

# СТРОЕНИЕ И ЭВОЛЮЦИЯ ЗВЁЗД

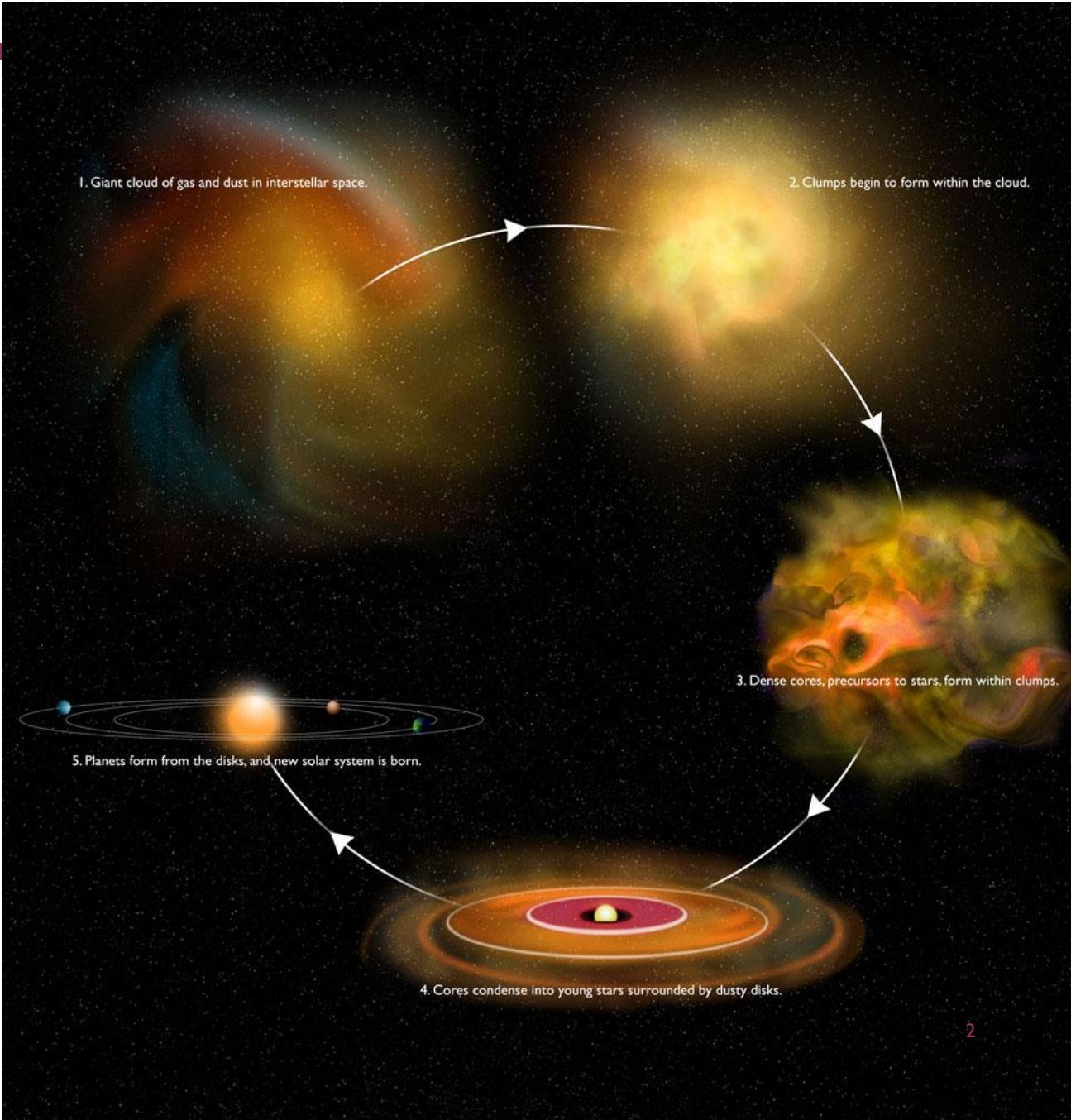
АНТОН БИРЮКОВ. МОДУЛЬ «АСТРОФИЗИКА», ОСЕНЬ 2022. ФАКУЛЬТЕТ ФИЗИКИ ВШЭ.

# ФОРМИРОВАНИЕ ЗВЁЗДЫ

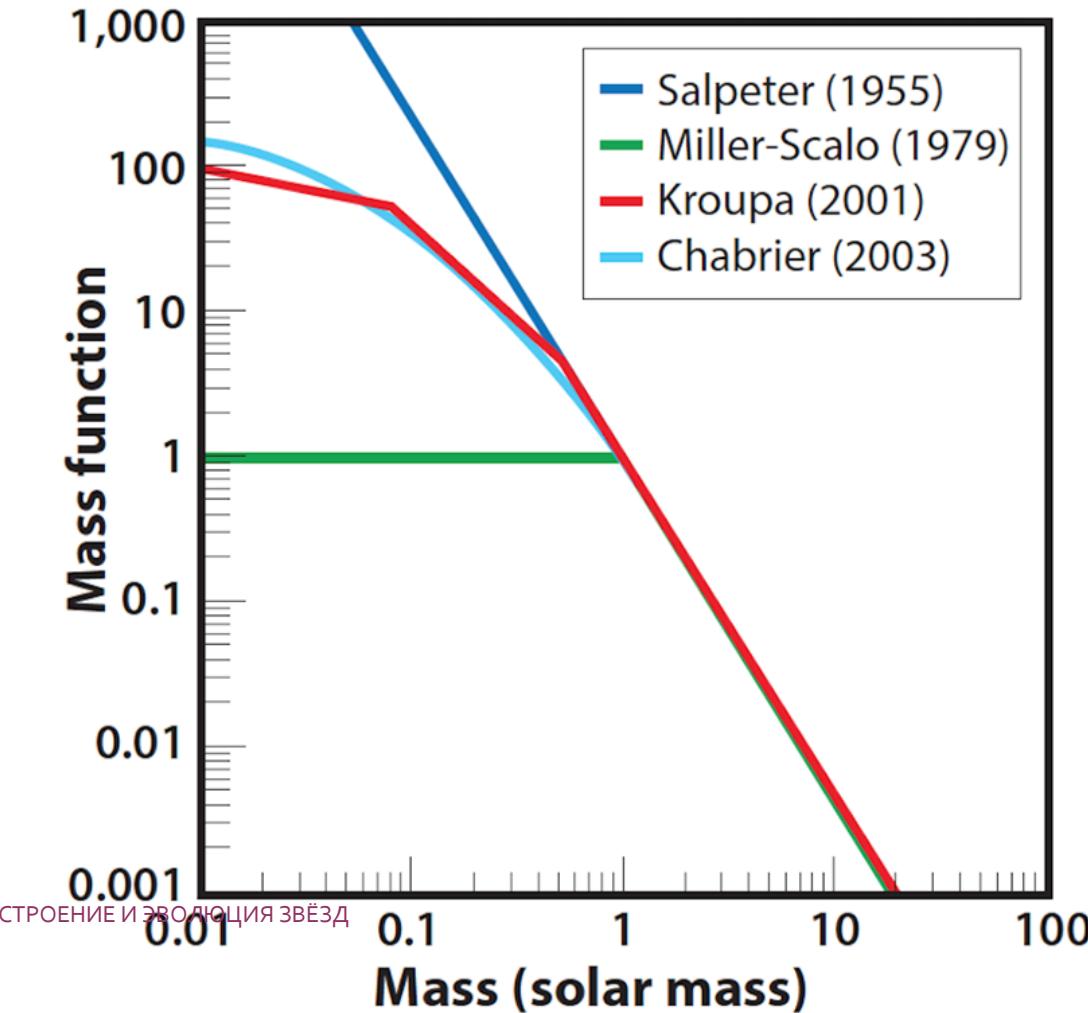
- Звёздообразование запускается при достижении облаком джинсовской массы:

$$M_J \propto T^{3/2} \rho^{-1/2}$$

- По ходу сжатия возможна (и скорее наступает) фрагментация облака из-за повышения плотности.
- Условие возможности фрагментации: показатель адиабаты  $< 4/3$



# РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЗВЁЗД ПО НАЧАЛЬНЫМ МАССАМ



Функция масс Солпитера (Salpeter, 1955):

$$\xi(M) = \xi_0 M^{-2.35}$$

$$N(M_1 \dots M_2) = \xi_0 \int_{M_1}^{M_2} \xi(M) dM$$

# ЖИЗНЬ ЗВЕЗДЫ

«Жизнь звезды – это постоянная борьба  
силы тяжести и силы газового давления»  
(Иосиф Шкловский)



## НА ДАЛЕКОЙ ПЛАНЕТЕ ВЕНЕРЕ

На далекой планете Венере  
Солнце пламенней и золотистей.  
На Венере, ах, на Венере  
У деревьев синие листья...

Эти стихи написаны сорок лет назад русским поэтом Гумилевым. Синие листья Гумилева — это поэтическая метафора. Он был прекрасным поэтом, но не мог предвидеть появления новой науки — астроботаники. Согласно основоположнику этой науки Г. А. Тихову, «синие листья» долж-

Что же произошло в науке?

Как хорошо всем известно, Венера покрыта густым слоем облаков. Пелена облаков там настолько плотная, что поверхность планеты совершенно под ней не видна. По этой причине астрономы почти ничего не знали о физических условиях, господствующих на поверхности Венеры. Неизвестен и до сих пор даже период ее вращения вокруг сво-

Профессор И. ШКЛОВСКИЙ Всякое нагретое тело, как известно, излучает широкий спектр электромагнитных волн, в том числе и радиоволны. Поэтому, зная поток радиоизлучения от Венеры, а также расстояние до нее и размеры планеты, можно по известным простым формулам физики определить температуру излучающей поверхности. Результаты оказались поразительными. По наблюдениям на волнах 3 и 10

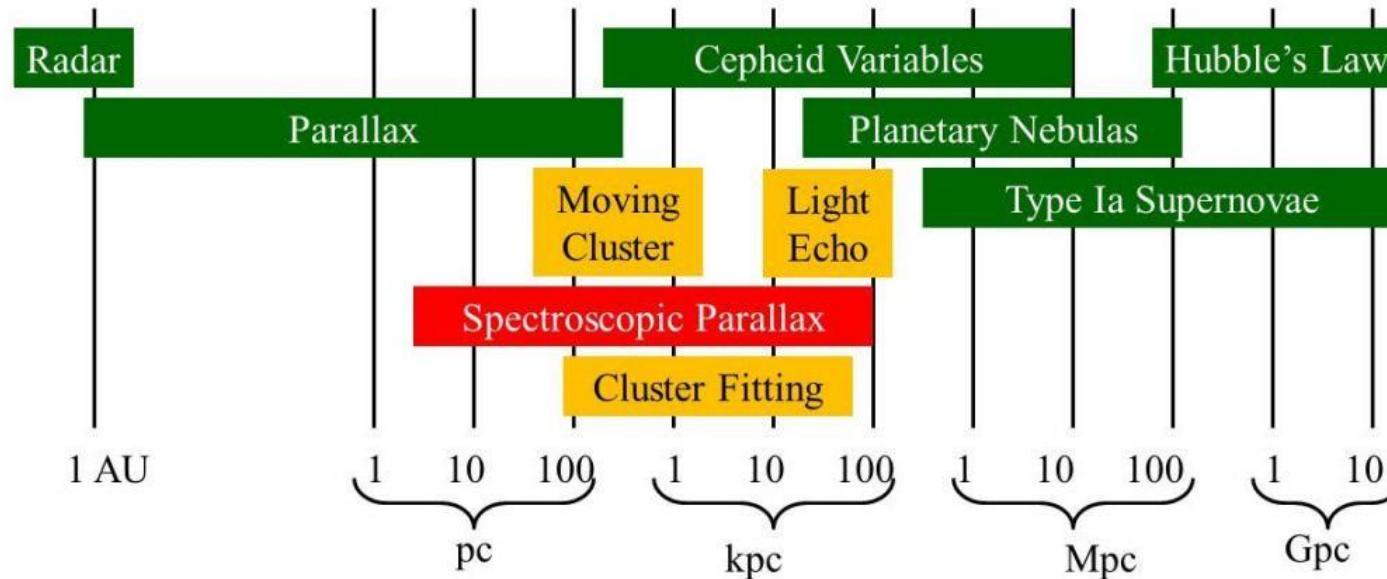
и речи о том, что на поверхности планеты есть моря.

Какой же мрачный это мир! Раскаленные скалы, полное отсутствие водоемов, углекислая плотная атмосфера и пелена облаков, закрывающая все небо. Сквозь нее не видно ни солнца, ни звезд, что и говорить — картина совсем не такая радостная, как она рисовалась поэту, чьими стихами мы начали эту статью.

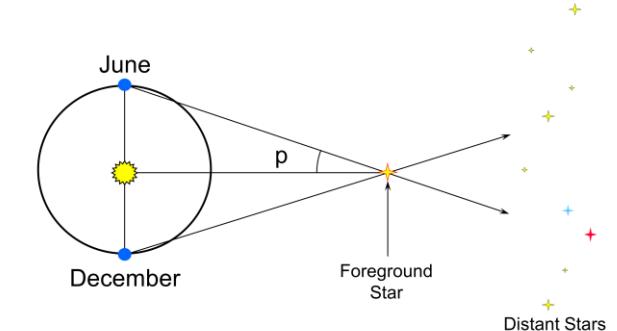
Как непохожи эти две соседние

# РАССТОЯНИЯ ДО ЗВЁЗД

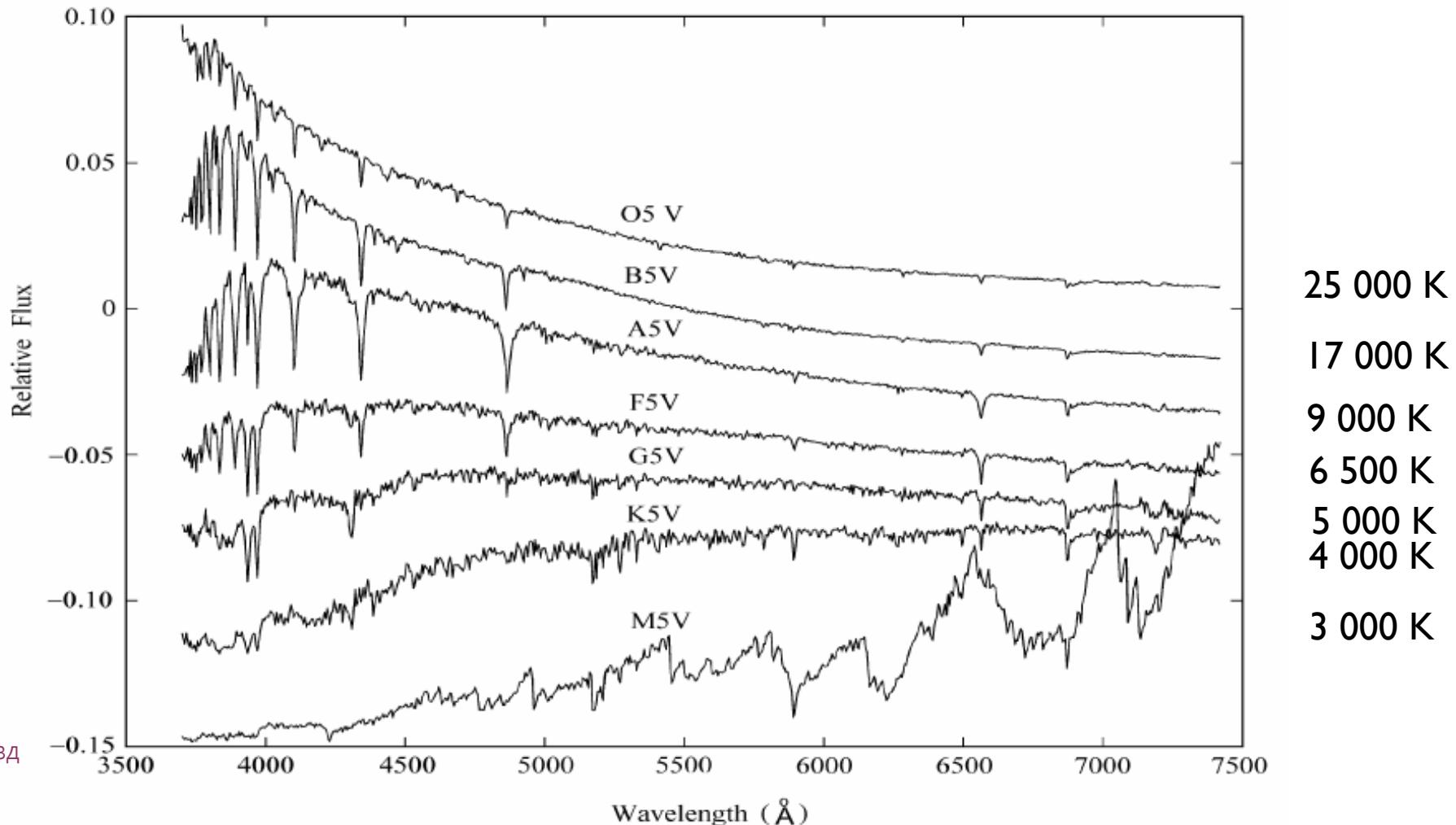
## The Cosmic Distance Ladder:



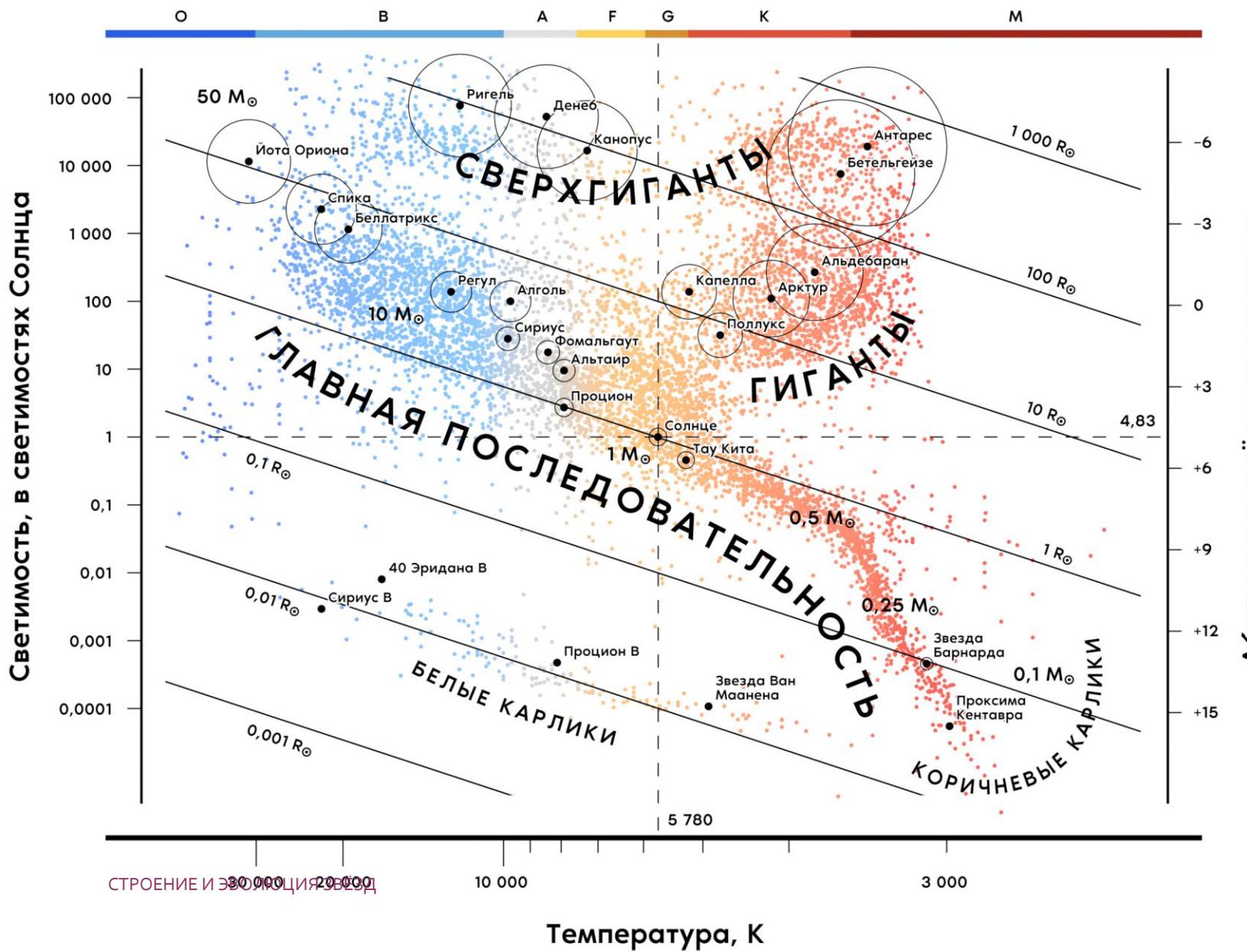
Method of Trigonometric Parallaxes



# СПЕКТРЫ ЗВЁЗД

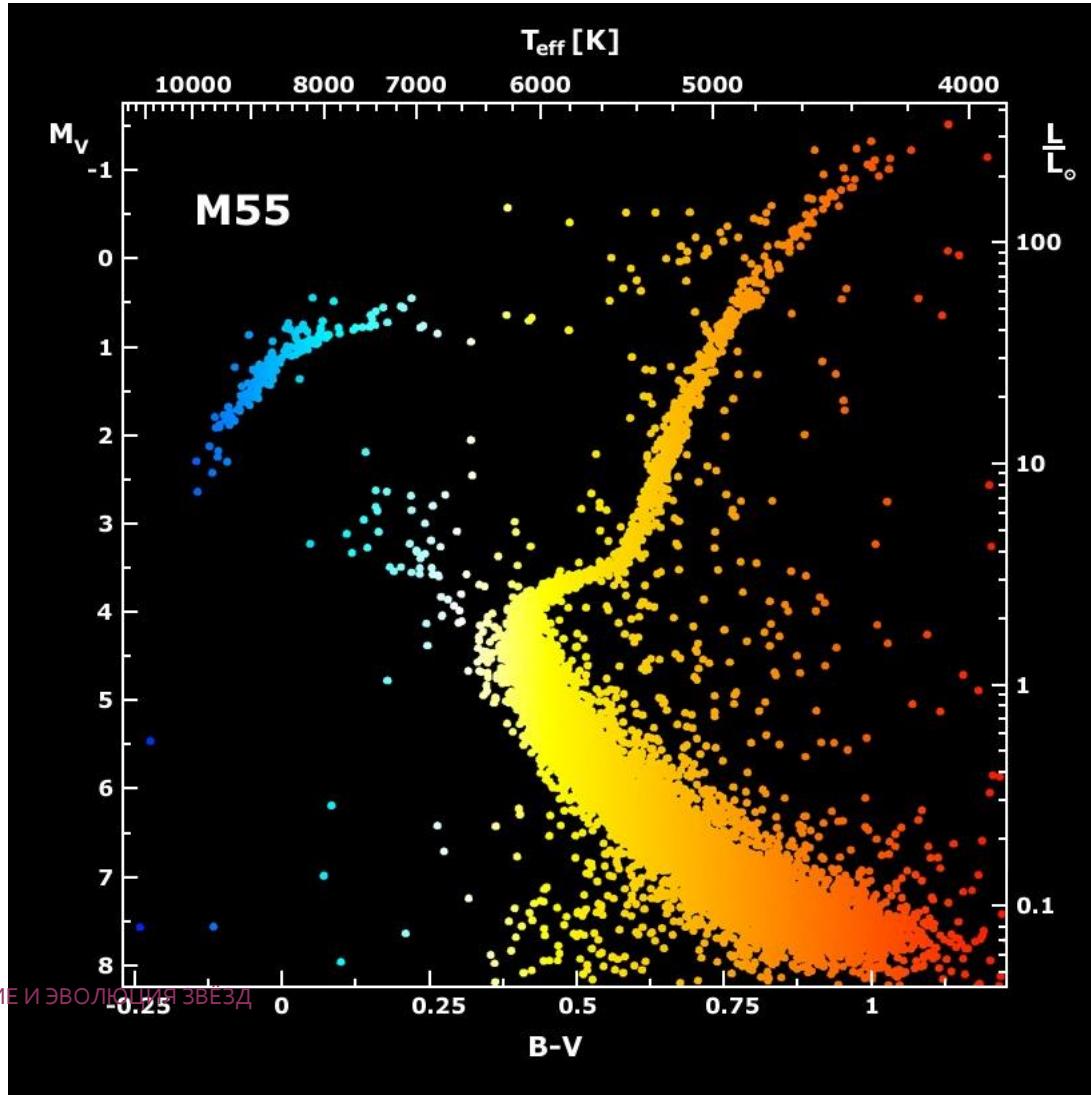


## Спектральный класс



- Температуры определяются по спектрам.
- Для определения светимости необходимо знать расстояние (в идеале – по параллаксу), а также учесть межзвездное поглощение.
- Самые легкие звезды имеют массу 0.08 солнечных.
- Самые тяжелые из образующихся сейчас около 100-200 солнечных.
- С ростом массы резко растет светимость.
- Время жизни тем больше, чем меньше масса звезды.

# ДИАГРАММА ГЕРЦШПРУНГА-РАССЕЛА ДЛЯ СКОПЛЕНИЯ



СТРОЕНИЕ И ЭВОЛЮЦИЯ ЗВЁЗД

Все звёзды скопления имеют  
примерно один возраст.

