

The background is a deep blue gradient with faint, stylized celestial patterns. On the left, there are concentric circular arcs and radial lines, resembling a celestial map or a clock face, with numerical labels like 150, 160, 170, 180, 190, 200, 210, 220, 230, 240, 250, and 260. On the right, there are circular orbits with arrows indicating direction. The overall theme is astronomy and space.

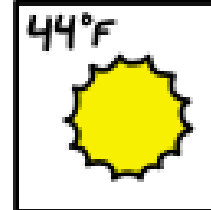
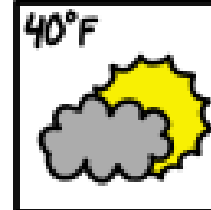
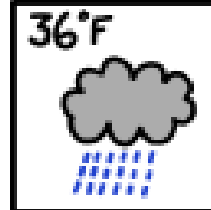
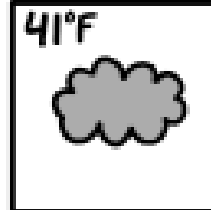
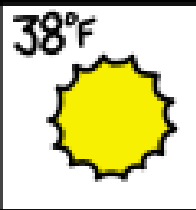
ЭВОЛЮЦИЯ ОДИНОЧНЫХ ЗВЁЗД

(ЛЕКЦИЯ 6. МОДУЛЬ «АСТРОФИЗИКА». ВЕСНА 2022. ВШЭ)

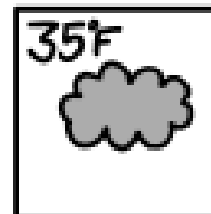
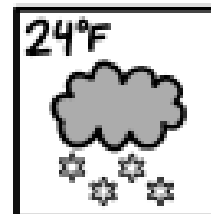
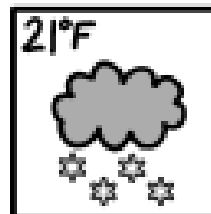
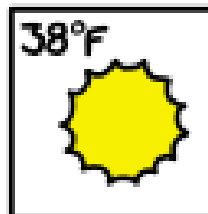
АНТОН БИРЮКОВ, К.Ф.-М.Н.

ПРОГНОЗ ПОГОДЫ

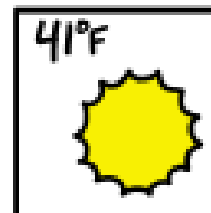
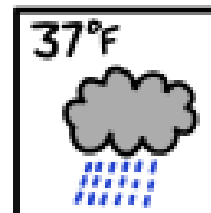
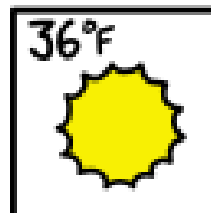
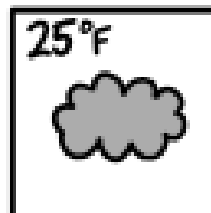
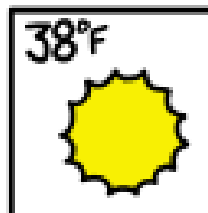
YOUR 5-DAY
FORECAST



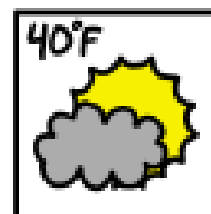
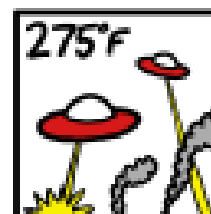
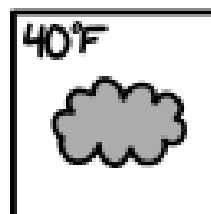
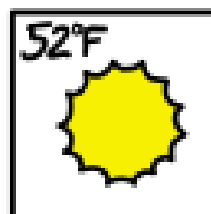
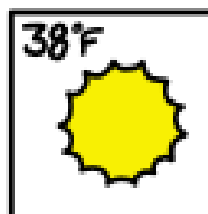
YOUR 5-MONTH
FORECAST



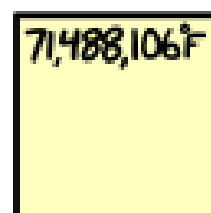
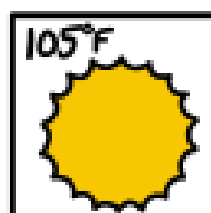
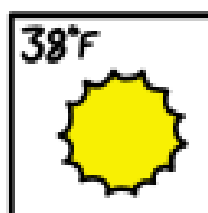
YOUR 5-YEAR
FORECAST



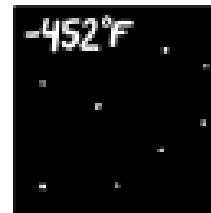
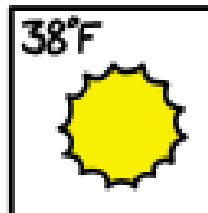
YOUR 5-MILLION-
YEAR FORECAST



