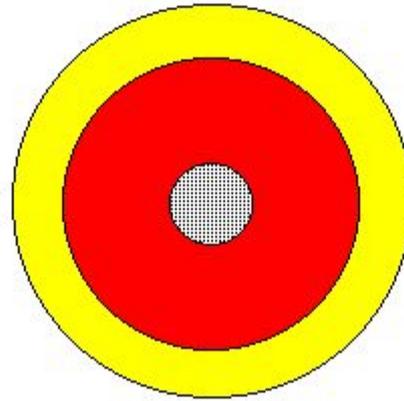
very low mass star



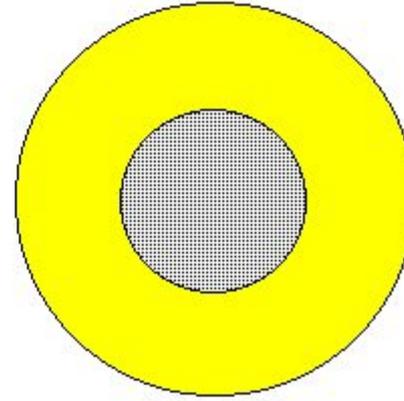
Internal Structure for Main Sequence Stars



O star
(60 solar masses)



G star
(1 solar mass)



M star
(0.1 solar masses)



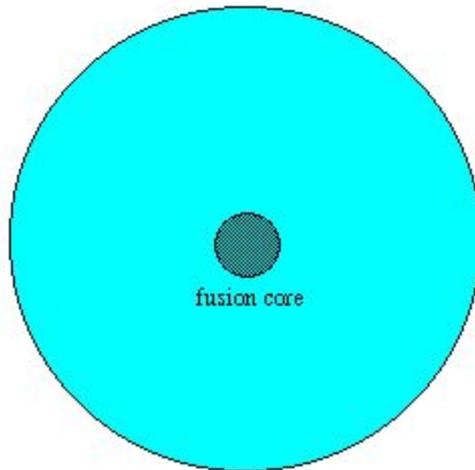
radiative zone



convective zone



nuclear burning region



O star (60 solar radii)

G star (1 solar radii)

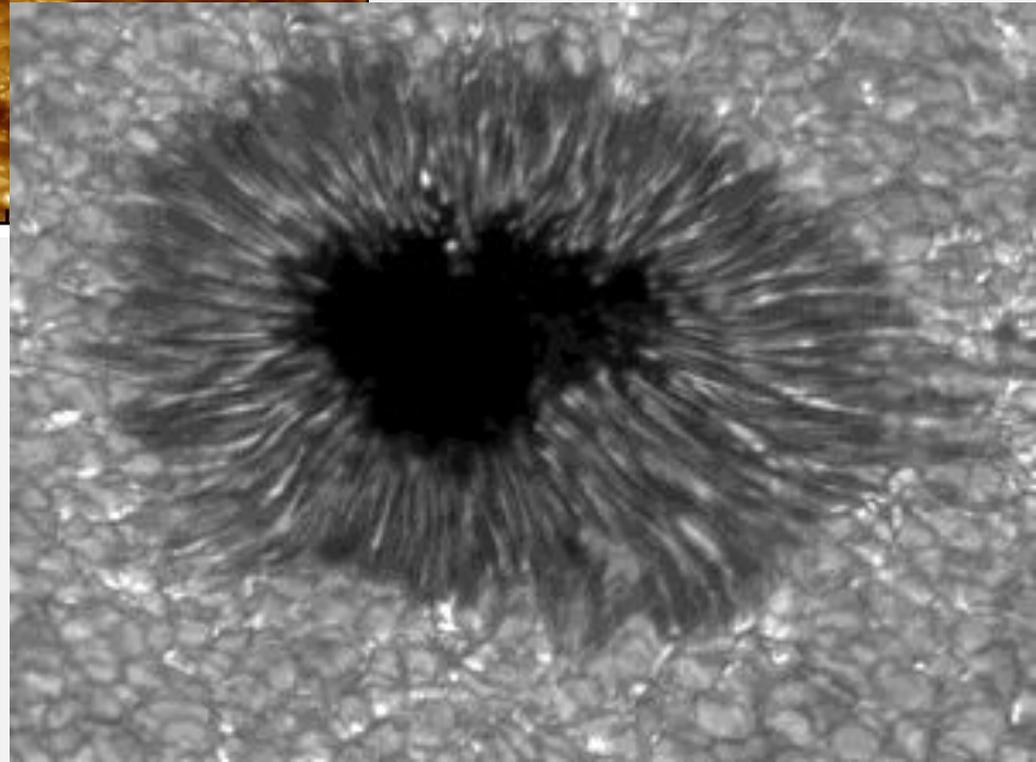
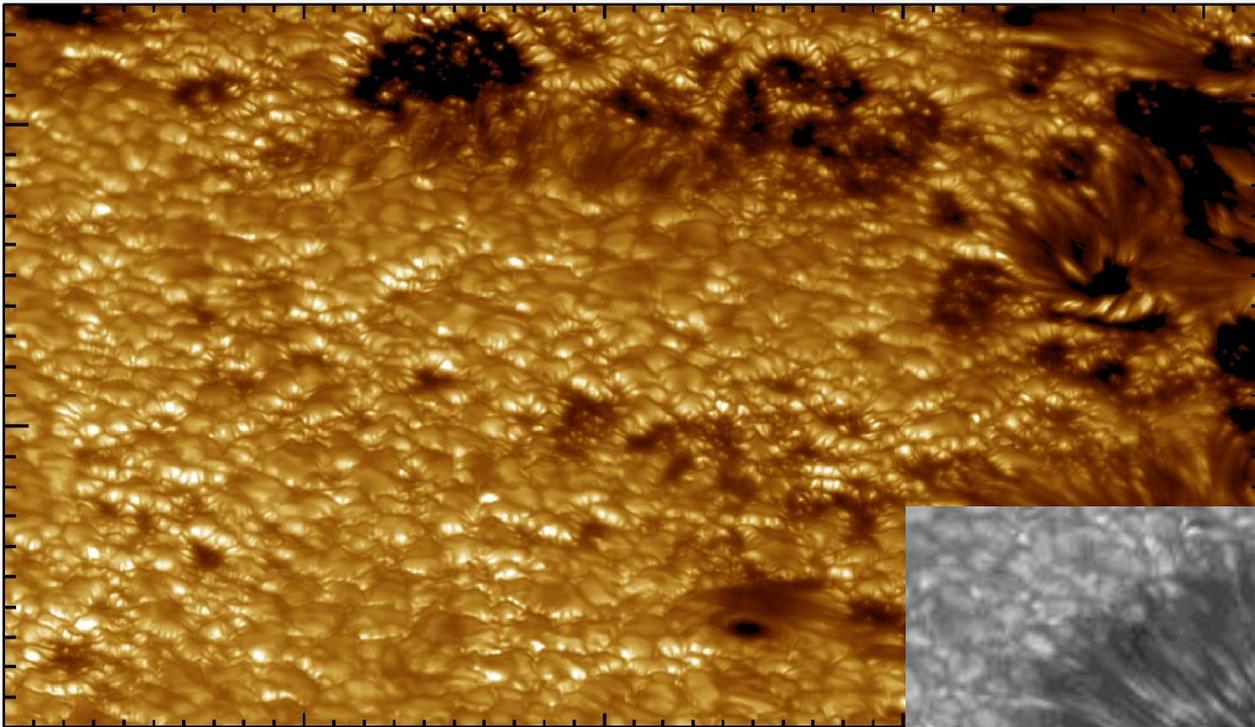


