

# Звезды: строение и эволюция

# Классификация нормальных звезд

- Спектры большинства звезд эмпирически удалось расположить в виде последовательности, вдоль которой линии одних химических элементов постепенно ослабевают, а других – усиливаются. Сходные между собой спектры объединяются в *спектральные классы*. Тонкие различия между ними позволяют выделить *подклассы*. Дальнейшие исследования показали, что звезды, принадлежащие различным спектральным классам, отличаются своими температурами.
- В Гарвардской классификации спектральные типы (классы) обозначены буквами латинского алфавита: O, B, A, F, G, K и M. Поскольку в эпоху разработки этой классификации связь между видом спектра и температурой не была еще известна, то после установления соответствующей зависимости пришлось изменить порядок спектральных классов, который первоначально совпадал с алфавитным расположением букв (мнемоническое правило: **O Be A Fine Girl Kiss Me**).
- Внутри каждого спектрального класса можно установить плавную последовательность подклассов, переходящих из одного в другой. Каждый класс (кроме класса O) делится на 10 подклассов, обозначаемых цифрами от 0 до 9, которые ставятся после обозначения спектрального класса, например, B8, A0, G5. Спектральный класс O подразделяется на подклассы от O2 до O9,5.

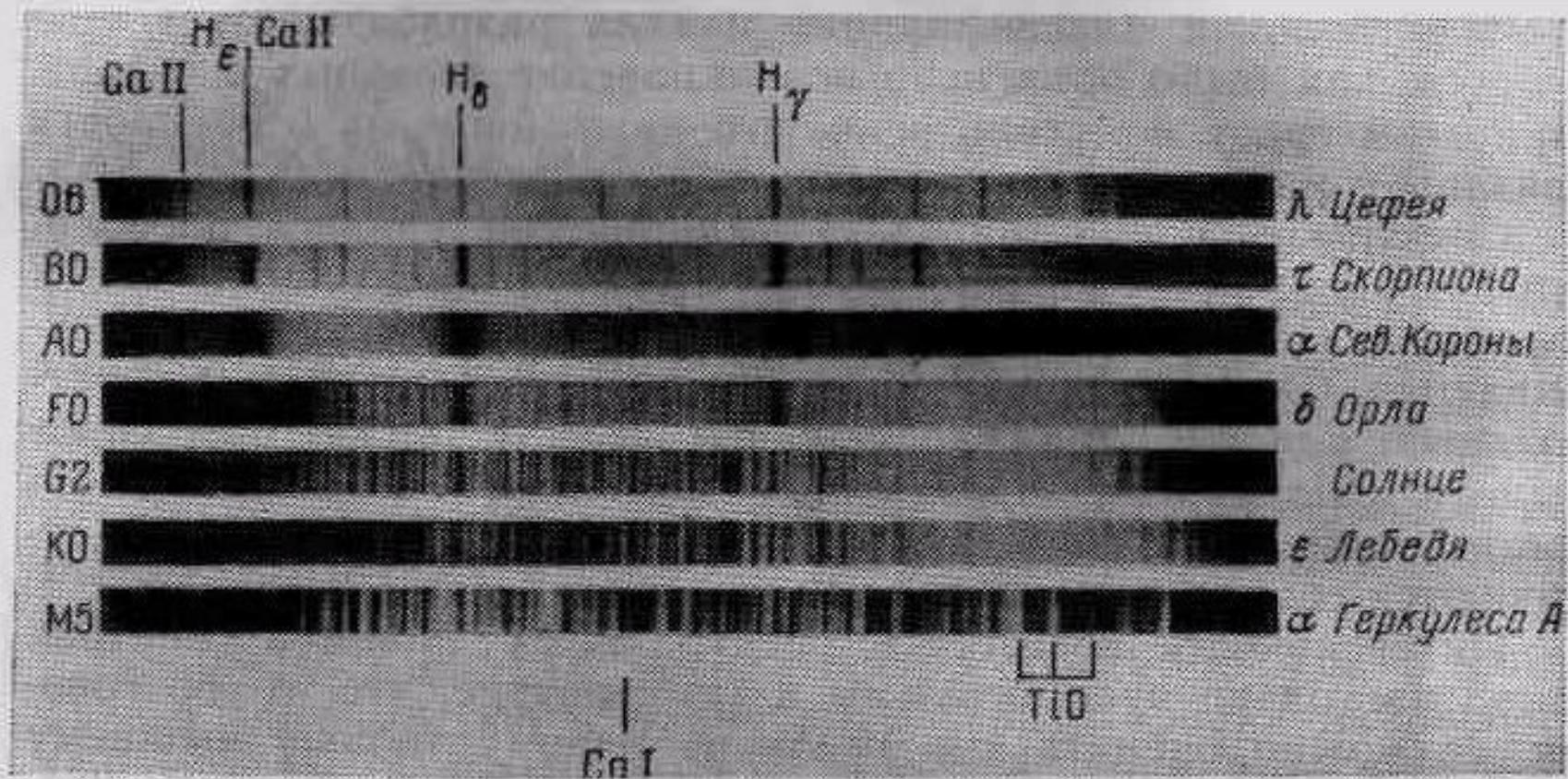
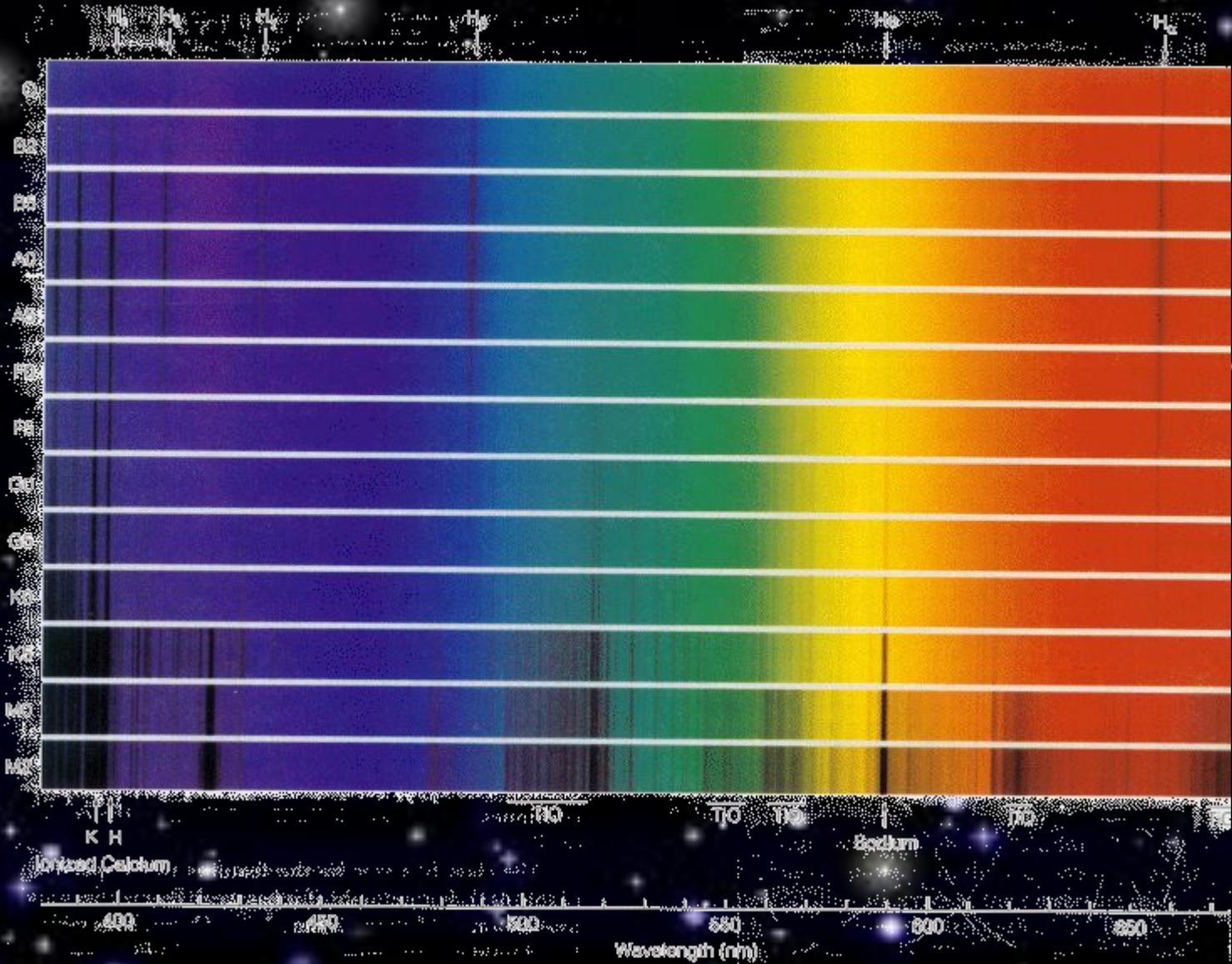


Рис. 193. Спектры звезд различных спектральных классов.



# Диаграмма Герцшпрунга – Рассела

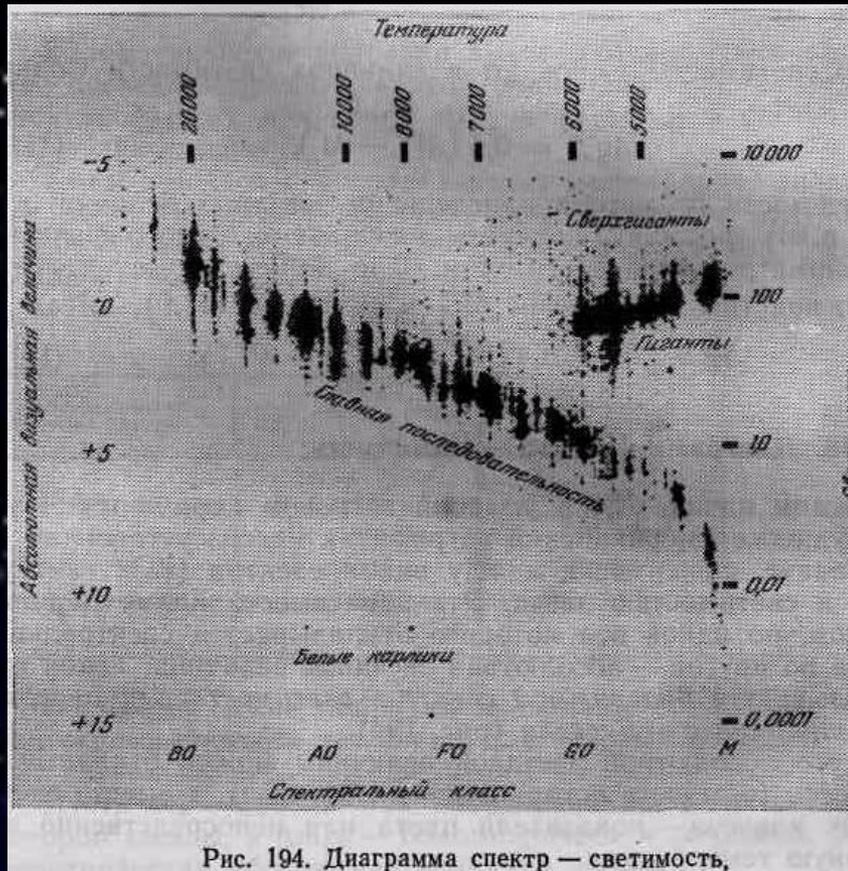
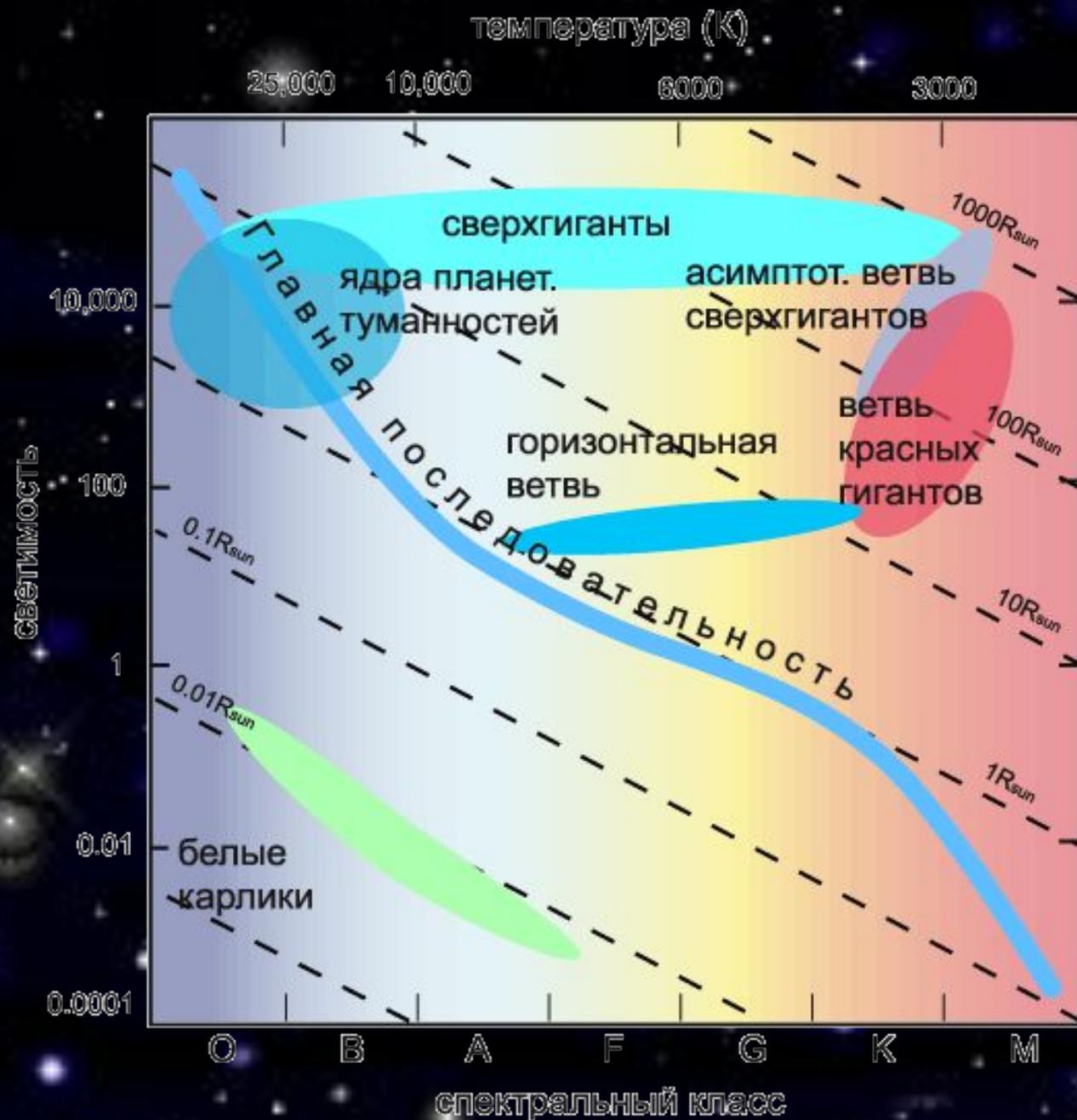


Рис. 194. Диаграмма спектр — светимость,

В самом начале XX в. датский астроном Герцшпрунг и несколько позже американский астрофизик Рассел установили существование зависимости между видом спектра (т. е. температурой) и светимостью звезд. Эта зависимость иллюстрируется графиком, по одной оси которого откладывается спектральный класс, а по другой — абсолютная звездная величина. Такой график называется *диаграммой спектр — светимость* или *диаграммой Герцшпрунга — Рассела*





# Классы светимости

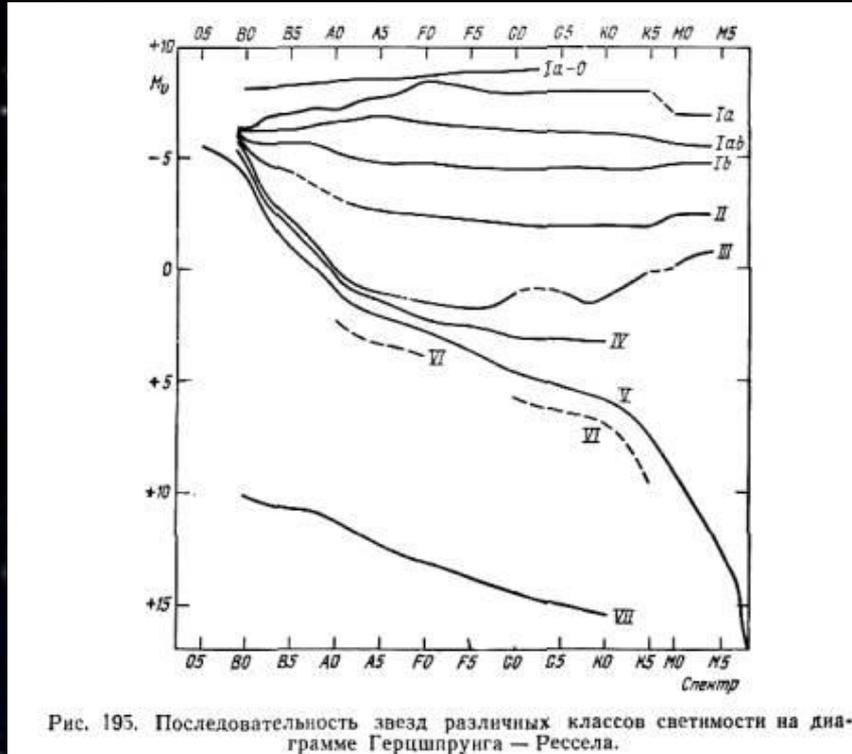
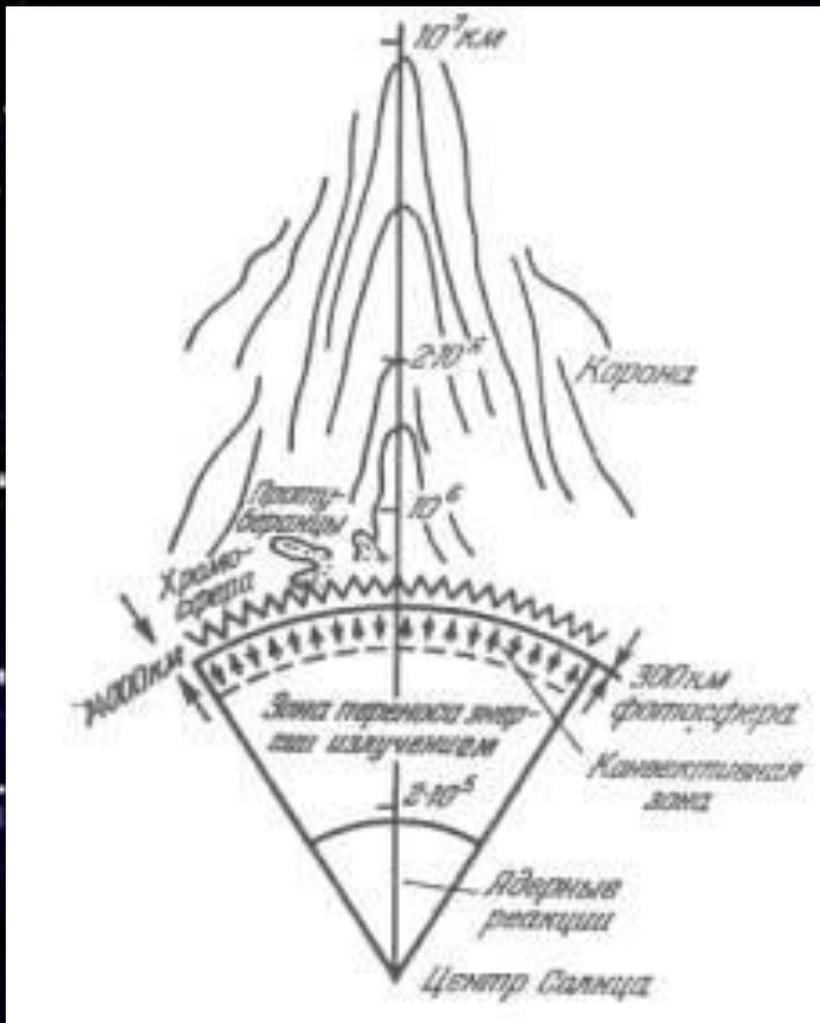


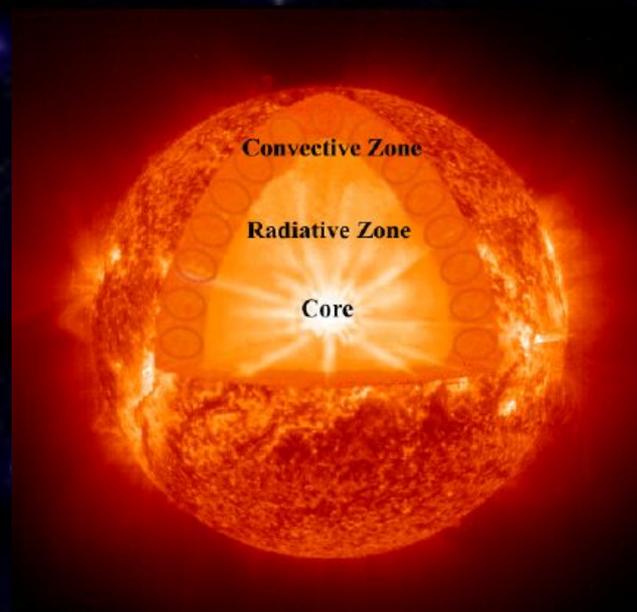
Рис. 195. Последовательность звезд различных классов светимости на диаграмме Герцшпрунга — Рассела.