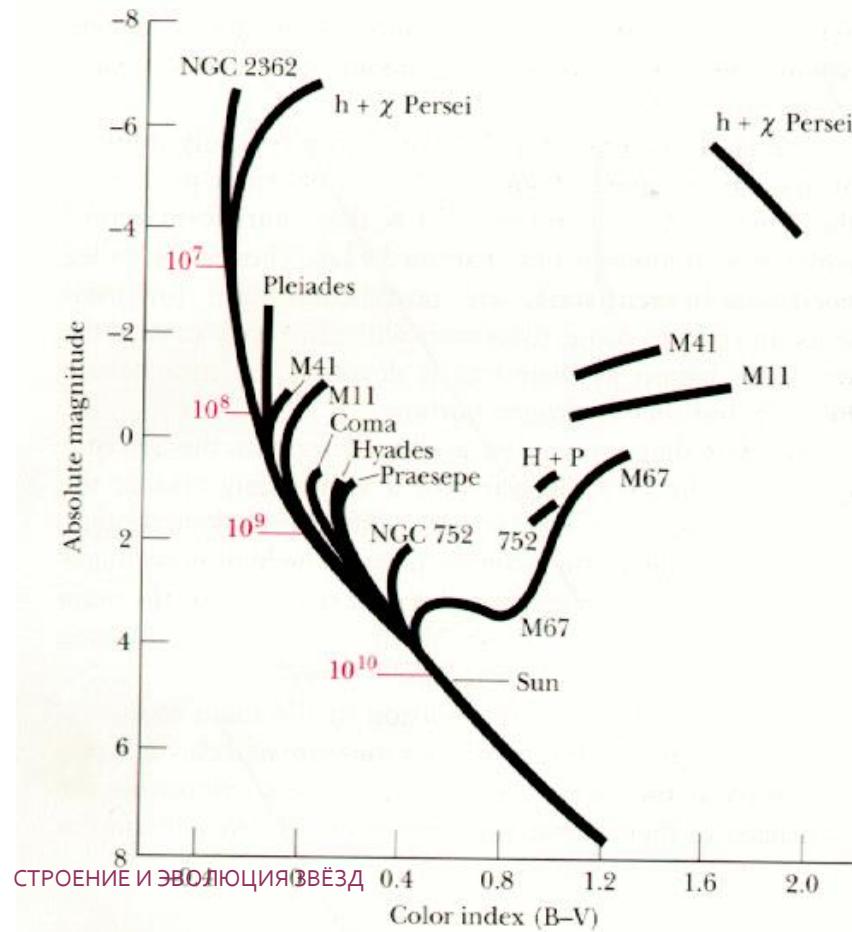


8

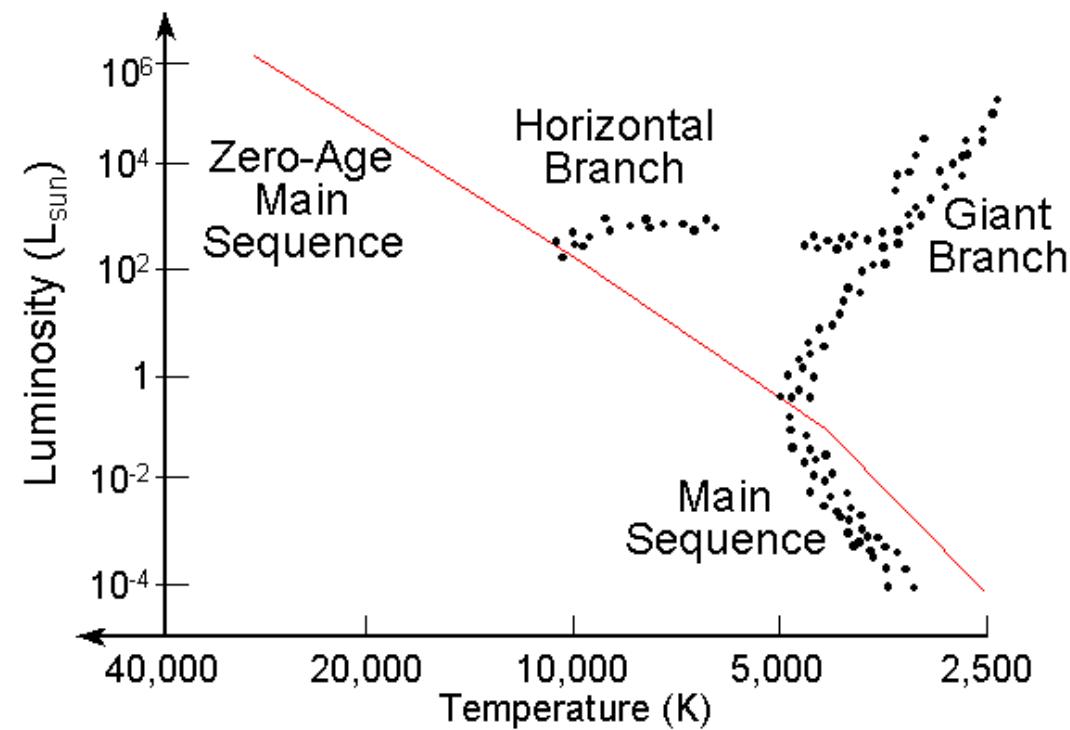
$$L_\odot = 4 \cdot 10^{26} \text{ Вт} = 4 \cdot 10^{33} \text{ эрг/с}$$

# ДИАГРАММА ГЕРЦШПРУНГА-РАССЕЛА ДЛЯ СКОПЛЕНИЙ

ГР-диаграммы для рассеянных скоплений

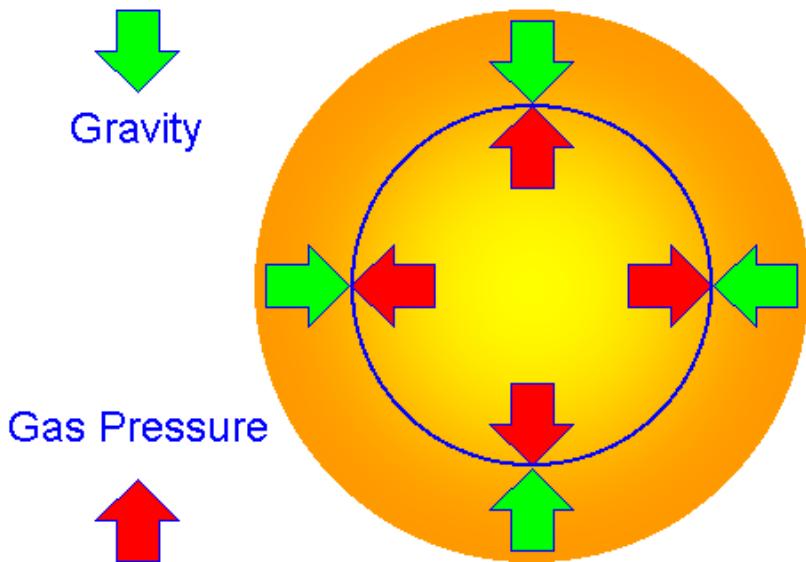


Typical Globular Cluster H-R Diagram



# УСТОЙЧИВОСТЬ ЗВЕЗДЫ

## Hydrostatic Equilibrium



$$\rho \frac{d^2 r}{dt^2} = -G \frac{M_r \rho}{r^2} - \frac{dP}{dr}$$

DENSITY

ACCELERATION

GRAVITATIONAL CONSTANT

MASS WITHIN A SPHERE OF RADIUS  $r$

PRESSURE GRADIENT

# ПРОСТЕЙШАЯ МОДЕЛЬ

$$\frac{dr}{dm} = \frac{1}{4\pi r^2 \rho}$$

- Сохранение массы

$$\frac{dP}{dm} = -\frac{Gm}{4\pi r^4}$$

- Гидростатическое равновесие

$$\frac{dl}{dm} = \epsilon_{\text{нuc}}$$

- Сохранение энергии

$$\frac{dT}{dm} = -\frac{Gm}{4\pi r^4} \frac{T}{P} \nabla$$

СТРОЕНИЕ И ЭВОЛЮЦИЯ ЗВЁЗД

- Тепловое равновесие, причём  $\nabla = \frac{\partial \ln T}{\partial \ln P}$

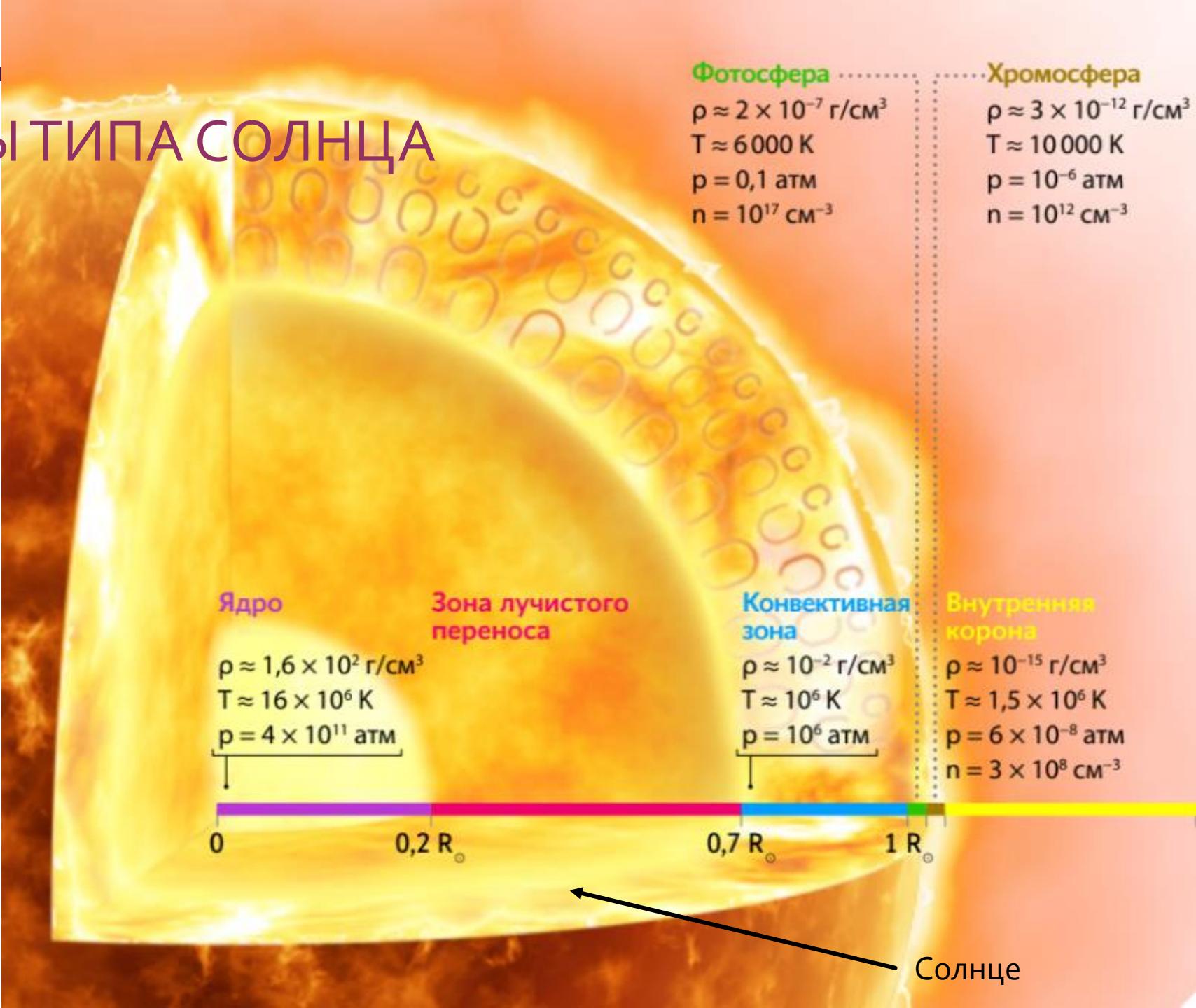
$$\text{Уравнение состояния: } P = K \rho^{1+\frac{1}{n}}$$

$n$  – показатель политропы

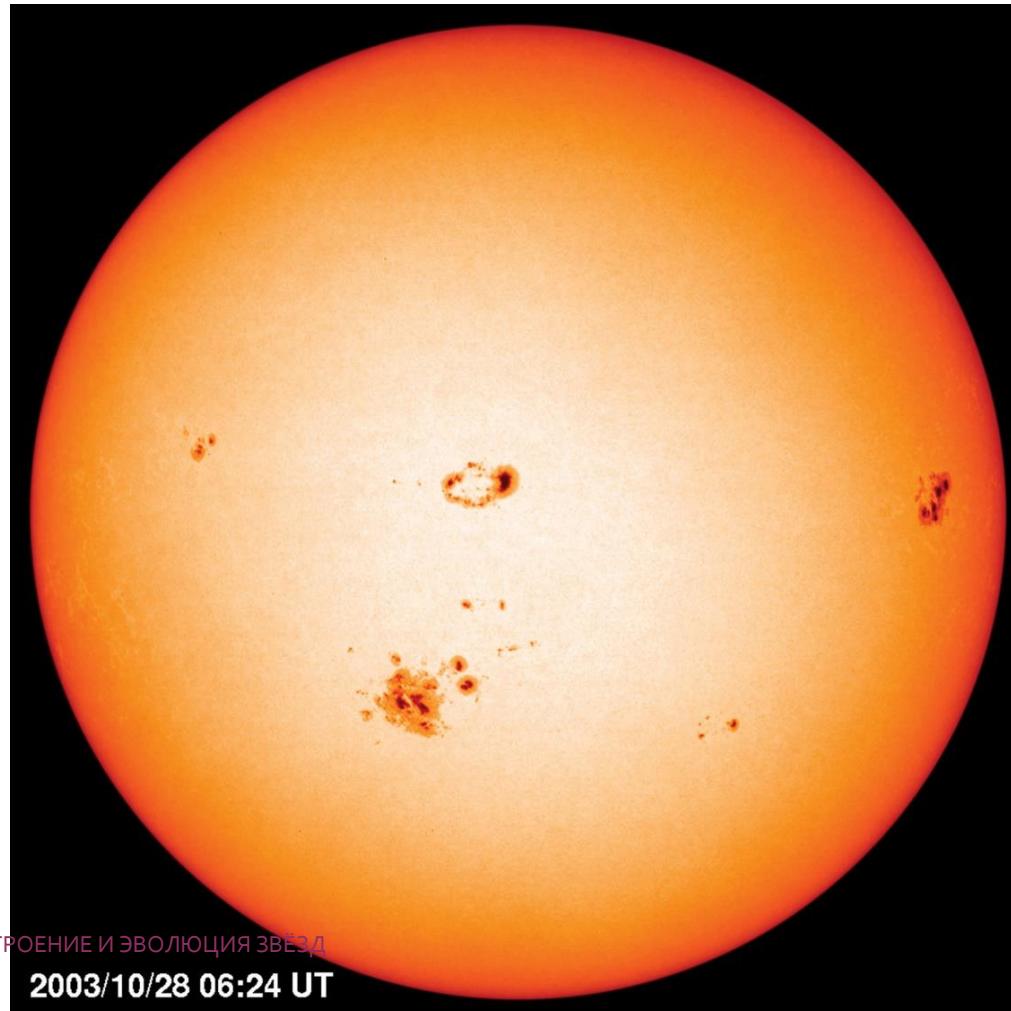
$n$	Где?
0	Твёрдые планеты
0.5...1	Нейтронные звёзды
1.5	Планеты гиганты и коричневые карлики, конвективные ядра звёзд, нерелятивистские белые карлики, звёзды главной последовательности.
3	Релятивистские белые карлики, звёзды главной последовательности.

# СТРУКТУРА ЗВЕЗДЫ ТИПА СОЛНЦА

- Зона лучистого переноса
- Конвективная зона
- Зона энерговыделения  
(может быть конвективной, а  
может быть лучистой)

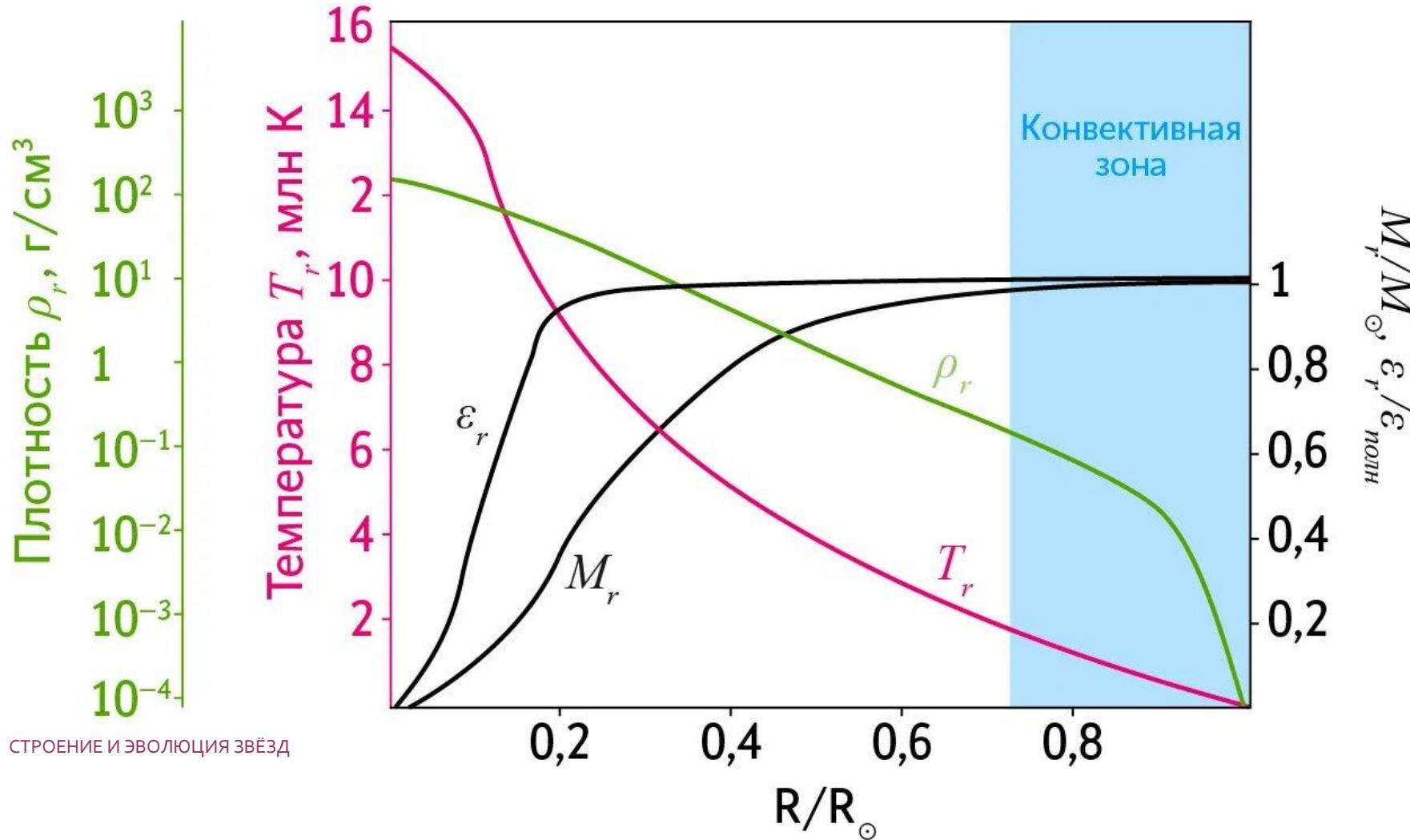


# ПАРАМЕТРЫ СОЛНЦА – «ТИПИЧНОЙ» ЗВЕЗДЫ

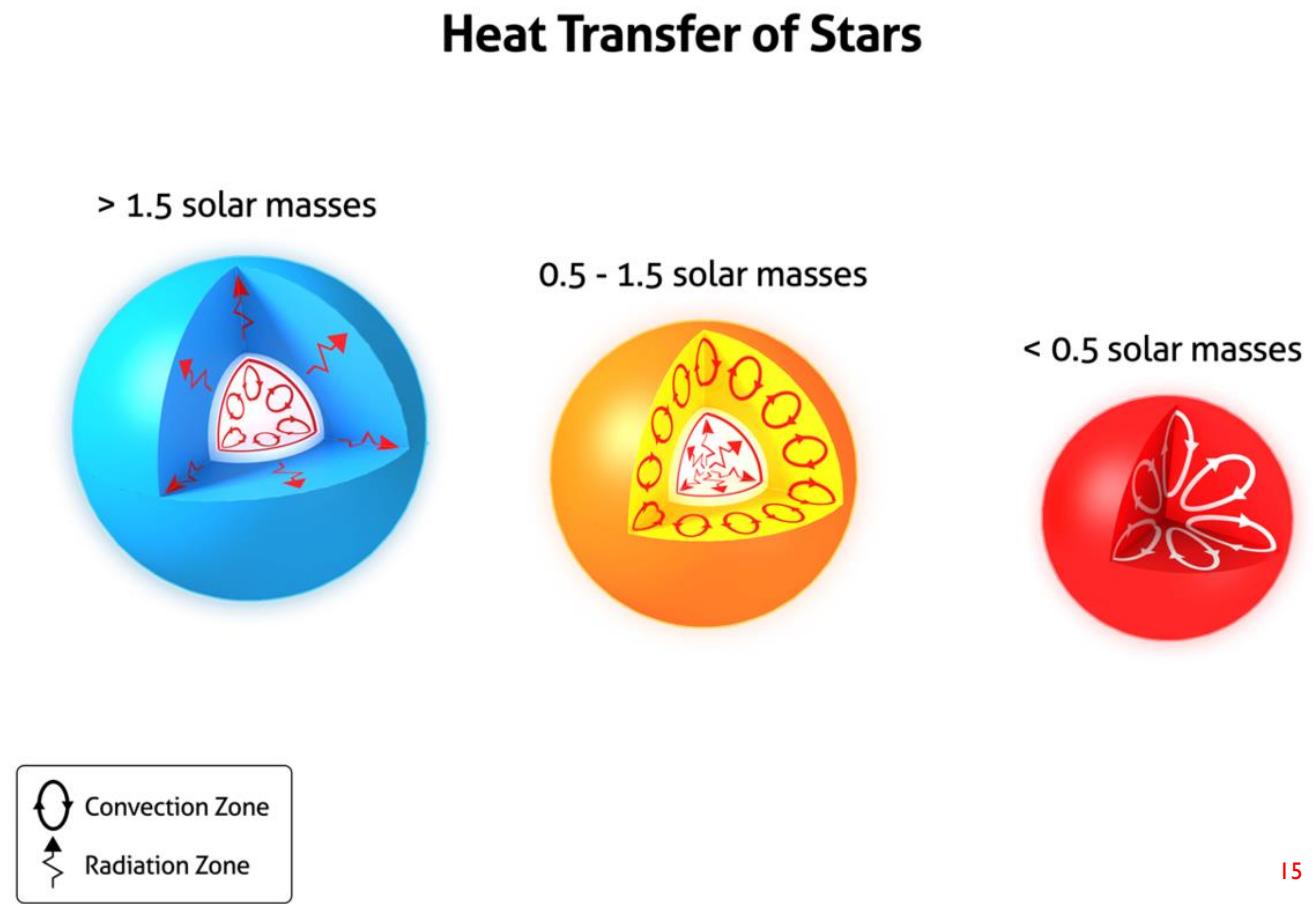
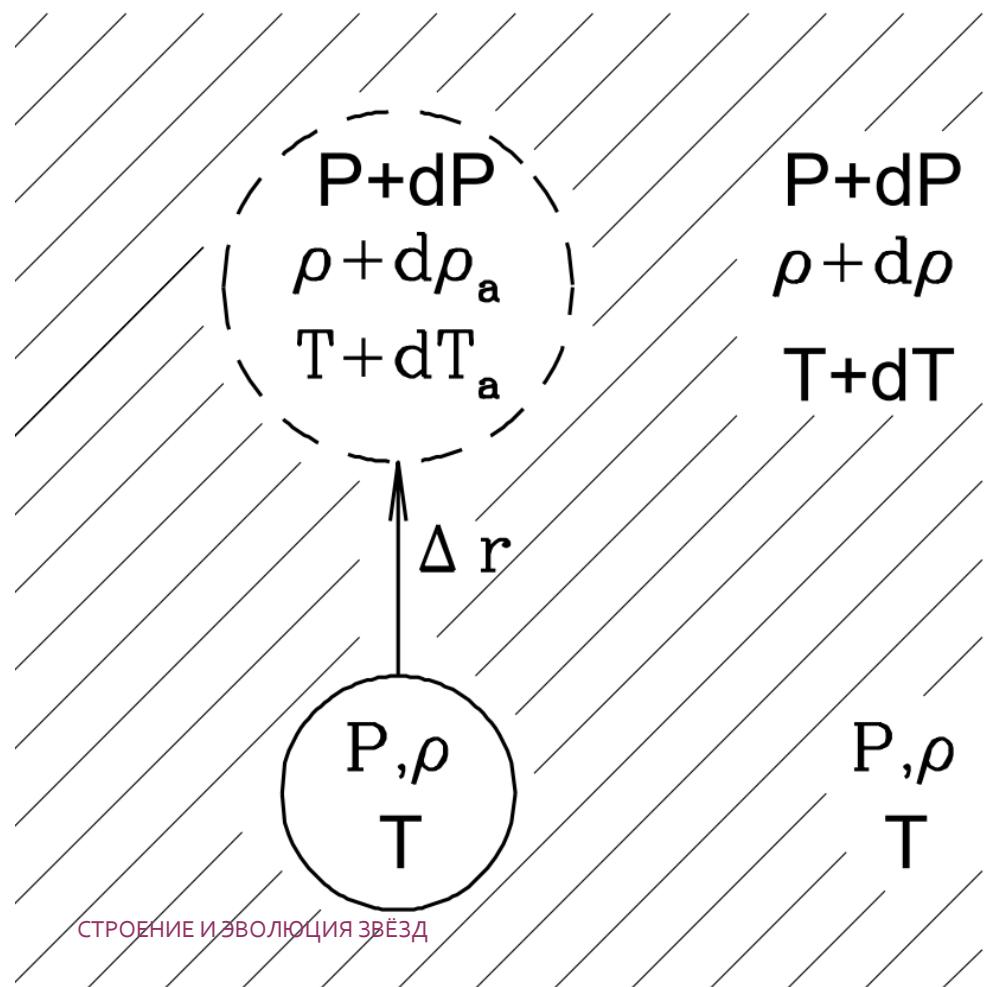