YOUR 5-BILLION-
YEAR FORECAST



YOUR 5-TRILLION-
YEAR FORECAST

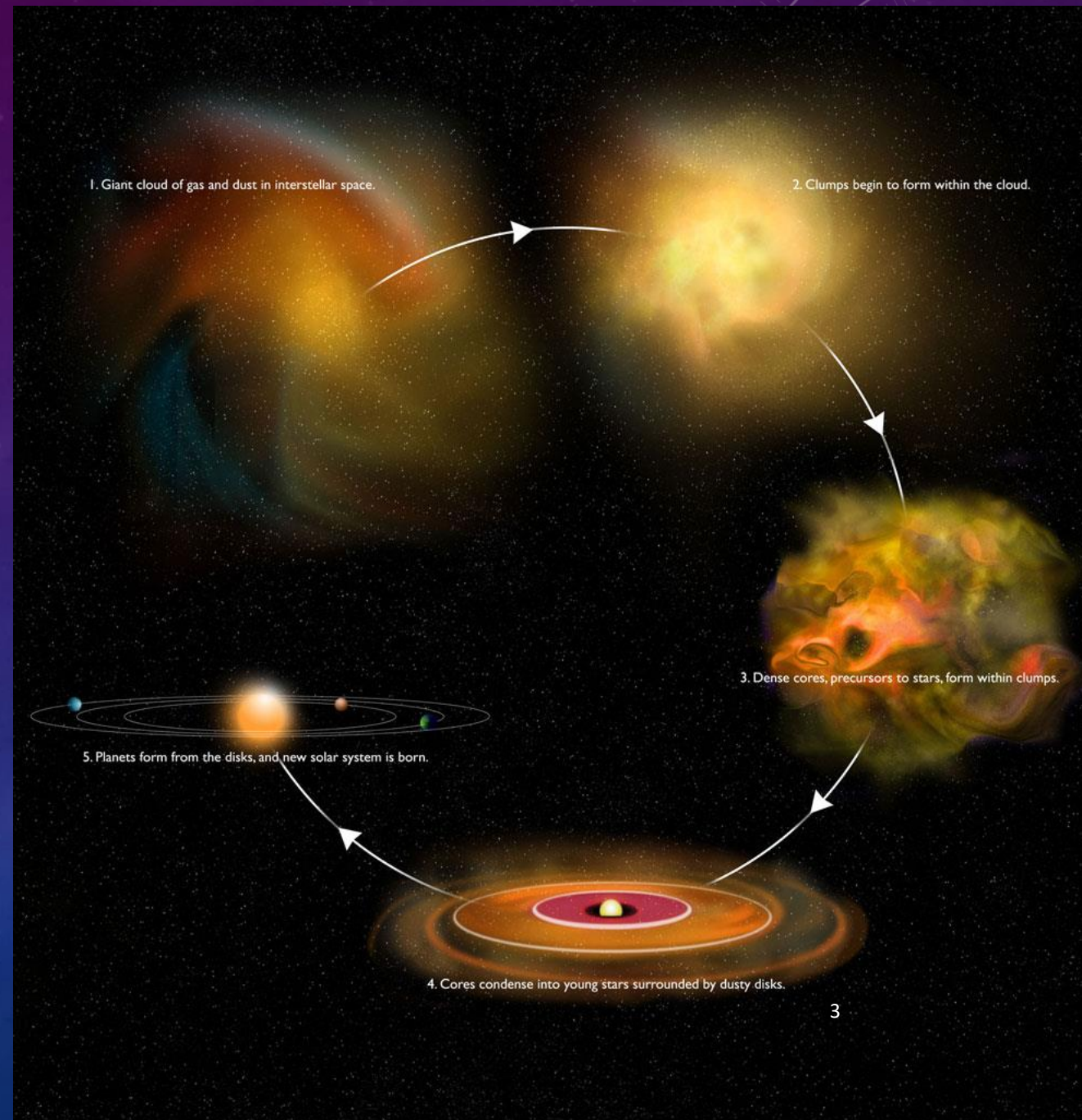


ФОРМИРОВАНИЕ ЗВЕЗДЫ

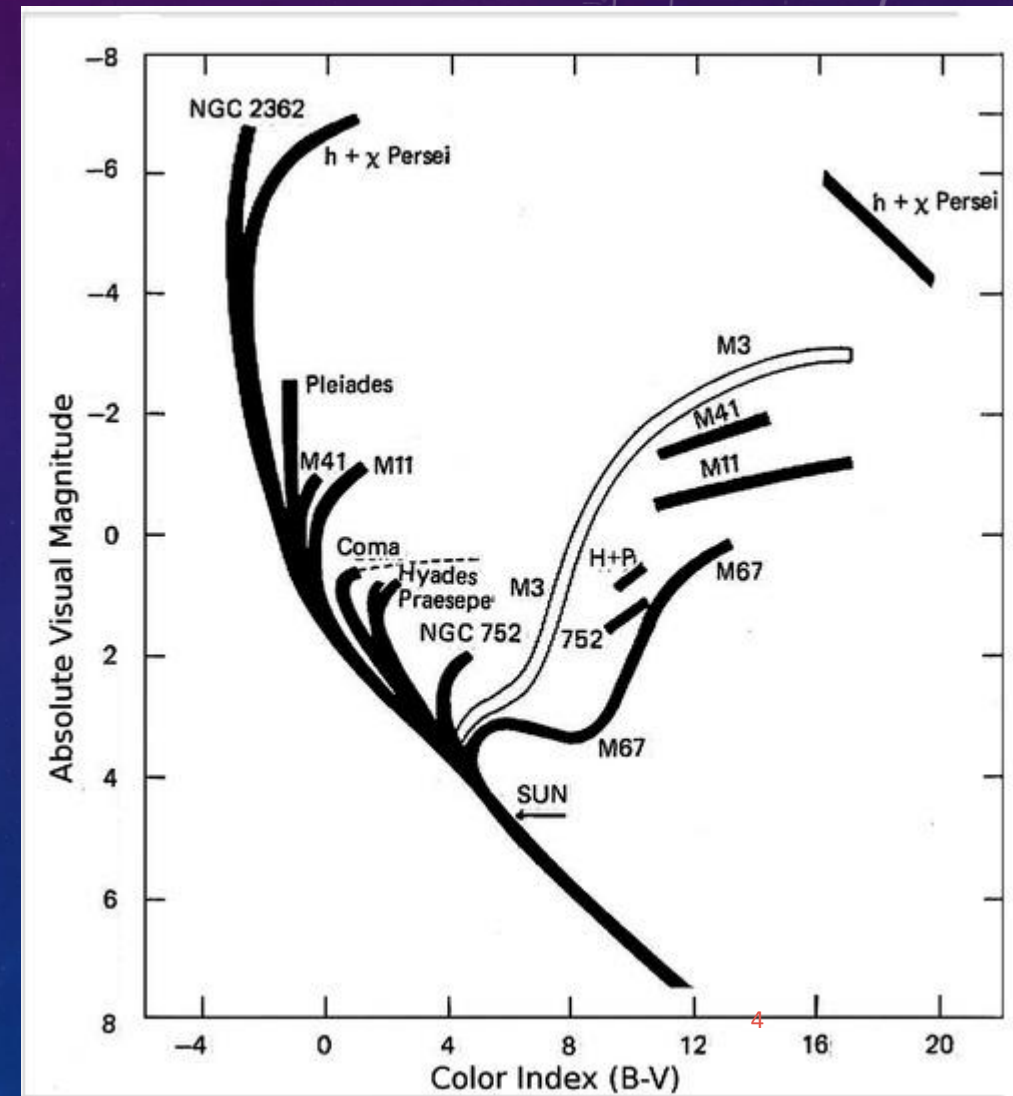
- Звёздообразование запускается при достижении облаком джинсовской массы:

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

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



ЗВЁЗДНЫЕ СКОПЛЕНИЯ



ЕЩЕ РАЗ О Г-Р...