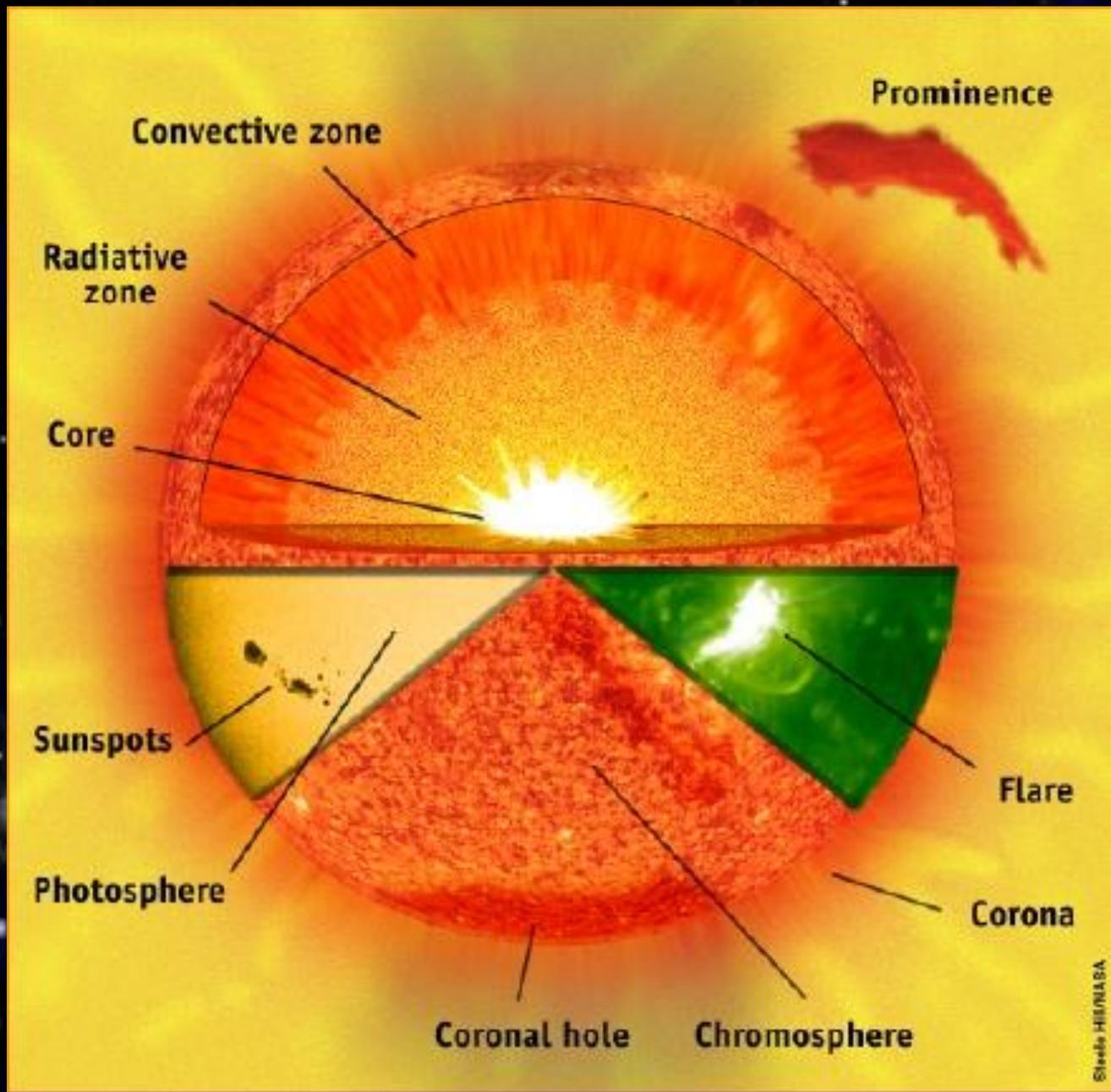
Внимательное изучение диаграммы позволяет выделить на ней ряд других последовательностей, правда, обладающих значительно большей дисперсией, чем главная. Эти последовательности называются *классами светимости* и обозначаются римскими цифрами от I до VII, проставленными после наименования спектрального класса. Таким образом, полная классификация звезд оказывается зависящей от двух параметров, один из которых характеризует спектр (температуру), а другой — светимость. Солнце, относящееся к главной последовательности, попадает в V класс светимости и обозначение его спектра G2V. Эта классификация звезд называется МКК (Моргана, Кинана, Кельман).

# Внутреннее строение Солнца

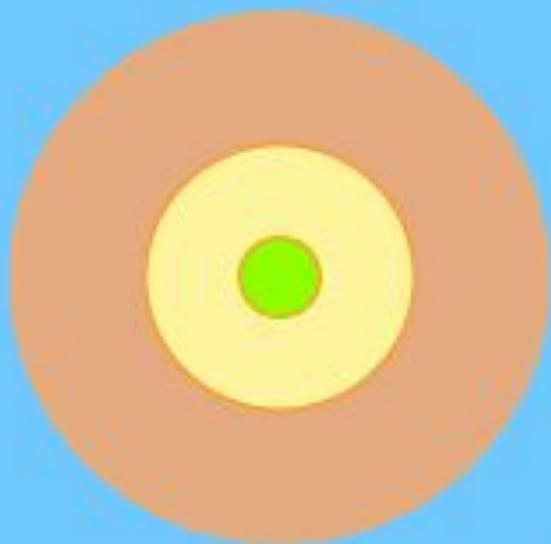


- Зона ядерных реакций в центре
- Зона лучистого переноса энергии
- Конвективная зона
- Фотосфера
- Хромосфера
- Корона





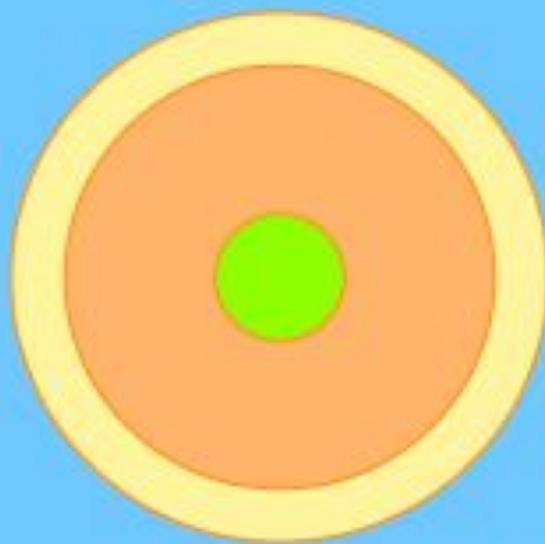
# Внутренняя структура звезд главной последовательности



звезда класса O  
(60 солн. масс)



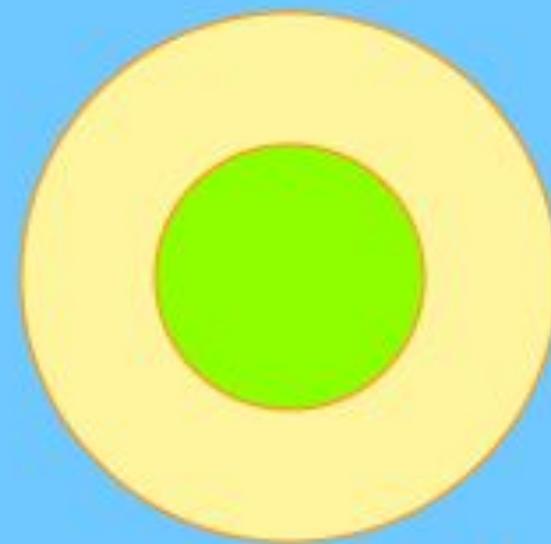
лучистая зона



звезда класса G  
(1 солн. масса)



конвект. зона



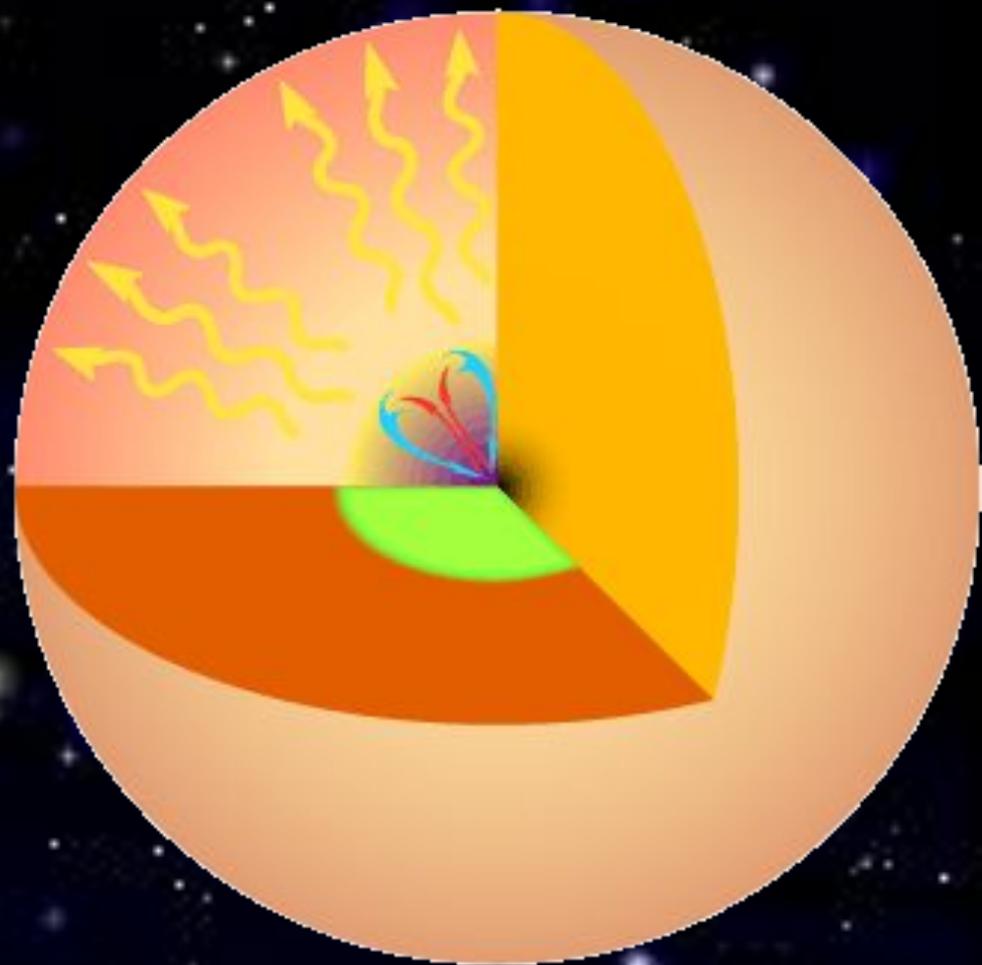
звезда класса M  
(0.1 солн. масса)



ядерное горение

В конце ГП (50 млн. лет)

Массивная звезда (5-10  $M_{\text{sun}}$ )  
на главной последовательности



В начале ГП



$$L_{\square} \approx 4 \cdot 10^{33} \text{ erg/s}$$

$$M_{\square} \approx 2 \cdot 10^{33} \text{ g}$$

Солнце

(для сравнения радиуса)

# Физические основы внутреннего строения звезд

Нет ничего проще, чем звезда.  
(А. Эддингтон)

Физическое состояние стационарных звезд определяется условиями гидростатического (макроскопические параметры - масса, радиус - изменяются на больших временах  $\gg$  динамического времени) и теплового (звезды не взрываются, их светимость меняется плавно) равновесия.

# Гидростатическое равновесие

- Для сферически -симметричного случая

$$\frac{1}{\rho} \frac{dP}{dr} + \frac{Gm(r)}{r^2} = 0$$

- Прямым следствием уравнения гидростатического равновесия является *теорема вириала*, связывающая тепловую (кинетическую) и потенциальную (гравитационную) энергию стационарной звезды. Умножая обе части уравнения гидростатического равновесия на  $r$  и интегрируя по  $dm$  по частям, получим

$$U = - \int \frac{Gm dm}{r} = -3 \int P dV$$

$$(dm = 4\pi\rho r^2 dr)$$

# Полиτροπная модель

$$P = K \rho^\gamma = K \rho^{1 + \frac{1}{n}} \quad (\gamma - \text{показатель, } n - \text{индекс полиτροпы)}$$

$$dE = -P dV_{\text{(адиабата)}} \quad \text{На единицу массы} \quad V = \frac{1}{\rho}, \quad d\varepsilon = -P \frac{d\rho}{\rho^2}$$

$$\varepsilon = \frac{P}{\rho(\gamma - 1)} \quad \text{Удельная тепловая энергия}$$

$$U = -3(\gamma - 1)Q \quad Q = \int \varepsilon \rho dV = \int \varepsilon dm$$

Отсюда можно, например, оценить температуру в центре Солнца.

Пусть вся звезда состоит из идеального одноатомного газа,  $\gamma = 5/3$ ,  $Q = (3/2)NkT$ . С учетом молекулярного веса получим  $T \sim 10^7$  К. Точное значение –  $14 \cdot 10^6$  К.

# Частные случаи политропных моделей

- $n = 3/2, \gamma = 5/3$  (идеальный одноатомный газ)

$$U = -2Q, E = -Q$$

Звезда обладает отрицательной теплоемкостью

$dE/dT < 0$  – устойчивое тепловое равновесие

- $n = 3, \gamma = 4/3$  (реализуется в белых карликах, больших горячих звездах)

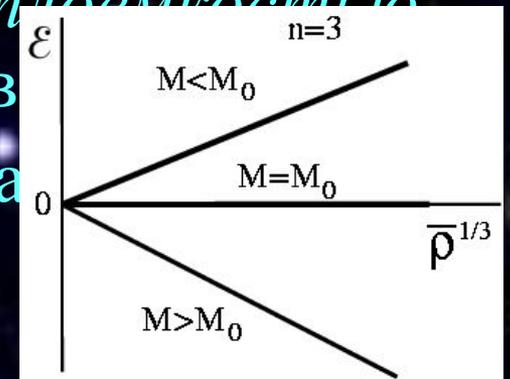
$$U = -Q, E = 0$$

Равновесие возможно только при одном

определенном значении массы,

$$M \sim (K/G)^{3/2}$$

Радиус звезды может быть любым.



$$Q \sim PV \sim PM/\rho \sim KM\rho^{1/3}$$

$$U \sim -GM^2/R \sim -GM^2/(M/\rho)^{1/3}$$

$$E = Q + U$$

$$KM \sim GM^{5/3} \quad M \sim \left(\frac{K}{G}\right)^{3/2}$$

# Теория белых карликов

- Плотность очень велика,  $\rho \sim 10^5 - 10^9 \text{ г/см}^3$ . Вещество состоит из ядер и свободных электронов, которые подчиняются статистике Ферми – Дирака.

Объем фазовой ячейки  $(2\pi\hbar)^3$

Число электронов в единице объема —

$$N = \frac{2}{(2\pi\hbar)^3} \frac{4\pi}{3} p_F^3 = \frac{E_F}{3\pi^2 \hbar^3} \rho_F = \frac{E_F}{3\pi^2 \hbar^3} \rho_F \left( \sqrt{1+x^2} - 1 \right)$$

Ферми

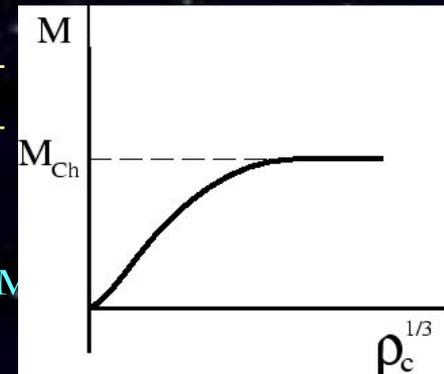
Введем параметр  $x = p_F / m_e c$ . При  $x \ll 1$  электроны нерелятивистские, при  $x \gg 1$  — релятивистские.

$$P = K \rho^{5/3} \quad x \ll 1$$

$$P \propto \rho^{4/3} \quad x \gg 1$$

$$\rho = \mu_e \mu_0^6 M^6 \mu^3$$

$M_{Ch} = 1.44 M_{\odot}$  Чандрасекаровский предел



Считается, что белые карлики - это обнажившееся ядро звезды, находившейся до сброса наружных слоев на ветви сверхгигантов. Когда оболочка планетарной туманности рассеется, ядро звезды, находившейся до этого на ветви сверхгигантов, окажется в верхнем левом углу диаграммы ГР. Остывая, оно переместится в верхний угол диаграммы для белых карликов. Ядро будет горячее, маленькое и голубое с низкой светимостью - это и характеризует звезду как белый карлик. Белые карлики состоят из углерода и кислорода с небольшими добавками водорода и гелия, однако у массивных сильно проэволюционировавших звезд ядро может состоять из кислорода, неона или магния. Ядерные реакции в белом карлике не идут. Для белых карликов существует зависимость "масса-радиус", причем чем больше масса, тем меньше радиус.