fusion core



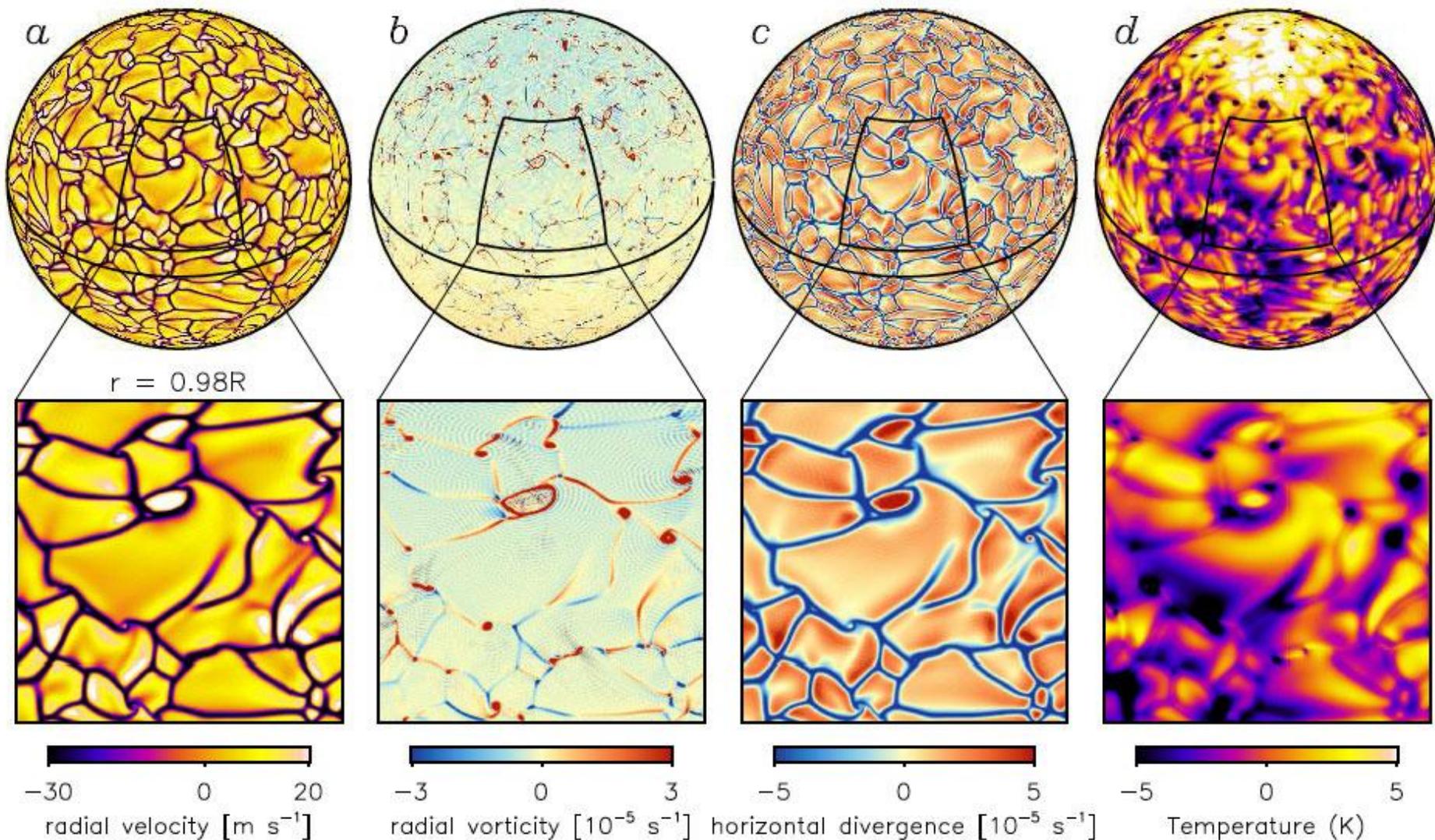
M star (0.4 solar radii)