$$M = m + 5(1 - \log D_{\text{пк}})$$

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

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

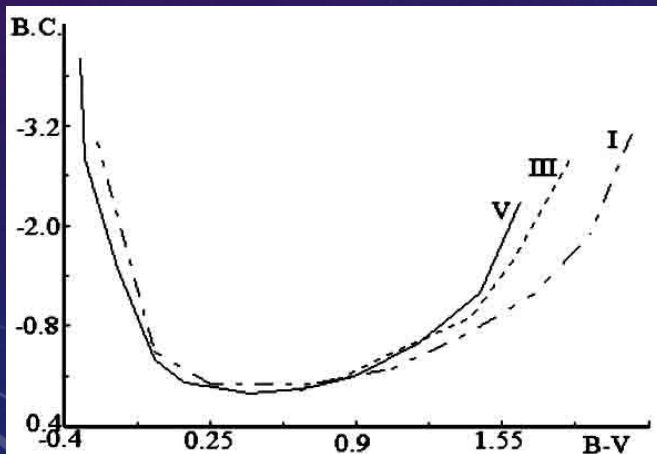
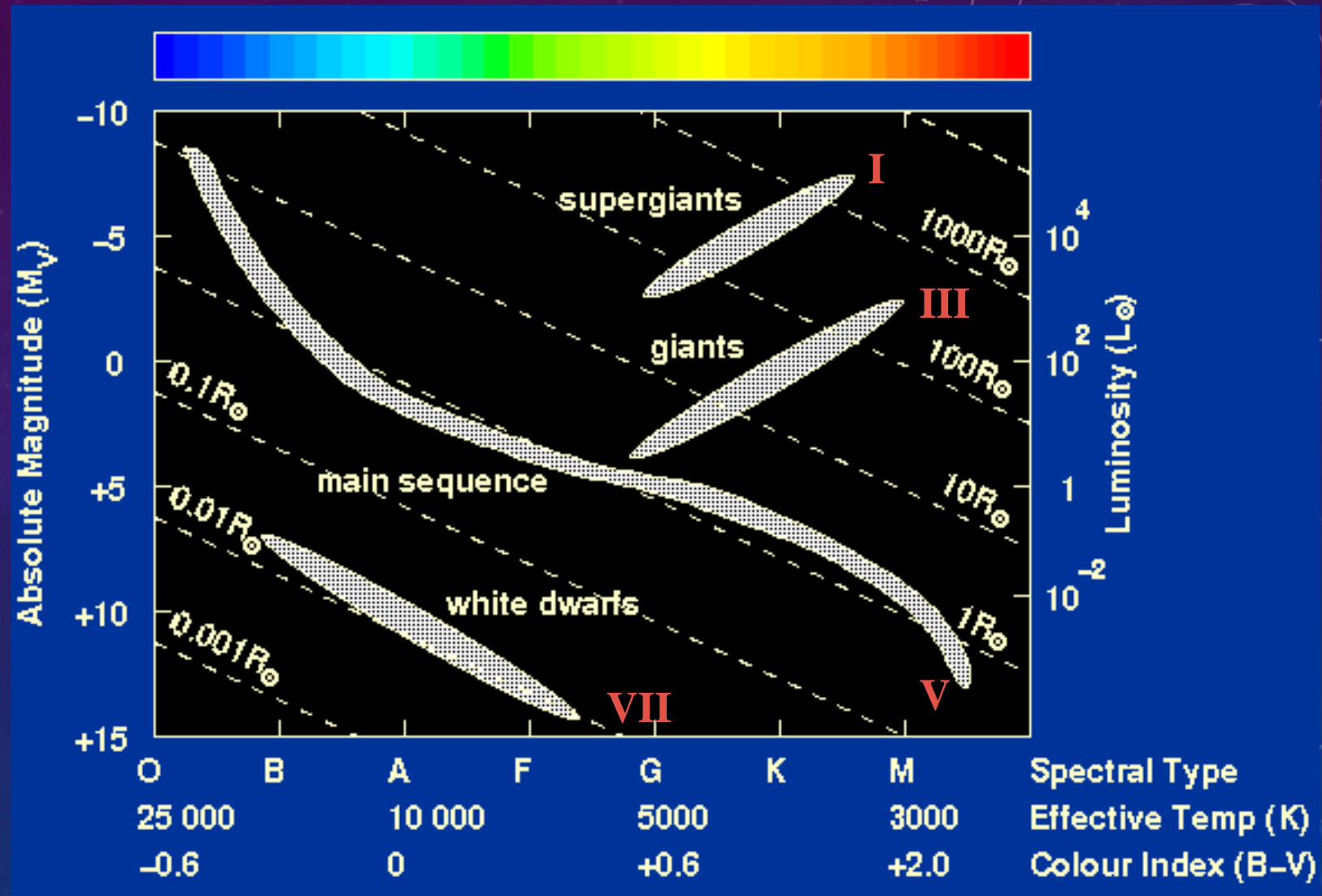
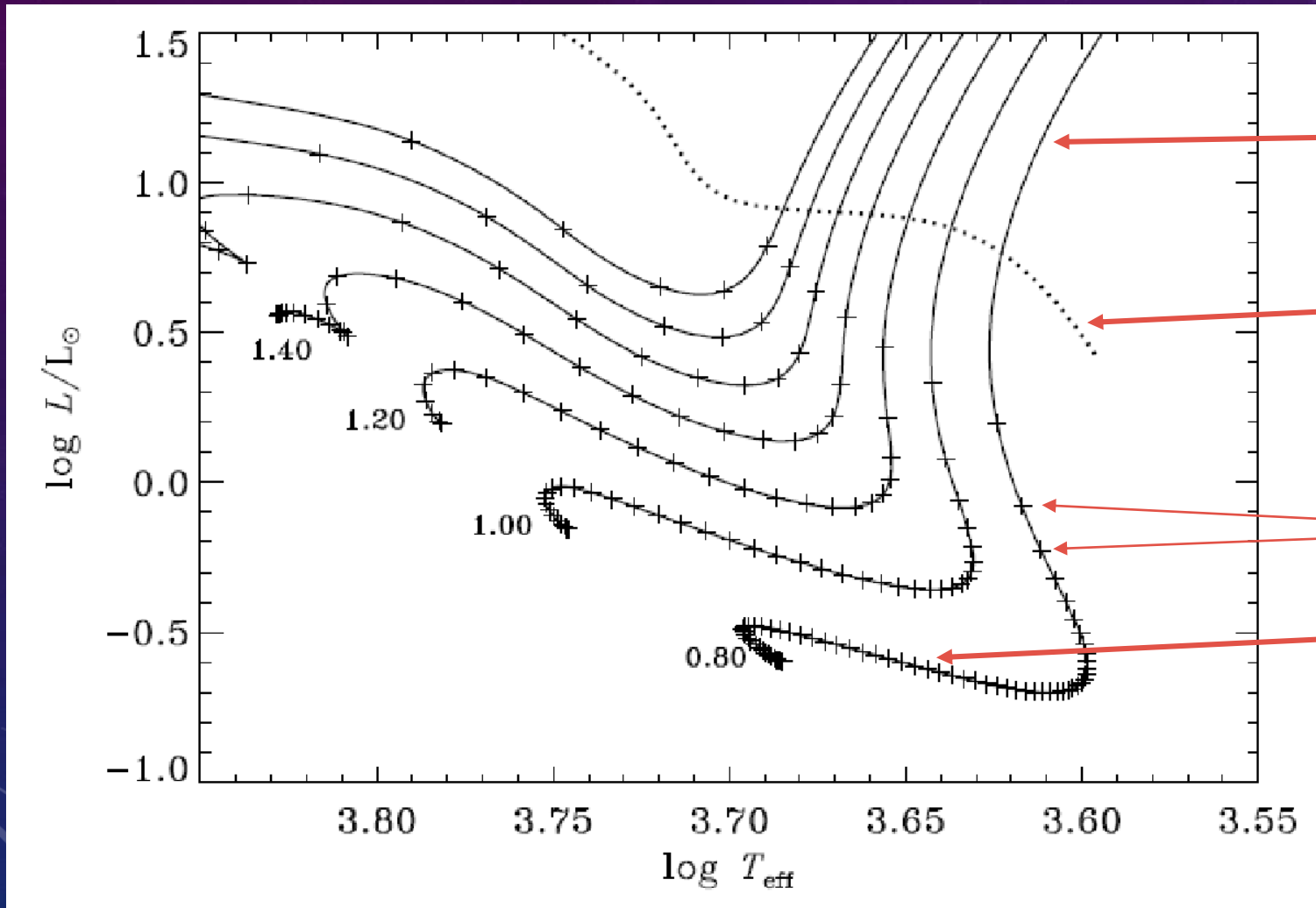


Рис.2-2



НАЧАЛЬНЫЕ СТАДИИ ЭВОЛЮЦИИ



Стадия Хаяши (полностью конвективная звезда)

Первые термоядерные реакции
 ${}^2_1\text{H} + {}^2_1\text{H} \rightarrow {}^3_2\text{He} + \text{n} + 3.26 \text{ МэВ}$