Масса	$1.99 \cdot 10^{33}$ г
Светимость	$3.86 \cdot 10^{33}$ эрг/с
Радиус	690000 км
Средняя плотность	$1.4 \text{ г}/\text{см}^3$
Плотность в центре	$\sim 100 \text{ г}/\text{см}^3$
Температура поверхности	6000К
Температура в центре	$10^7$ К
Период вращения	25-38 дней
Состав	70% водород 28% гелий
Возраст	$5 \cdot 10^9$ лет
Время жизни	$\sim 10^{10}$ лет

# ВНУТРИ СОЛНЦА



# КОНВЕКЦИЯ ИЛИ ЛУЧИСТЫЙ ПЕРЕНОС?



# КОНВЕКЦИЯ ИЛИ ЛУЧИСТЫЙ ПЕРЕНОС?

$$\nabla_{ad} = \left( \frac{\partial \ln T}{\partial \ln P} \right)_{ad} < \left( \frac{\partial \ln T}{\partial \ln P} \right)_{rad} = \nabla_{rad}$$

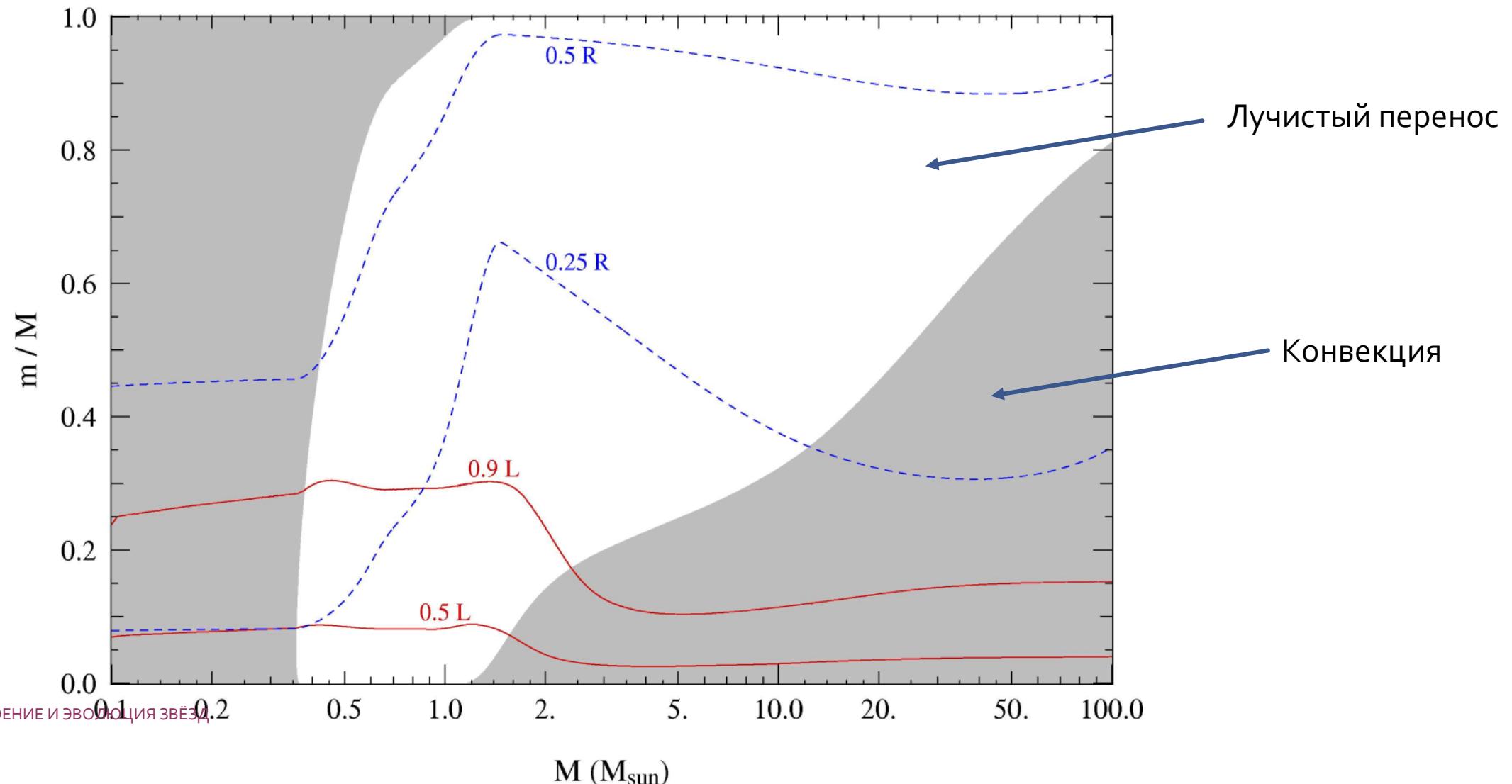
Критерий Шварцшильда начала конвекции для химически-однородной среды

$$\frac{dT}{dm} = - \frac{Gm}{4\pi r^4} \frac{T}{P} \nabla$$

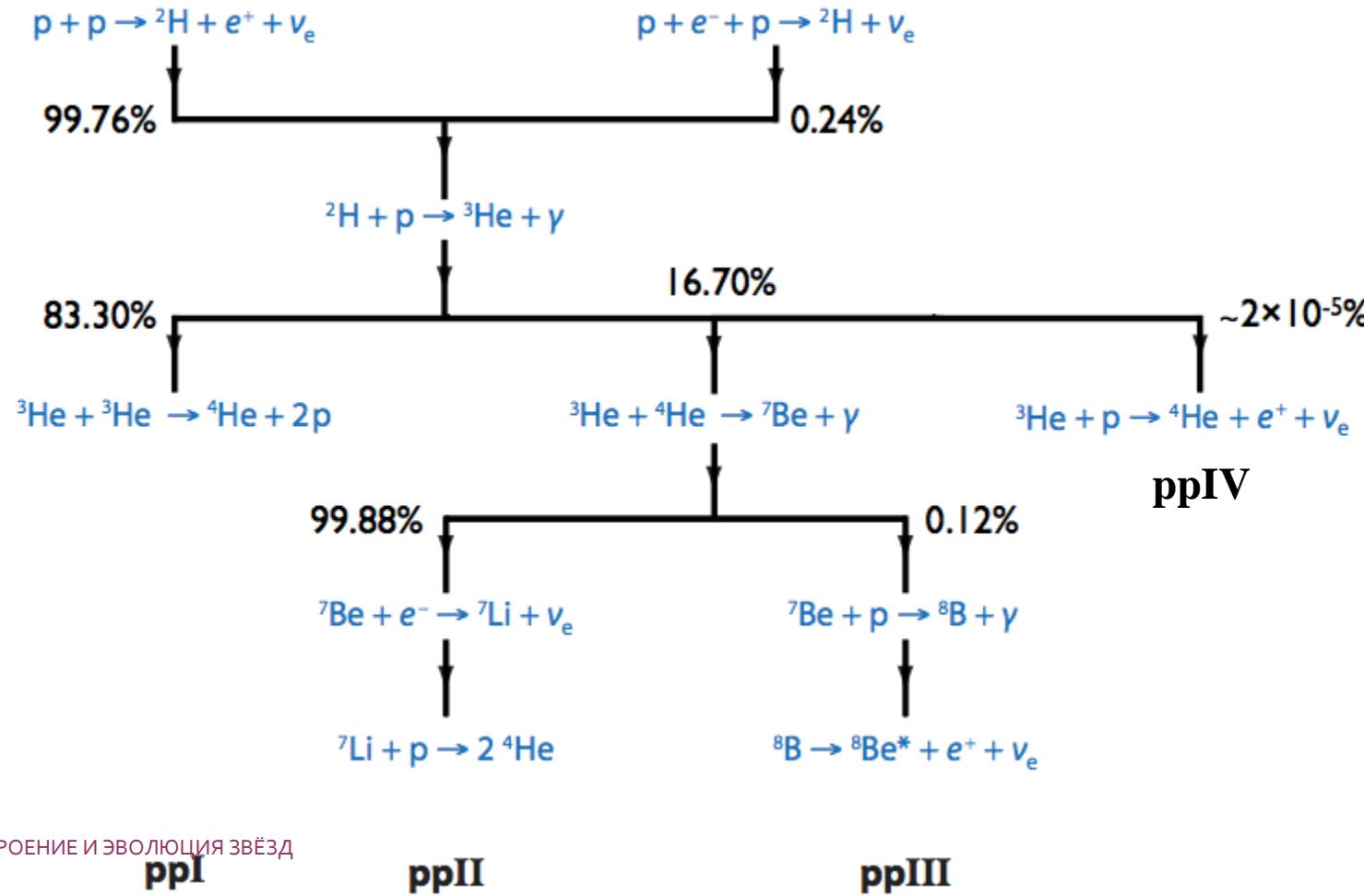
with

$$\nabla = \begin{cases} \nabla_{rad} = \frac{3\kappa}{16\pi acG} \frac{lP}{mT^4} & \text{if } \nabla_{rad} \leq \nabla_{ad} \\ \nabla_{ad} & \text{if } \nabla_{rad} > \nabla_{ad} \end{cases}$$

# ВНУТРИ ЗВЁЗД РАЗНЫХ МАСС

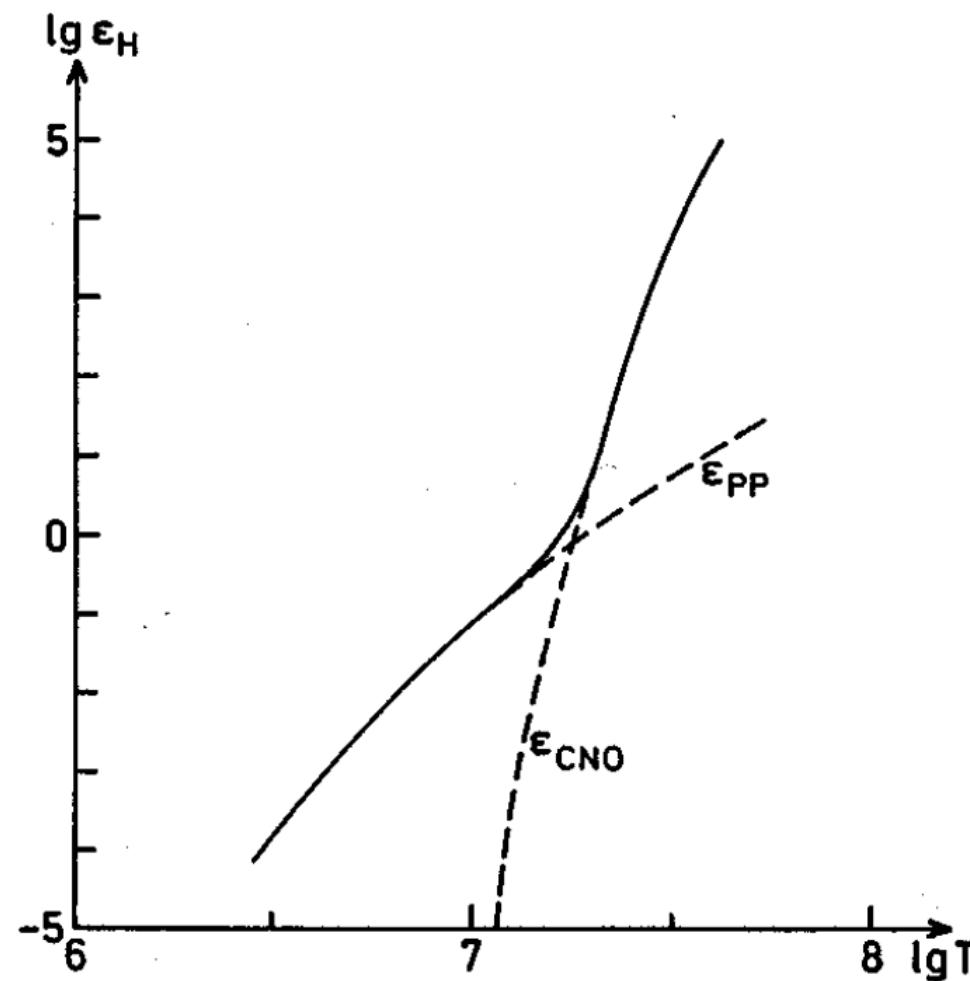
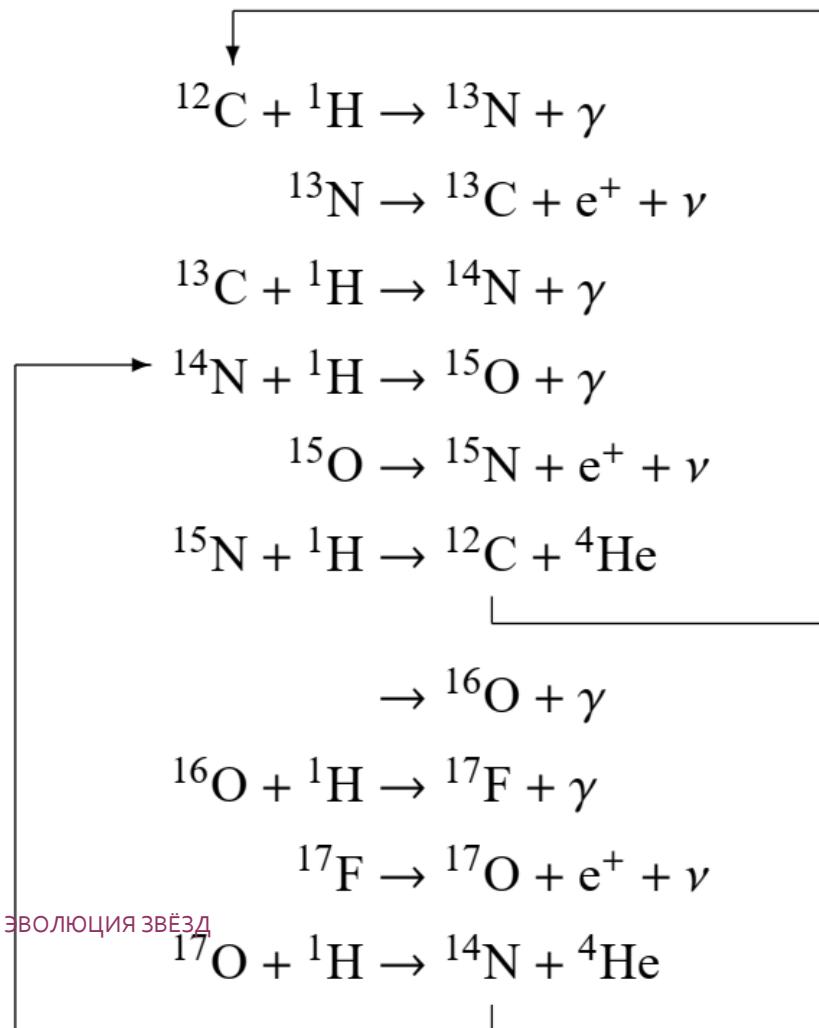


# ТЕРМОЯДЕРНОЕ ГОРЕНИЕ: РР-ЦИКЛ

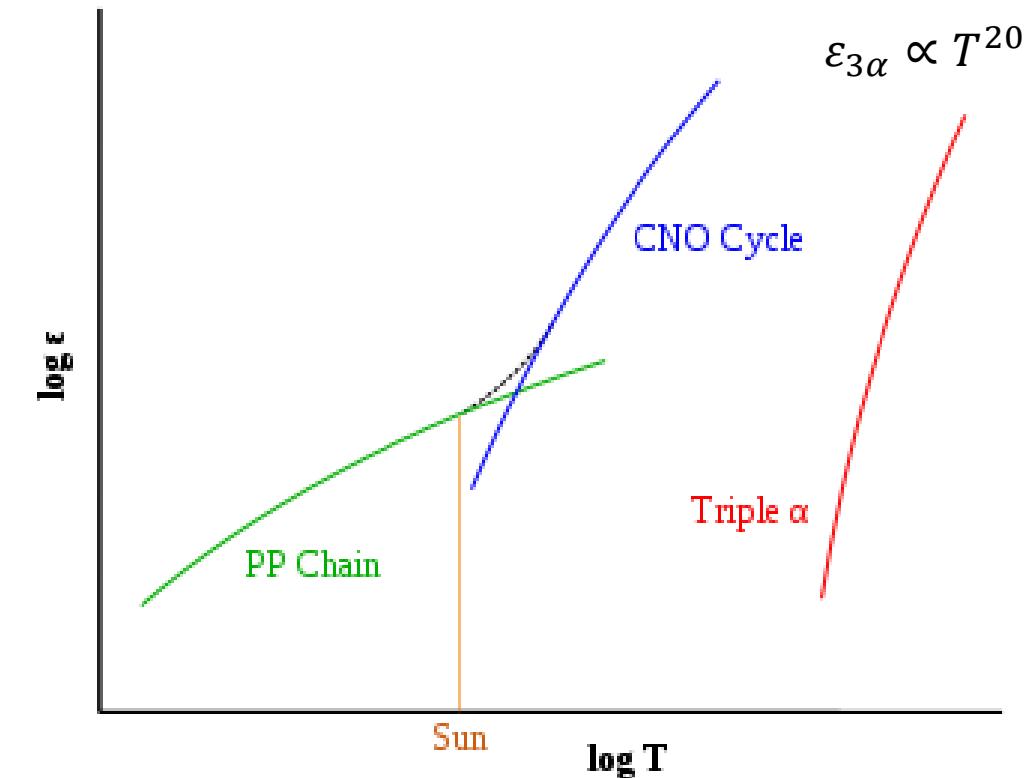
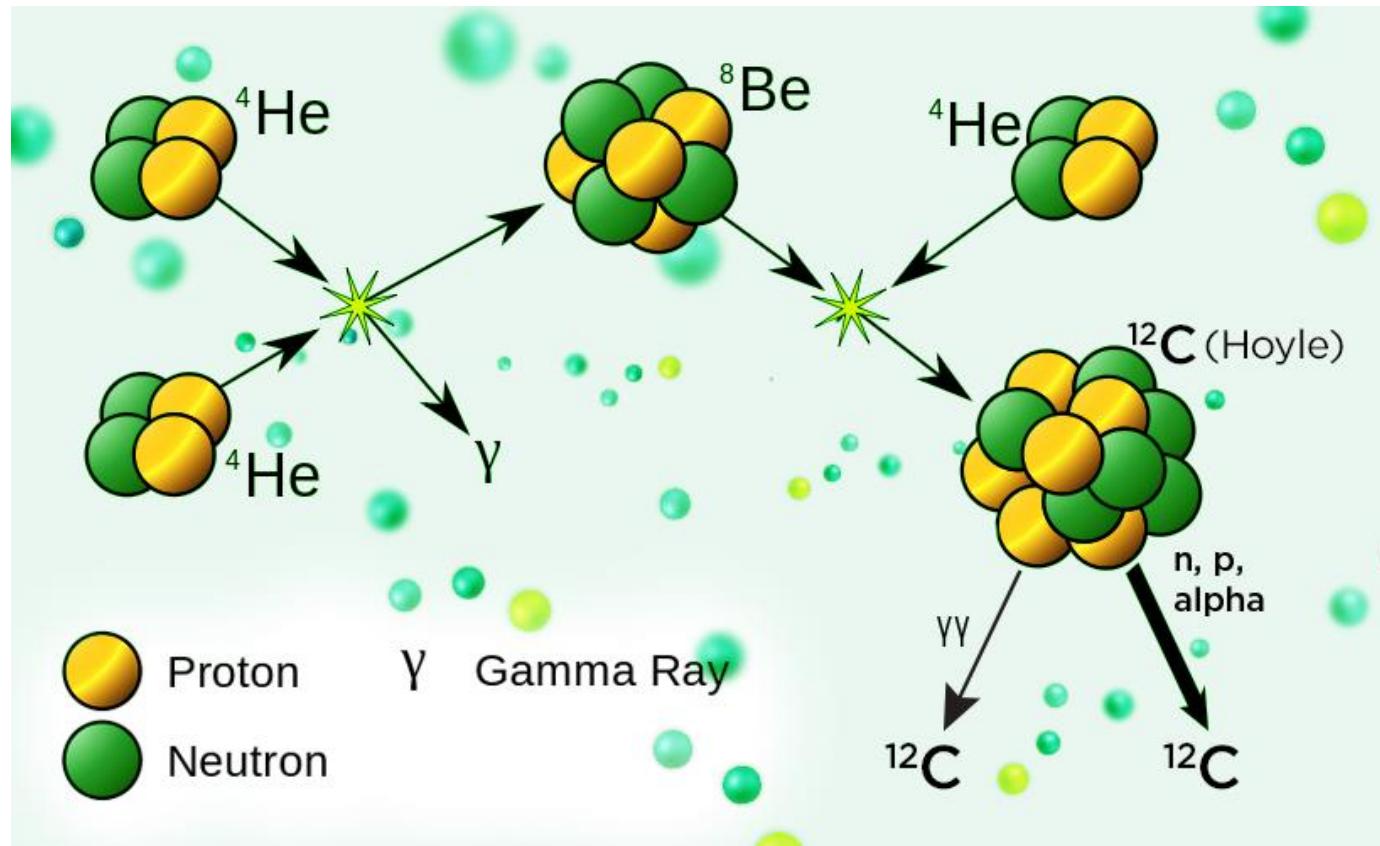


- $M > 0.08M_\odot$
- Характерное время реакции  $p+p \sim 10^{10}$  лет
- Реакция идёт благодаря квантовому туннелированию
- Р-Р доминирует при температурах  $\sim 10 - 14$  МК
- Удельное энерговыделение  $\varepsilon \propto T^{3..4}$
- Эффективность  $\sim 0.007Mc^2$