Конвекция на поверхности Солнца

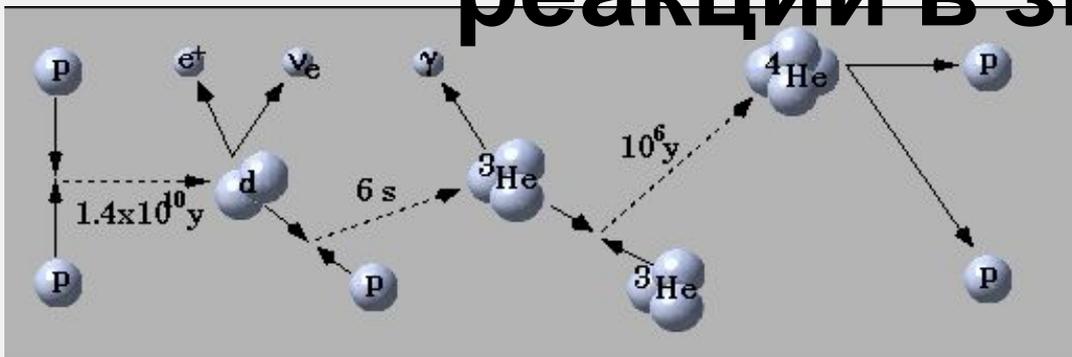


Разрешение изображения $\sim 100\text{км}$
Размеры гранул $\sim 1000\text{км}$

Конвекция на поверхности Солнца

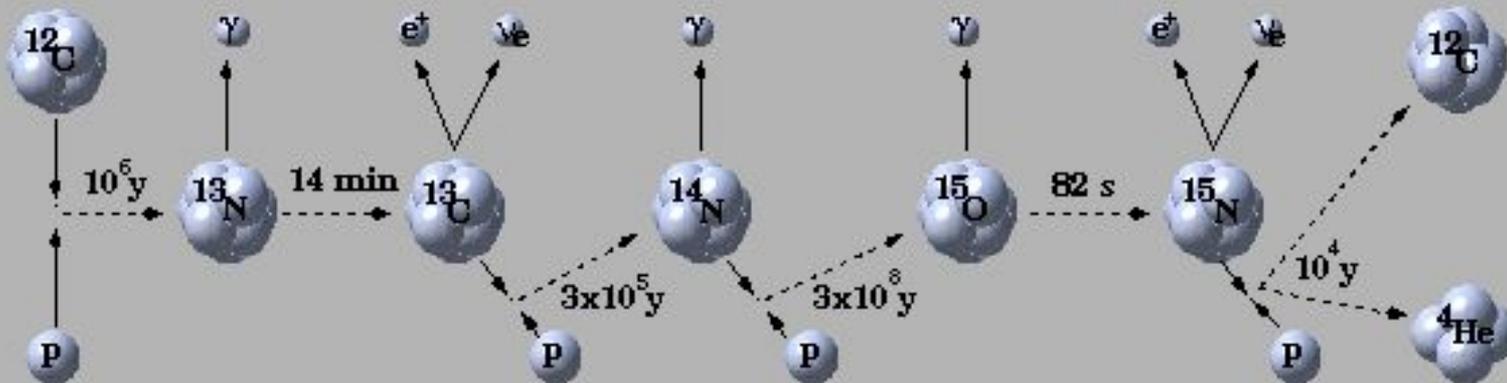


Основные типы термоядерных реакций в звездах

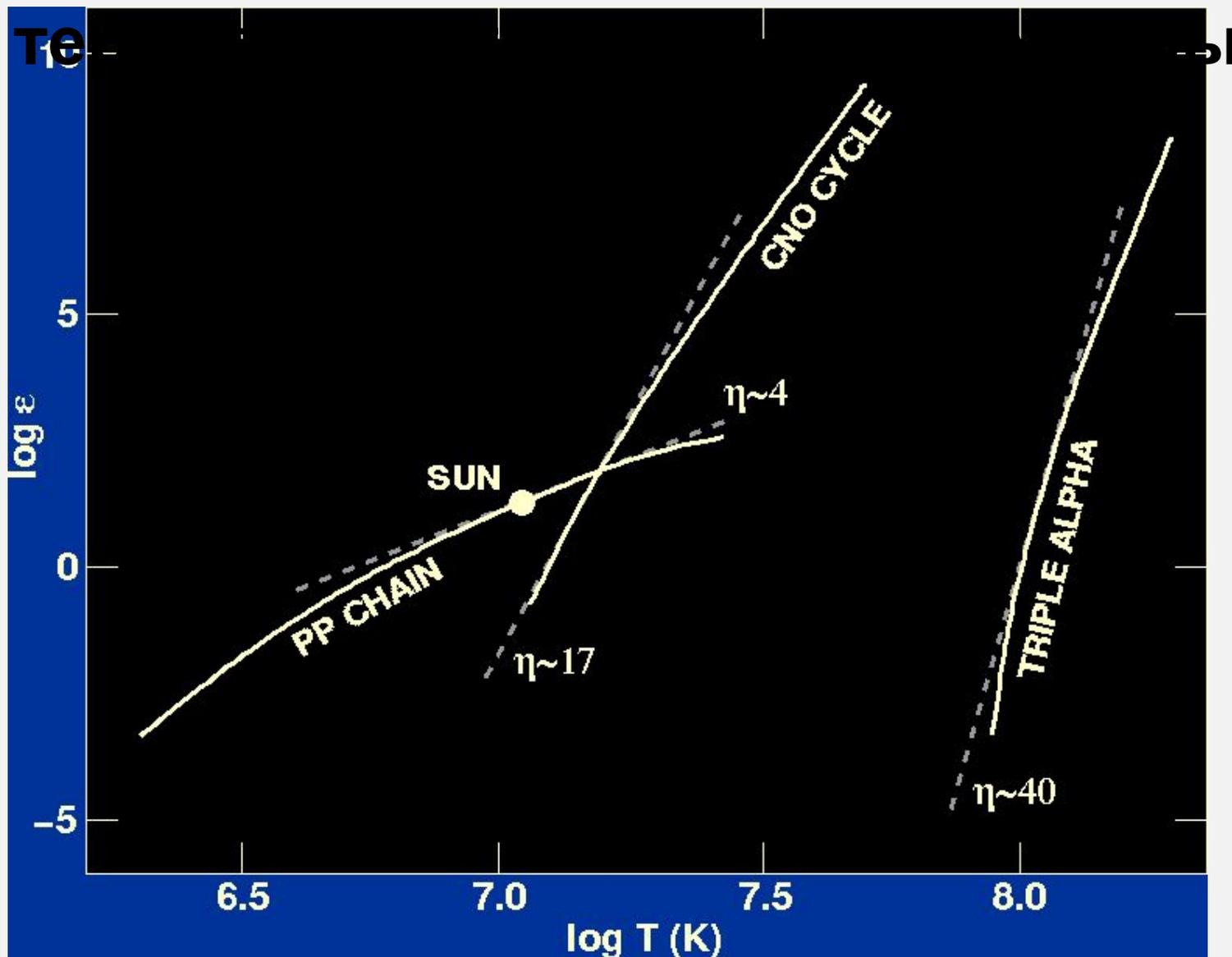