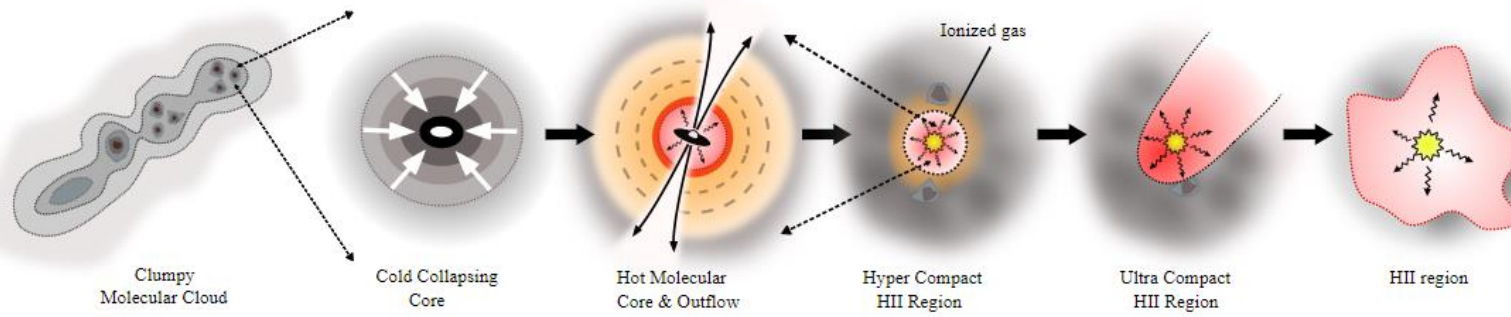
1 млн лет

Стадия Хеньи (начало горения водорода)