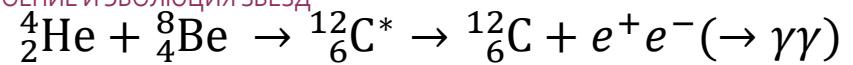
# ТЕРМОЯДЕРНОЕ ГОРЕНИЕ: СНО-ЦИКЛ



# ТРОЙНОЙ АЛЬФА-ПРОЦЕСС



СТРОЕНИЕ И ЭВОЛЮЦИЯ ЗВЁЗД



# ДВЕ СТОРОНЫ ГР-ДИАГРАММЫ

$$M = m + 5(1 - \log D_{\text{ПК}})$$

$$M_{\text{bol}} = -2.5 \log L_{W,\text{bol}} + 71.197$$

$$M_{\text{bol},\odot} = M_{\odot} + B.C. = +4.75$$

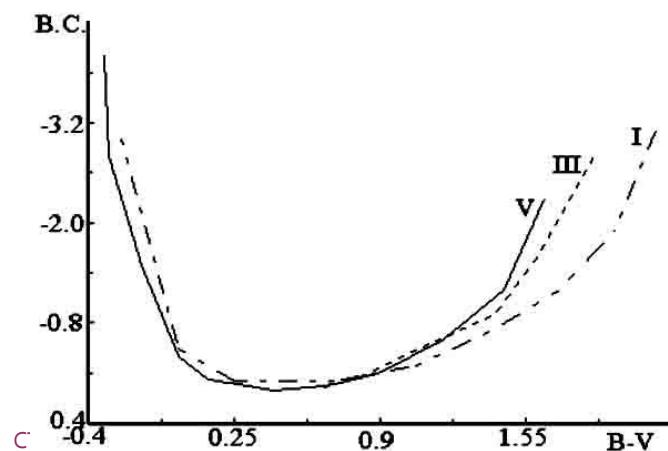
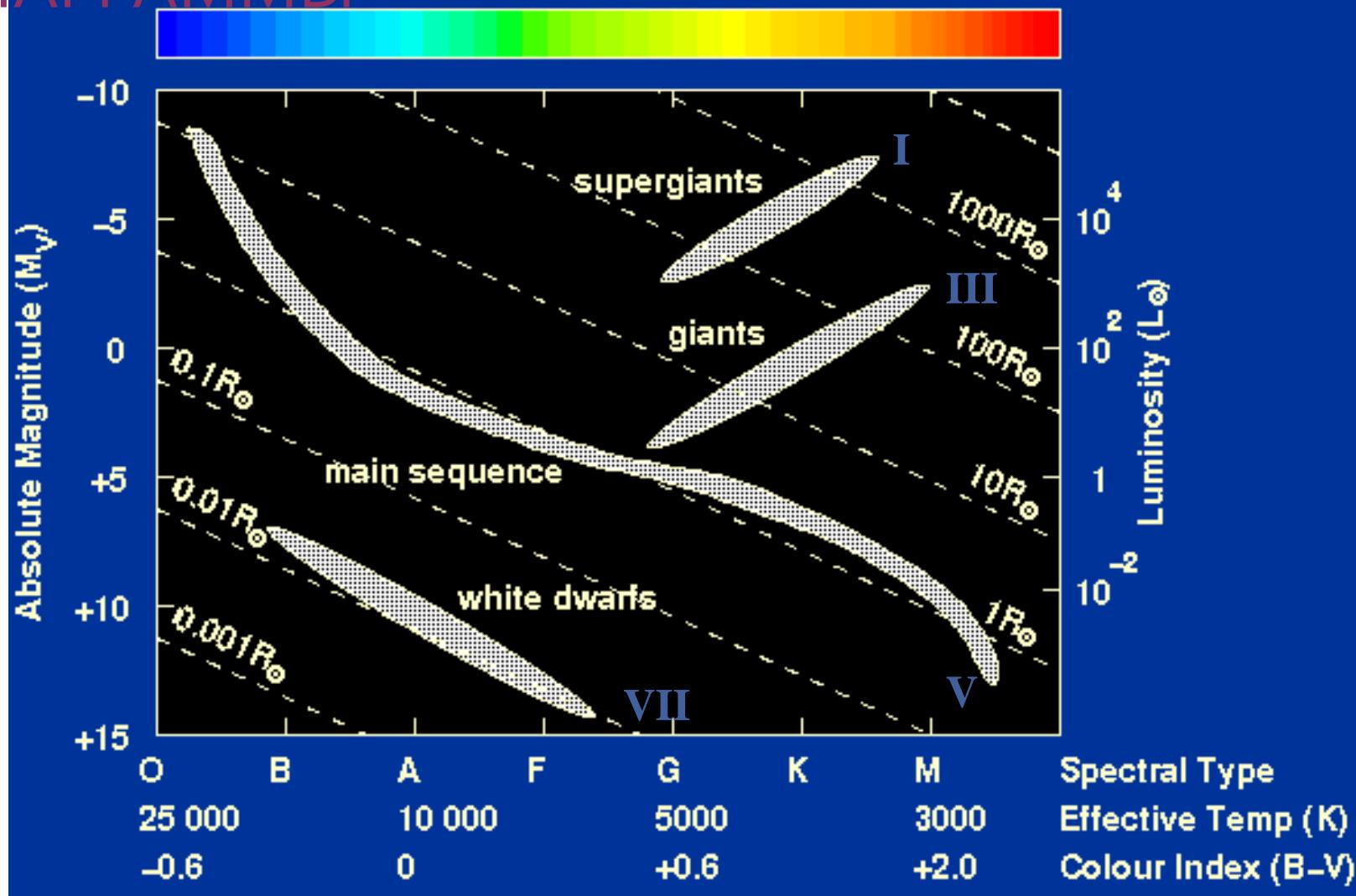
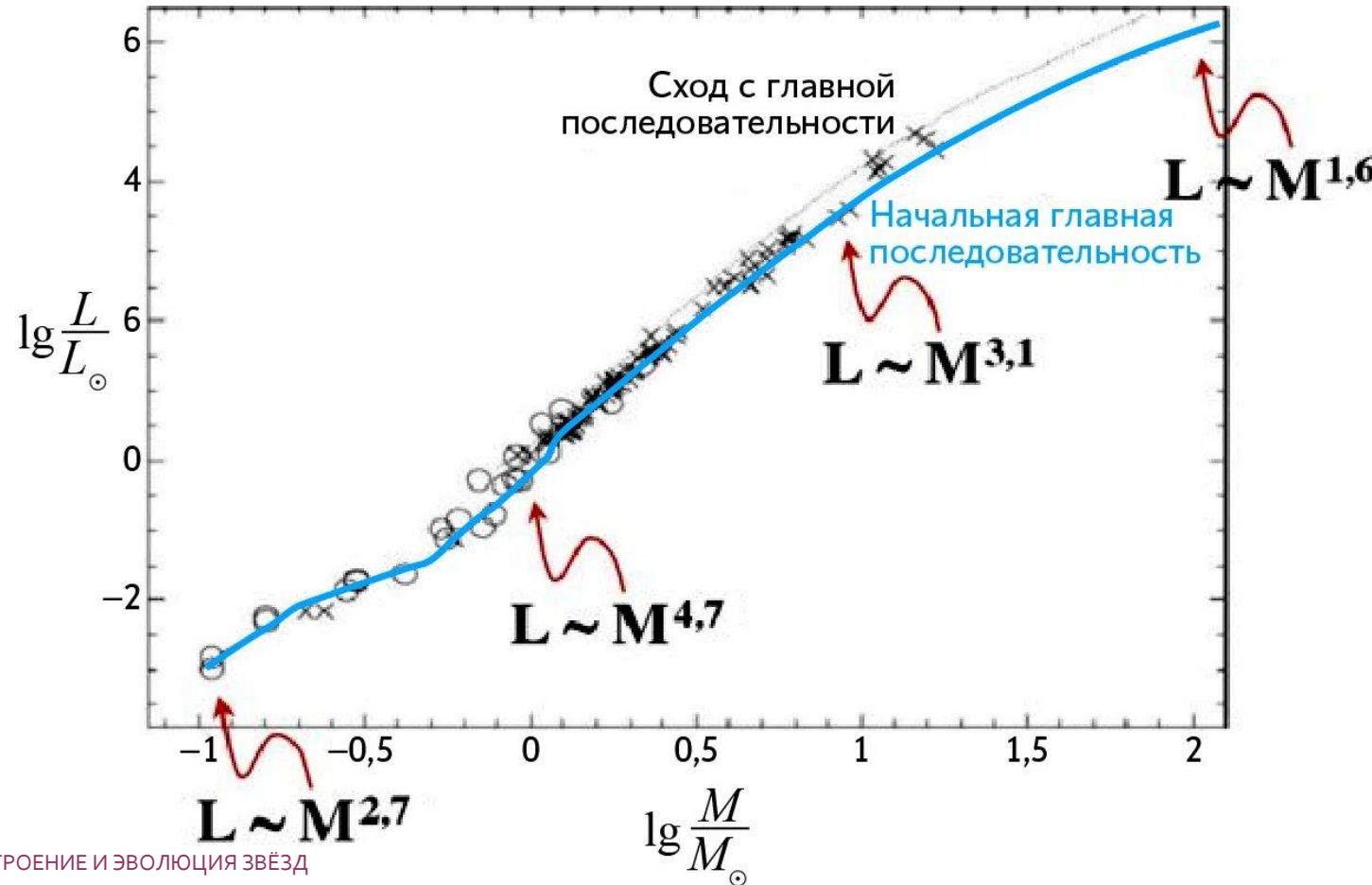


Рис.2-2



ГР-диаграмма: для наблюдателей и теоретиков

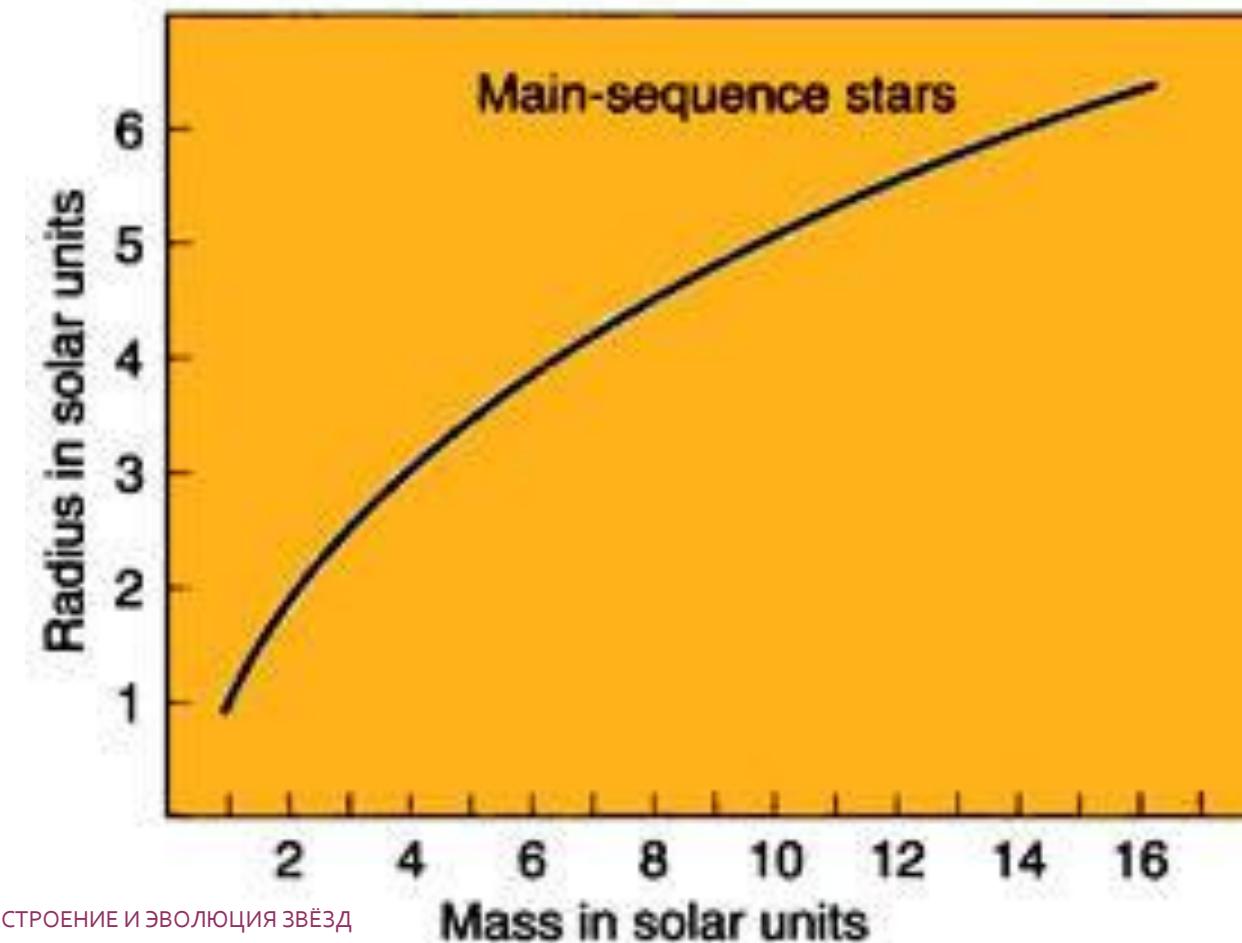
# СООТНОШЕНИЕ МАССА-СВЕТИМОСТЬ



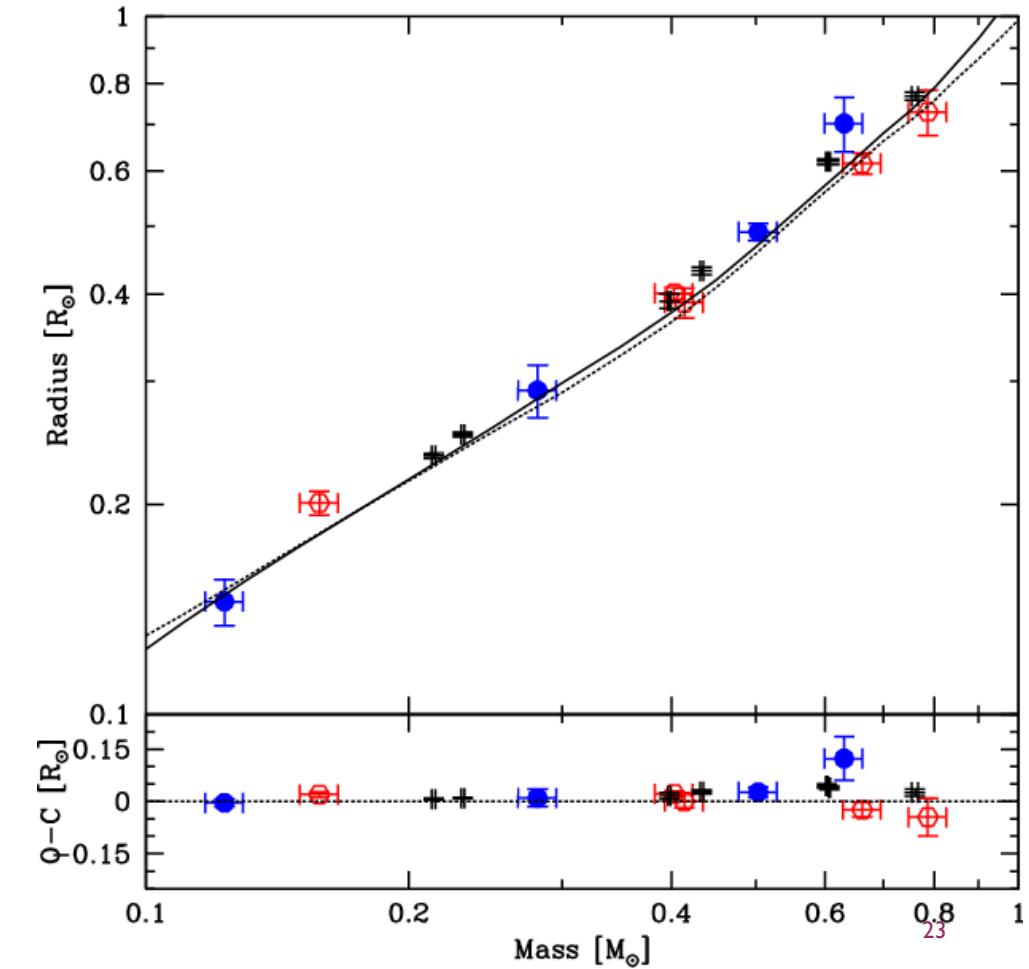
- В маломассивных звёздах преобладает газовое давление ( $P_g \propto T$ ) и поэтому  $L_{\text{low}} \propto M^{3...4}$
- В массивных звёздах существенно в том числе и давление излучения ( $P_r \propto T^4$ ), поэтому

$$L_{\text{high}} \propto M^{1...2}$$

# СОТНОШЕНИЕ МАССА-РАДИУС

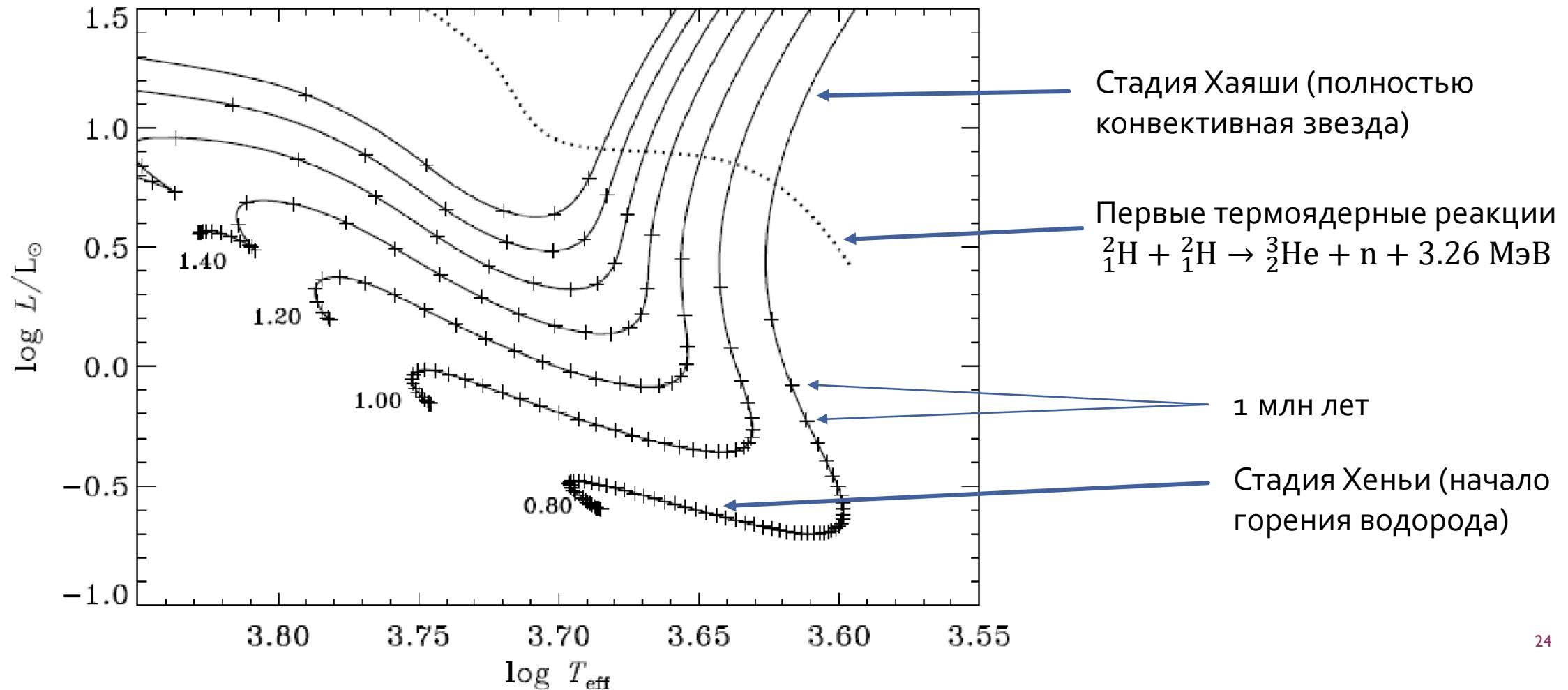


$$L \propto \varepsilon M \propto \rho T^\alpha M$$
$$M^3 \propto \frac{M}{R^3} \left(\frac{M}{R}\right)^\alpha M \Rightarrow R \propto M^{\frac{\alpha-1}{\alpha+3}}$$



$$\alpha_{PP} \sim 4, \alpha_{CNO} \sim 20$$

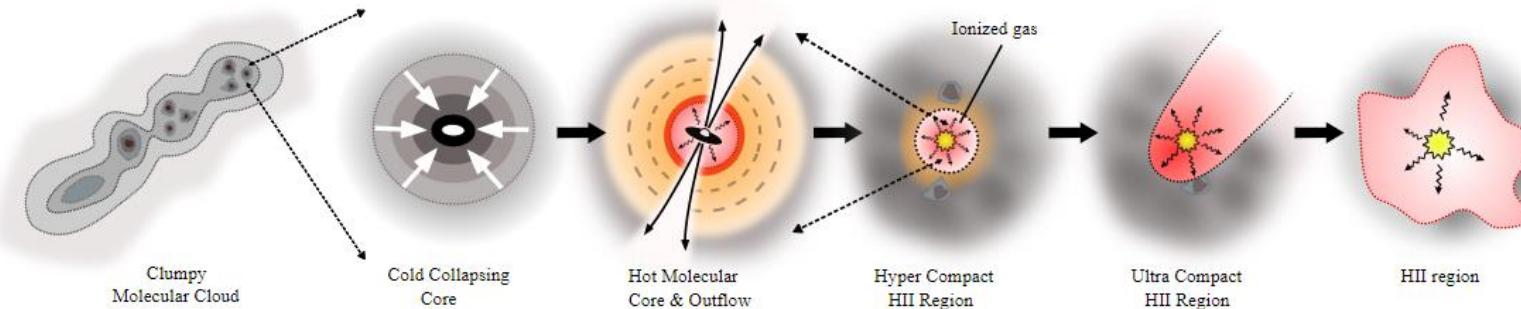
# ЭВОЛЮЦИЯ ДО ГЛАВНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ



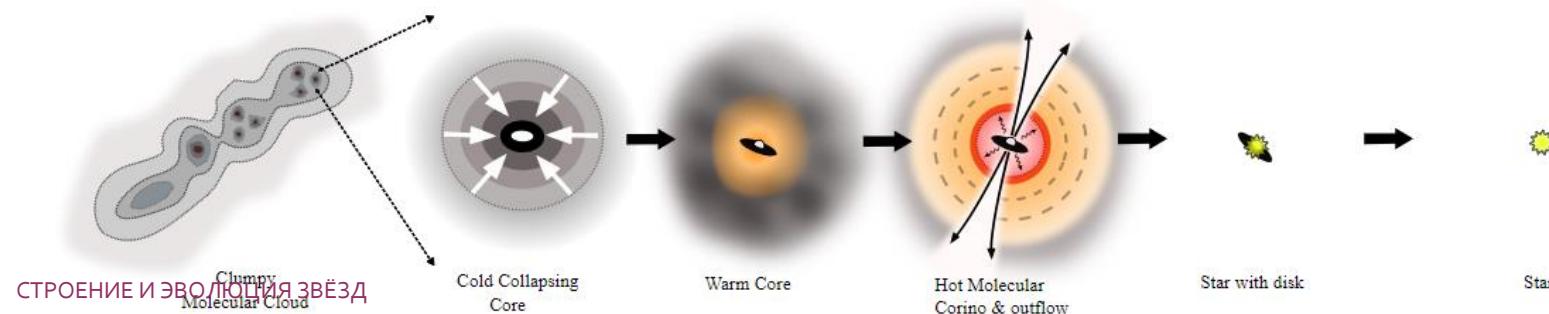
# ПРОТОЗВЕЗДА И ЕЁ ОКРЕСТНОСТИ

Main difference: massive stars affect their surroundings

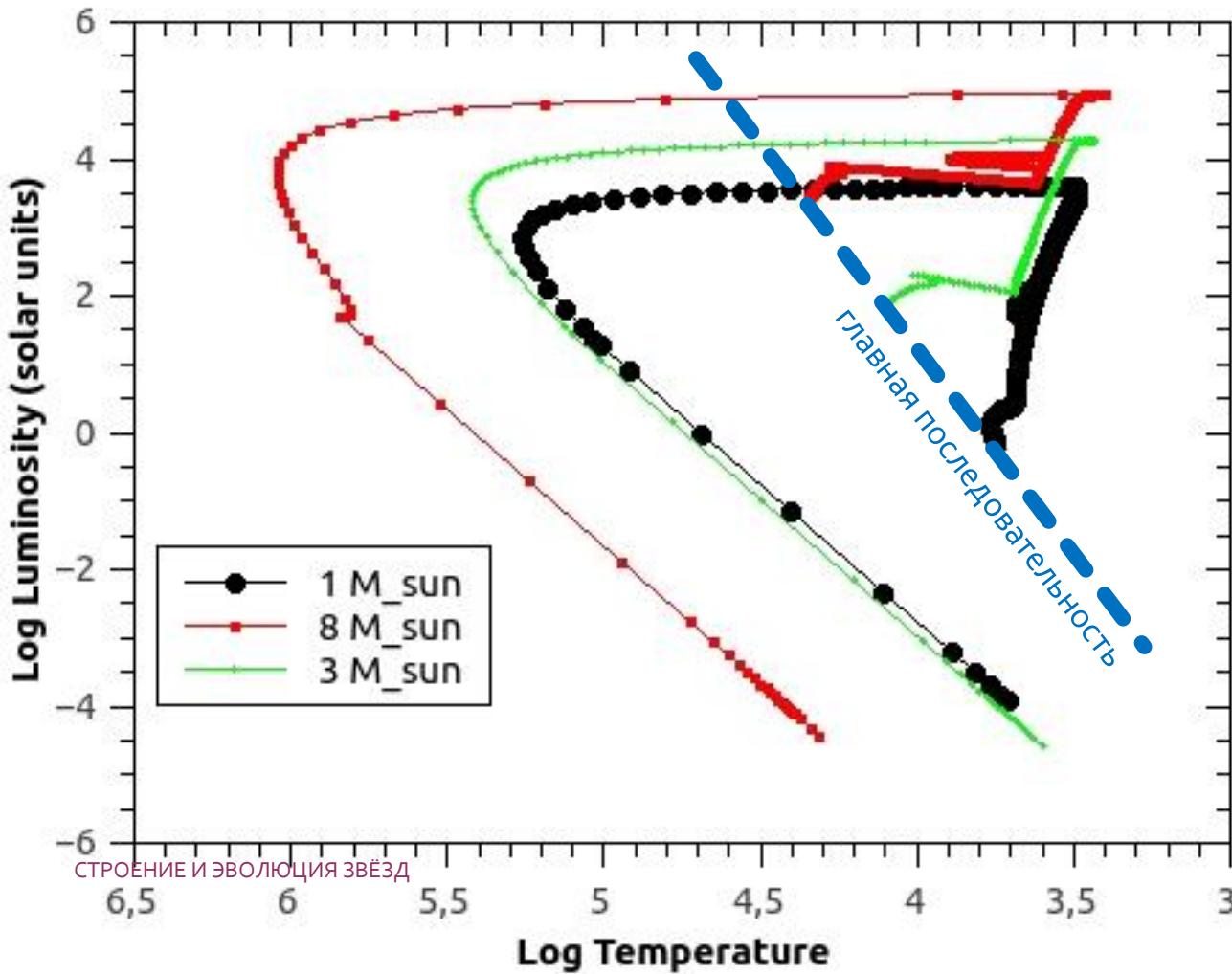
## High-mass SF



## Low-mass SF



# ДОЛГАЯ ЭВОЛЮЦИЯ ЗВЕЗД МАЛОЙ МАССЫ



Расчеты проведены с помощью программы SSE (Single Star Evolution).