Цикл
p-p

Цикл
CNO



Зависимости производства энергии при



Время жизни звезд на главной

последовательности

*(потребление 10% массы
звезды)*

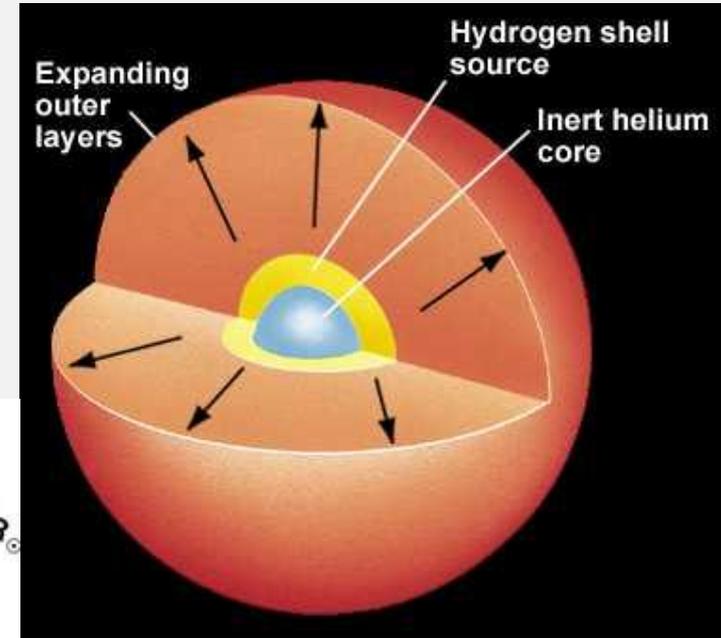
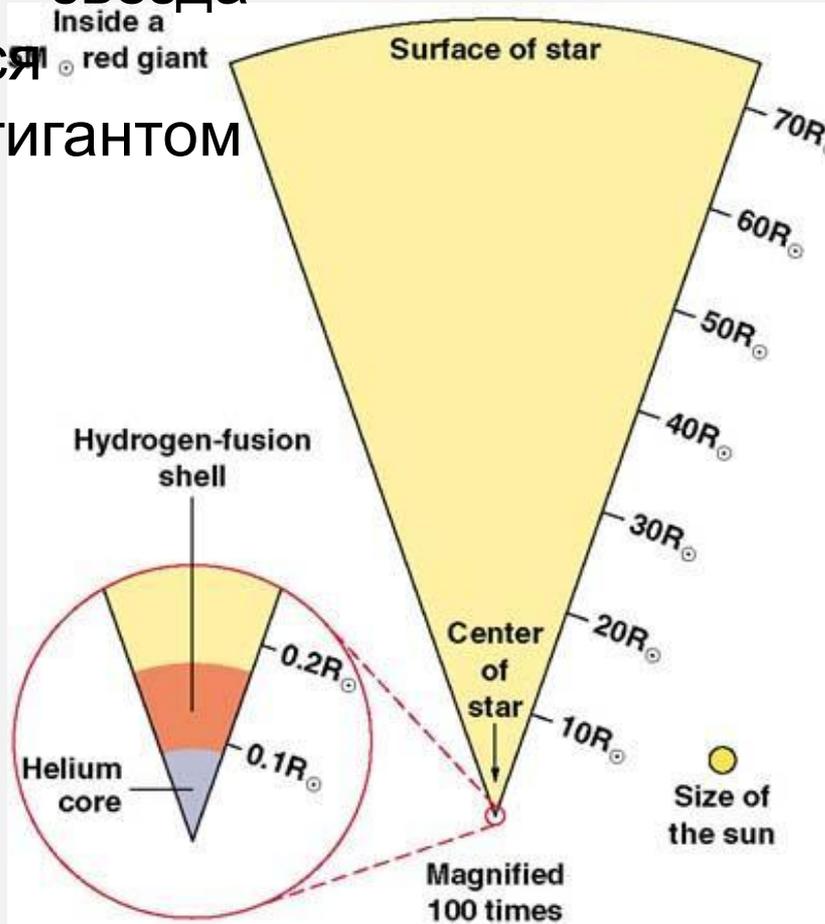
$$t(\text{ГП}) \sim \frac{E}{L} \sim \frac{0.007(0.1M)c^2}{L}$$