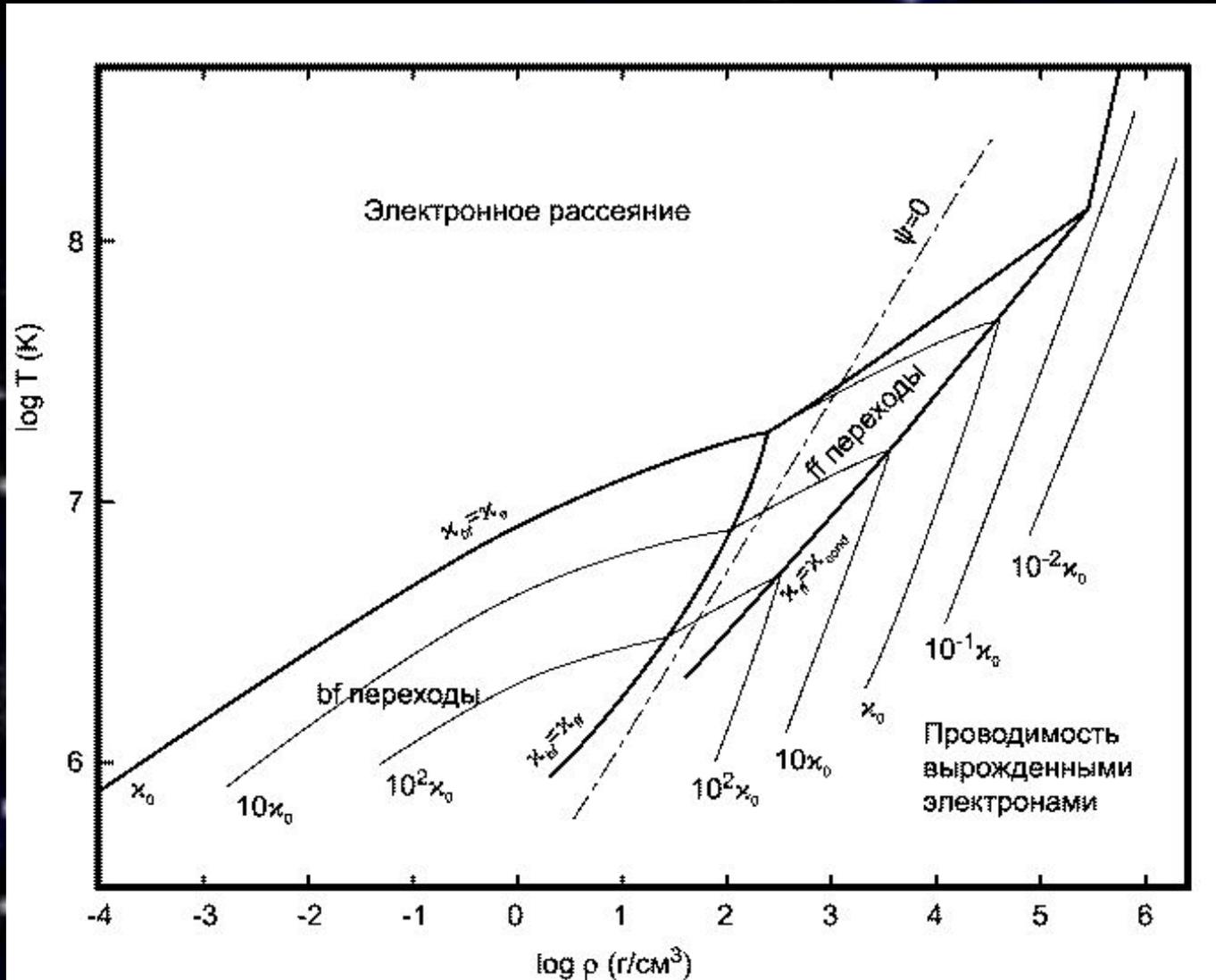
# Сравнение свойств белого карлика Сириус В с Землей и Солнцем

Свойства	Земля	Сириус В	Солнце
масса ( $M_{\text{sun}}$ )	$3 \cdot 10^{-6}$	0.94	1.00
радиус ( $R_{\text{sun}}$ )	0.009	0.008	1.00
светимость ( $L_{\text{sun}}$ )	0.00	0.0028	1.00
температура поверхности (К)	287	27000	5770
средняя плотность (г/см <sup>3</sup> )	5.5	$2.8 \cdot 10^6$	1.41
центральная температура (К)	4200	$2.2 \cdot 10^7$	$1.6 \cdot 10^7$
центральная плотность (г/см <sup>3</sup> )	9.6	$3.3 \cdot 10^7$	160

# Перенос излучения в звездах

- Перенос энергии из недр звезды к ее поверхности может осуществляться различными механизмами: излучением, электронной теплопроводностью, конвекцией. Для нормальных звезд в большинстве случаев этот перенос обусловлен лучистой теплопроводностью.
- Лучистый перенос представляет собой диффузионный процесс. Фотоны многократно рассеиваются, поглощаются и переизлучаются (за счет томсоновского рассеяния и тормозного механизма излучения). Коэффициент диффузии равен  $D = cl/3$ , где  $l$  – средняя длина свободного пробега фотонов,  $l \sim 1/\kappa\rho$  ( $\kappa$  – «непрозрачность»,  $\kappa = \alpha/\rho$ ). Время диффузии  $t_D \sim R^2/D$ . Для Солнца время диффузии фотонов составляет около миллиона лет.
- При некоторых условиях (градиент температуры выше адиабатического) радиальное распределение плотности оказывается неустойчивым и возникает конвекция. Внешняя конвективная зона имеется на Солнце.

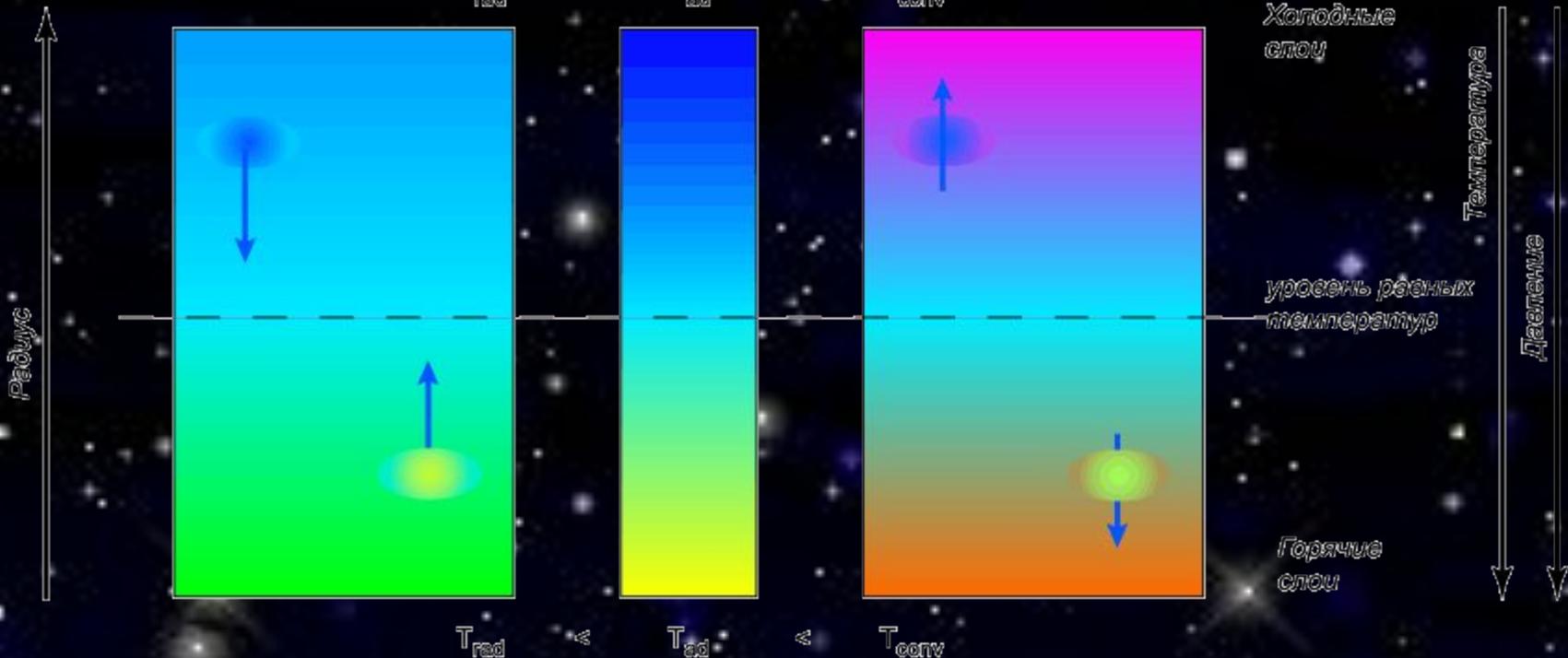
# Непрозрачность вещества в недрах звезд



Устойчивая среда

Конвективно-неустойчивая среда

Адиабатическое распределение температуры



$$0 > \left(\frac{dT}{dr}\right)_{\text{rad}} > \left(\frac{dT}{dr}\right)_{\text{ad}}$$

$$0 > \left(\frac{dT}{dr}\right)_{\text{ad}} > \left(\frac{dT}{dr}\right)_{\text{conv}}$$

$$\nabla < \nabla_{\text{ad}}$$

$$\nabla > \nabla_{\text{ad}}$$

$$\frac{dS}{dr} > 0$$

$$\frac{dS}{dr} < 0$$

# Уравнения звездной структуры

$$\frac{1}{\rho} \frac{dP}{dr} + \frac{Gm(r)}{r^2} = 0$$

$$m(r) = \int_0^r 4\pi\rho r^2 dr$$

$$\frac{dT}{dr} = -\frac{3}{4} \frac{\kappa \rho u_r L(r)}{4\pi r^2 c T^3} \quad u_r = aT^4$$

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

$$M_r = 0 \text{ при } L_r = 0 \quad r =$$

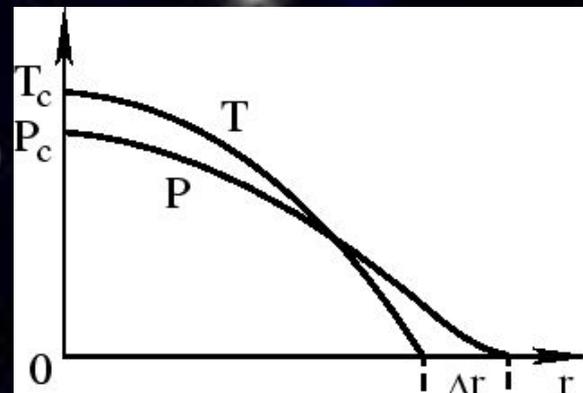
$$P = P_0 \text{ на поверхности}$$

$$P = P(\rho, T, X, Y, Z)$$

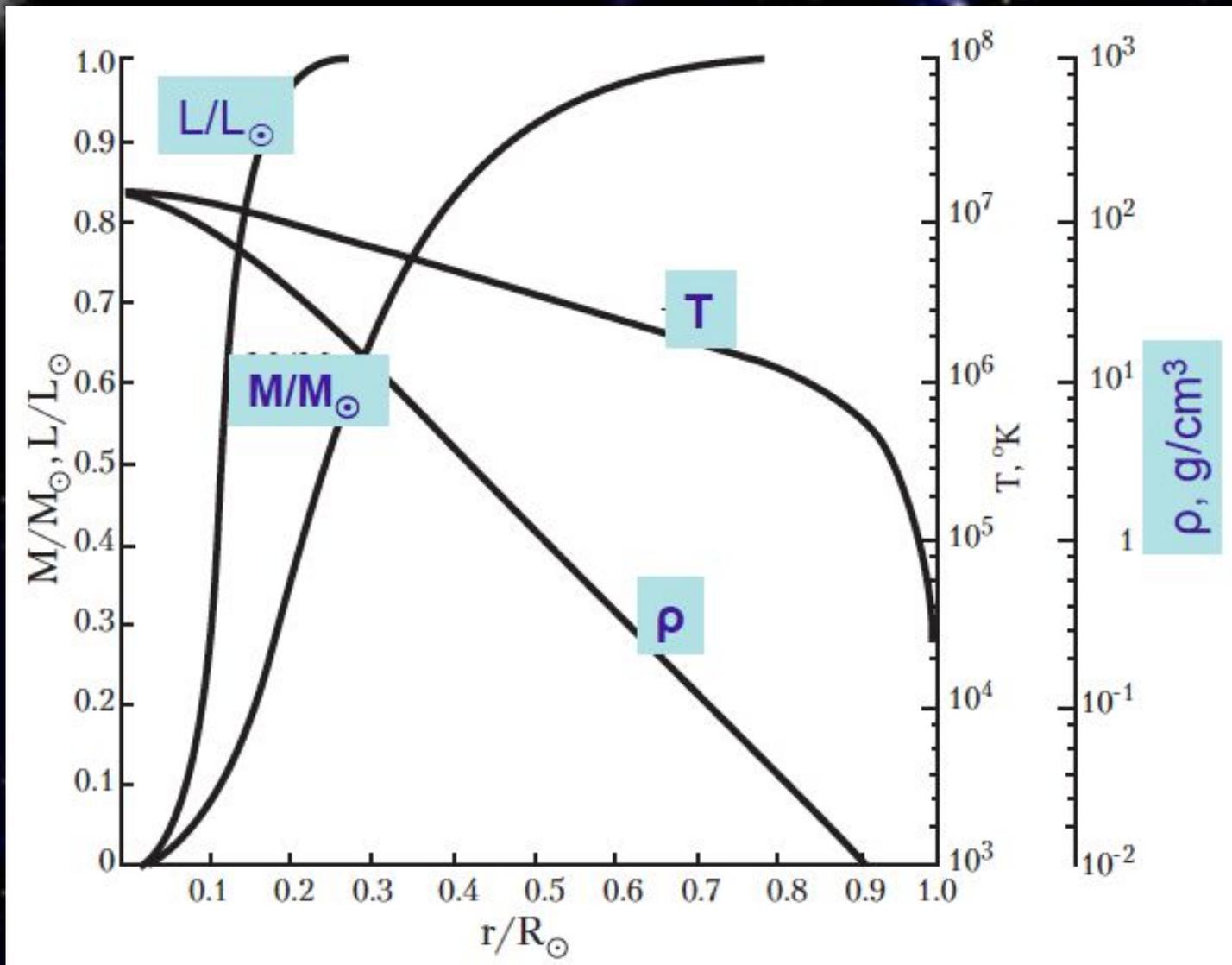
$$\kappa = \kappa(\rho, T, X, Y, Z)$$

$$\varepsilon = \varepsilon(\rho, T, X, Y, Z)$$

$X, Y, Z$  – весовые доли элементов: водорода, гелия и др.



# Модель Солнца



# Соотношение масса – светимость

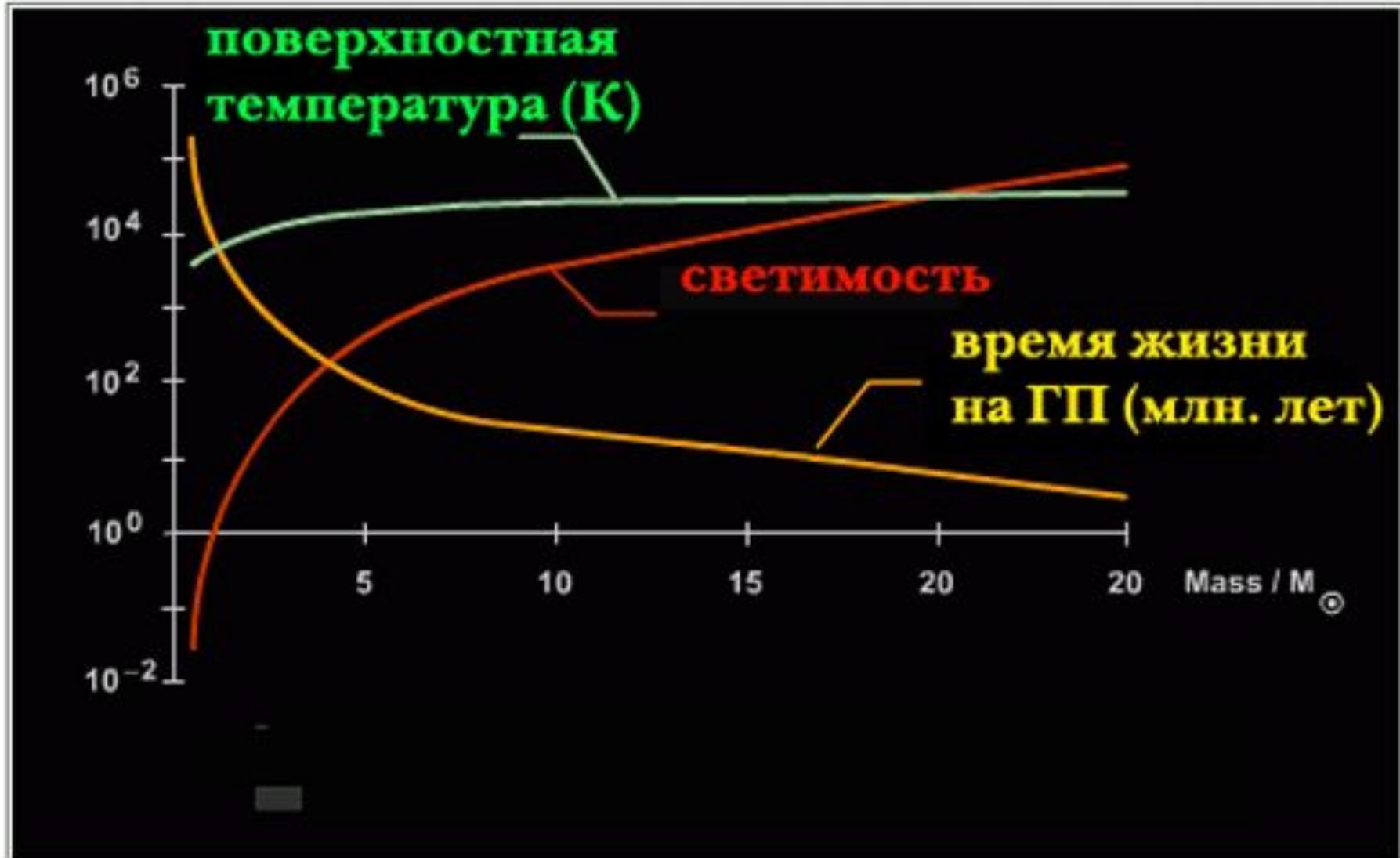
- Из уравнений, описывающих структуру нормальных звезд, можно найти связь между массой и светимостью звезды. Для звезд с массой порядка солнечной

$$L \propto M^{3.4}$$

- Характерное время жизни звезды на главной последовательности

$$t_m = \frac{\eta_n M_c c^2}{L} \sim 10^{10} \left( M / M_{\square} \right)^{-2} \quad \text{years}$$

( $\eta_n$  – эффективность ядерных реакций ( $\sim 0.007$ ),  $M_c$  – масса ядра звезды). *Массивные звезды эволюционируют быстрее.*



# Эддингтоновский предел СВЕТИМОСТИ

- Этот предел определяется равенством силы светового давления на электрон и силы притяжения протона звездой.