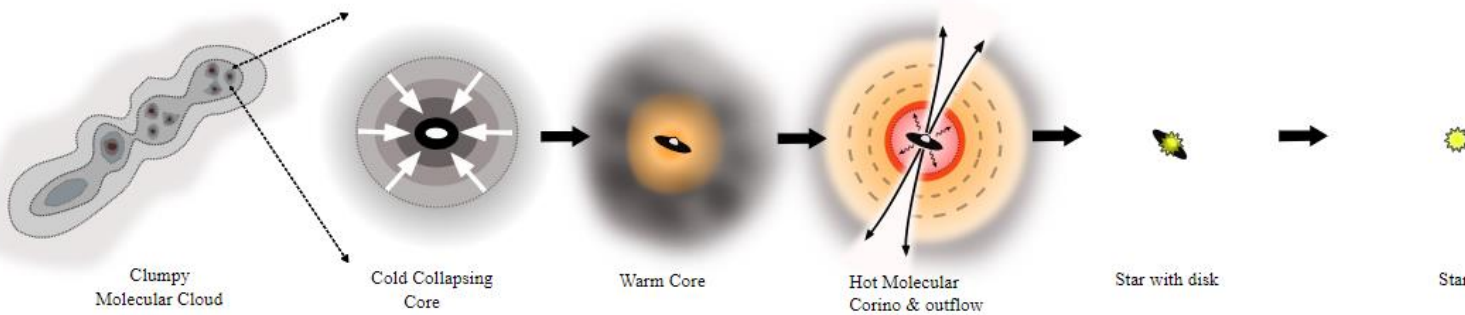
ПРОТОЗВЕЗДА И ЕЁ ОКРЕСТНОСТИ

Main difference: massive stars affect their surroundings

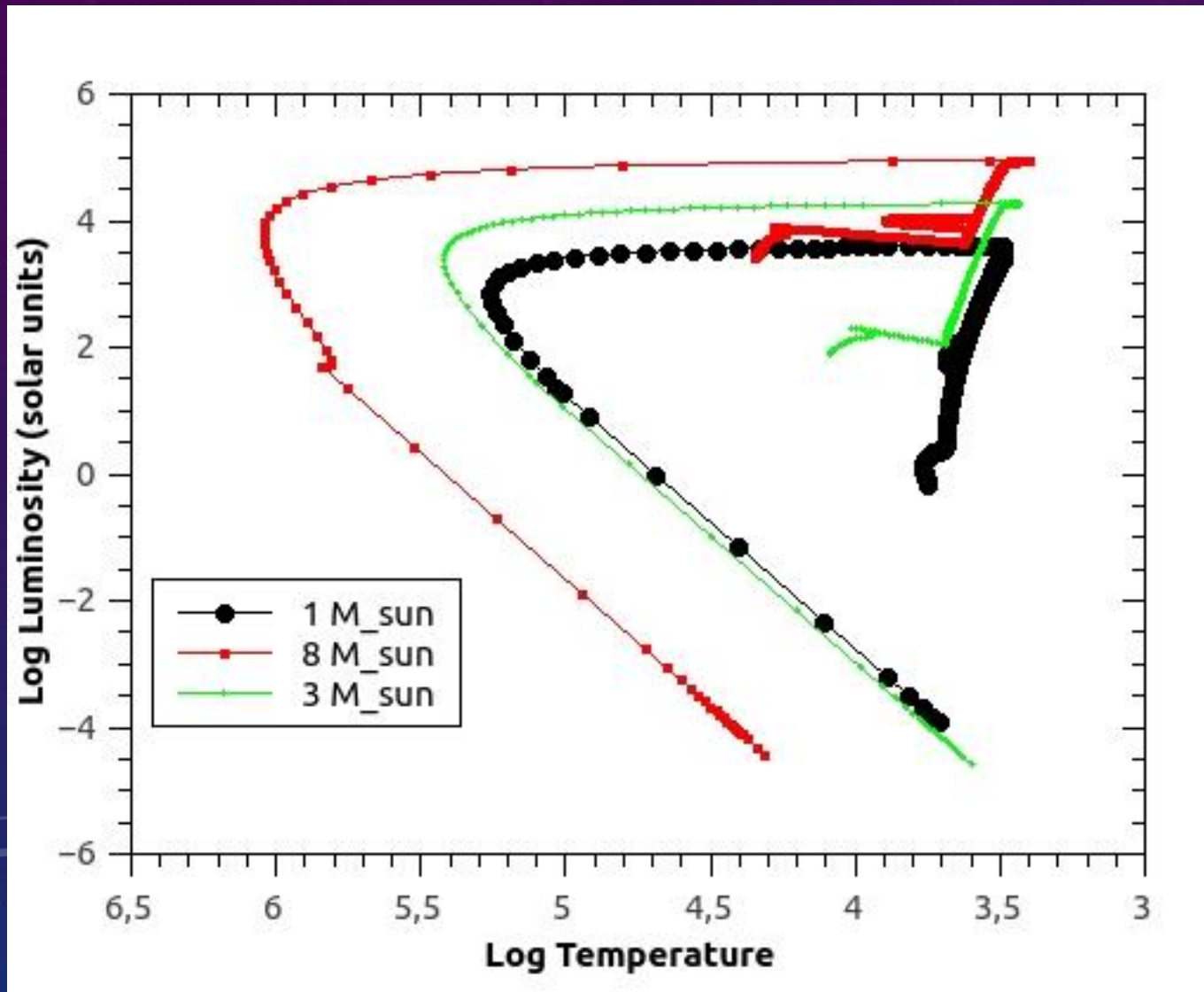
High-mass SF



Low-mass SF



ОТ ГЛАВНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ДО БЕЛЫХ КАРЛИКОВ



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

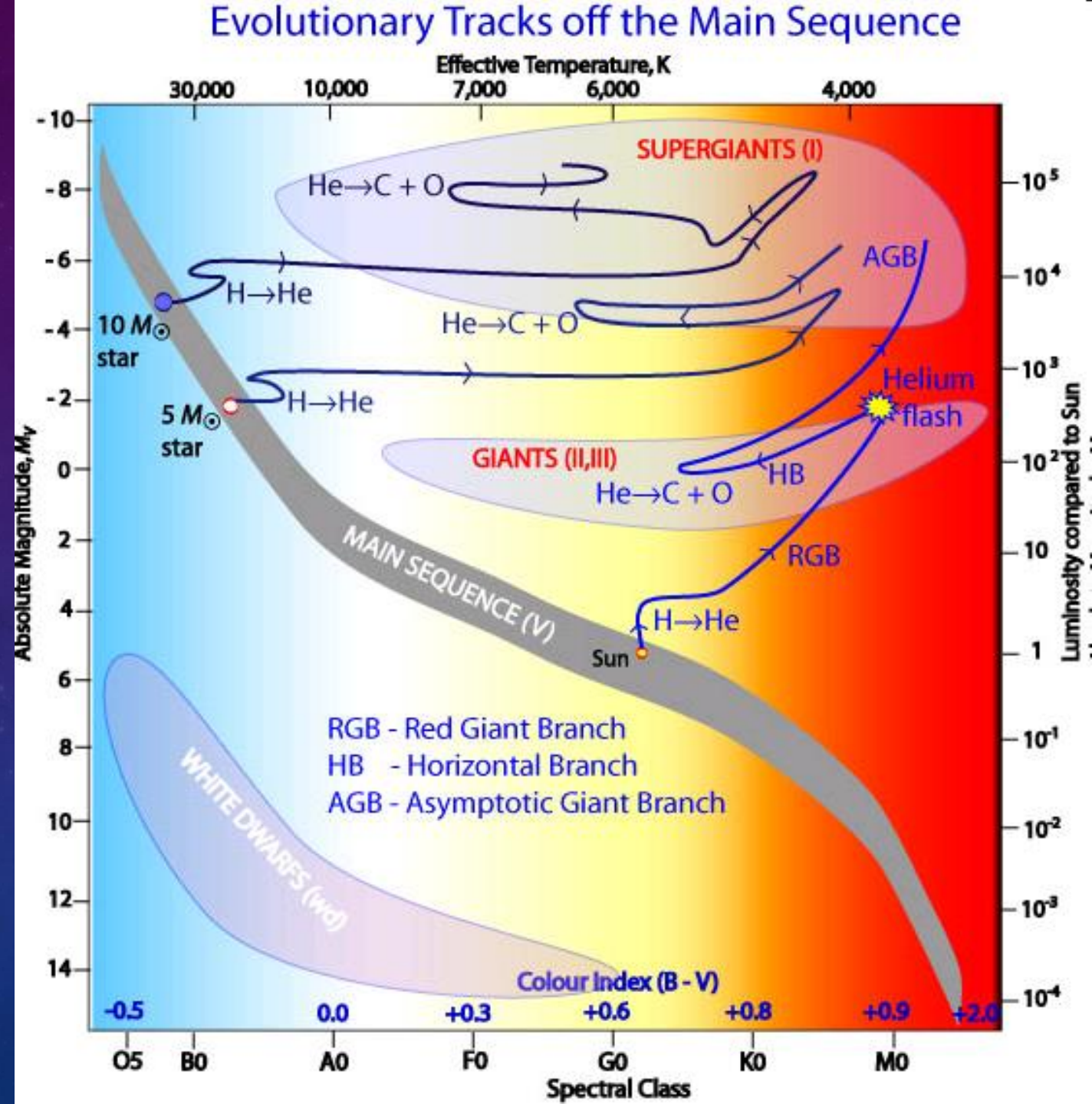
<http://astronomy.swin.edu.au/~jhurley/stellar.html>

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

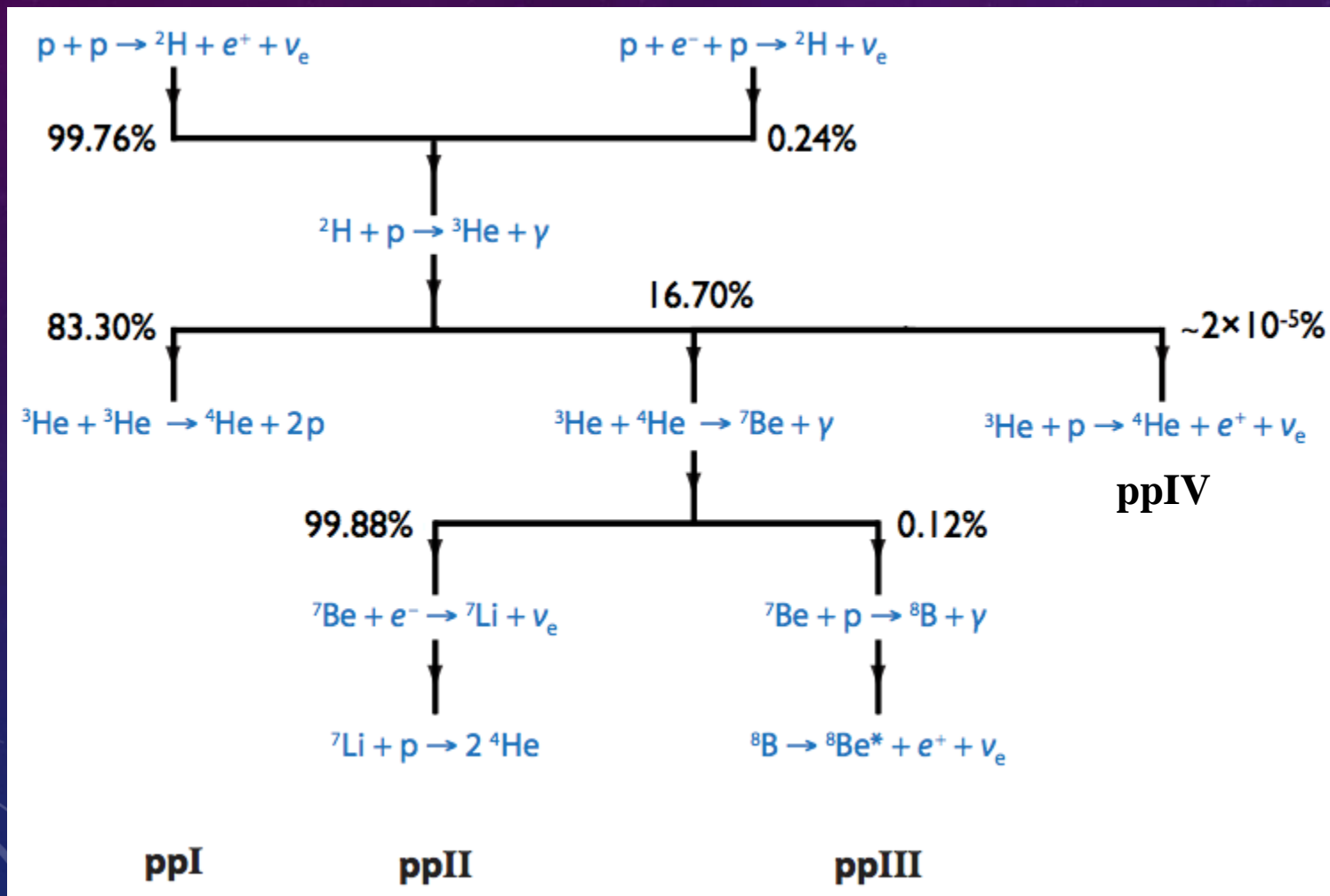
<http://www.astro.wisc.edu/~townsend/static.php?ref=mesa-web>

ЭВОЛЮЦИЯ

- 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.