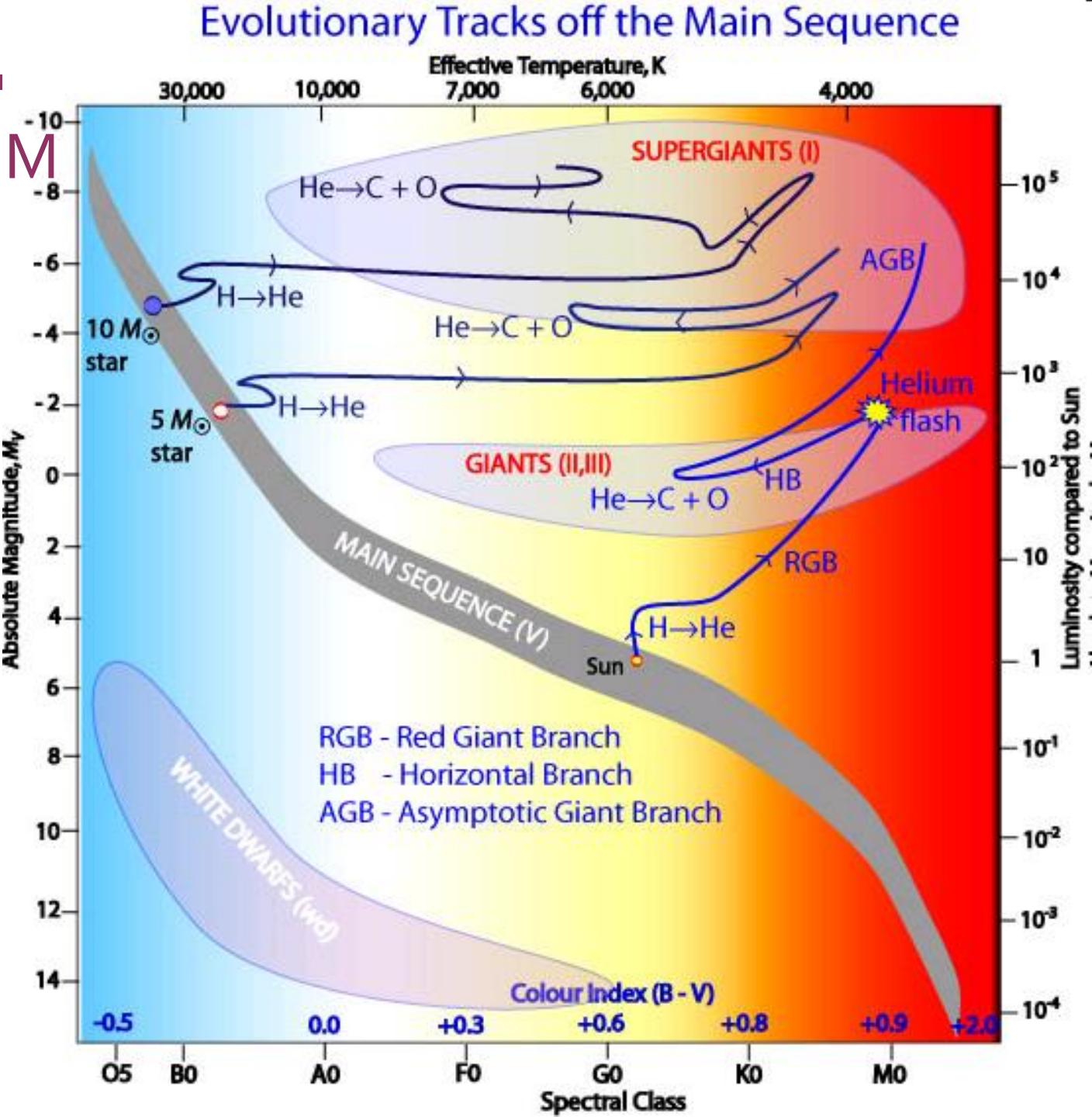
<http://astronomy.swin.edu.au/~jhurley/stellar.html>

Наиболее употребимый на сегодня код MESA (Modules for Experiments in Stellar Astrophysics)

<http://www.astro.wisc.edu/~townsend/static.php?ref=mesa-web>

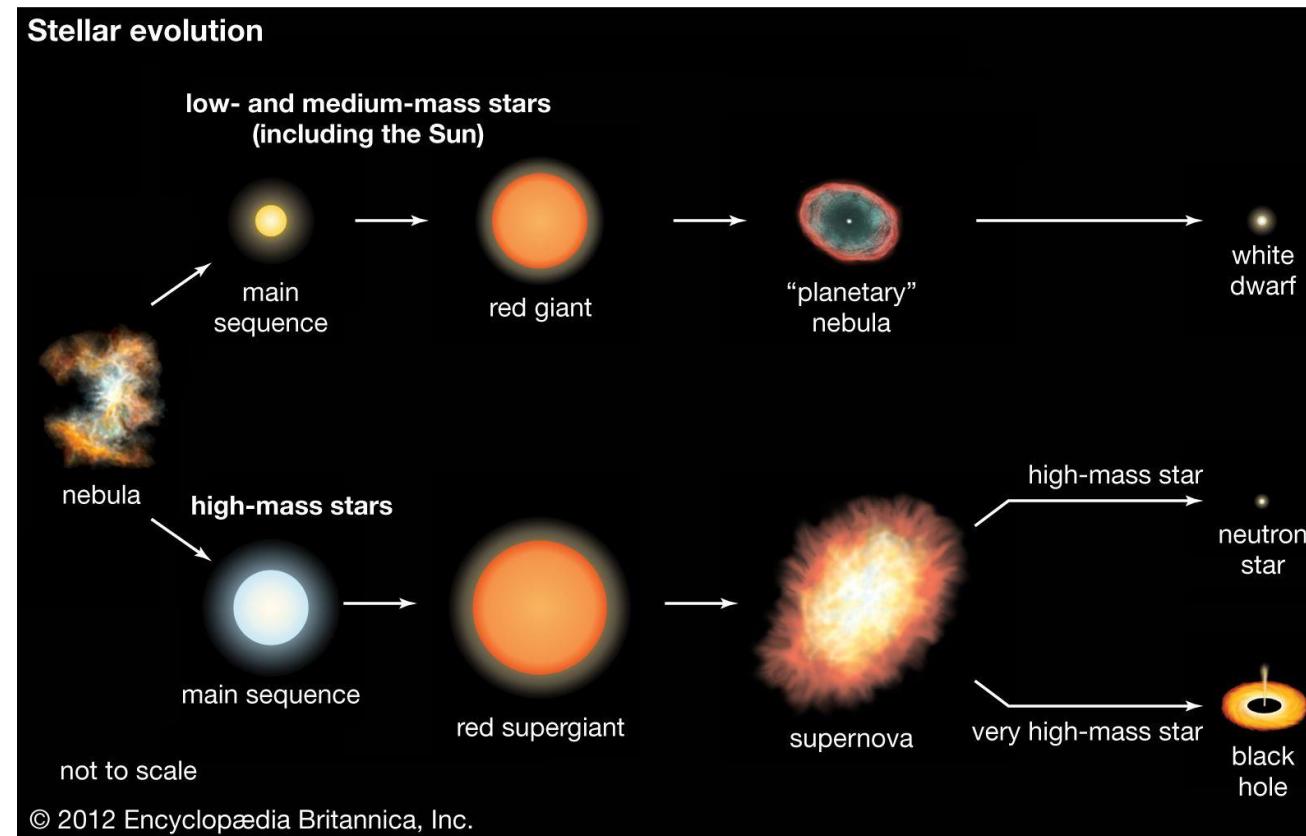
# ЭВОЛЮЦИЯ ЗВЕЗД В ЦЕЛОМ

- За свою жизнь звезда переживает несколько эпох «главной последовательности», во время которых в ядре горя разные элементы.
- Чем тяжелее ядра горючего, тем быстрее оно сгорает.
- Горение более тяжелого элемента сопровождается большим энерговыделением.

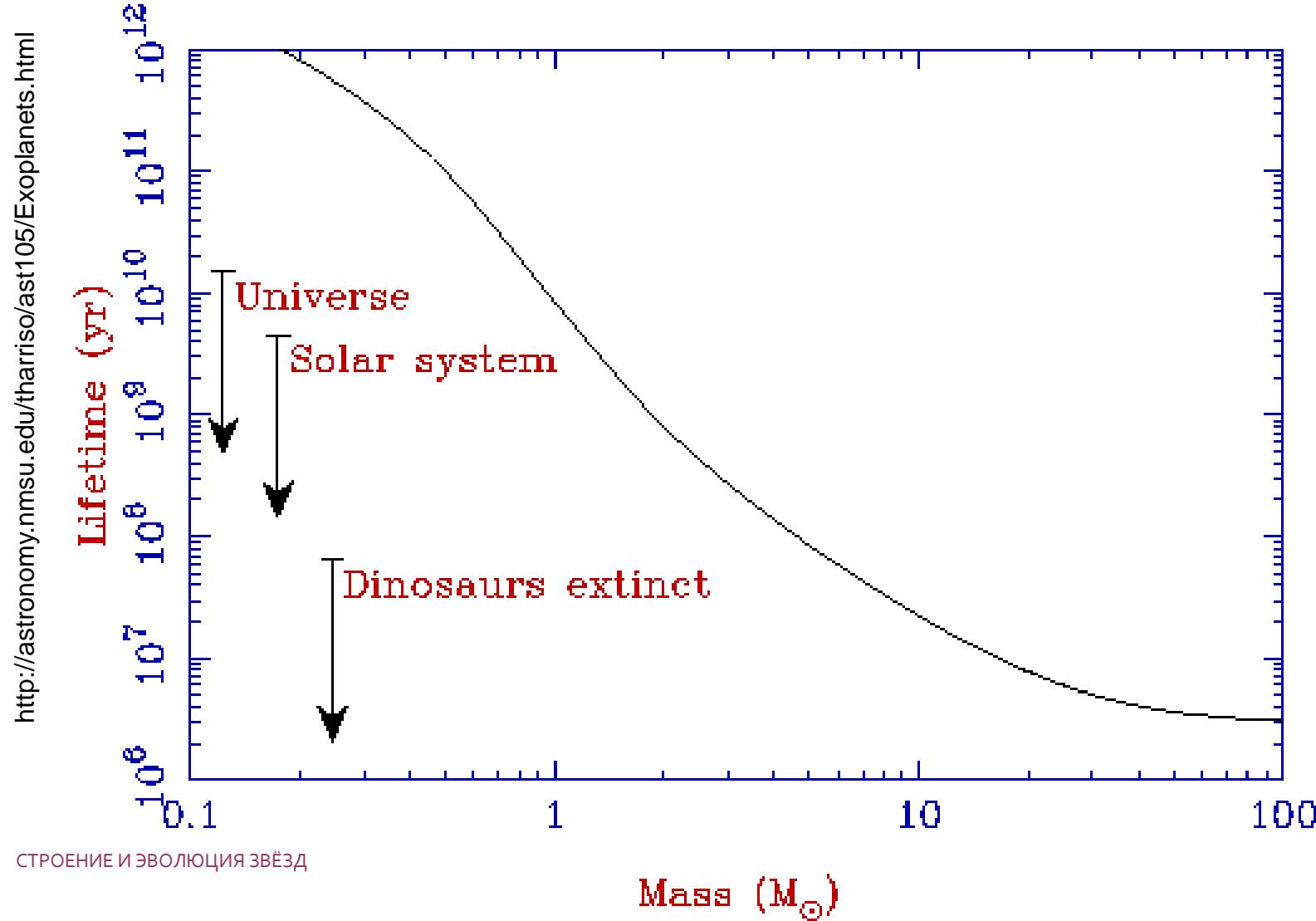


# МАССА – ПЕРВЫЙ ГЛАВНЫЙ ПАРАМЕТР

- Чем массивнее звезда – тем больше она излучает и меньше живет.
- Массивные звезды в конце жизни взрываются, а их ядра становятся нейтронными звездами или черными дырами.
- Маломассивные звезды сбрасывают оболочки, и их ядра становятся белыми карликами.



# ВРЕМЯ ЖИЗНИ ЗВЕЗДЫ НА ГЛАВНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ



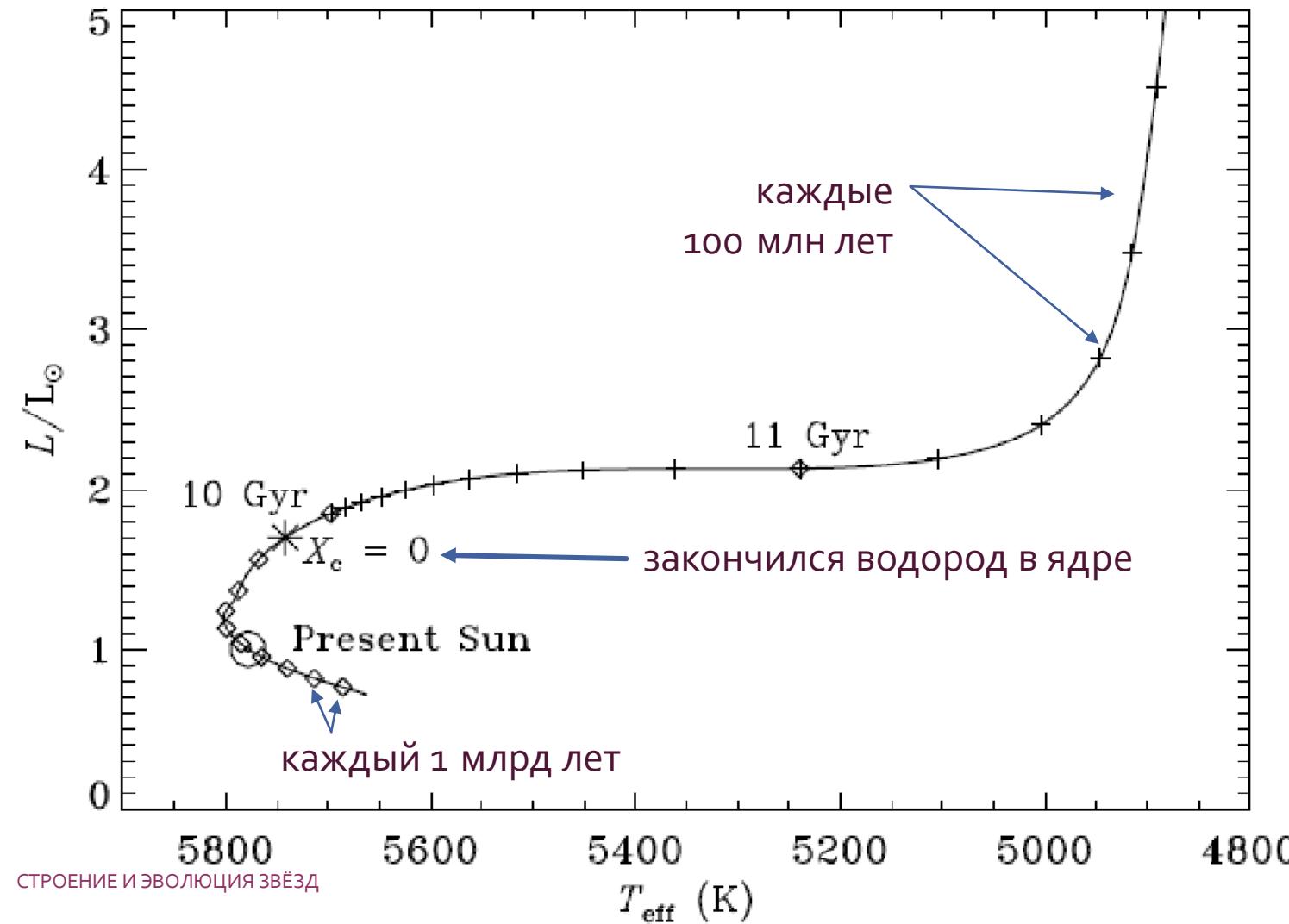
$$t_{MS} \propto \frac{M}{L}$$

$$L \propto M^{3..4} \Rightarrow t_{MS} \propto \frac{1}{M^{2..3}}$$

$$L_{max} = L_{Edd} \approx (10^{38} \text{ erg s}^{-1}) \left( \frac{M}{M_{\odot}} \right)$$

$$t_{MS,max} \approx 2 \text{ Myr} = const$$

# СОЛНЦЕ В БЛИЖАЙШИЕ МИЛЛИАРДЫ ЛЕТ



$$P = \frac{\rho}{\mu m_p} kT$$

$\mu = \left( 2X + \frac{3}{4}Y + \frac{1}{2}Z \right)^{-1}$  – относительная молекулярная масса.

Для солнечного ядра сегодня:

$X \approx 0.34$  – доля ядер водорода

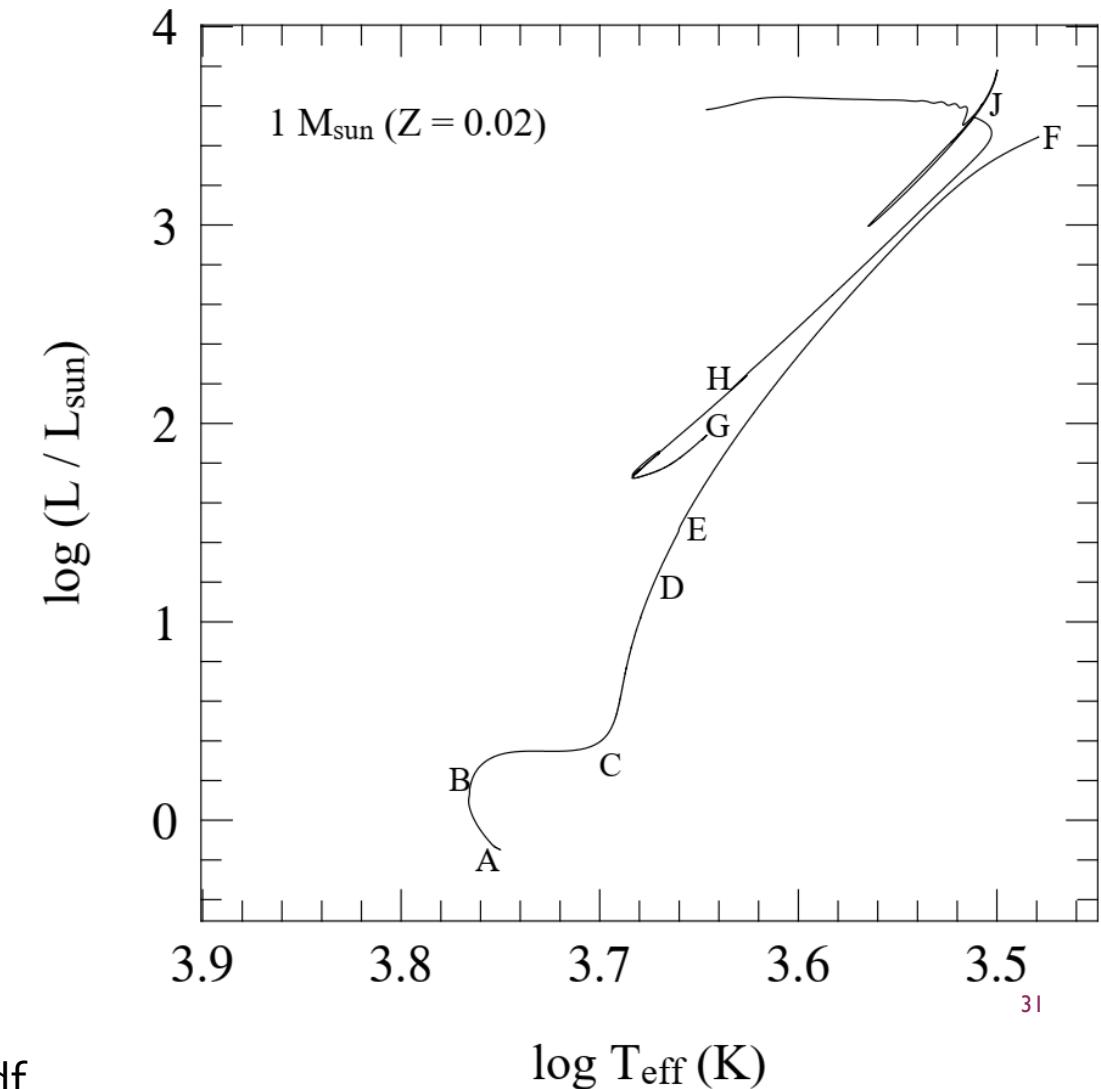
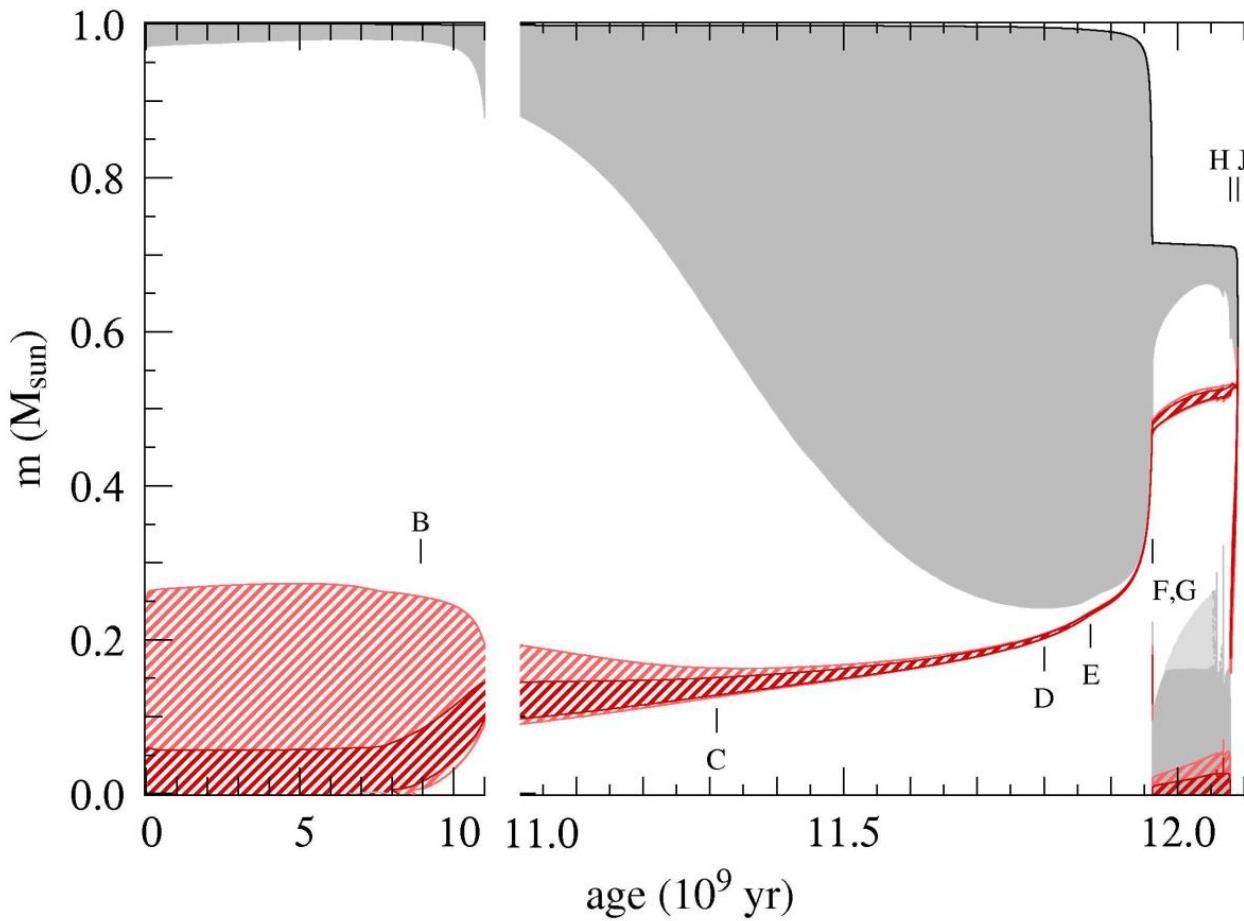
$Y \approx 0.64$  – доля ядер гелия

$Z \approx 0.02$  – доля ядер тяжелых элементов  
(**металличность**)

$\mu_{\odot, \text{core}} \approx 0.83$  и растёт

$\langle \mu_{\odot} \rangle \approx 0.6$  ( $X \sim 0.75, Y \sim 0.25$ )<sub>30</sub>

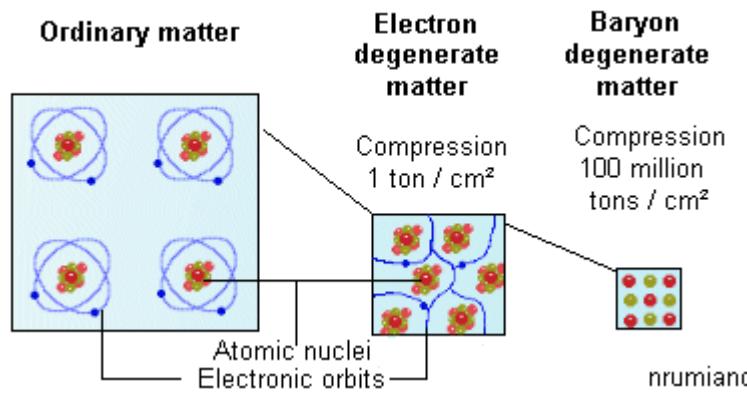
# СОЛНЦЕ В БЛИЖАЙШИЕ МИЛЛИАРДЫ ЛЕТ



# ВЫРОЖДЕНИЕ ВЕЩЕСТВА

$T_F \sim \rho^{2/3} m^{-1} h^2$  -- Температура Ферми. Вырождение наступает при  $T < T_F$  при заданной плотности (или при повышении плотности при заданной температуре).