$$\frac{\sigma_T}{c} \frac{L}{4\pi r^2} = G \frac{M m_p}{r^2}$$

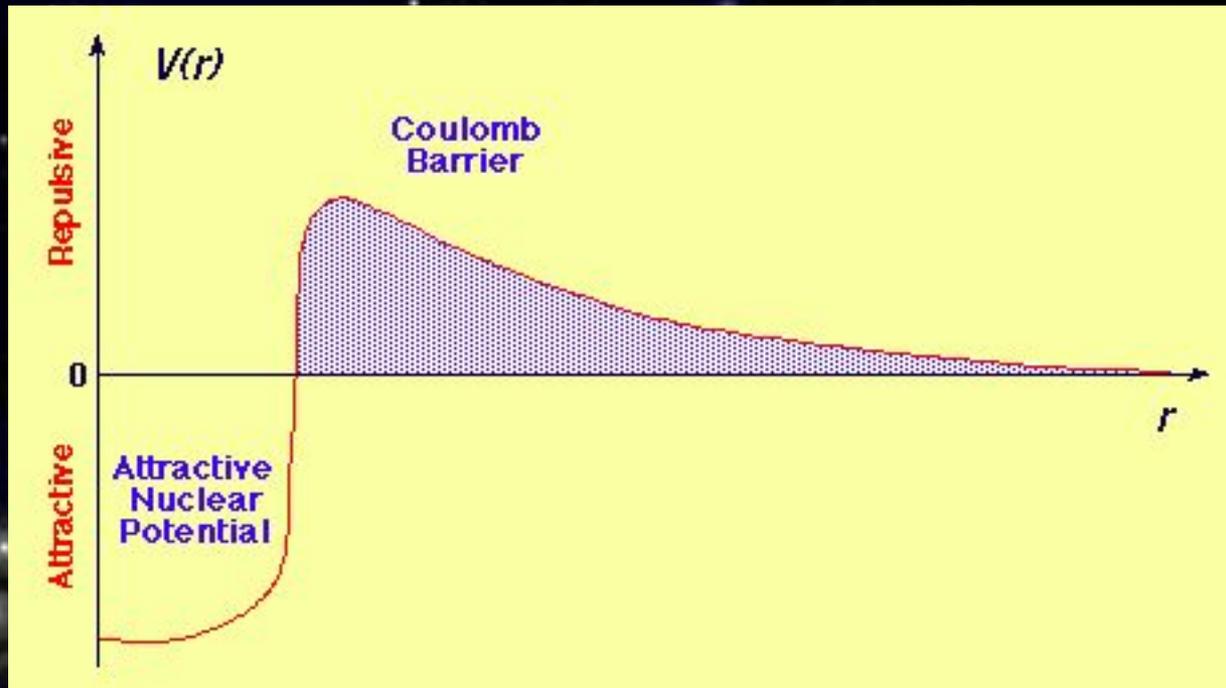
$$L \leq \frac{4\pi G M m_p c}{\sigma_T} \approx 3 \cdot 10^4 L_{\square} \left( \frac{M}{M_{\square}} \right)$$

# Ядерные источники энергии звезд

Если бы Солнце светило только за счет запасов тепловой энергии, то их хватило бы на  $\sim 30$  млн. лет.

При типичных температурах средняя кинетическая энергия частиц в центре звезды  $\sim 1$  кэВ. В то же время для преодоления кулоновского отталкивания двух протонов необходима энергия  $\sim 1$  МэВ. При максвелловском распределении доля частиц с такой энергией  $\sim e^{-1000} \approx 10^{-430}$ . В Солнце всего  $10^{57}$  частиц, т.е. классическая вероятность взаимодействия двух протонов пренебрежимо мала. Однако, вероятность такого взаимодействия значительно увеличивается с учетом законов квантовой механики за счет туннельного эффекта.





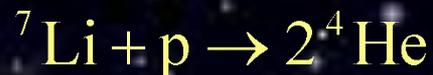
# Ядерные реакции в звездах

- Основные типы ядерных реакций в звездах – это так называемый протон-протонный и углеродный (CNO) циклы. Первый доминирует при  $T < 20$  млн. К, второй – при более высоких температурах.
- В обоих случаях в конечном счете из 4-х протонов образуется одно ядро гелия. При этом выделяется энергия
$$(4M_p - M_{\text{He}})c^2 = 28.3 \text{ МэВ.}$$
- Минимальная масса звезды, при которой возможны ядерные реакции,  $\sim 0.1$  солнечной.

# Ядерные реакции в звездах: протон-протонный цикл



$10^8$

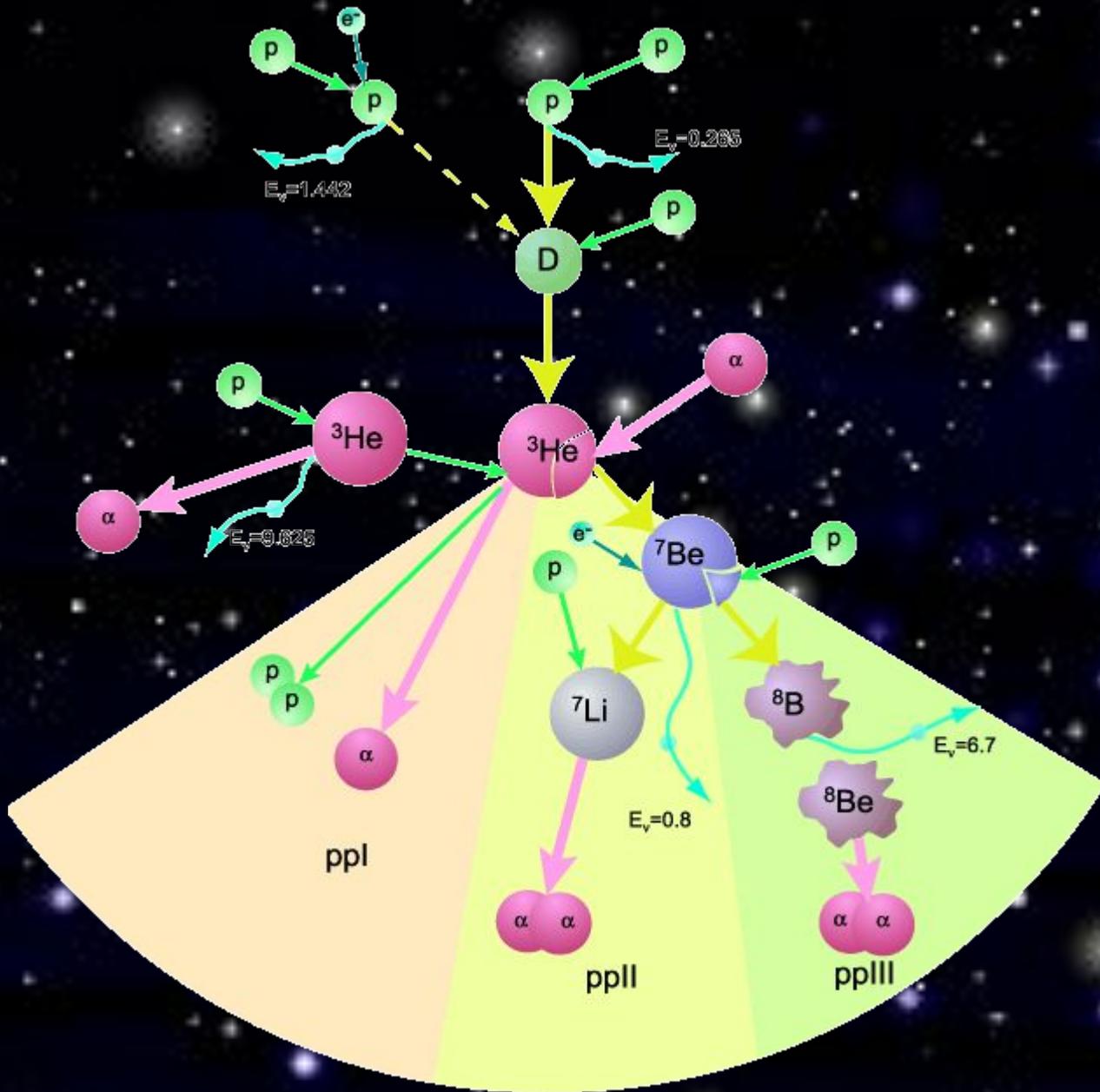


Вторая цепочка дает побочные продукты:



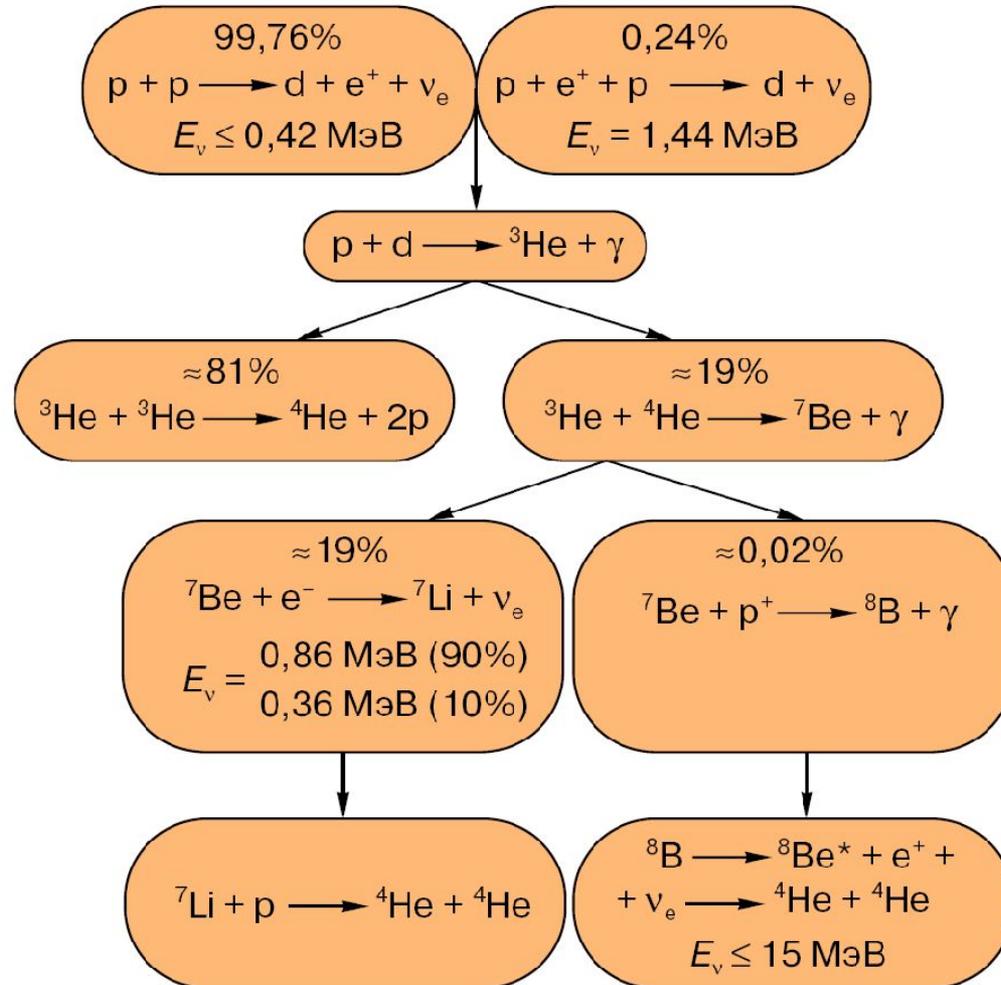
Последний распад дает нейтрино высоких энергий (8–9 МэВ).



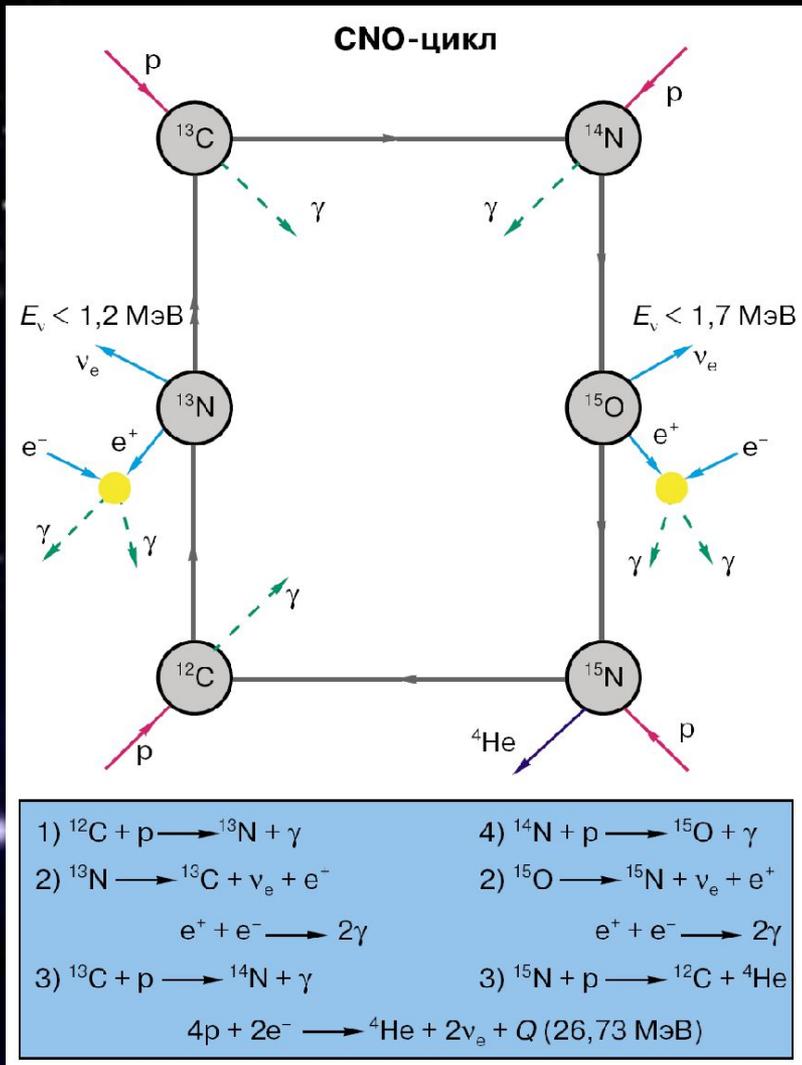


Основные цепи реакций превращения водорода в гелий, характерные для звезд с массами, близкими к солнечным. Две реакции, показанные слева вне основного пути обычно не относятся к pp-циклу, а существенны только при точном подсчете количества высокоэнергетических нейтрино. С точки зрения энерговыделения существенны только первые две цепочки.

## pp-Цикл

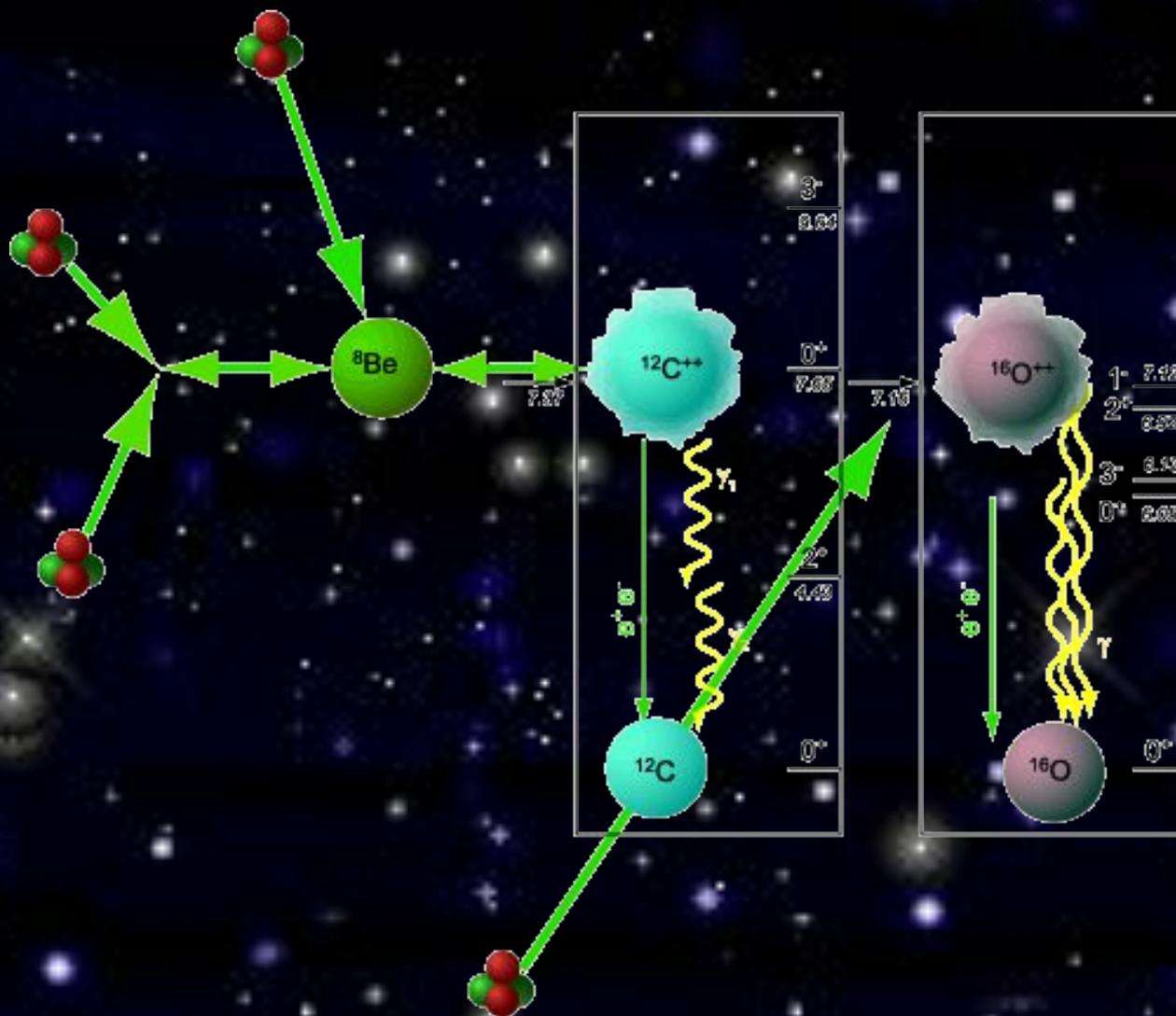


# Ядерные реакции в звездах: углеродный (CNO) цикл

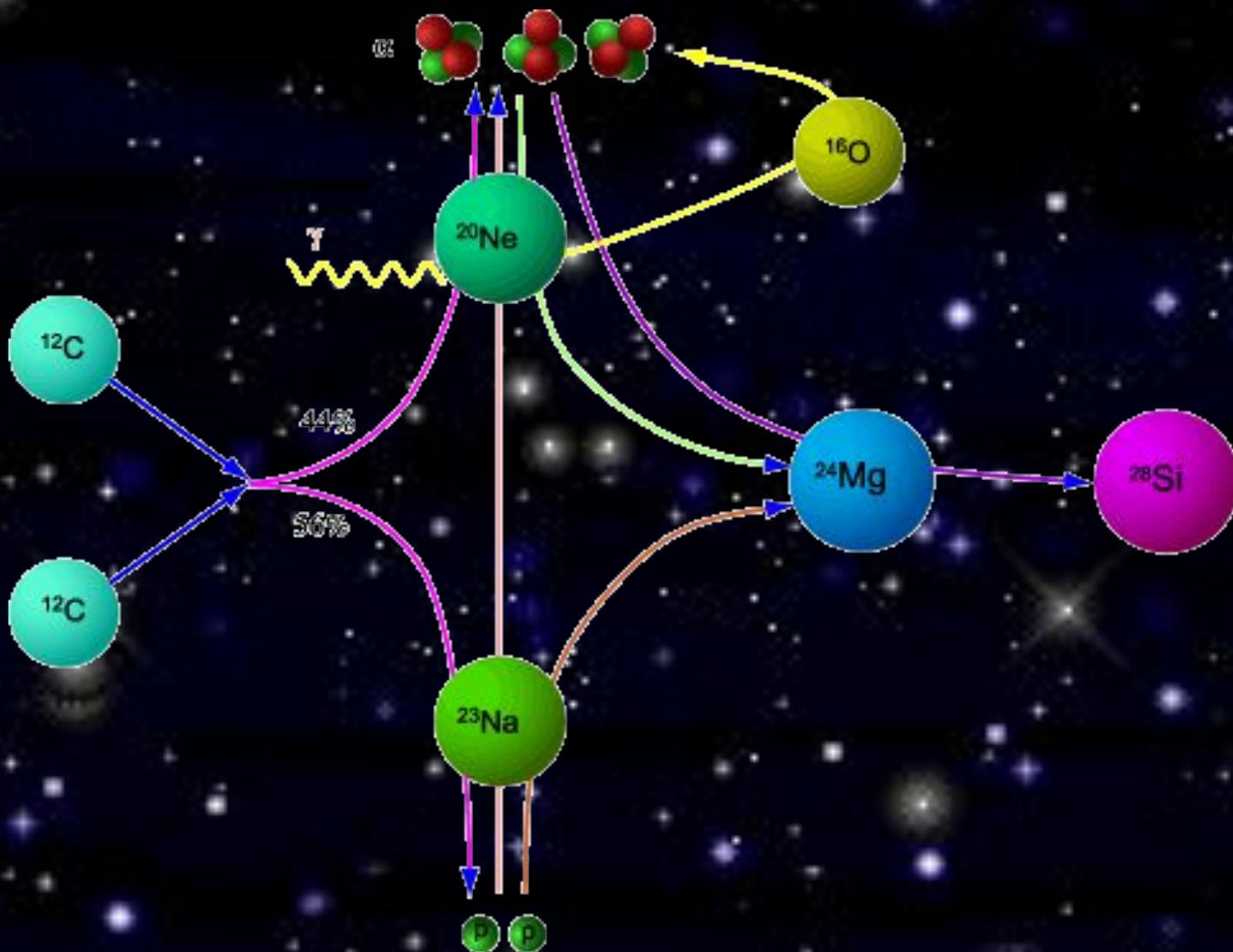


Углерод здесь выступает в роли катализатора. Количество энергии, выделяемой в обоих циклах, примерно одинаково.