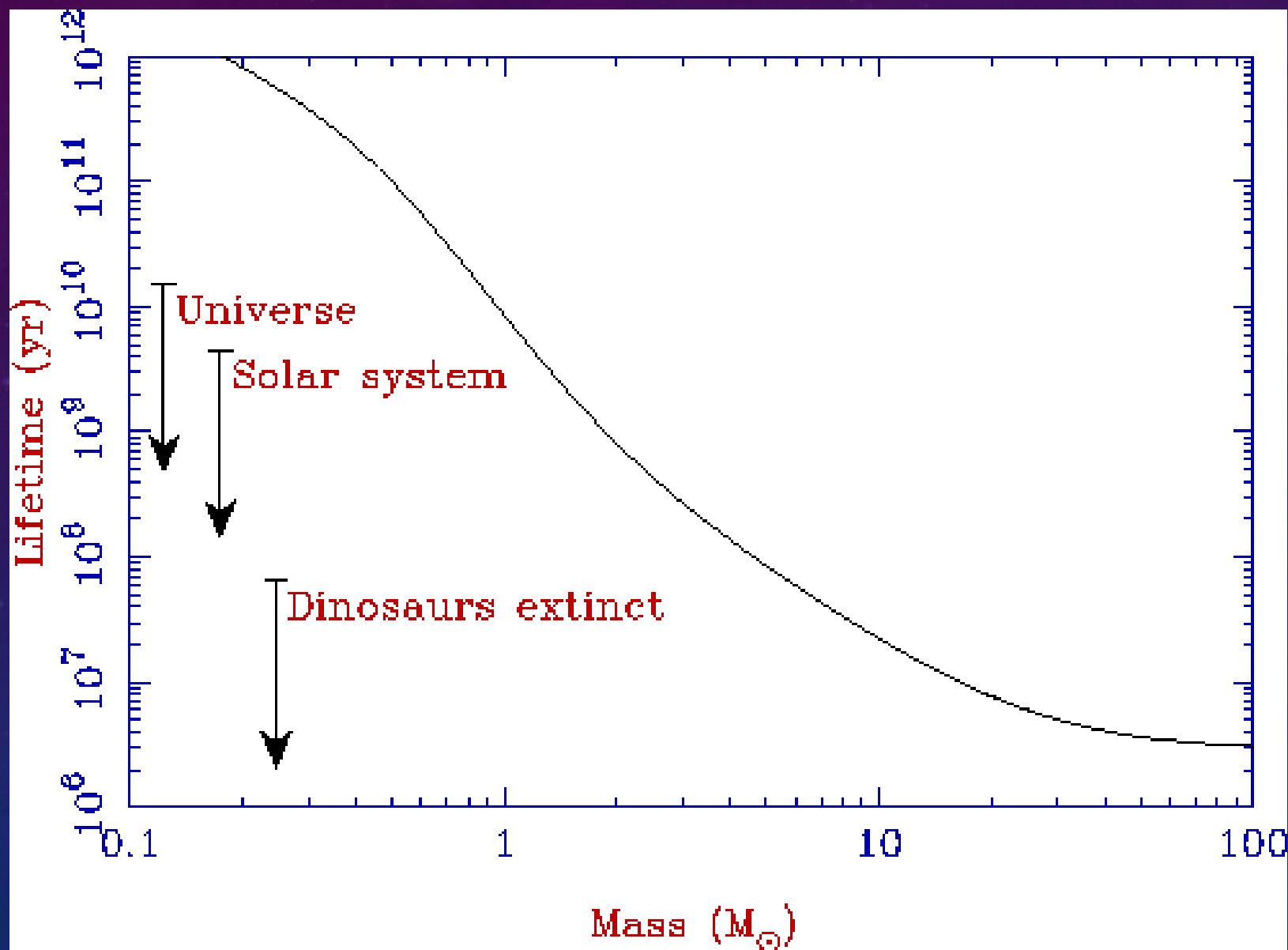
ТЕРМОЯДЕРНОЕ ГОРЕНИЕ: PP-ЦИКЛ



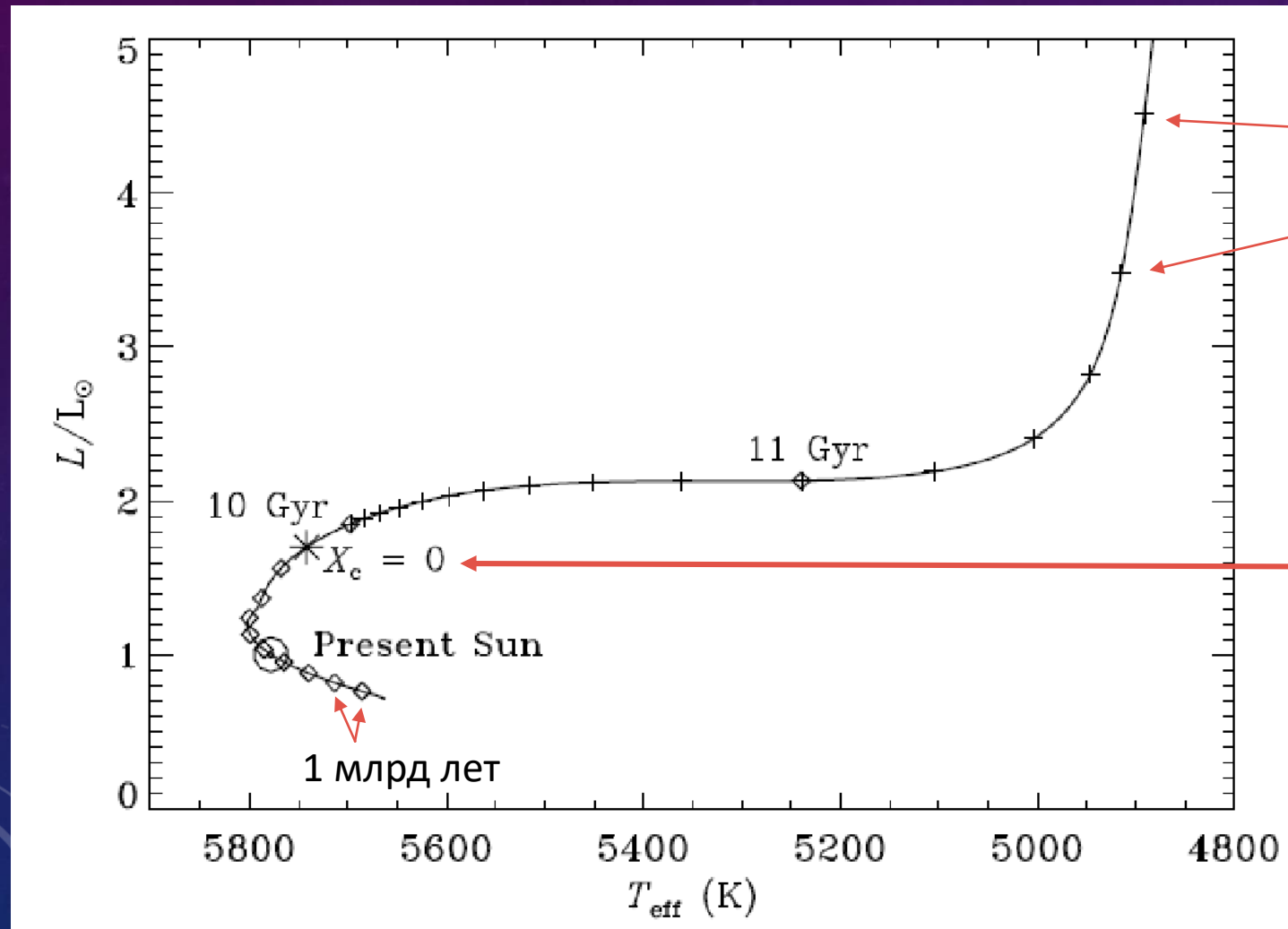
- $M > 0.08 M_{\odot}$
- Характерное время реакции $p+p$
 $\sim 10^{10}$ лет
- Реакция идёт благодаря квантовому туннелированию
- p - p доминирует при температурах $\sim 10 - 14$ МК
- Удельное энерговыделение
 $\varepsilon \propto T^{3..4}$
- Эффективность $\sim 0.007 M c^2$