$$L \sim M^x$$

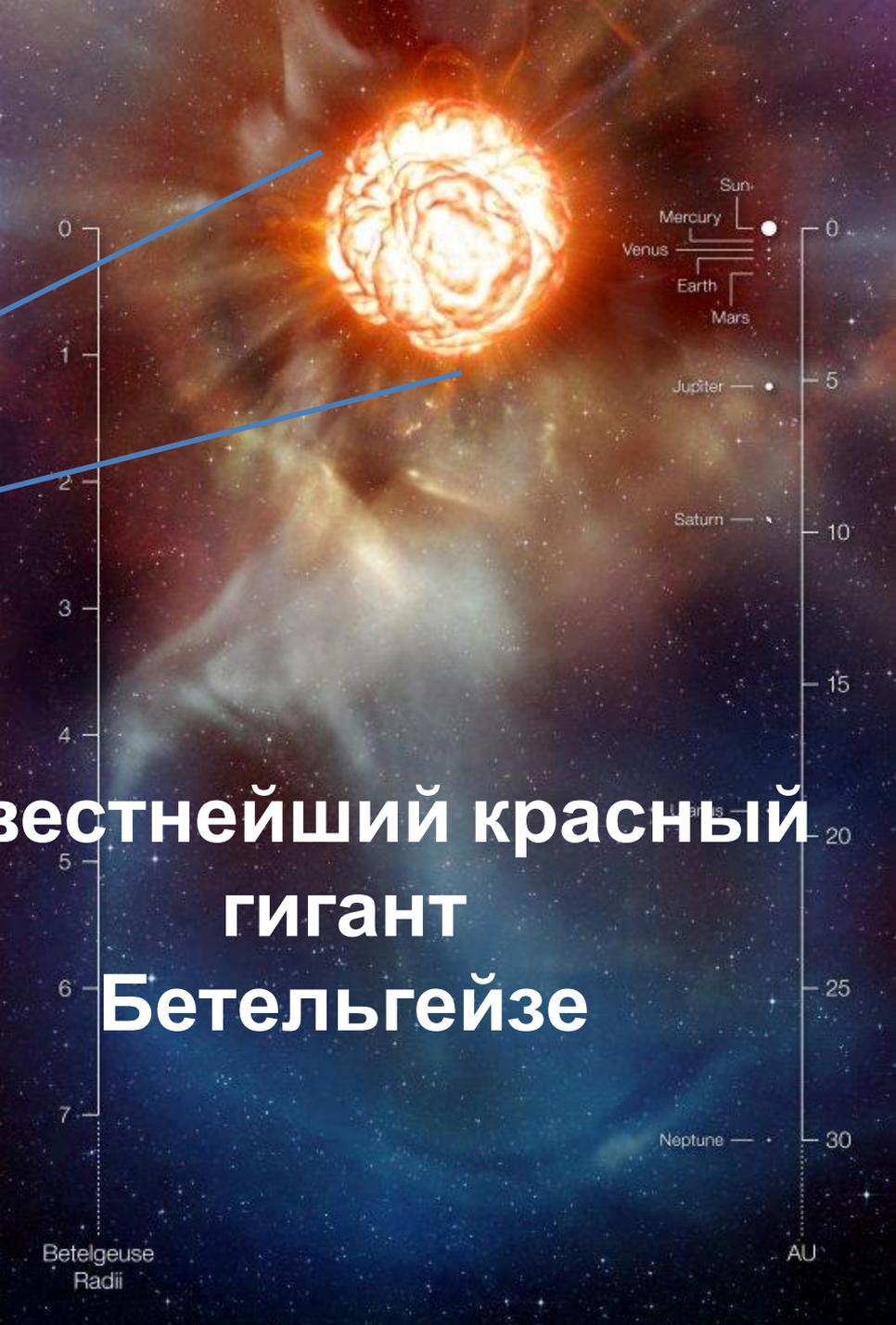
$$t \sim 10^{10} \left(\frac{M}{M_{\text{Sun}}} \right)^{-(x-1)} \text{ лет}$$

Фаза красных гигантов

После исчерпания топлива в центре звезды образуется инертное ядро и раздувается оболочка - звезда становится красным гигантом