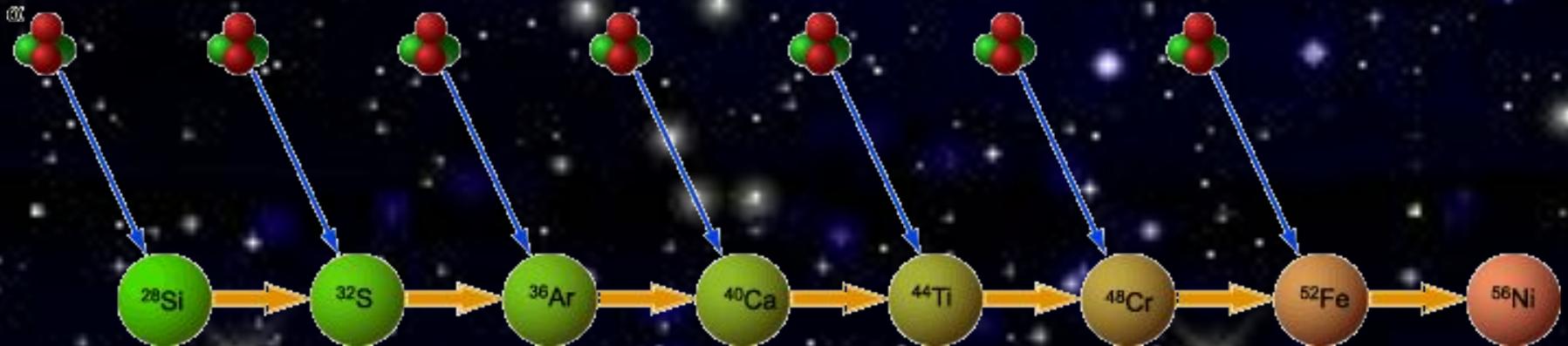
# Горение гелия

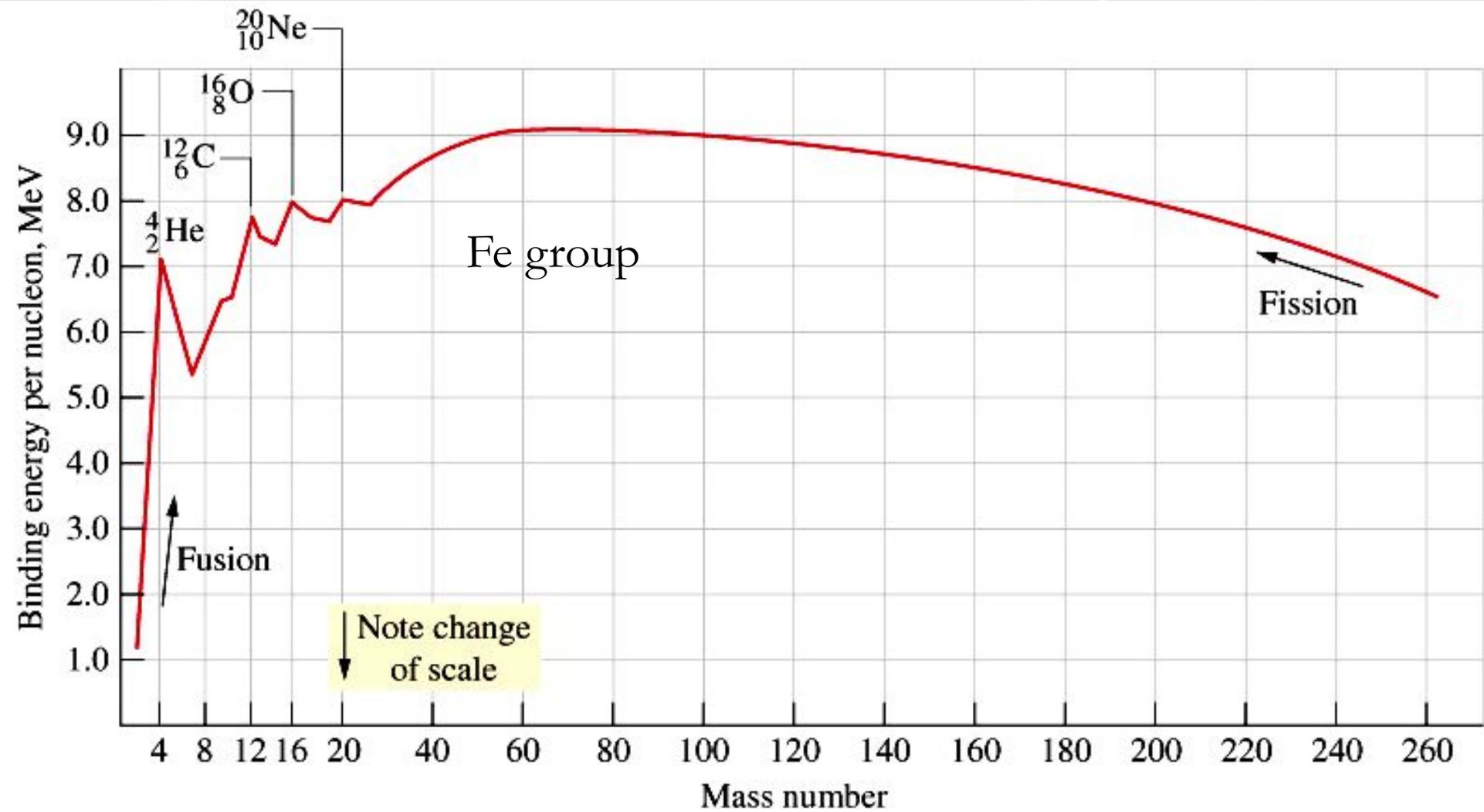


# Горение С и О на поздних стадиях эволюции



# Горение кремния и образование элементов до железного пика

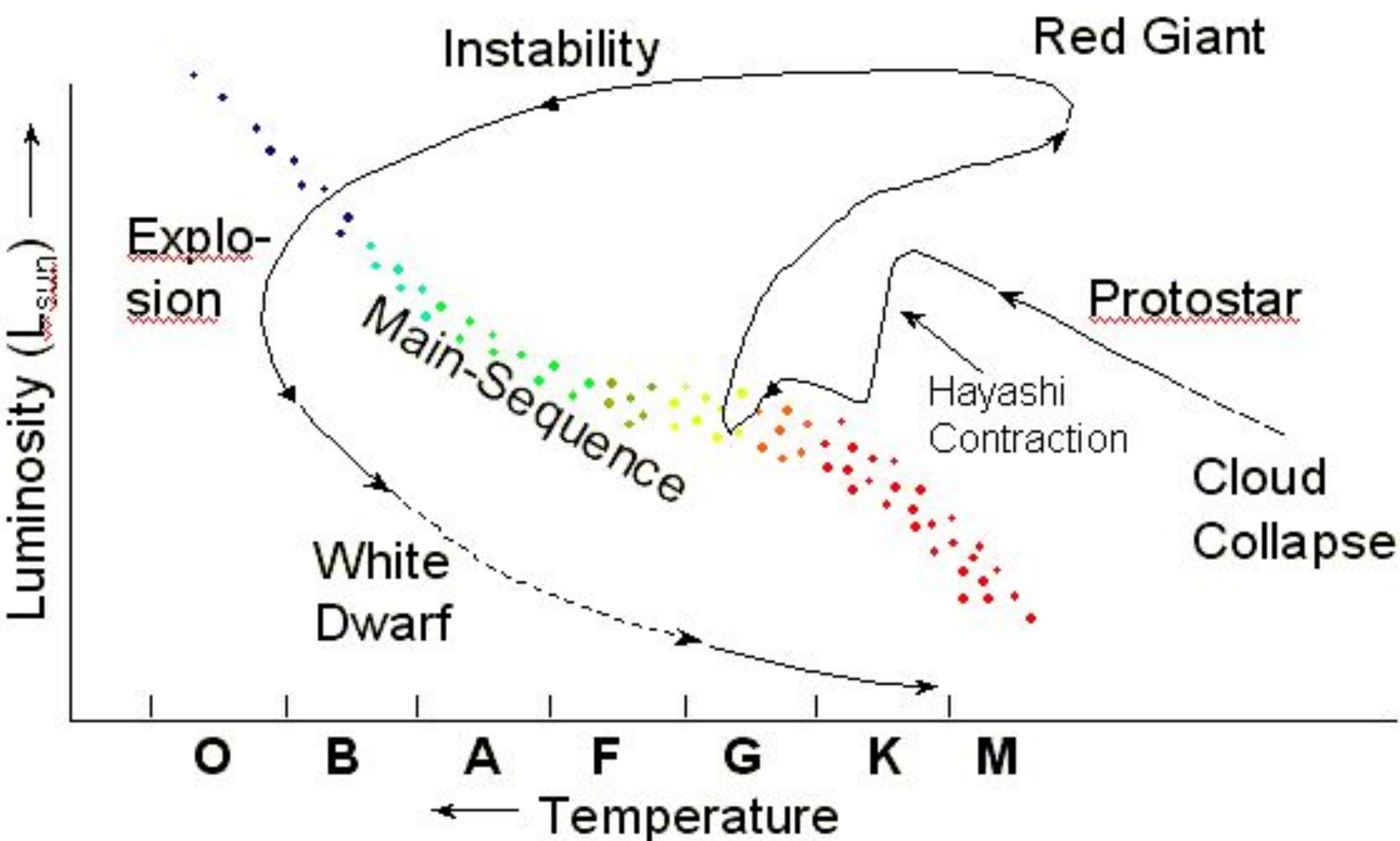


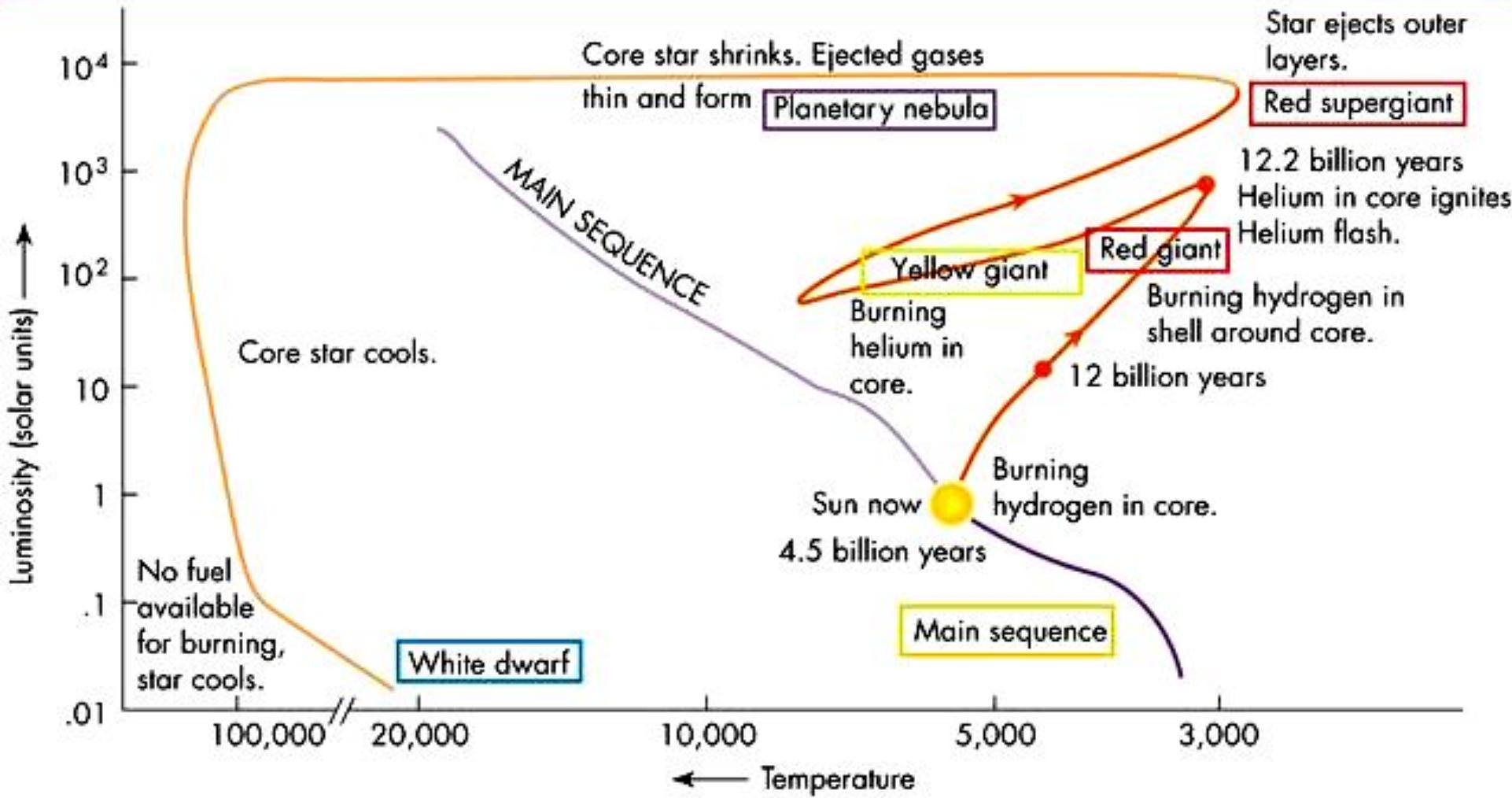
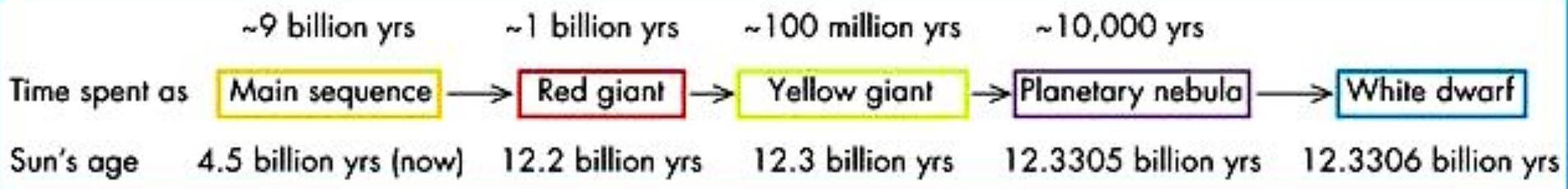


# Эволюция звезд после главной последовательности

- При достаточно больших массах звезд ( $> 0.5$  солнечной) нет глобального перемешивания, поэтому водород в центре постепенно истощается. Появляется слоевой источник энергии и изотермическое гелиевое ядро. Звезда начинает разбухать и ее радиус увеличивается в десятки раз. На диаграмме Гецшпрунга – Рассела звезда переходит в область красных гигантов.