ВРЕМЯ ЖИЗНИ ЗВЕЗДЫ НА ГП

<http://astronomy.nmsu.edu/tharriso/ast105/Exoplanets.html>



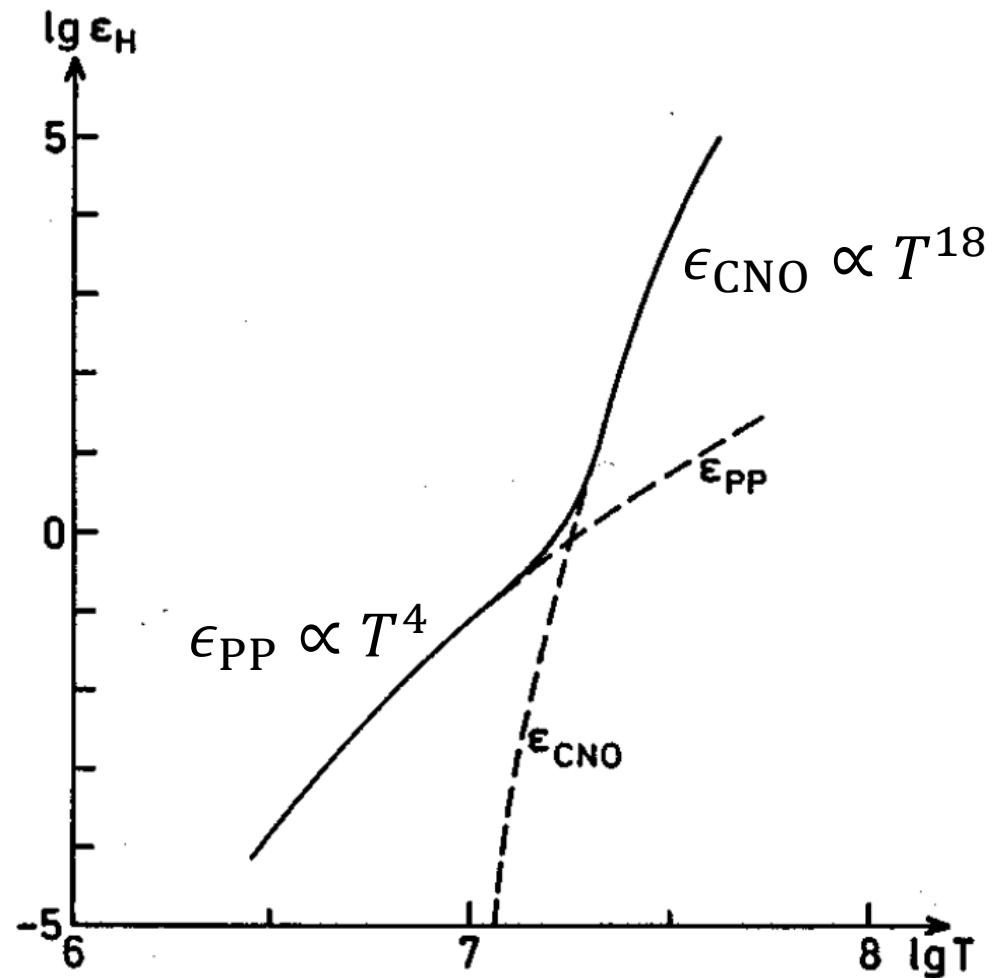
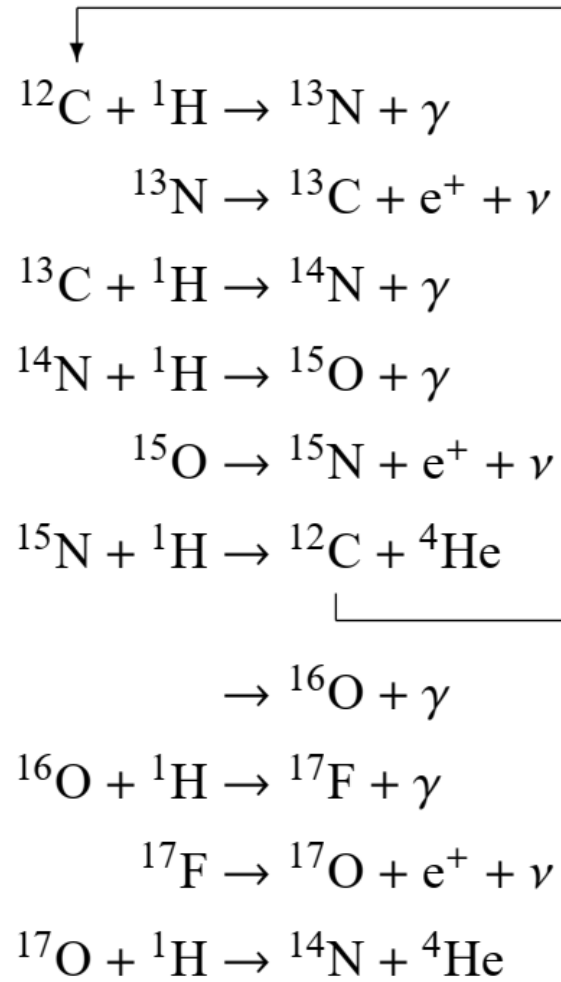
СОЛНЦЕ В БЛИЖАЙШИЕ МИЛЛИАРДЫ ЛЕТ