В центре Солнца:  $\rho_{\odot,c} \sim 160 \text{ г см}^{-3}$  и  $T_{F,e} \sim 3 \cdot 10^6 \text{ К} < T_{\odot,c} \sim 10^7 \text{ К}$   
– электроны не вырождены.



$$P_e \sim \rho_e v_e^2 \propto \rho_e^{5/3}$$

и не зависит от температуры.

(для релятивистских фермионов, когда  $E_F = kT_F > mc^2$   
давление слабее зависит от концентрации:  $P \propto \rho^{4/3}$ )

# ОБЩАЯ КАРТИНА ЭВОЛЮЦИИ СОЛНЦА

1 ZAMS (Zero Age Main Sequence)

1-4 Горение водорода в ядре (главная последовательность).

5-7 Горение водорода в слоевом источнике (провал Герцшпрунга )

8 Расширение внешней конвективной оболочки

(8-9) Образование красного гиганта (ветвь красных гигантов)

9 Гелиевая вспышка (загорается гелий в вырожденном ядре)

9-10 Исчезновение конвективной оболочки

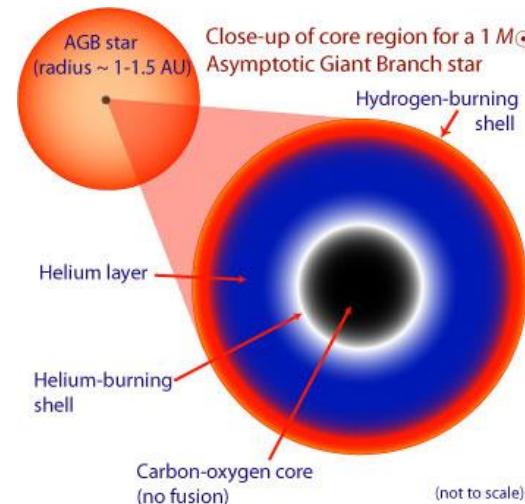
10 - Горизонтальная ветвь

(10 - 13) Спокойное горение гелия в ядре и водорода в слоевом источнике

14 Исчерпание гелия в ядре

14-15 Вторичное расширение внешней конвективной оболочки

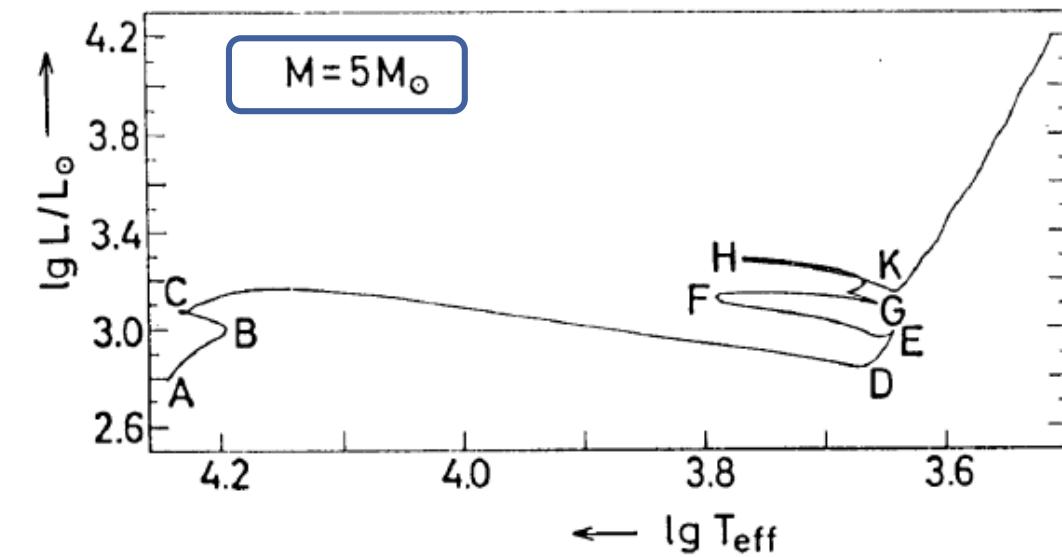
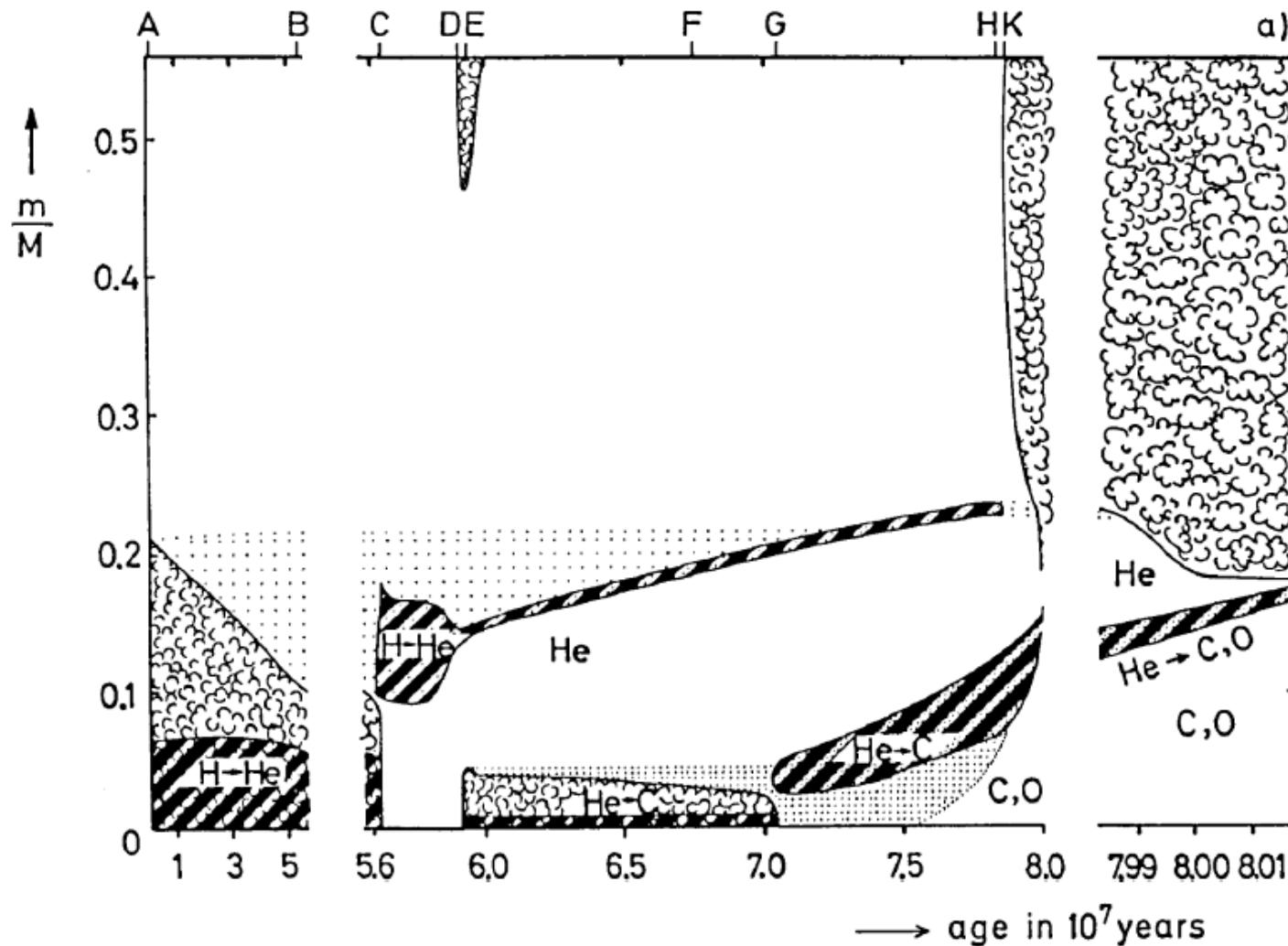
15 Начало тепловой неустойчивости сверхгиганта, пульсации



СТРОЕНИЕ И ЭВОЛЮЦИЯ ЗВЁЗД



# ДИАГРАММА КИППЕНХАЙНА ДЛЯ $M = 5M_{\odot}$

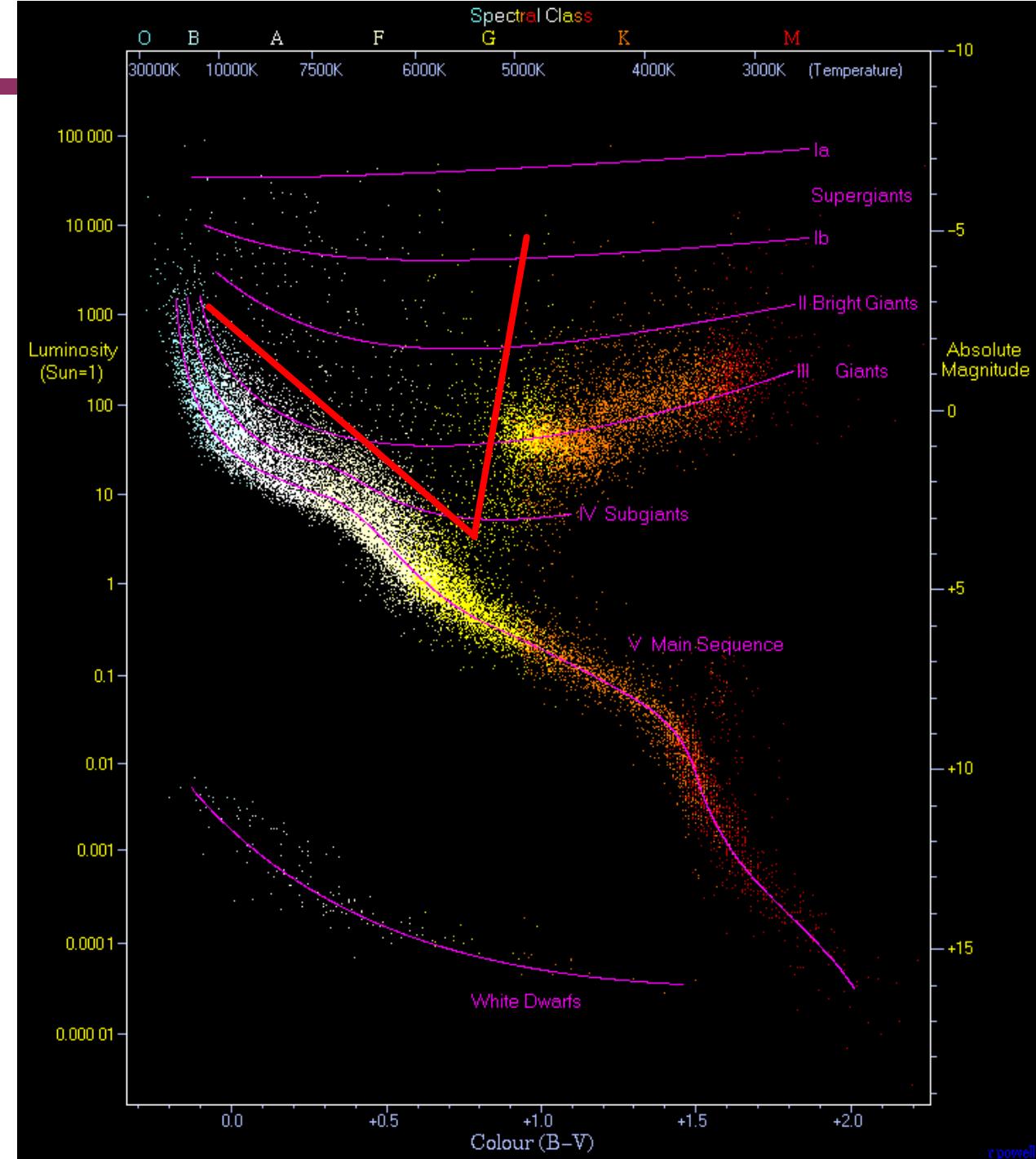


# ПРОВАЛ ГЕРЦШПРУНГА

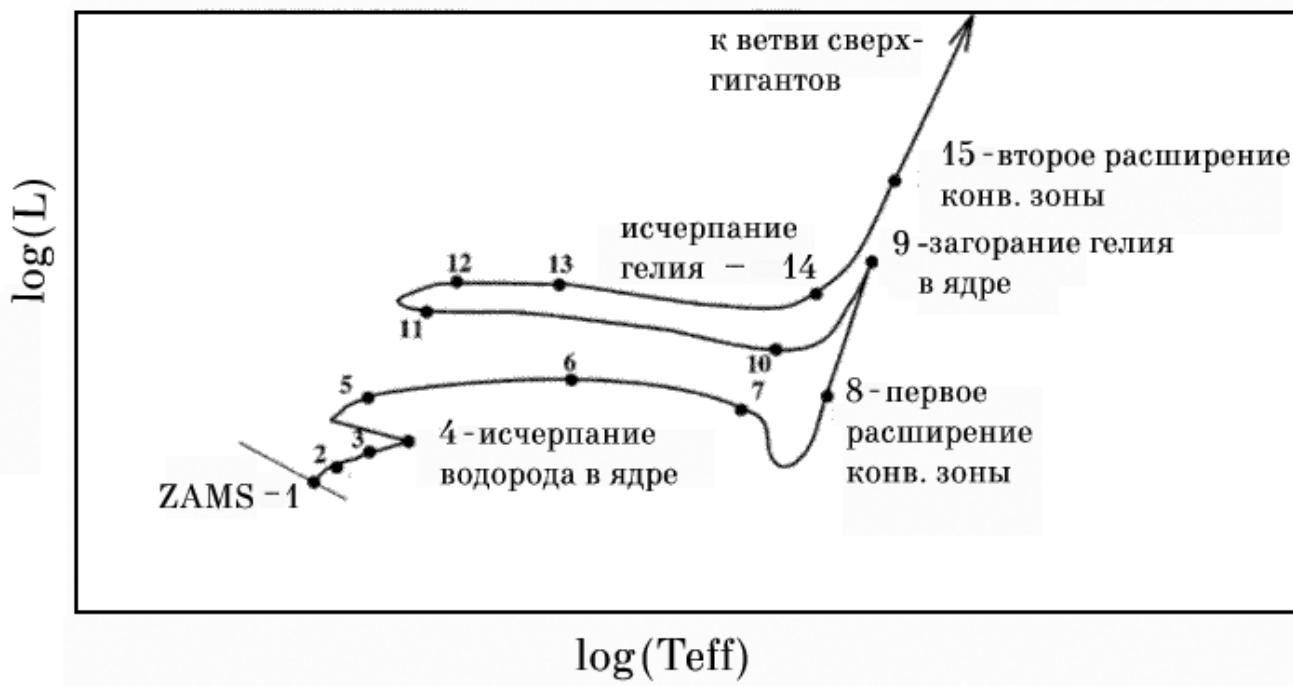
Гелиевое ядро с массой ниже некоторой находится в равновесии и не вырождено.  
Водород горит в слоевом источнике.  
Это стадия субгиганта.  
Растет масса ядра.  
Это приводит к резкому сжатию – начинается RGB.

При массе  $>2$  солнечных предельная масса (предел Шенберга-Чандraseкара) достигается быстро.  
Ядро сжимается – начинается стадия гиганта.  
Т.о., у таких звезд стадия субгиганта короткая.  
Поэтому возникает «провал Герцшпрунга» - звезды очень быстро пересекают эту часть диаграммы.

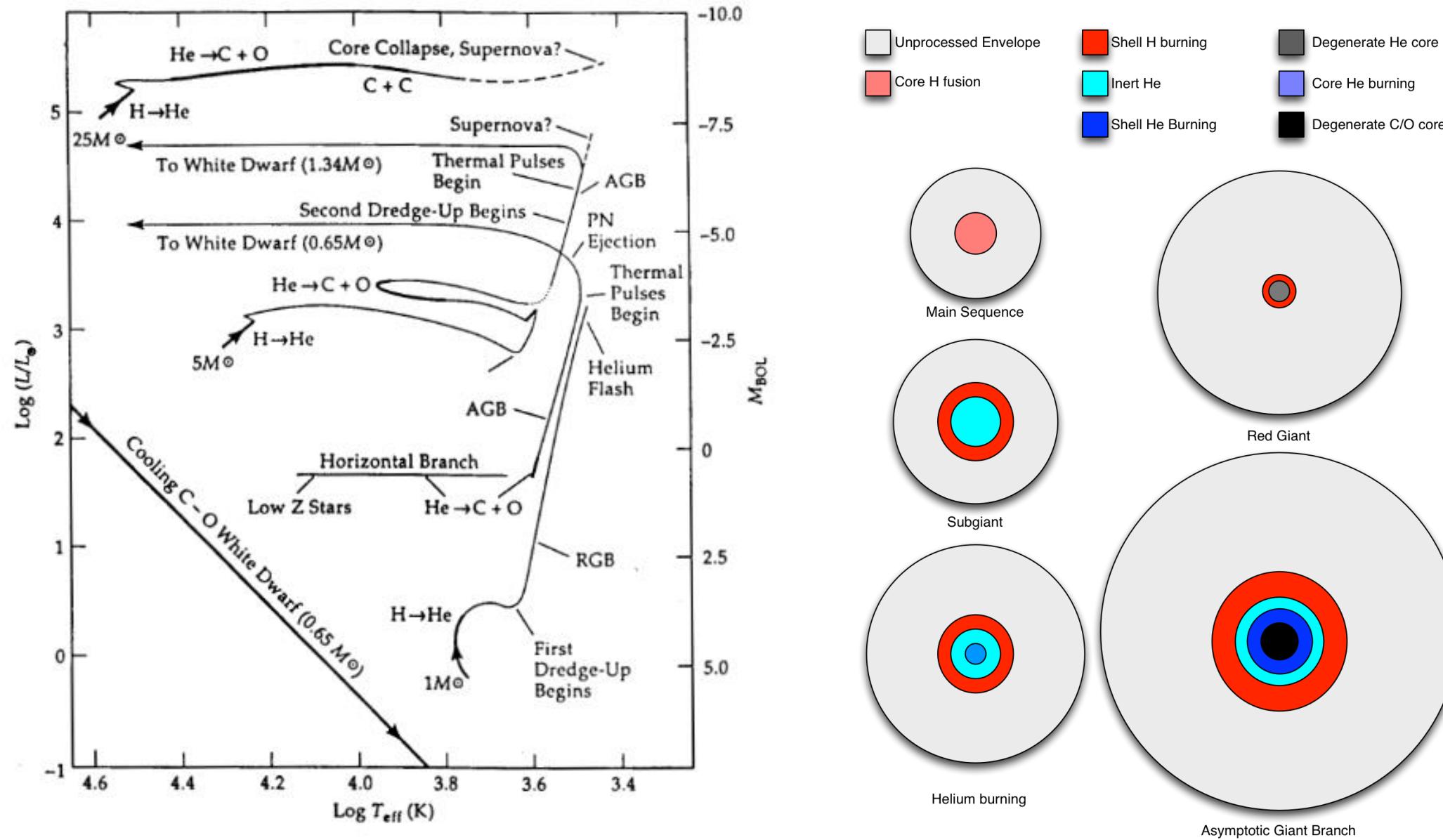
СТРОЕНИЕ И ЭВОЛЮЦИЯ ЗВЁЗД



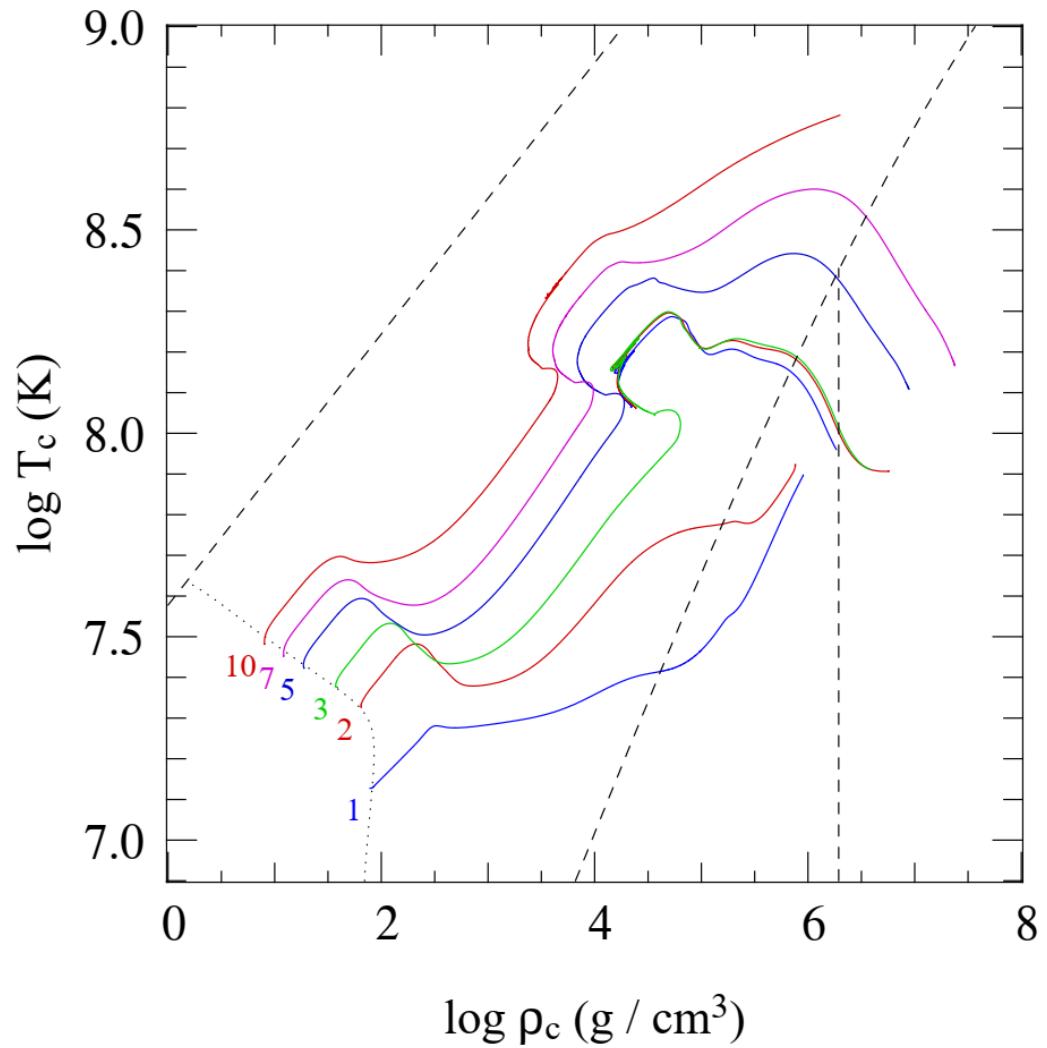
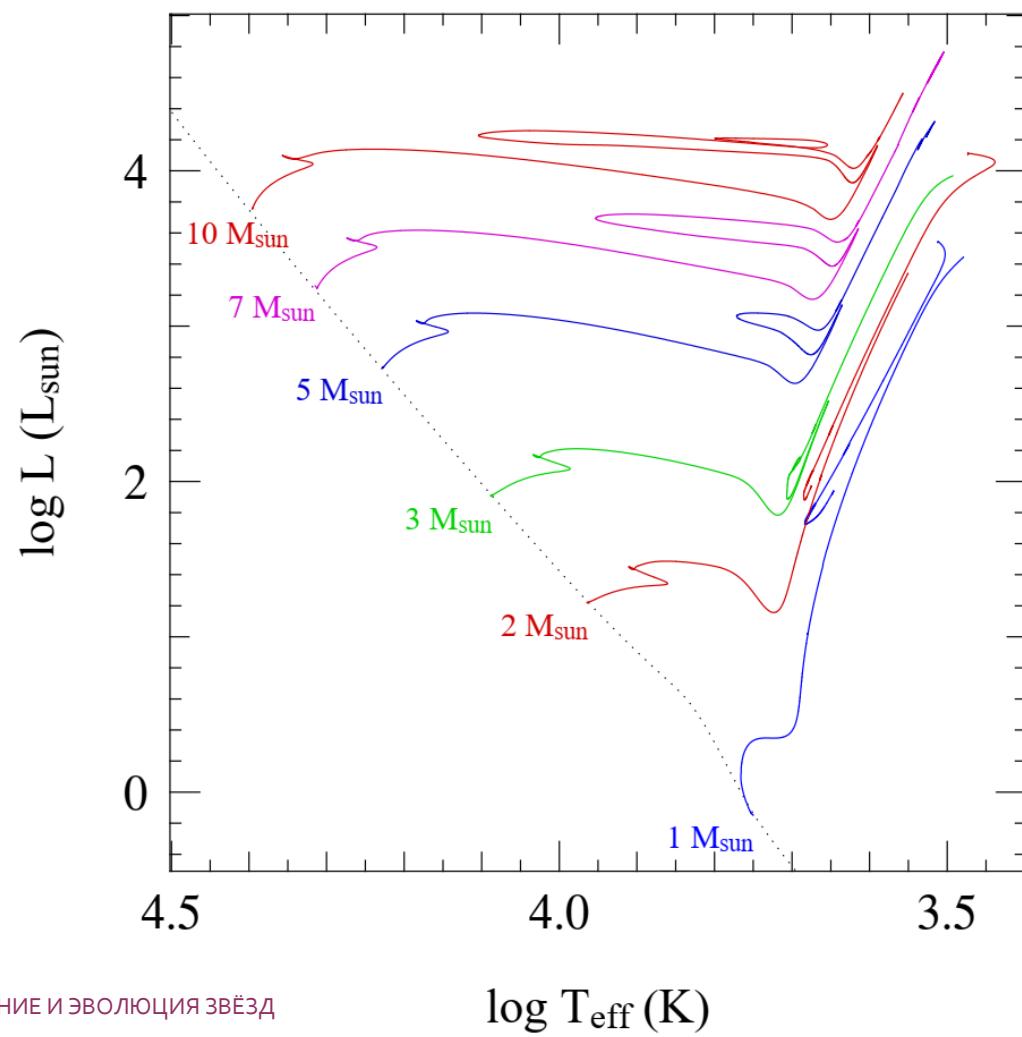
# ЭВОЛЮЦИЯ ЗВЕЗДЫ С $M = 5M_{\odot}$