# Evolution of the Sun





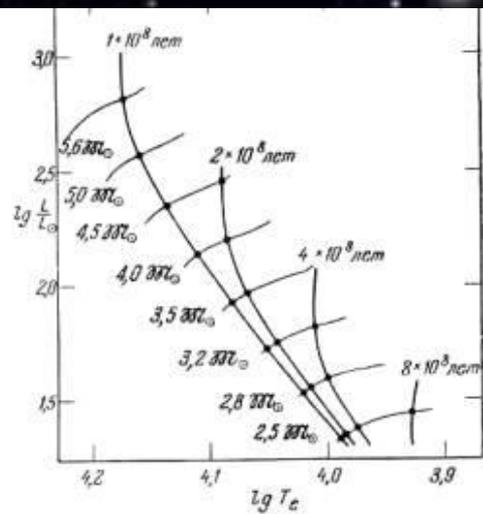
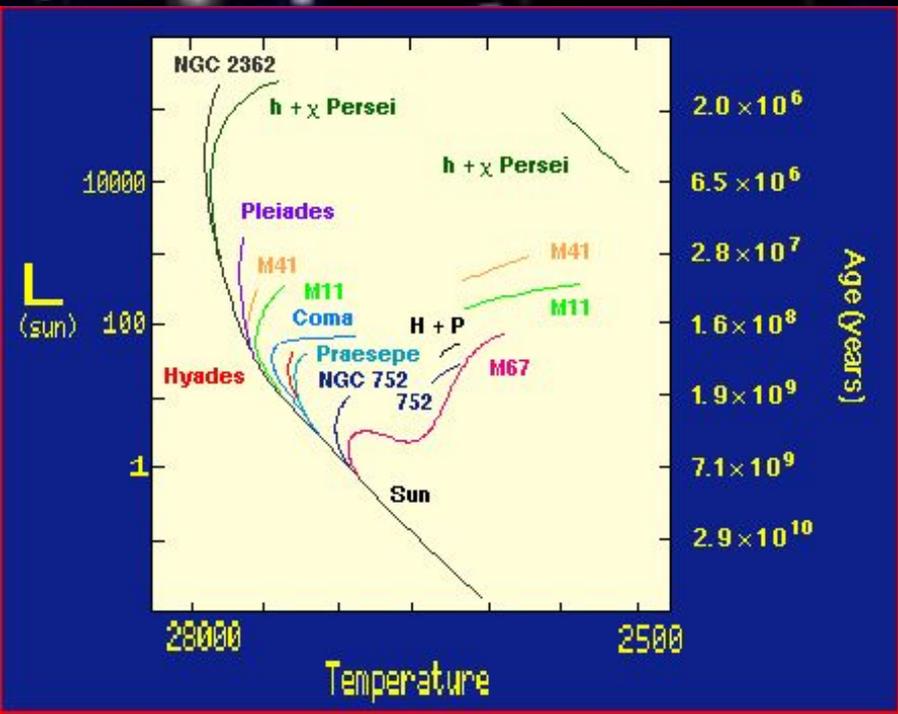
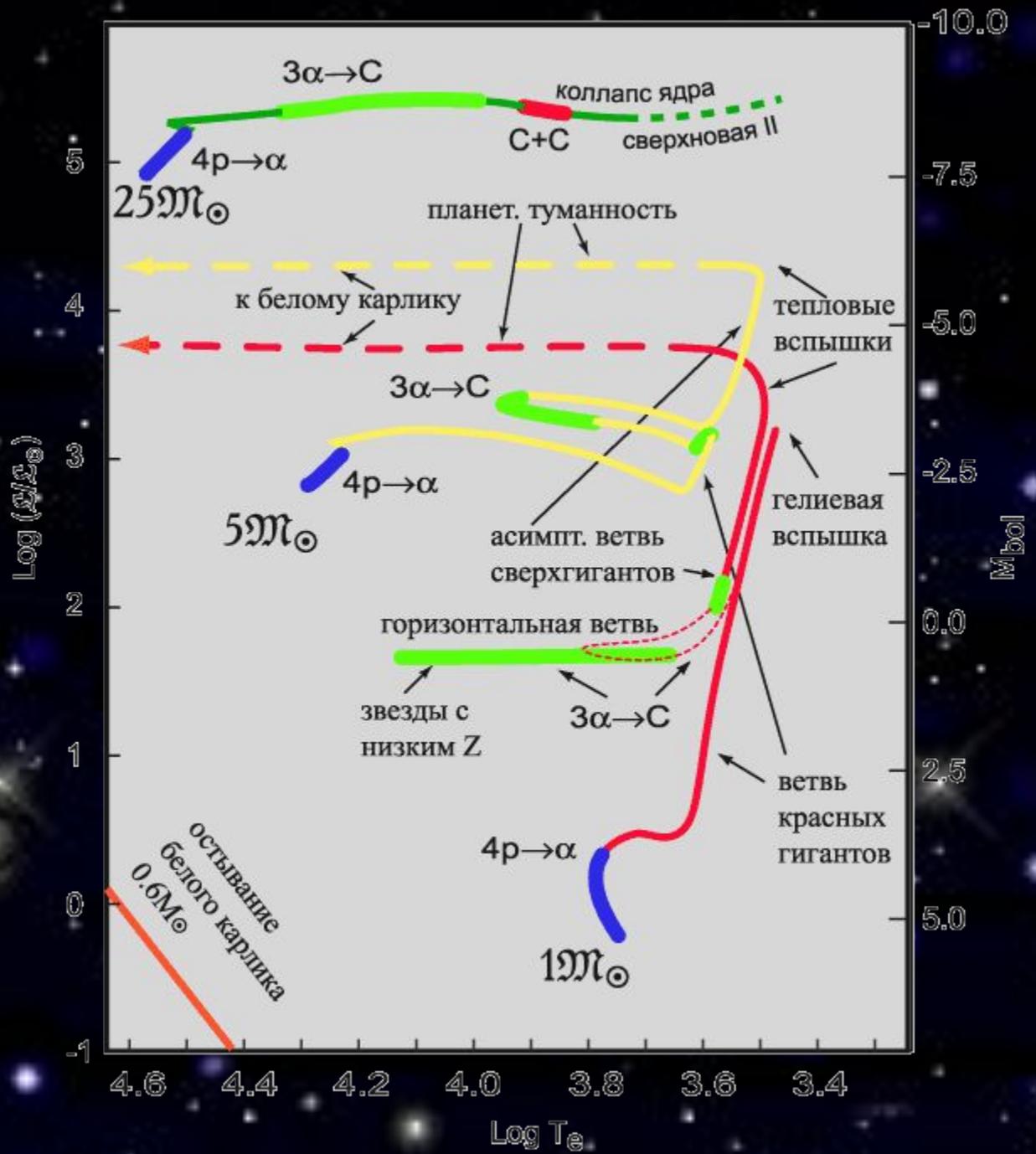
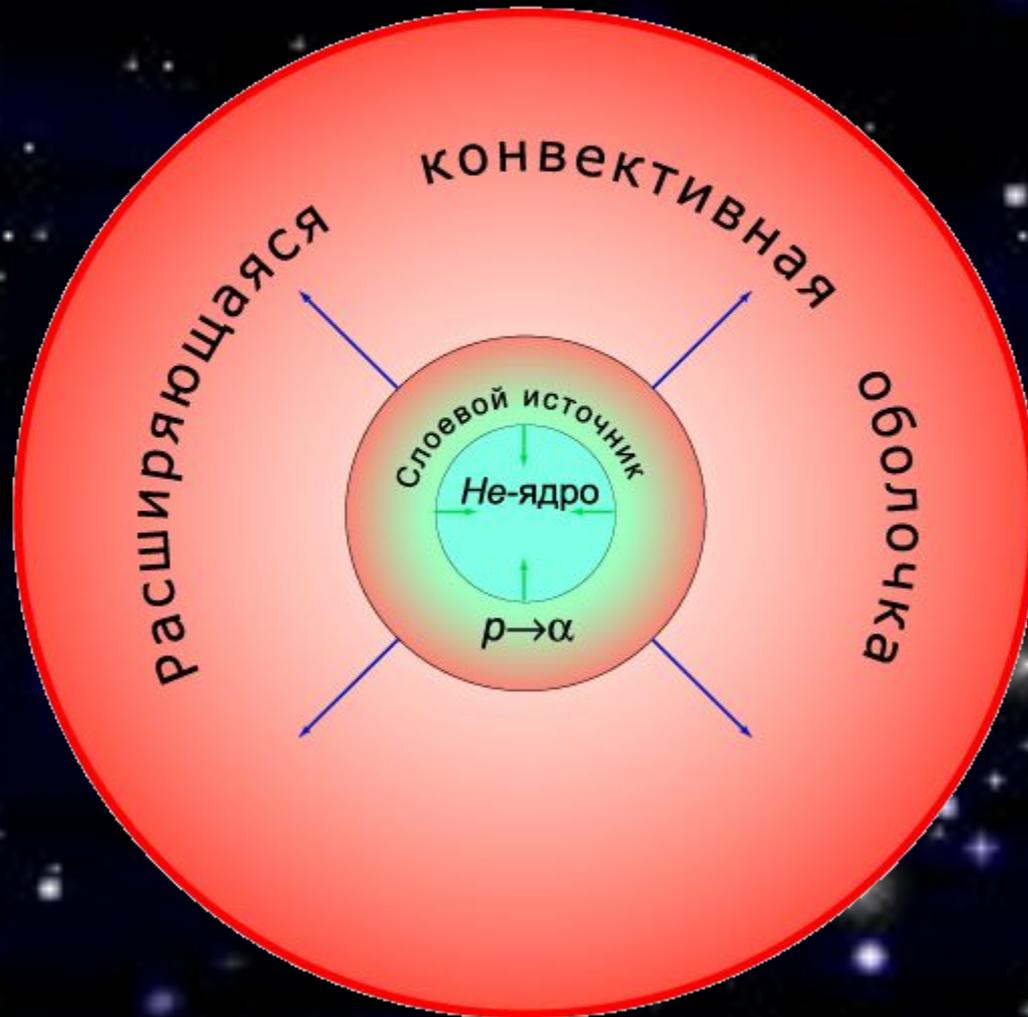


Рис. 245. Смещение звезд разной массы с главной последовательности с течением времени.

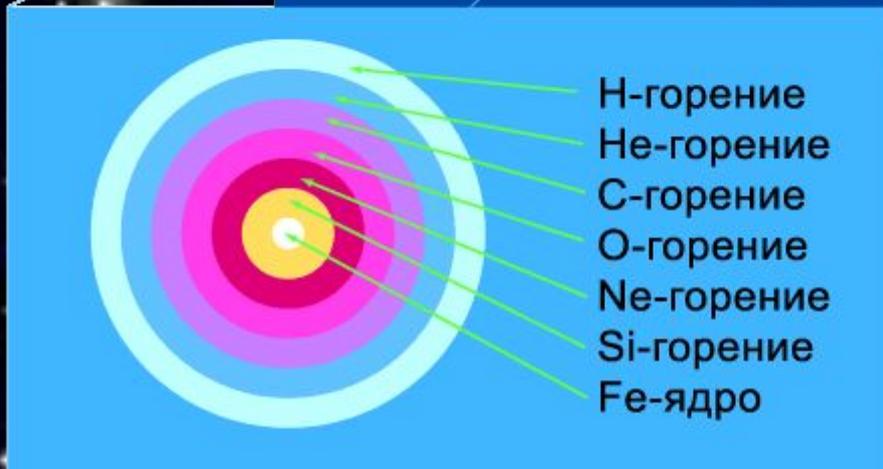
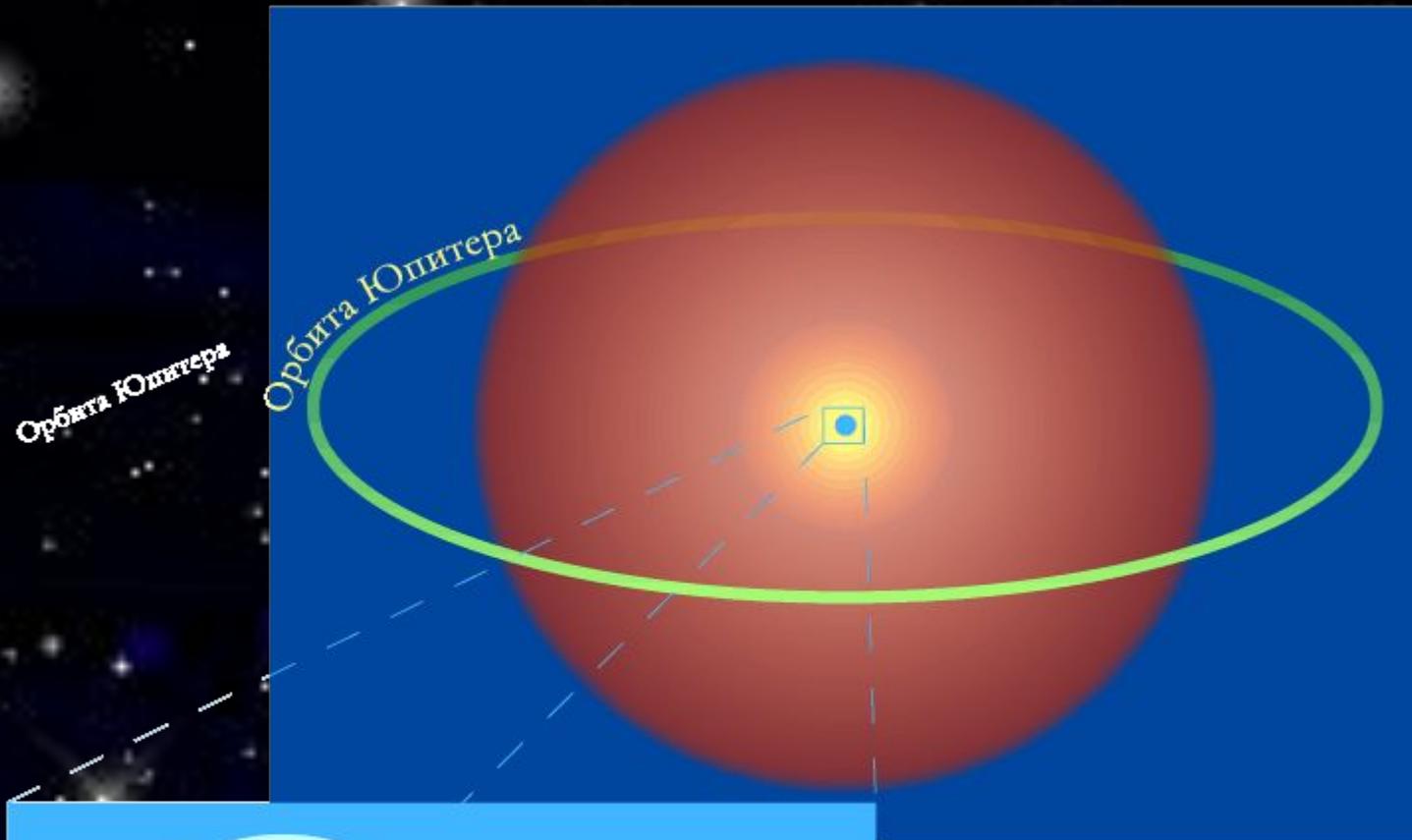




# Строение красного гиганта



# Строение сверхгиганта

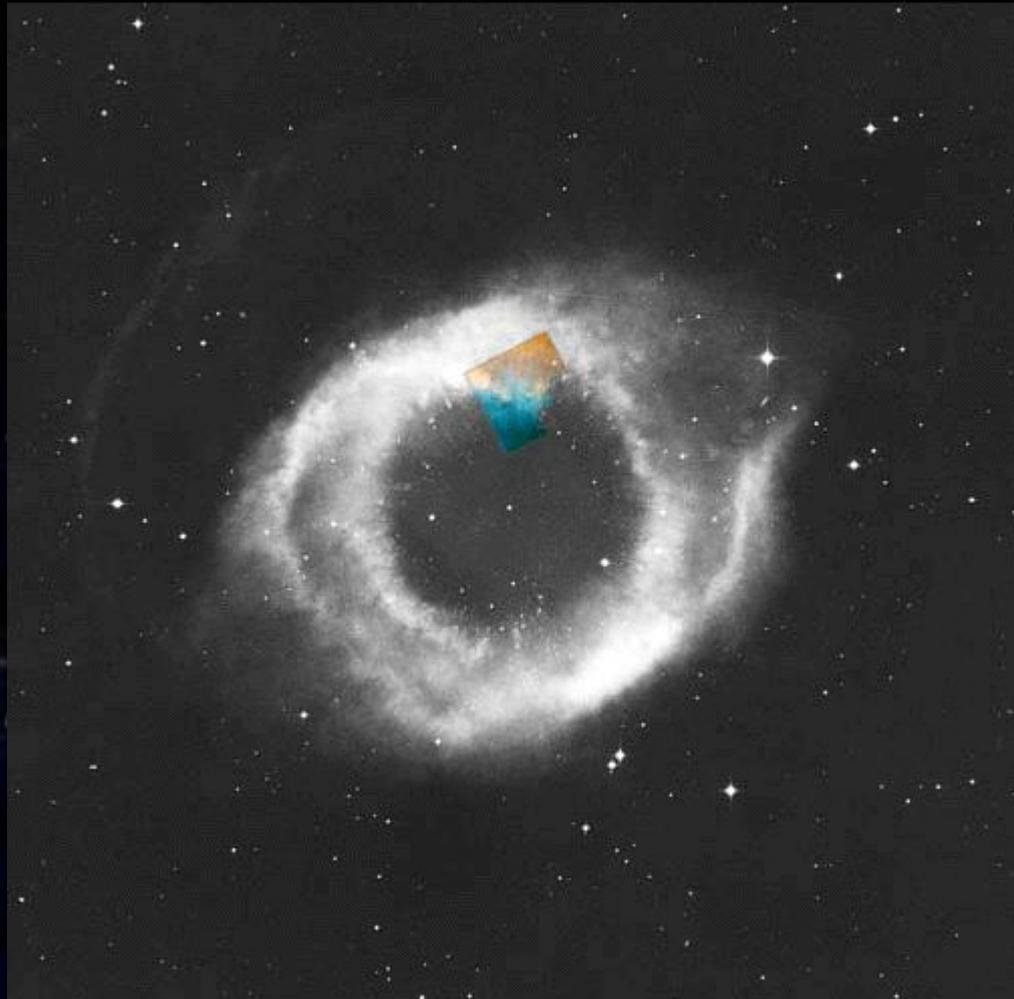


# Планетарные туманности

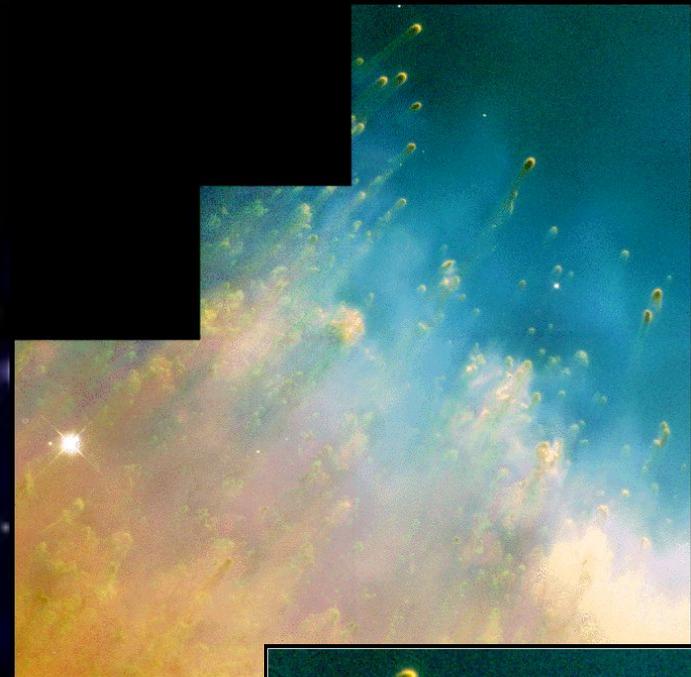


Планетарная туманность является сброшенными верхними слоями сверхгиганта. Свечение обеспечивается возбуждением газа ультрафиолетовым излучением центральной звезды.

Туманность излучает в оптическом диапазоне, газ туманности нагрет до температуры порядка 10000 К.