Горение продолжается только в небольшом слое. Оболочка раздувается

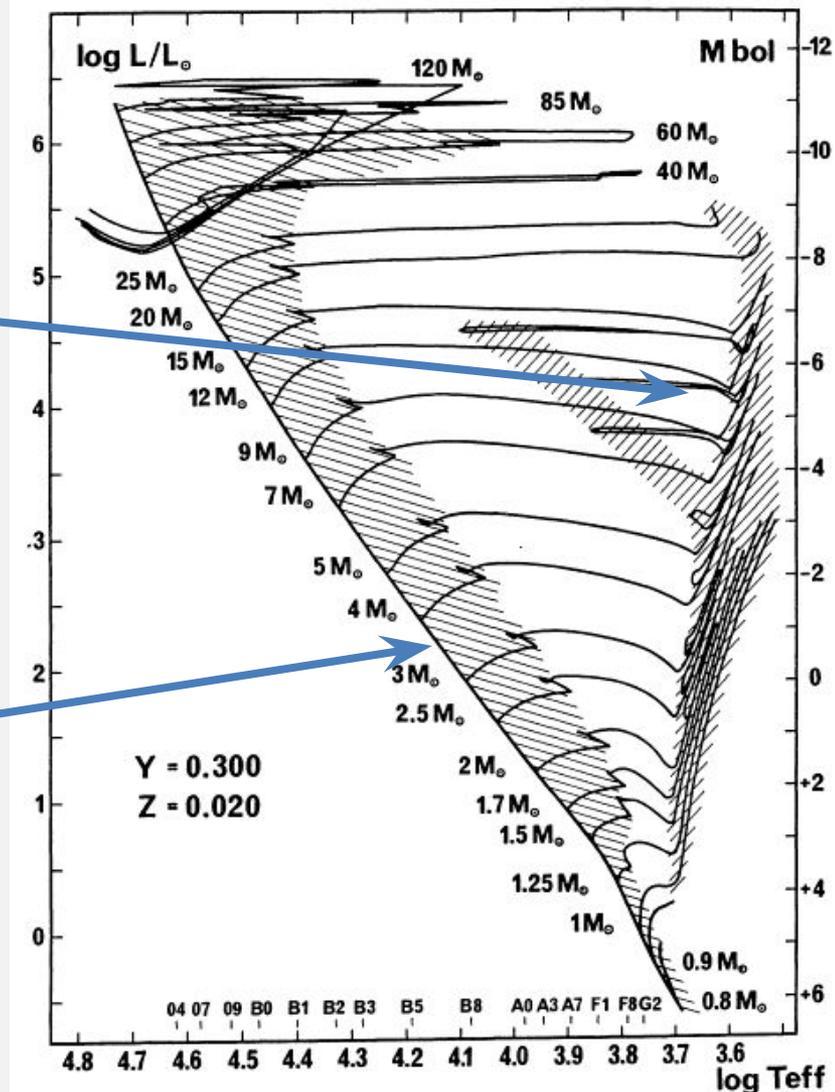


**Известнейший красный
гигант
Бетельгейзе**

Типичные расчеты звездной эволюции

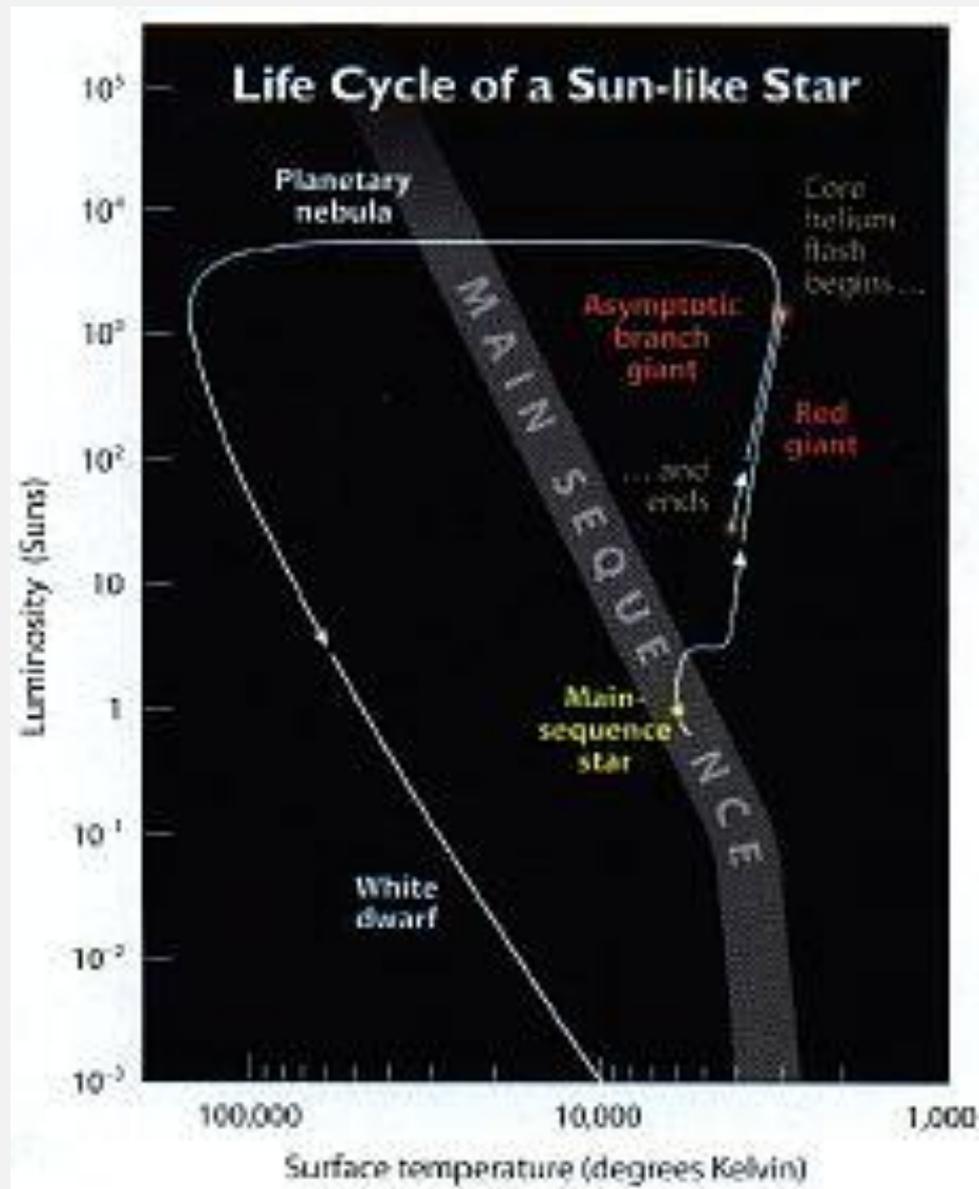
Красные
гиганты

Главная
последовательность



Основные этапы эволюции 1 M_☉

Фаза	<i>t</i> (лет)
ГП	9×10^9
Субгигант	3×10^9
Красный гигант	1×10^9
Гигант кр.пятна	1×10^8
Гигант ассимпт.ветви	$\sim 5 \times 10^6$
Планетарная тумм.	$\sim 1 \times 10^5$
Белый карлик	$> 8 \times 10^9$