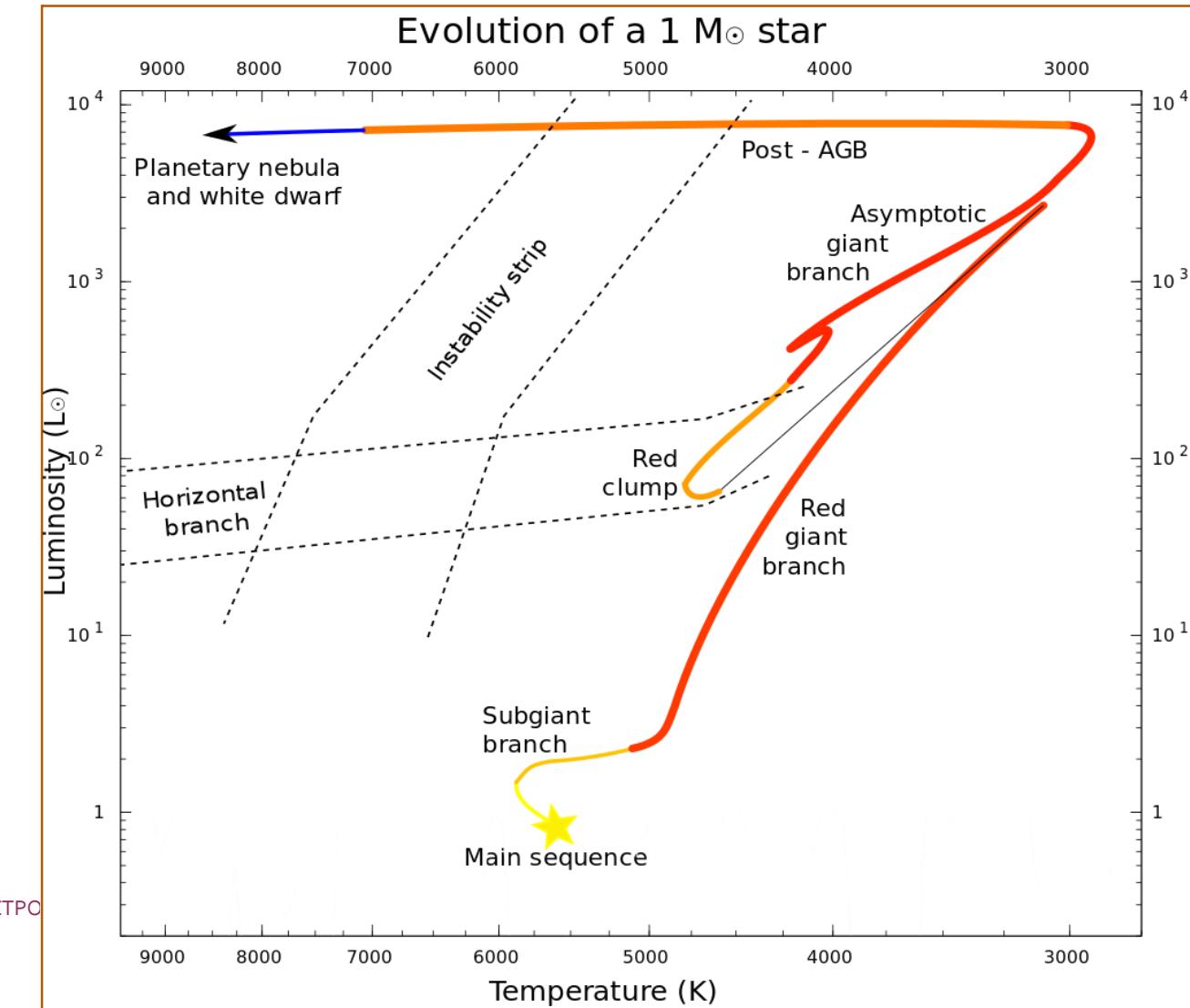
- 1 ZAMS (Zero Age Main Sequence)
- 1-3 Горение водорода в ядре (ГП)
- 4 Исчерпание водорода в ядре
- 4-5 Гравитационное сжатие звезды
- 5-6 Возгорание водорода в слоевом источнике
- 6-7 Горение водорода в толстом слое
- (5-7) Провал Герцшпрunga, стадия субгиганта
- 8 Возникновение обширной конвективной оболочки
- 7-9 Ветвь красных гигантов
- 9 Загорание гелия в центре (спокойное)
- 9-10 Исчезновение конвективной оболочки
- 10-11 Горизонтальная ветвь
- (9-13) Горение гелия в ядре и водорода в слоевом источнике
- 14 Исчерпание гелия
- 15 К асимптотической ветви гигантов, тепловые пульсации.



# ЭВОЛЮЦИЯ МАЛОМАССИВНЫХ ЗВЁЗД

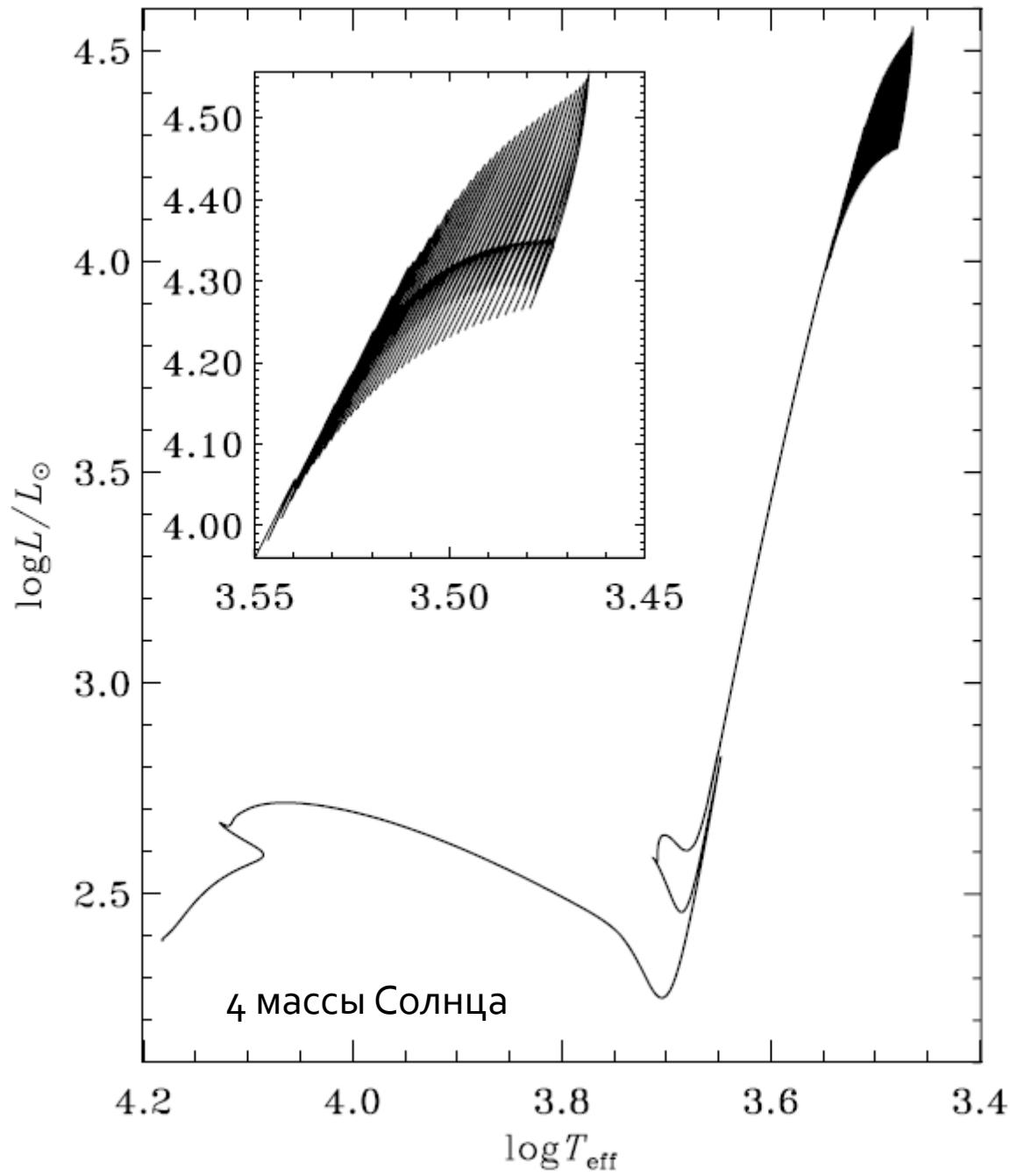
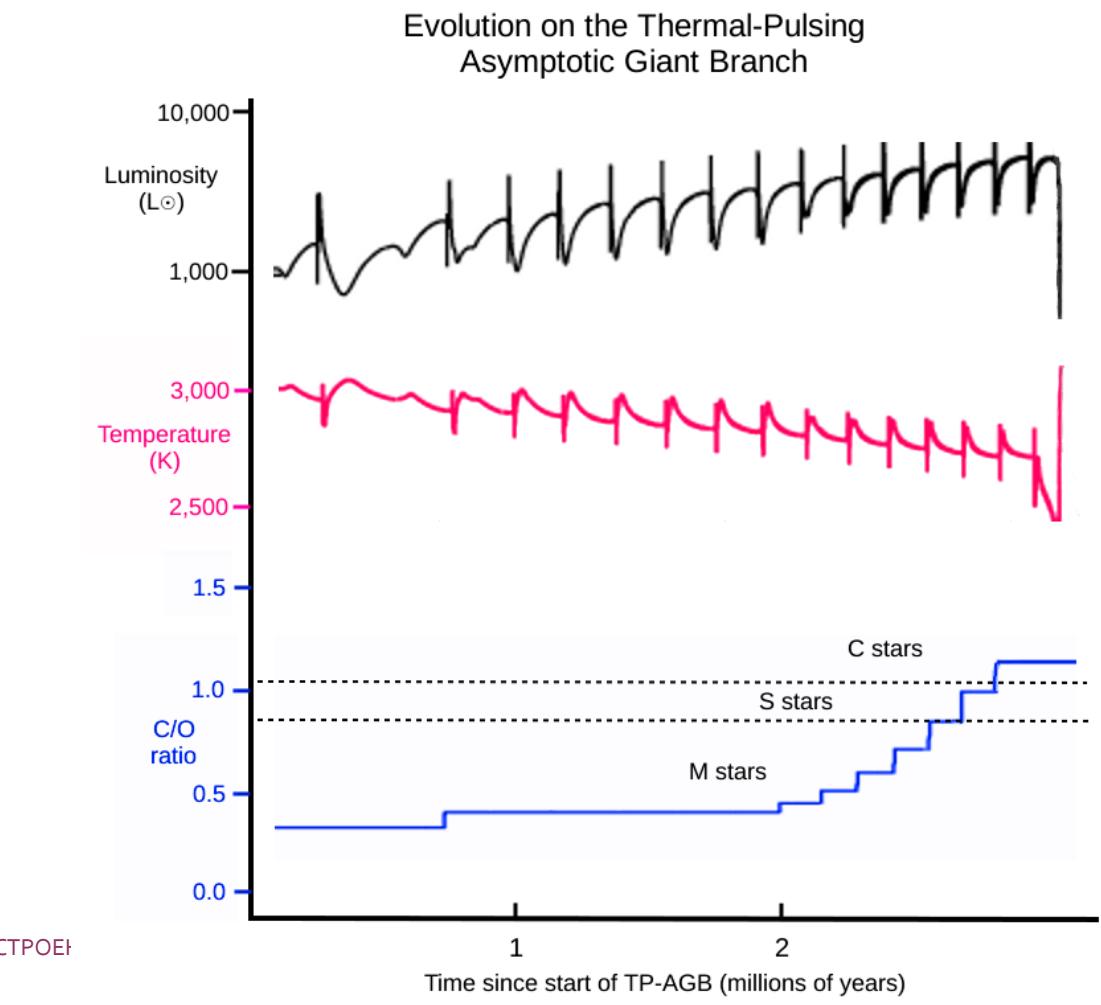


# ГОРИЗОНТАЛЬНАЯ ВЕТВЬ И ПОЛОСА НЕСТАБИЛЬНОСТИ

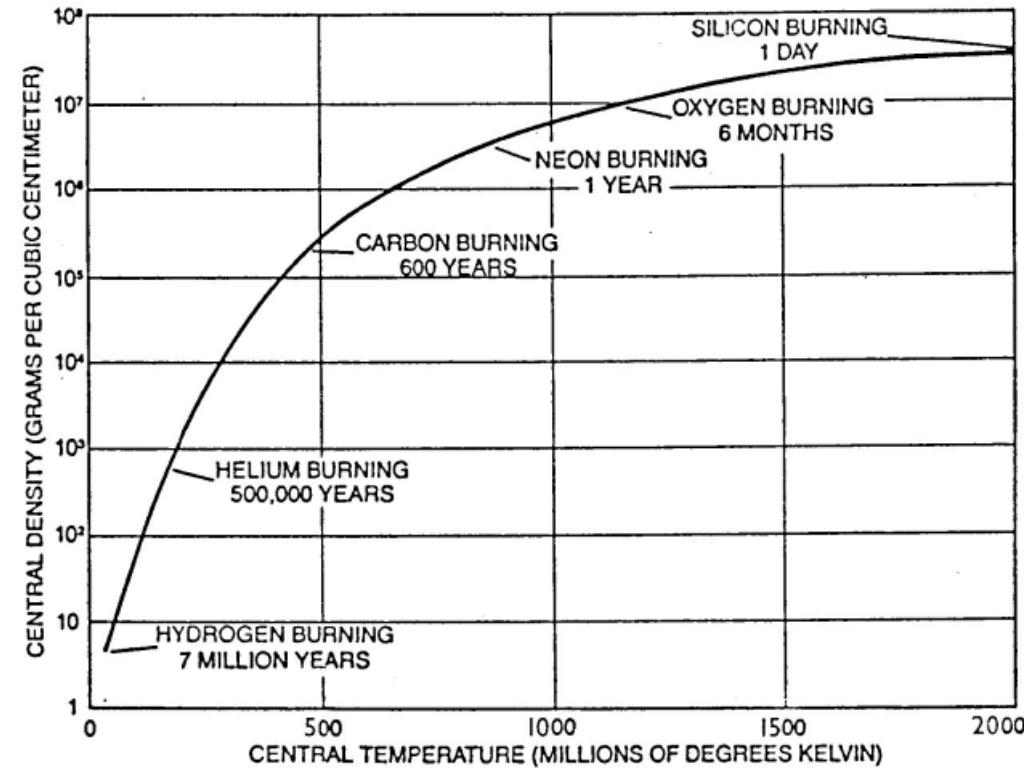
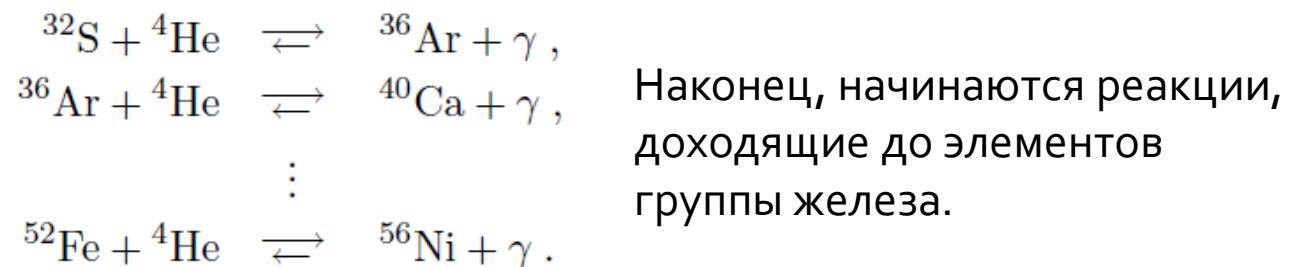
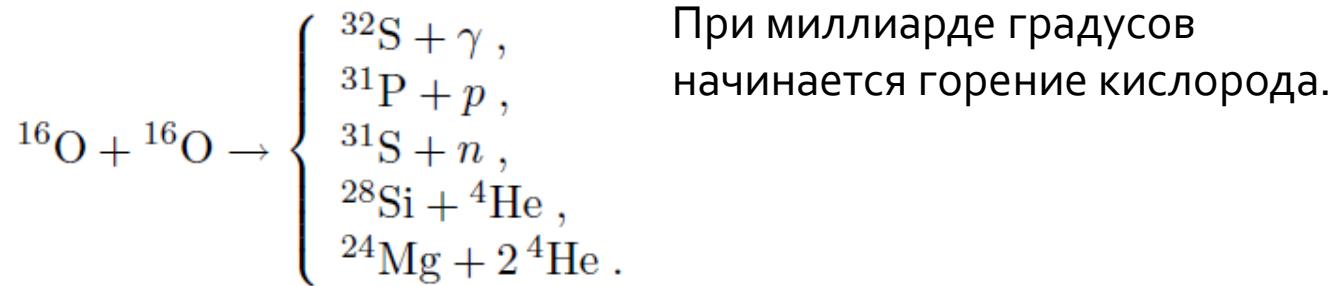
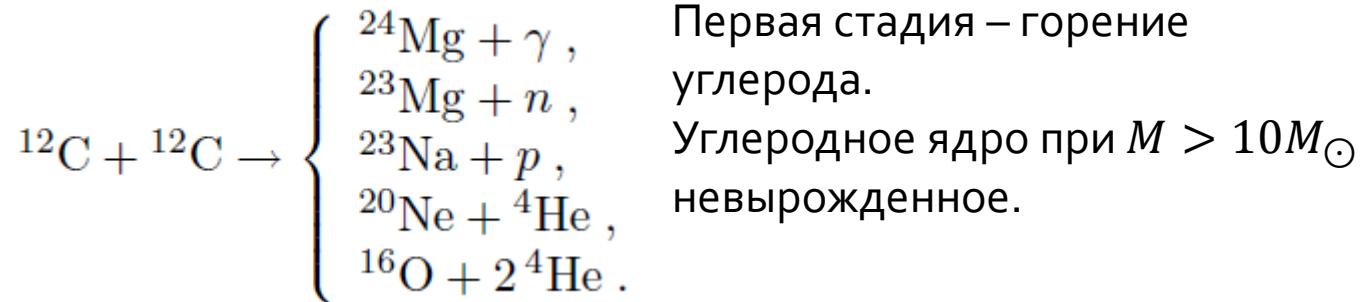


- На горизонтальной ветви идет горение гелия в ядре звезды.
- Массы ядер у разных звезд примерно одинаковы, поэтому светимость отличается слабо.
- А вот температура зависит от массы водородной оболочки. И этот параметр отличается сильно.
- Типичное время жизни на горизонтальной ветви - 100 млн. лет.

# ТЕПЛОВЫЕ ПУЛЬСАЦИИ

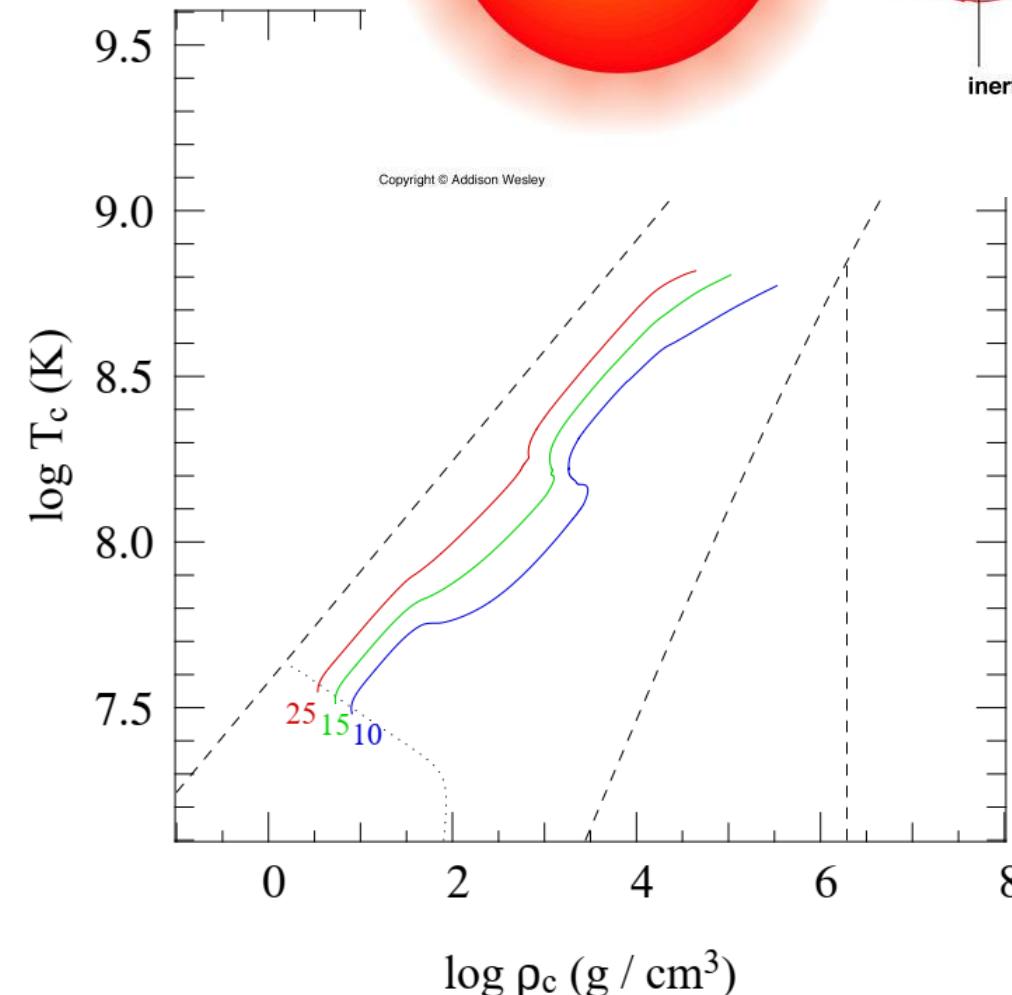
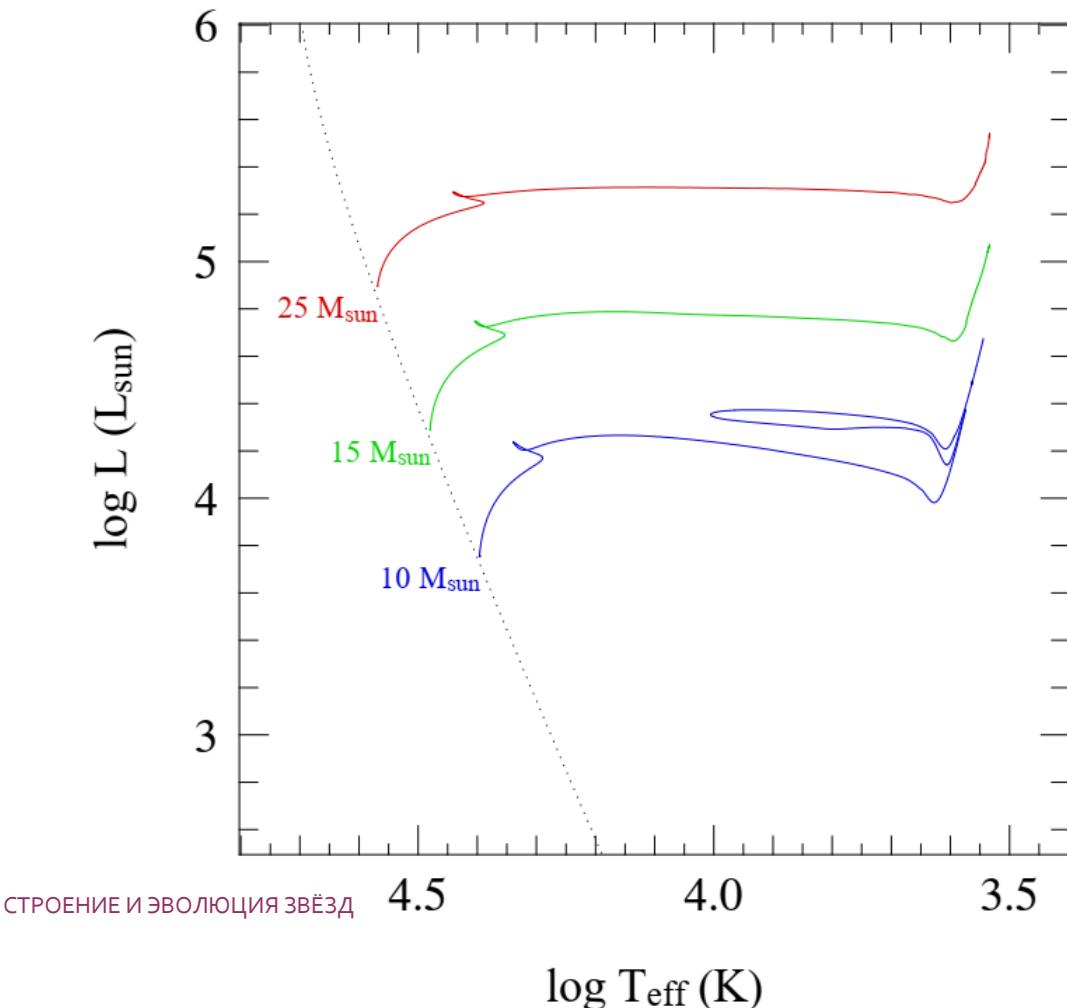