Helix Nebula • NGC 7293 • Las Campanas Observatory and HST  
Black & White: J. Bedke (CSC/STScI), Carnegie Institution of Washington  
Color Inset: C.R. O'Dell (Rice Univ.), NASA



Helix Nebula • NGC 7293  
PRC96-13a • ST ScI OPO • April 15, 1996



Helix Nebula Detail HST • WFPC2  
PRC96-13b • ST ScI OPO • April 15, 1996 • C.R. O'Dell (Rice Univ.), NASA

# Схема эволюции одиночной звезды

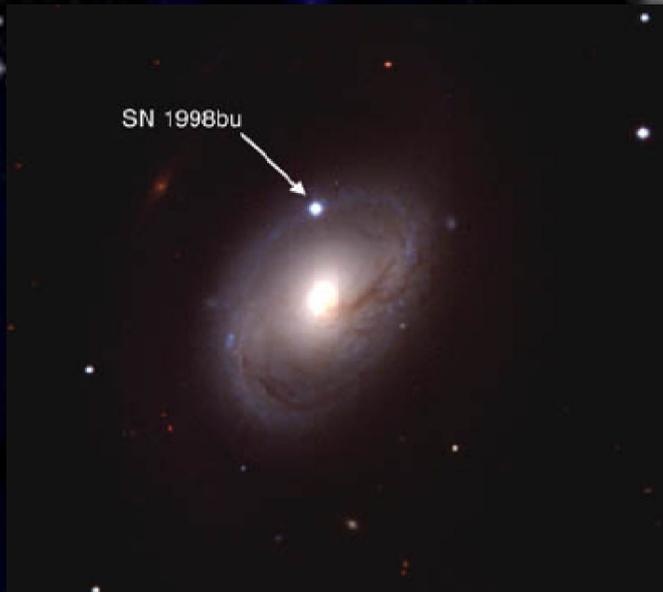
малые массы $0.08M_{\text{sun}} < M_* < 0.5M_{\text{sun}}$	умеренные массы $0.5M_{\text{sun}} < M_* < 8M_{\text{sun}}$		массивные звезды $8M_{\text{sun}} < M_* < 60-100M_{\text{sun}}$	
	$0.5M_{\text{sun}} < M_* < 3M_{\text{sun}}$	$3M_{\text{sun}} < M_* < 8M_{\text{sun}}$	$8M_{\text{sun}} < M_* < 10M_{\text{sun}}$	$M_* > 10M_{\text{sun}}$
горение водорода в ядре				
гелиевые бел. карлики	вырожд. Не ядро	невырожд. Не ядро		
	гелиевая вспышка			
спокойное горение гелия в ядре				
	СО белый карлик		вырожд. СО ядро	невырожд. СО ядро
			углеродная дет.	горение углерода в ядре. С в Fe
			горение углерода в ядре. С в O, Ne, Si, Fe, Ni.	
			O,Ne,Mg...белый карлик или нейтронная звезда	черная дыра

# Сверхновые

- Подавляющее большинство сверхновых (SN) можно классифицировать в один из двух типов: SNI и SNII. Главный признак, по которому ведется классификация, – наличие в оптическом спектре эмиссий водорода (тип SNI) или их отсутствие (тип SNII). Имеются различия в кривых блеска. Физически SNI и SNII – также разные типы объектов. Механизмы вспышек сверхновых до конца не ясны.

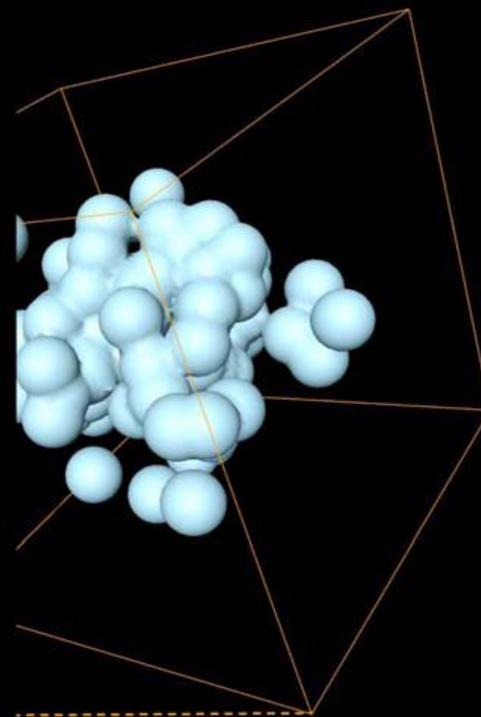
При достаточно большой плотности ядра давление электронного вырожденного газа становится неспособным противостоять дальнейшему сжатию, и свободные электроны соединяются с протонами, образуя нейтроны и испуская нейтрино. Нейтрино, которые испускаются прямо из ядра, способствуют дальнейшей потере им энергии и еще более быстрому коллапсу. Ядро коллапсирует столь стремительно (за время порядка секунды), что наружные слои звезды отстают от него. Когда ядро уменьшится до размера около 10 км, нейтронный газ станет вырожденным и резко остановит дальнейшее сжатие. Направленная наружу ударная волна увлечет оставшийся материал оболочки за собой, сжимая и нагревая его. Конечным результатом будет формирование нейтронной звезды или черной дыры в ядре и полный разрыв остатка звезды с высвобождением энергии порядка  $10^{53}$  эрг в нейтрино и  $10^{51}$  эрг в кинетической и световой энергии.

# Примеры сверхновых типа Ia





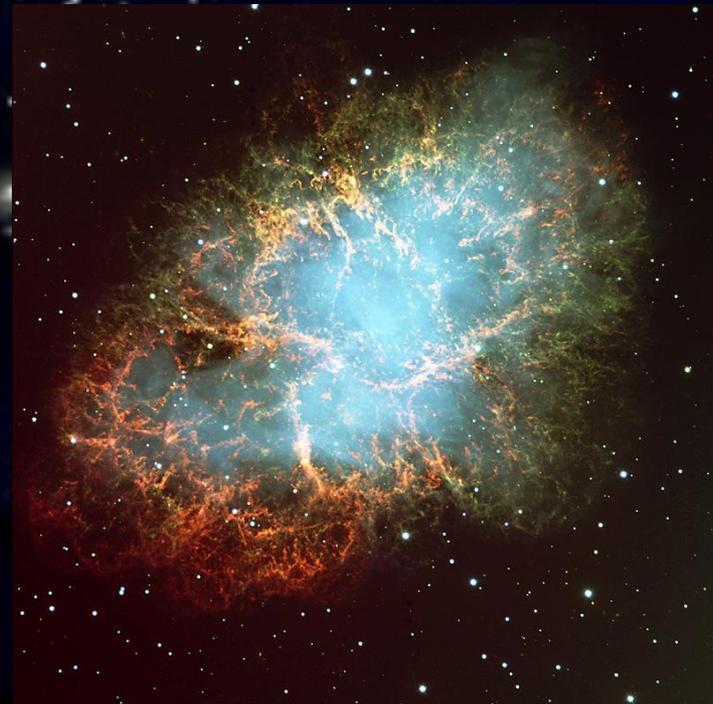
# Large-scale simulations



$t=0.006s$

Параметр	I тип	II тип
Амплитуда визуального блеска $\Delta m_V$	$>23^m$	$>23^m$
Абсолютная величина в максимуме блеска $M_{\max}$	$-16^m \dots -19^m$	$-16 \dots -18^m$
Энергия вспышки (эрг)	$10^{50}$	$10^{50} - 10^{51}$
Масса звезды-предшественника (масс Солнца)	$\sim 1.5$	$\sim 10$
Сброшенная масса (масс Солнца)	$\sim 0.5$	$\sim 1$
Скорость выброса (км/с)	15000–20000	$\sim 6000$
Локализация	Вспыхивают в галактиках всех типов	Вспыхивают только в спиральных галактиках (Sb, Sc)
Примеры остатков	Тихо (1572), Кеплера (1604), Краб, 1006 г. н.э.	Cas A(?)

Мультипликация NASA,  
показывающая взрыв звезды как  
сверхновой и превращение ее в  
пульсар.



The Crab Nebula in Taurus (VLT KUEYEN + FOR2)

ESO PR Photo 40f/99 (17 November 1999)

© European Southern Observatory



# Переменные звезды

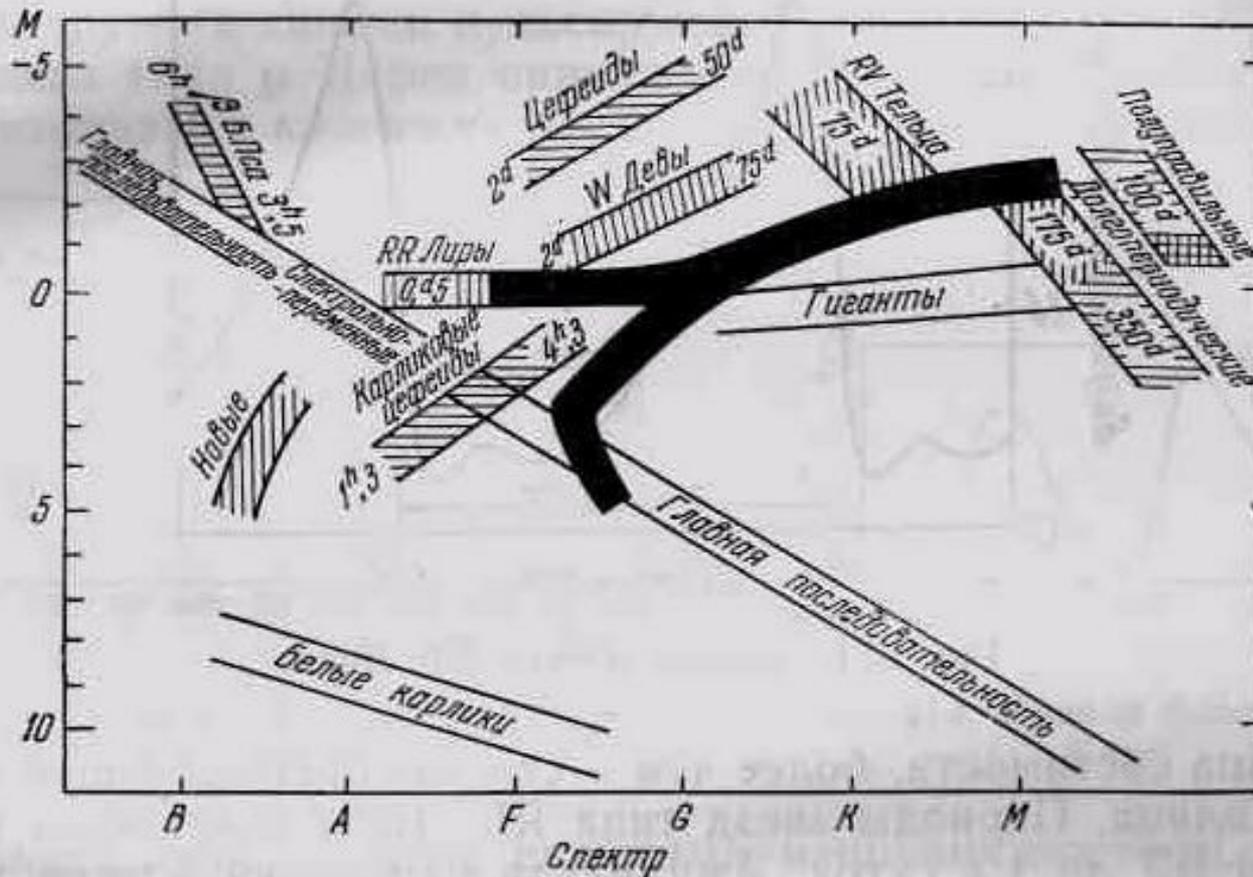


Рис. 210. Положение различных групп пульсирующих переменных на диаграмме Герцшпрунга — Рессела.

# Соотношение период-светимость

При определенных условиях в звезде развиваются автоколебательные процессы, приводящие к периодическому изменению ее светимости.

Механизм основан на изменении состояния ионизации гелия и, соответственно, - коэффициента непрозрачности (С.А. Жевакин).

Для цефеид существует связь между периодом и светимостью. Это позволяет достаточно надежно оценивать расстояния до этих звезд, что делает их «маяками Вселенной».

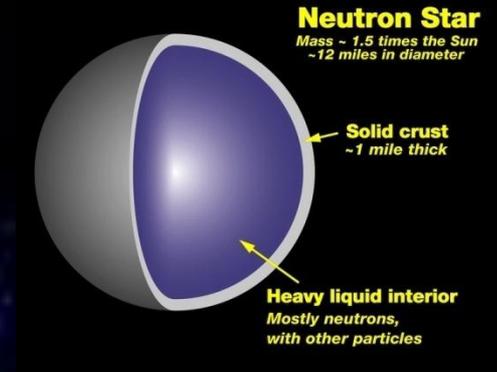
# Нейтронные звезды

При больших плотностях из-за вырождения могут идти процессы нейтронизации:



Пороговые энергии для разных элементов различны.

При массах ядра звезды больше Чандрасекаровского предела ( $\sim 1.2$  массы Солнца), но меньше  $\sim 2.5$  солнечных после исчерпания значительной части ядерного горючего происходит катастрофический коллапс и образуется нейтронная звезда (размер  $\sim 10$  км). Нейтронные звезды были открыты в 1967 г. (пульсары).

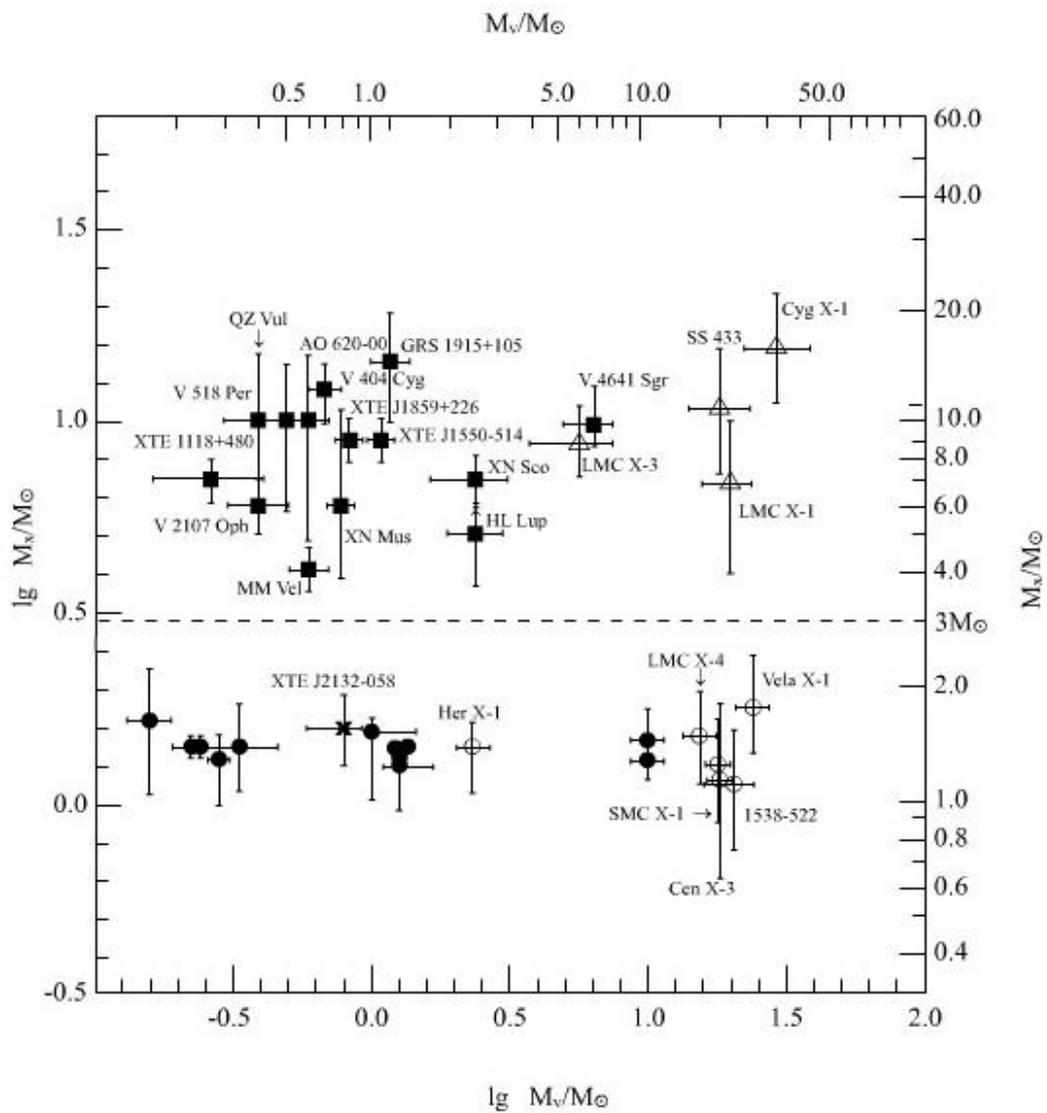


# Черные дыры

$$a = \frac{2GM}{c^2} = r_g$$

Гравитационный радиус (радиус Шварцшильда)

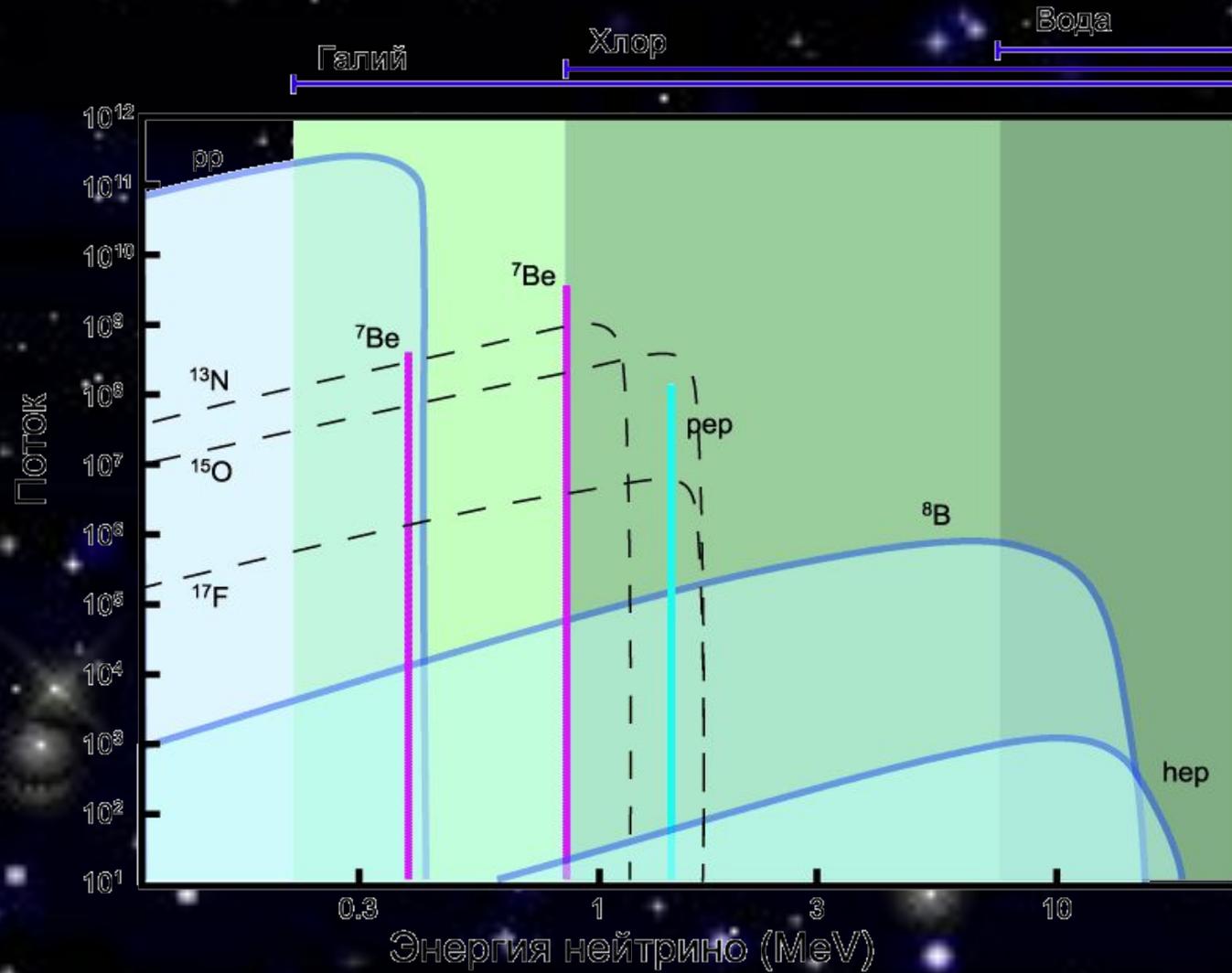
Для Солнца  $r_g = 3$  км.