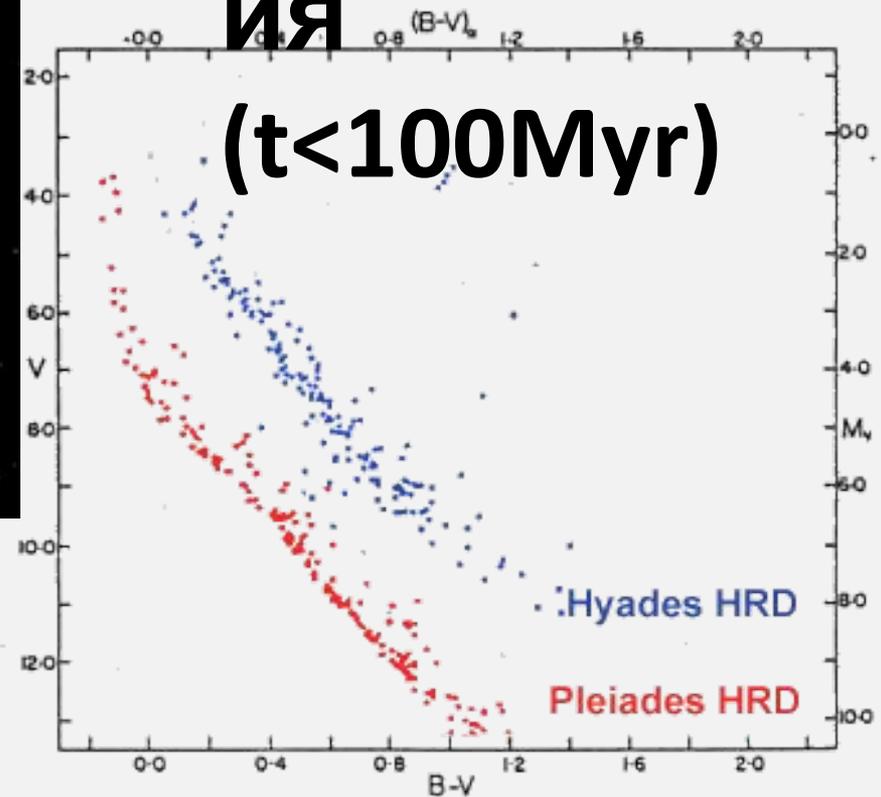


7X50 binoculars

The Hyades

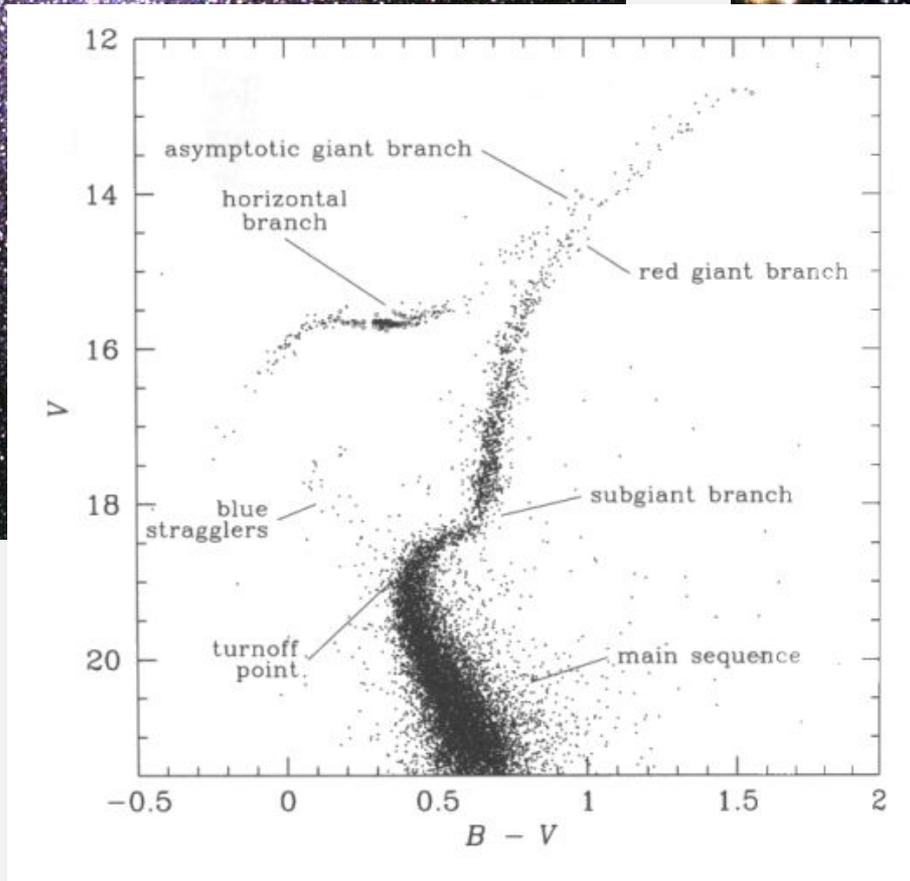
Молодые звездны е Скоплен ия

($t < 100 \text{ Myr}$)



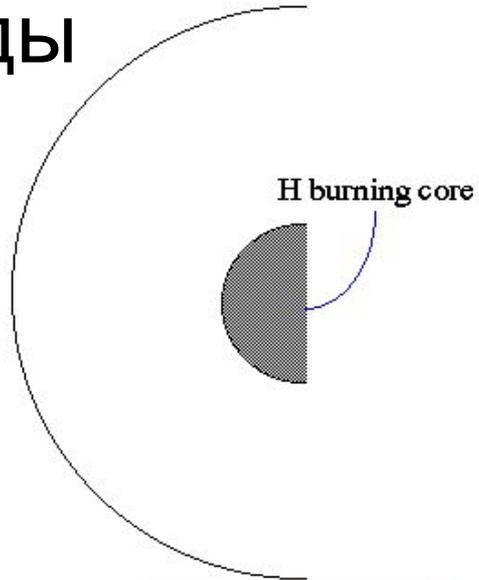
Шаровое скопление 47 Tuc

(≈ 10 Gyr)