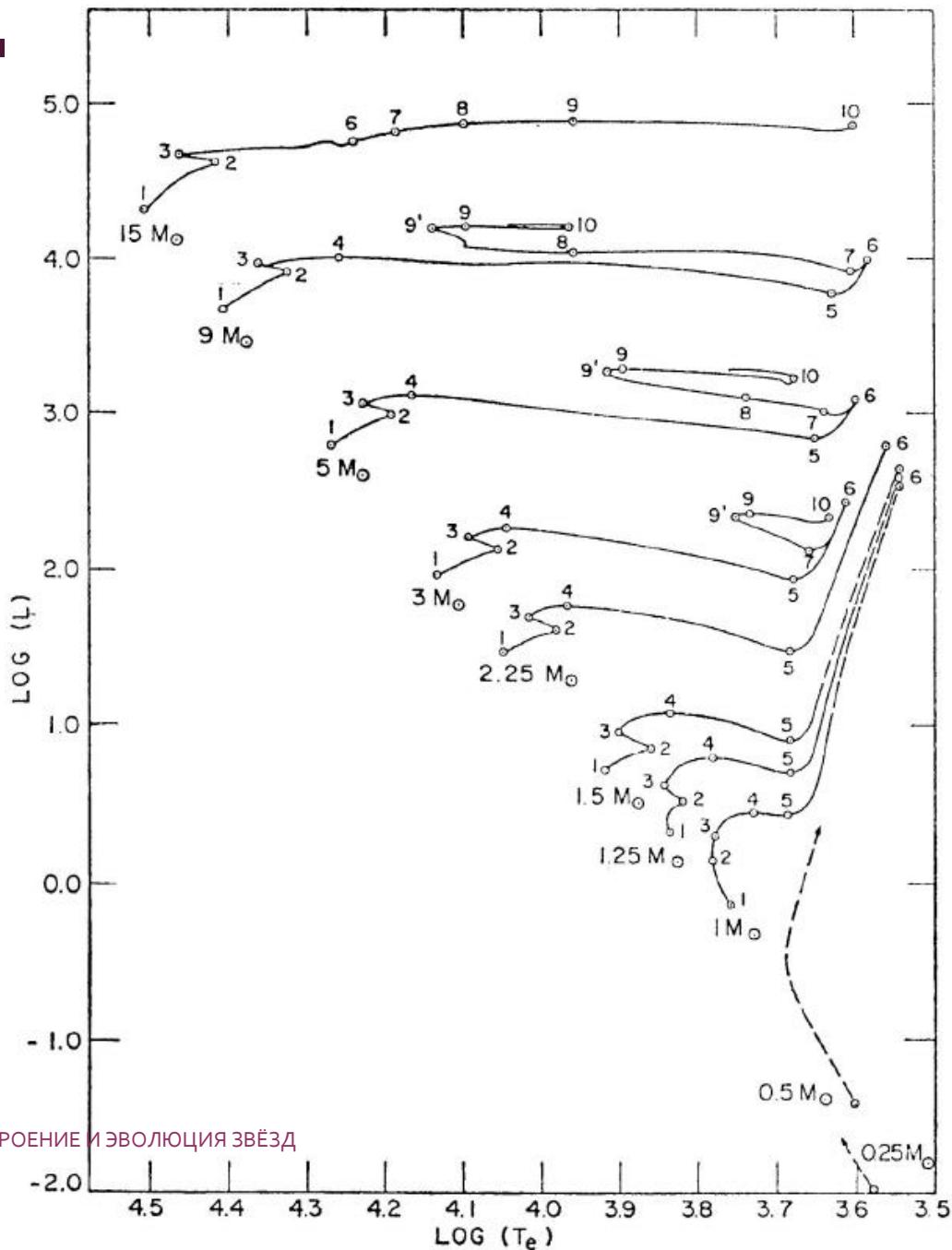
# РЕАКЦИИ В МАССИВНЫХ ЗВЕЗДАХ



25 масс Солнца

# ЭВОЛЮЦИЯ МАССИВНЫХ ЗВЕЗД

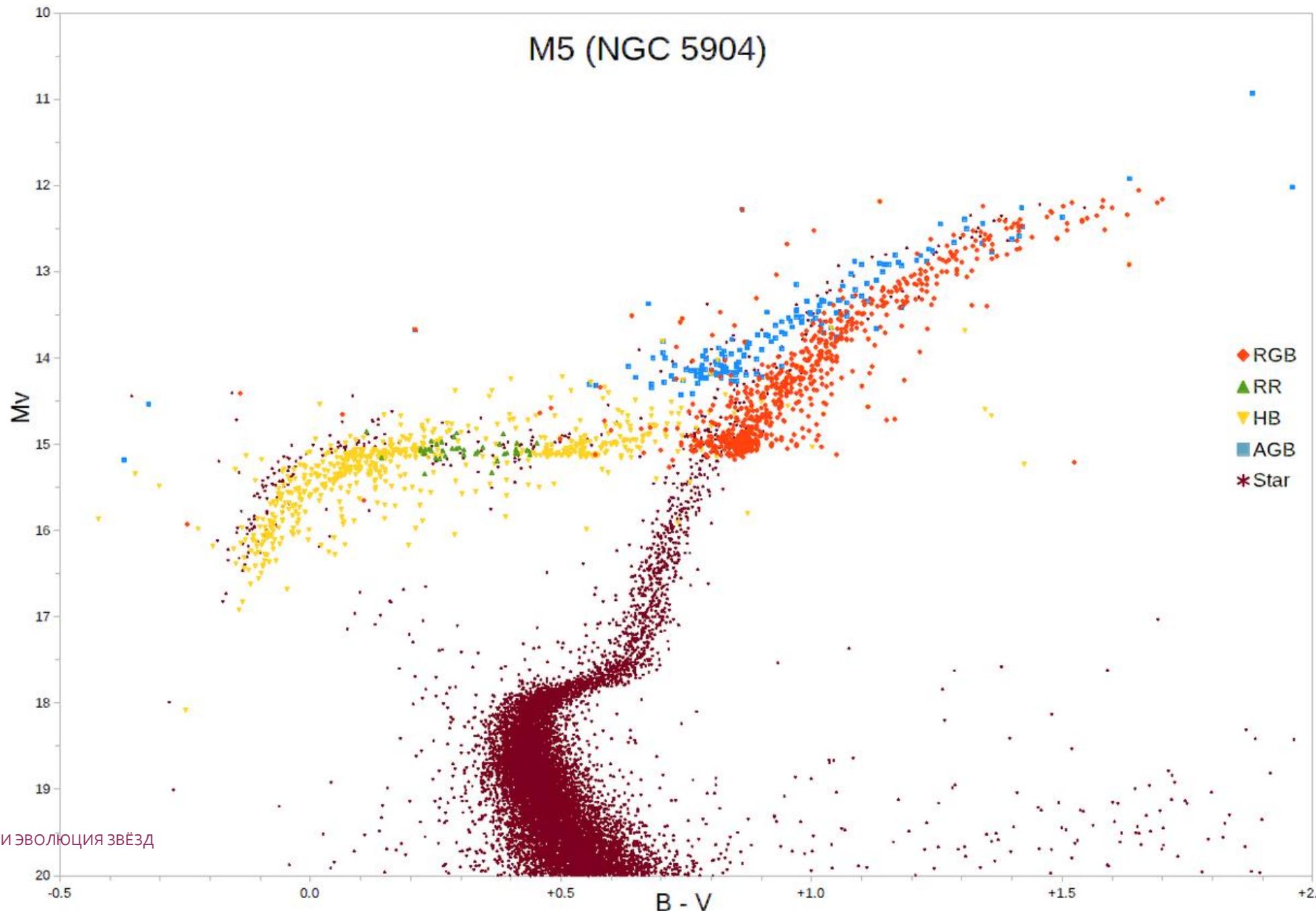




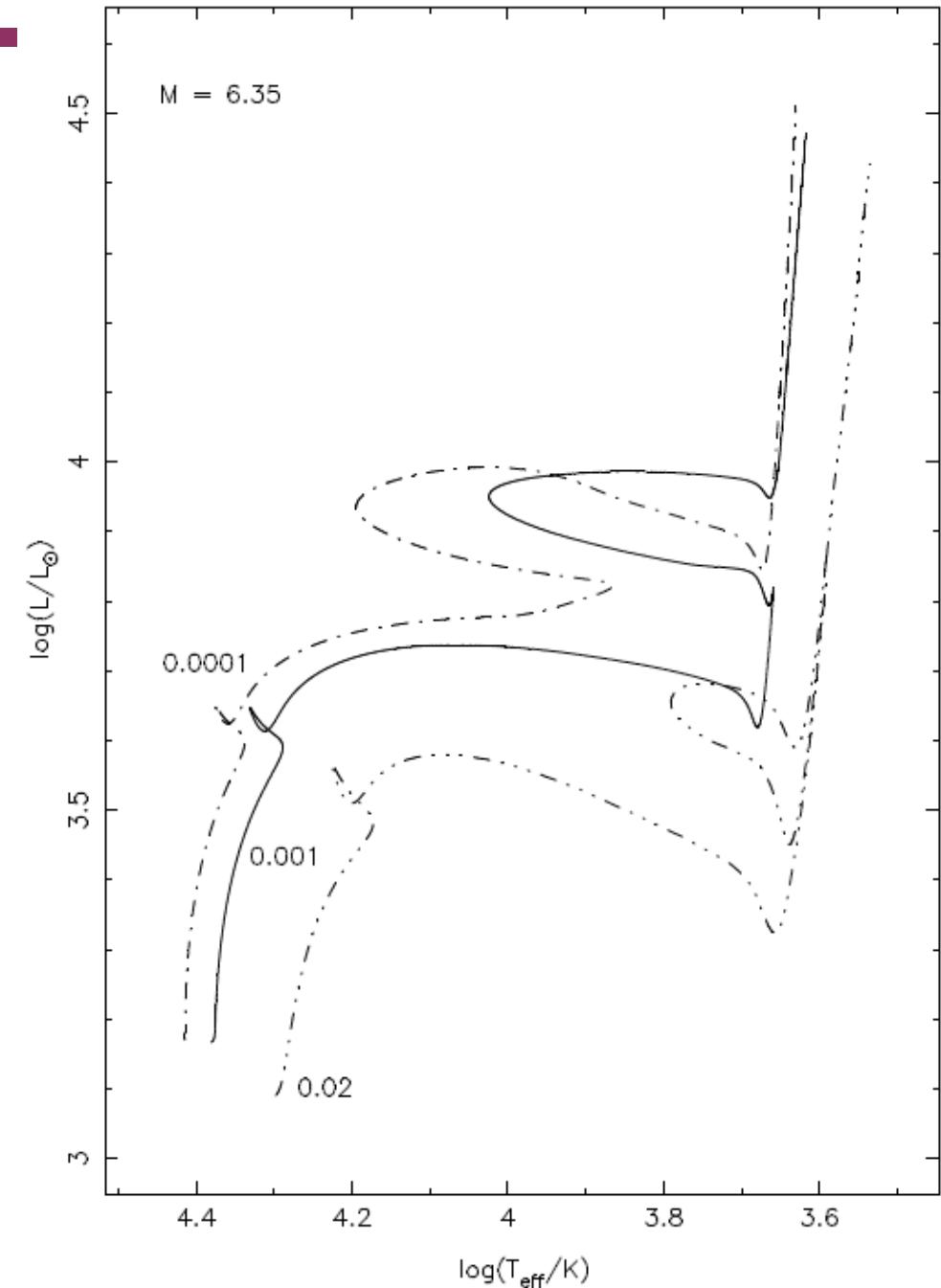
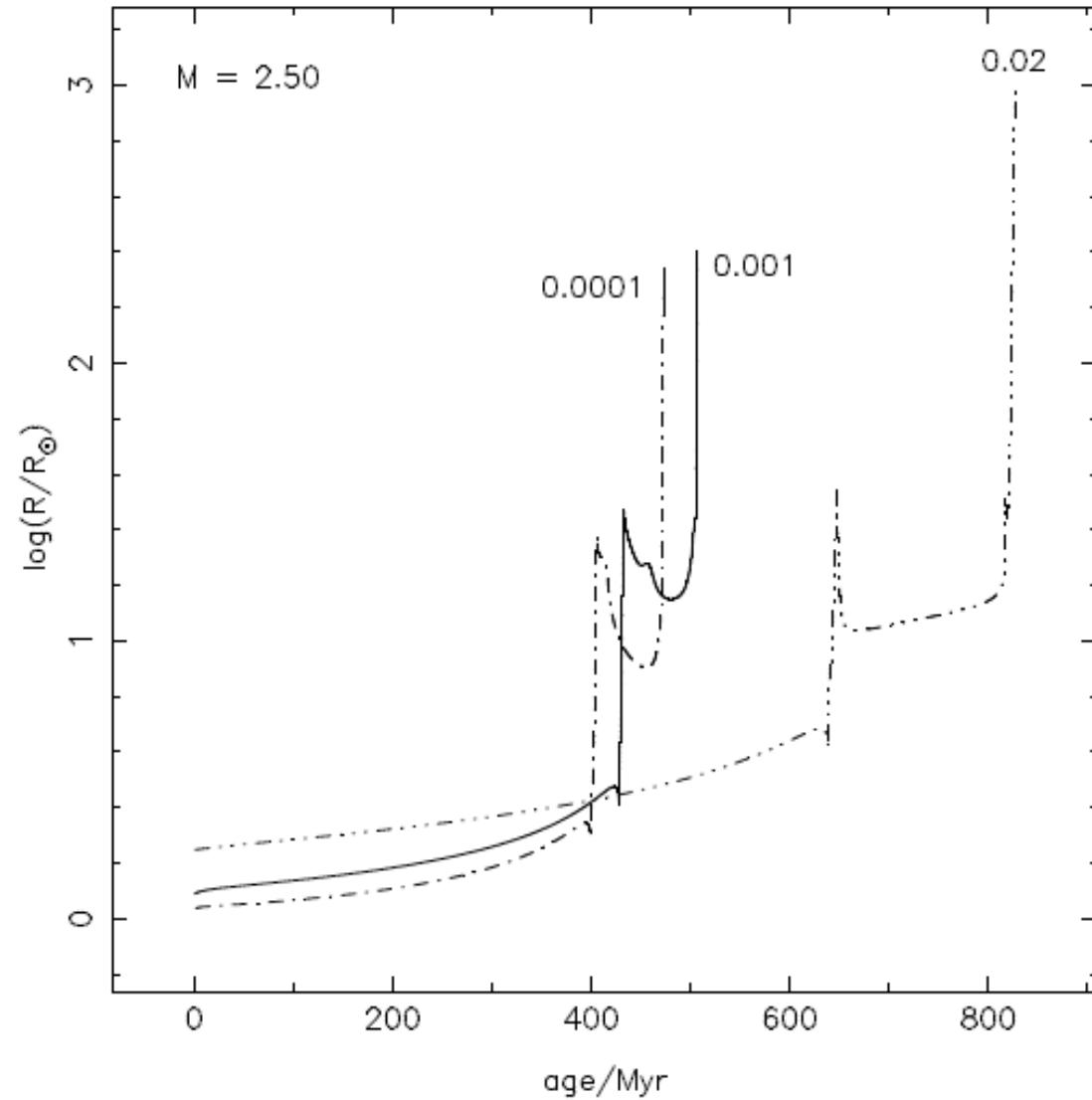
Mass ( $M_\odot$ )	Interval ( $i-j$ )				
	(1-2)	(2-3)	(3-4)	(4-5)	(5-6)
15	1.010 (7)	2.270 (5)		7.55 (4)	
9	2.144 (7)	6.053 (5)	9.113 (4)	1.477 (5)	6.552 (4)
5	6.547 (7)	2.173 (6)	1.372 (6)	7.532 (5)	4.857 (5)
3	2.212 (8)	1.042 (7)	1.033 (7)	4.505 (6)	4.238 (6)
2.25	4.802 (8)	1.647 (7)	3.696 (7)	1.310 (7)	3.829 (7)
1.5	1.553 (9)	8.10 (7)	3.490 (8)	1.049 (8)	$\geq 2$ (8)
1.25	2.803 (9)	1.824 (8)	1.045 (9)	1.463 (8)	$\geq 4$ (8)
1.0	7 (9)	2 (9)	1.20 (9)	1.57 (8)	$\geq 1$ (9)

Mass ( $M_\odot$ )	Interval ( $i-j$ )			
	(6-7)	(7-8)	(8-9)	(9-10)
15	7.17 (5)	6.20 (5)	1.9 (5)	3.5 (4)
9	4.90 (5)	9.50 (4)	3.28 (6)	1.55 (5)
5	6.05 (6)	1.02 (6)	9.00 (6)	9.30 (5)
3	2.51 (7)	4.08 (7)		6.00 (6)

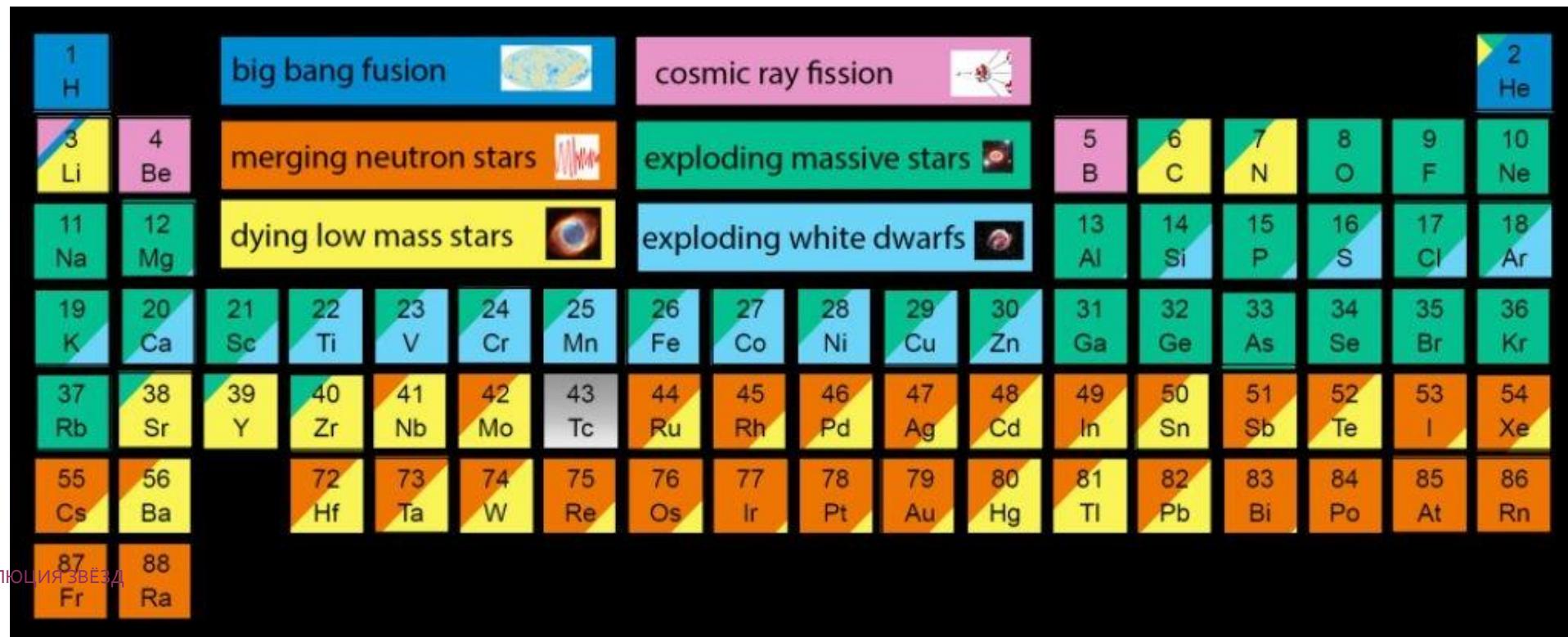


# МЕТАЛЛИЧНОСТЬ



# ХИМИЧЕСКАЯ ЭВОЛЮЦИЯ ВСЕЛЕННОЙ

Большинство химических элементов, с которыми мы сталкиваемся в жизни (и из которых состоим), возникли в звездах в течение их жизни в результате термоядерных реакций, или на последних стадиях жизни массивных звезд – во взрывах сверхновых. До образования звезд обычное вещество в основном существовало в виде водорода (самый распространенный элемент) и гелия.



СТРОЕНИЕ И ЭВОЛЮЦИЯ ЗВЕЗД

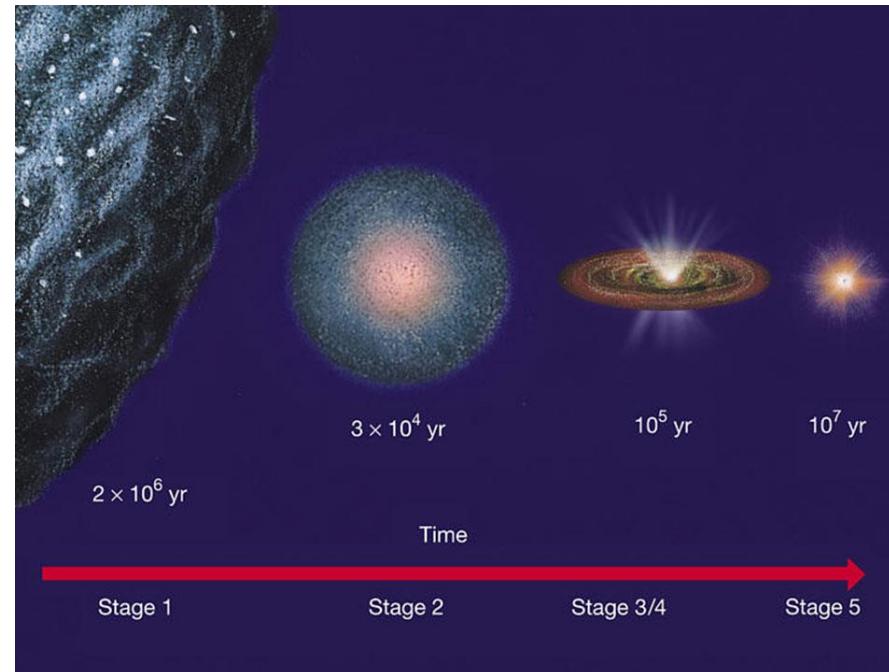
46

# ЛИТЕРАТУРА

- А. Засов, К. Постнов «Курс общей астрофизики», Гл. 5 и 6. ([github](#))
- С. Ламзин, «Физика и эволюция звёзд» ([github](#))
- O.R. Polls, «Stellar structure and evolution» ([github](#))
- Я. Зельдович, С. Блинников, Н. Шакура «Физические основы строения и эволюции звёзд», Гл. 6, <http://www.astronet.ru/db/msg/1169513/index.html>
- К. Постнов «Лекции по общей астрофизике для физиков», ч. 6 и 7  
<http://www.astronet.ru/db/msg/1176797>

# ДОМАШНЕЕ ЗАДАНИЕ 1

- а) Покажите, что самогравитирующее сферическое облако идеального газа начнёт коллапсировать, если его размер превысит величину джинсовской длины:  $R > \lambda_J \propto \left(\frac{T}{\rho}\right)^{1/2}$ . Здесь  $T$  – температура облака, а  $\rho$  – его плотность.
- б) Вычислите (приблизительно) значения джинсовской длины  $\lambda_J$  и джинсовской массы  $M_J = \rho \lambda_J^3$  для молекулярного водородного облака, температура которого  $T = 10$  К, а концентрация  $n = 10^4$  см<sup>-3</sup>.



## ДОМАШНЕЕ ЗАДАНИЕ 2

**1 (6 баллов).** Покажите, что если непрозрачность вещества звезды определяется в первую очередь томpsonовским рассеянием на свободных электронах (что верно для массивных звёзд), то максимальная (Эддингтоновская) светимость  $L_{\text{Edd}}$ , которую может иметь водородная звезда определяется выражением:

$$L_{\text{Edd}} = \frac{4\pi G M m_p c}{\sigma_T} \approx (1.3 \times 10^{38} \text{ эрг с}^{-1}) \left( \frac{M}{M_\odot} \right),$$

где  $M$  – масса звезды,  $m_p$  -- масса протона,  $\sigma_T = 6.65 \times 10^{-25} \text{ см}^2$  -- Томpsonовское сечение.

**2 (4 балла).** Светимость массивных звёзд главной последовательности определяется эффективностью СНО-цикла. Его удельное энерговыделение примерно равно  $\varepsilon = 5 \text{ МэВ/нуклон}$ . Зная это и воспользовавшись формулой из предыдущей задачи, рассчитайте минимальное время, которое проведёт массивная звезда на главной последовательности.