# Проблема солнечных нейтрино и нейтринная астрономия

- Количество нейтрино, излучаемое Солнцем за секунду, определяется только светимостью Солнца, т.к. при выделении 26.7 МэВ рождается 2 нейтрино. Выполненные к настоящему времени измерения дают величину потока нейтрино от Солнца заметно меньше ожидаемой.

# Области чувствительности различных типов детекторов

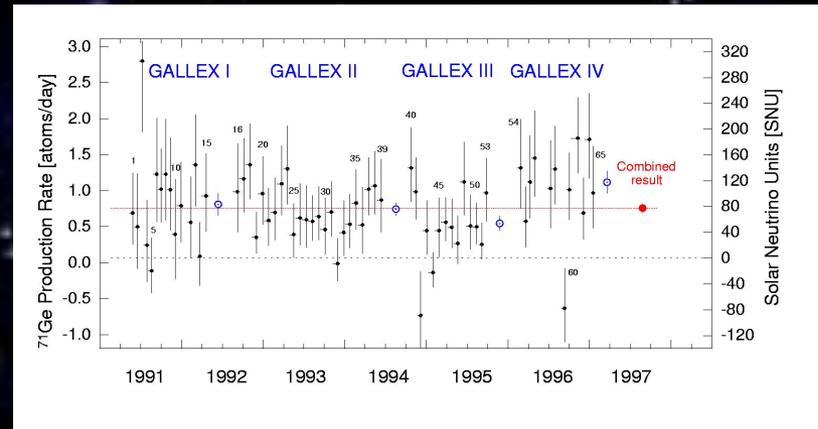
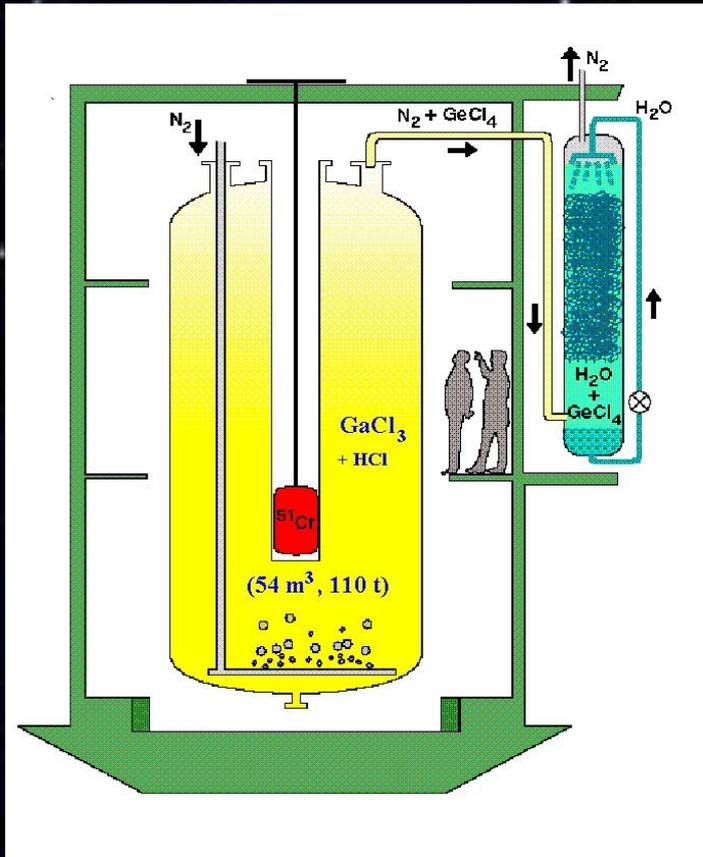


# Баксанская нейтринная обсерватория



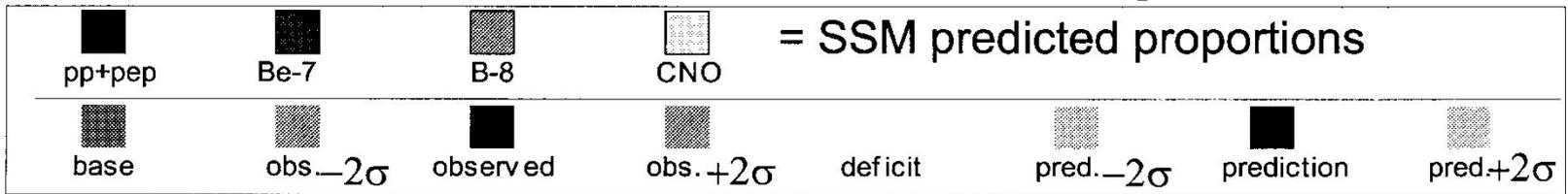
Подземная лаборатория галлий-германиевого нейтринного телескопа (ГГНТ) для детектирования солнечных нейтрино с мишенью из 60 тонн металлического галлия, расположенного на расстоянии 3,5 км от входа в тоннель.

# GALLEX

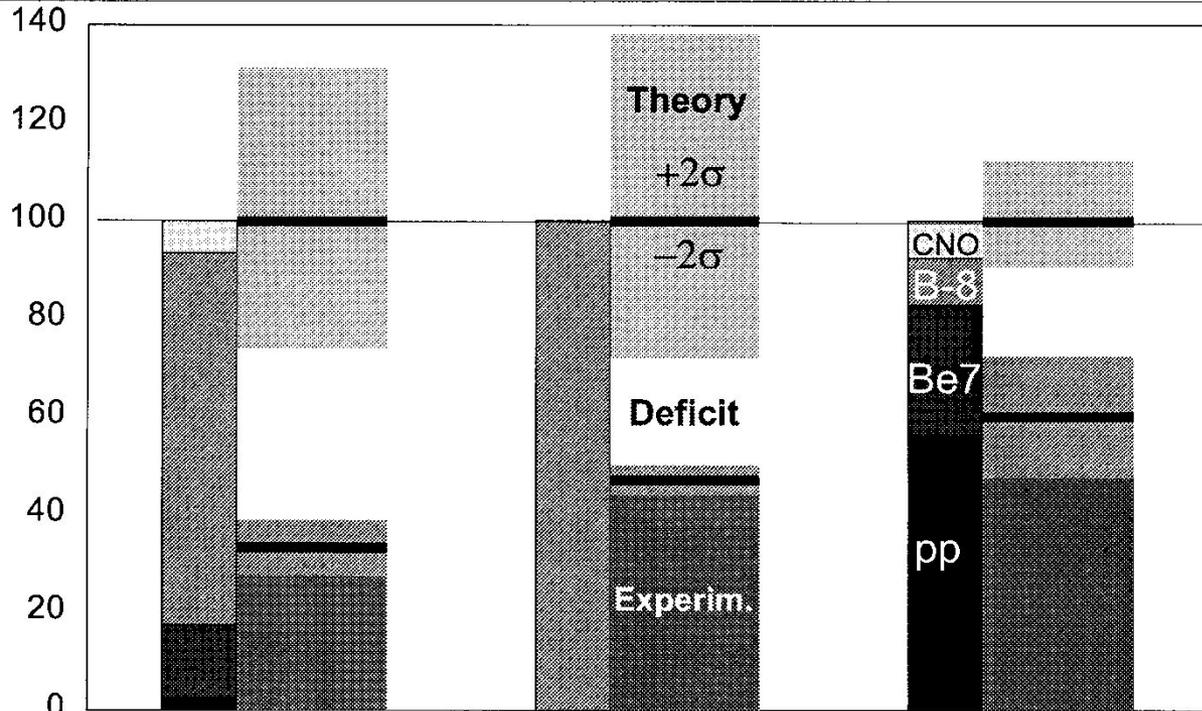


**Result: 77.5 SNU**  
**SSM prediction: 129 SNU**

# Results of Solar Neutrino Experiments



Percent of SSM-prediction



Homestake

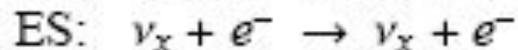
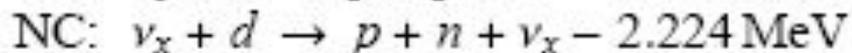
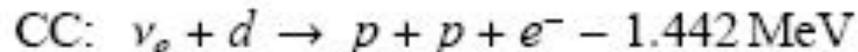
S.-Kamiok.

Gallex

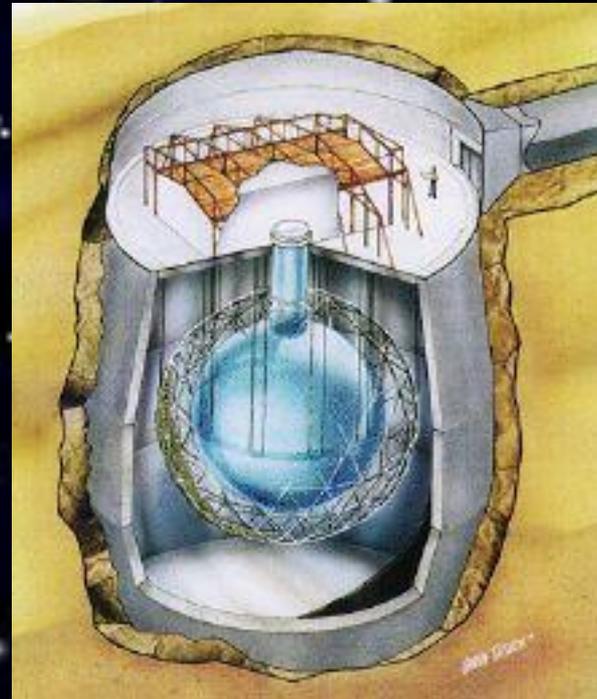
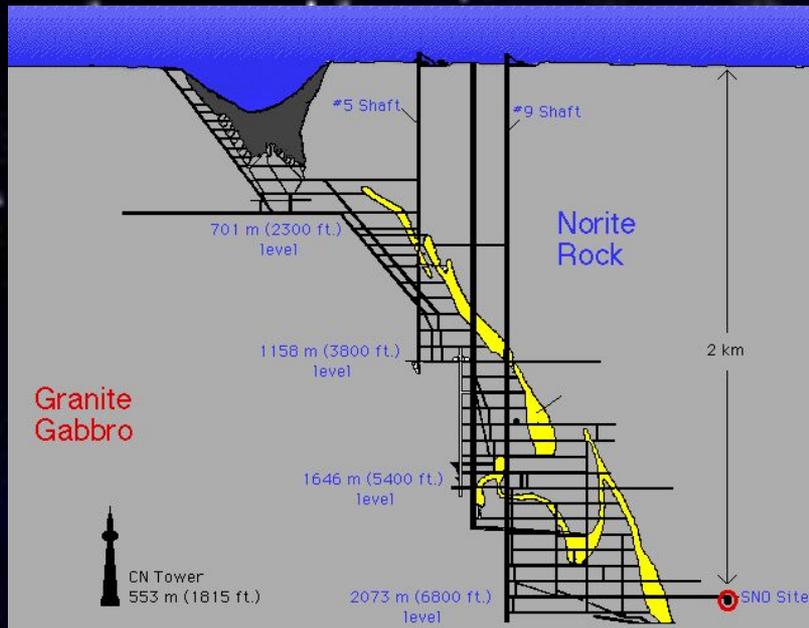
$2\sigma$

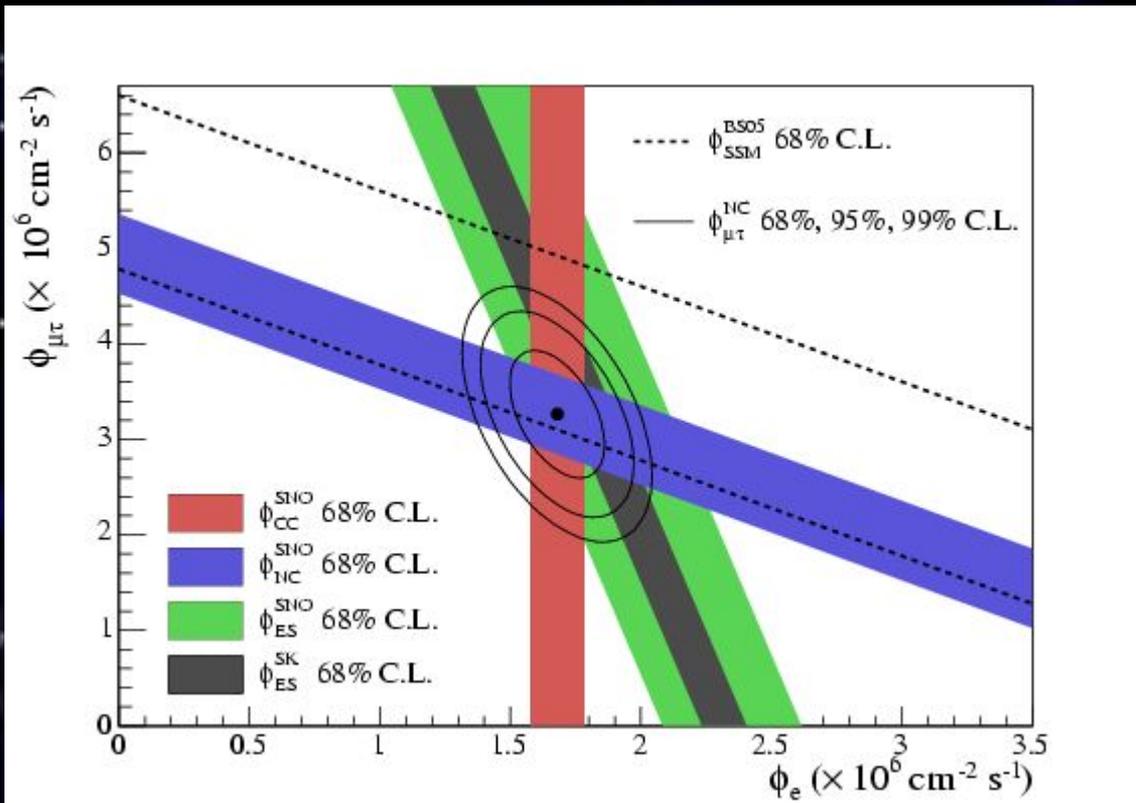
# Нейтринная обсерватория в Садбери

- Нейтринная обсерватория в Садбери (Онтарио, Канада) (Sudbury Neutrino Observatory (SNO)) была построена в шахте на глубине 2070 метров. 1000 тонн сверхчистой тяжелой воды ( $D_2O$ ) залито в акриловый сосуд диаметром 12 метров. Черенковское излучение регистрируется 9600 фотоумножителями. Детектор погружен в сверхчистую обычную воду, которая находится в бочкообразной полости диаметром 22 метра и высотой 34 метра, выкопанной в скале. За сутки детектор регистрирует около 10 нейтринных событий.
- Нейтринные потоки "борных" нейтрино, детектировались с помощью реакций (первая реакция (CC), протекающая с участием заряженных токов, чувствительна только к электронным нейтрино; вторая (NC), протекающая с участием нейтральных токов чувствительна ко всем нейтрино; упругое рассеяние (ES) чувствительно ко всем ароматам нейтрино, но к мюонным и тау в меньшей степени):

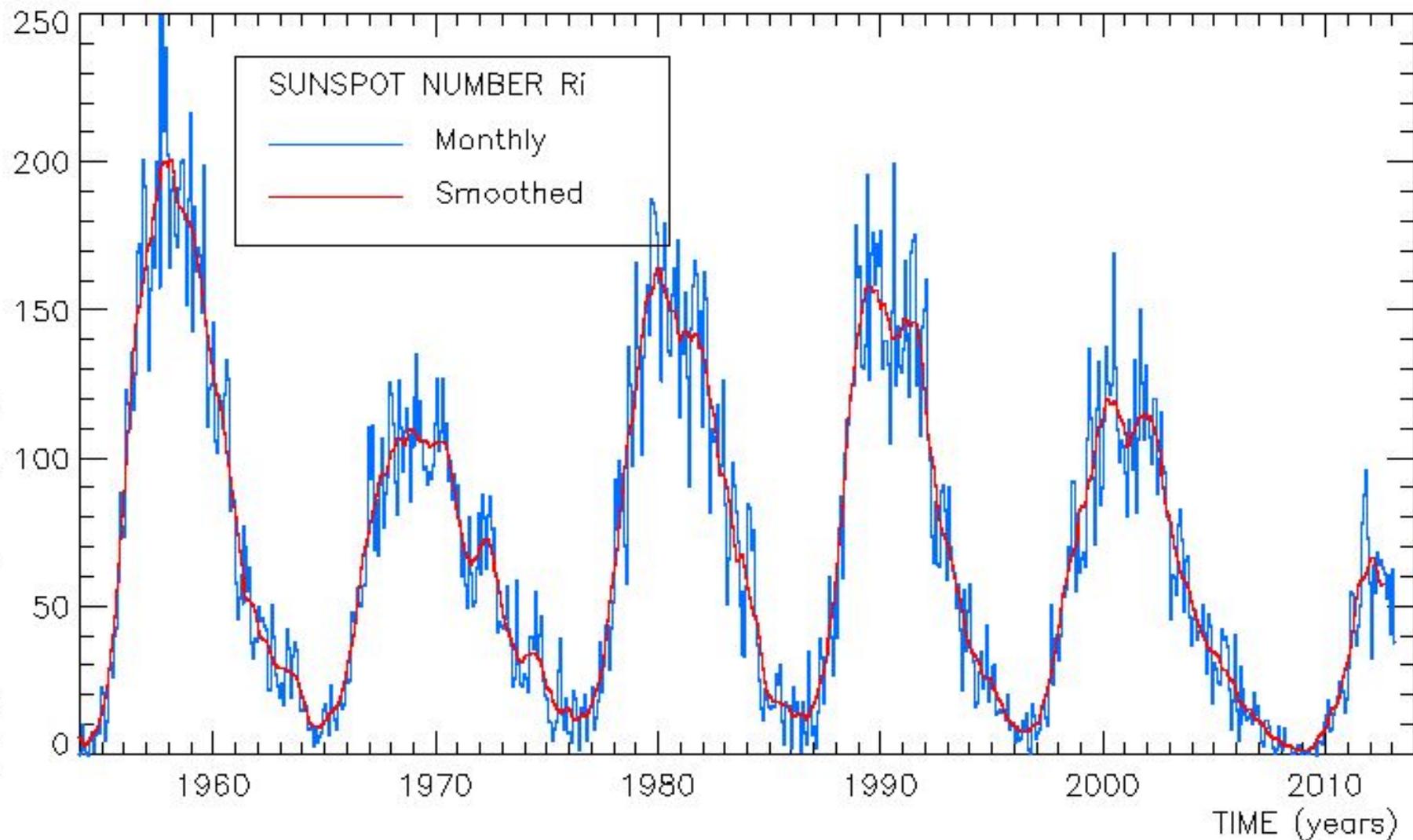


# Нейтронная обсерватория в Садбери





# Циклы солнечной активности



(<http://www.sidc.be>, Mar 1, 2013)

# Циклы солнечной активности