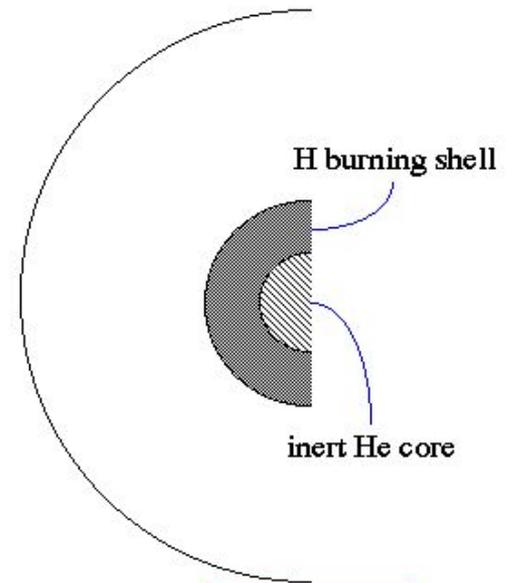


ЭВОЛЮЦИЯ ЗВЕЗДЫ

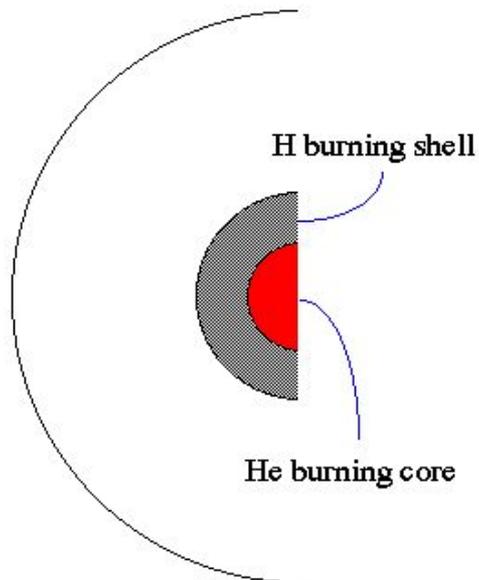
1 M_{\odot}



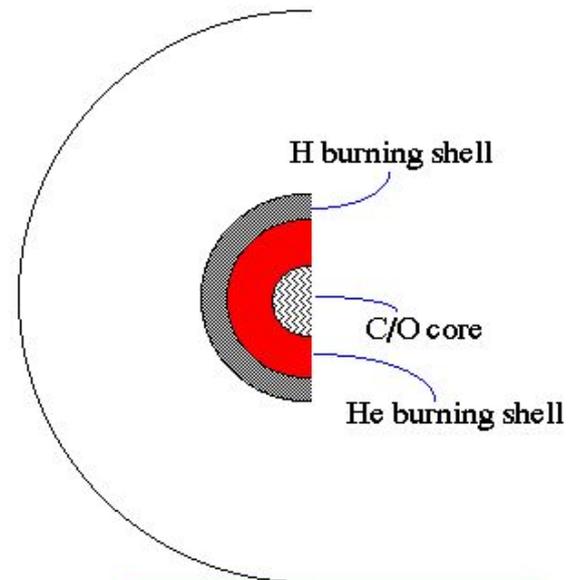
Main Sequence Star



Red Giant Star



Horizontal Branch Star



Asymptotic Giant Branch Star