100 млн лет

Закончился водород в ядре

ТЕРМОЯДЕРНОЕ ГОРЕНИЕ: СНО-ЦИКЛ

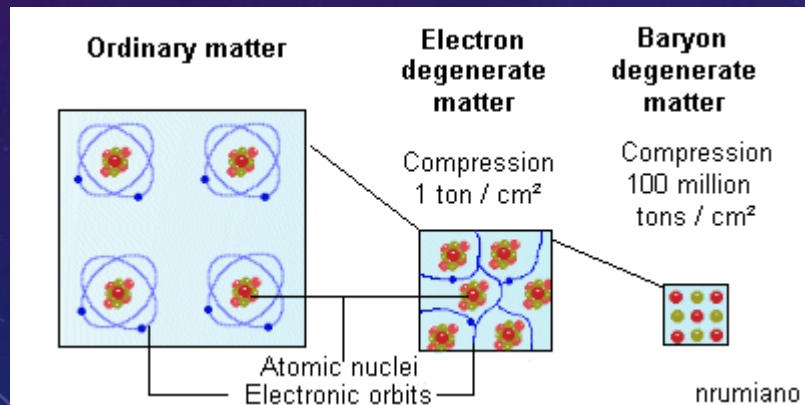


ВЫРОЖДЕНИЕ ВЕЩЕСТВА

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

В центре Солнца: $\rho_{\odot,c} \sim 160 \text{ г см}^{-2}$ и $T_{F,e} \sim 3 \cdot 10^6 \text{ К} < T_{\odot,c} \sim 10^7 \text{ К}$

– электроны не вырождены.

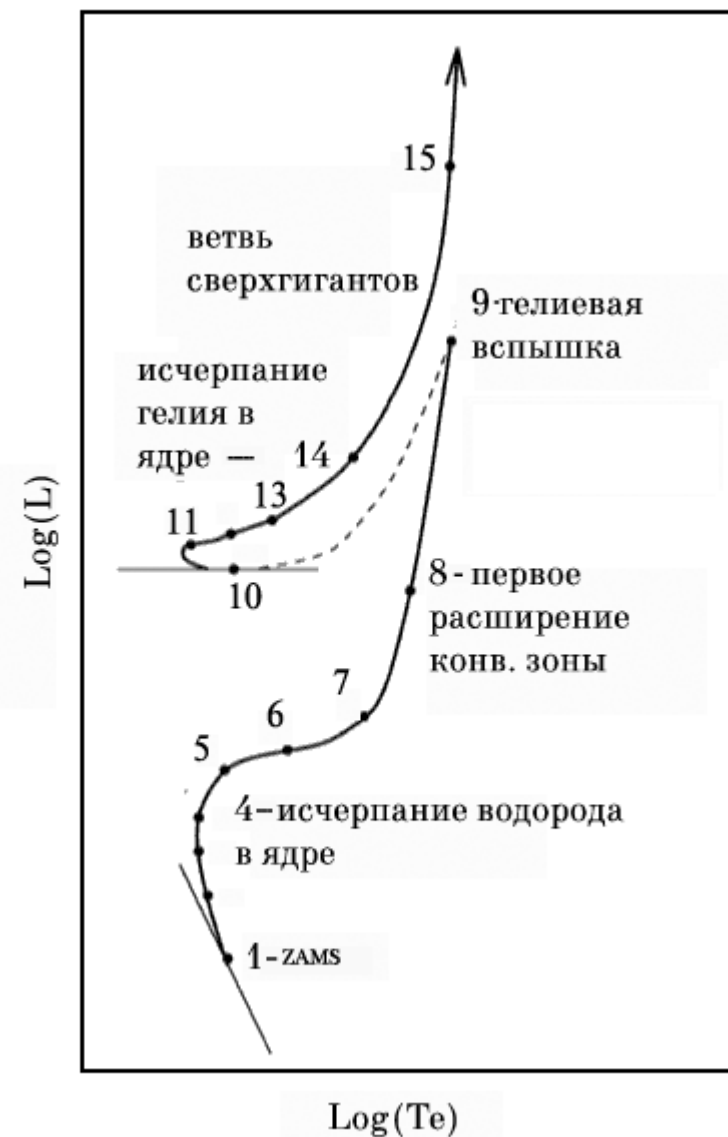
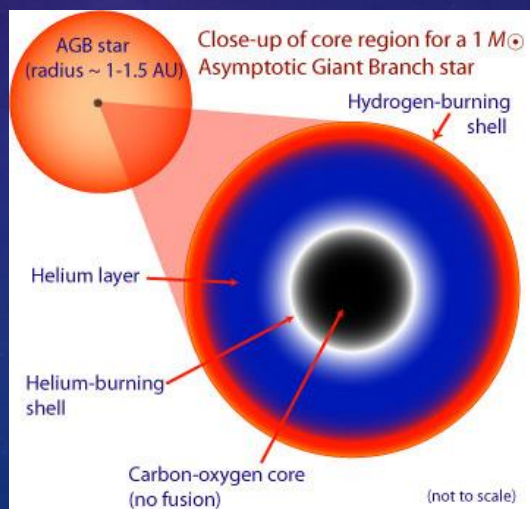


$P_e \sim \rho v_e^2 \propto n_e^{5/3}$ и **не зависит** от температуры.

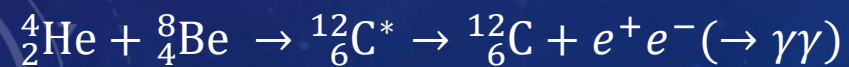
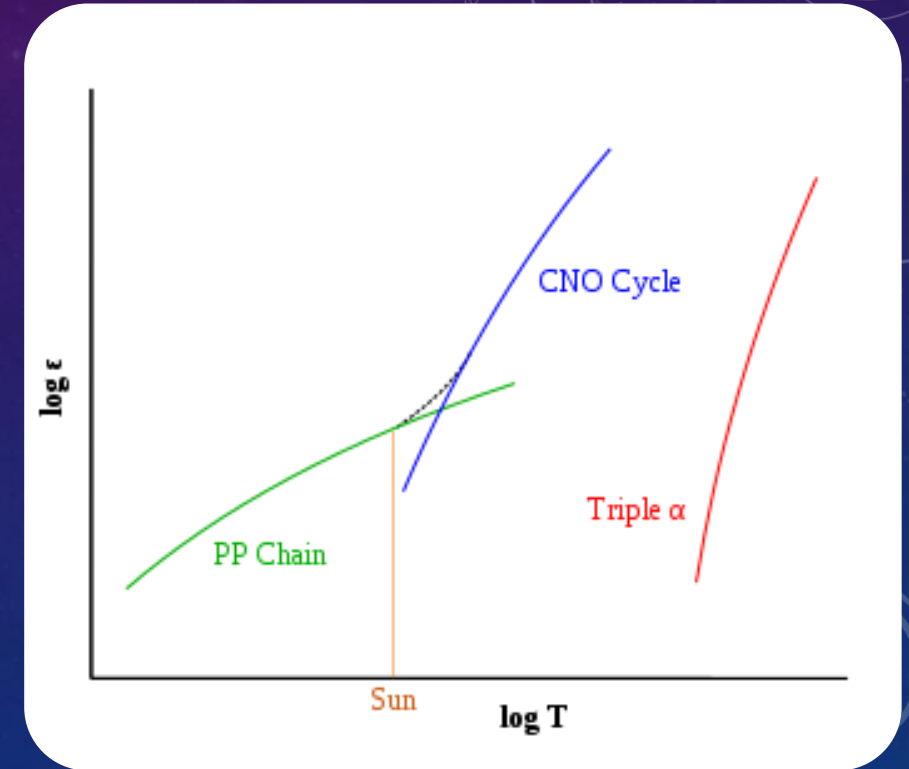
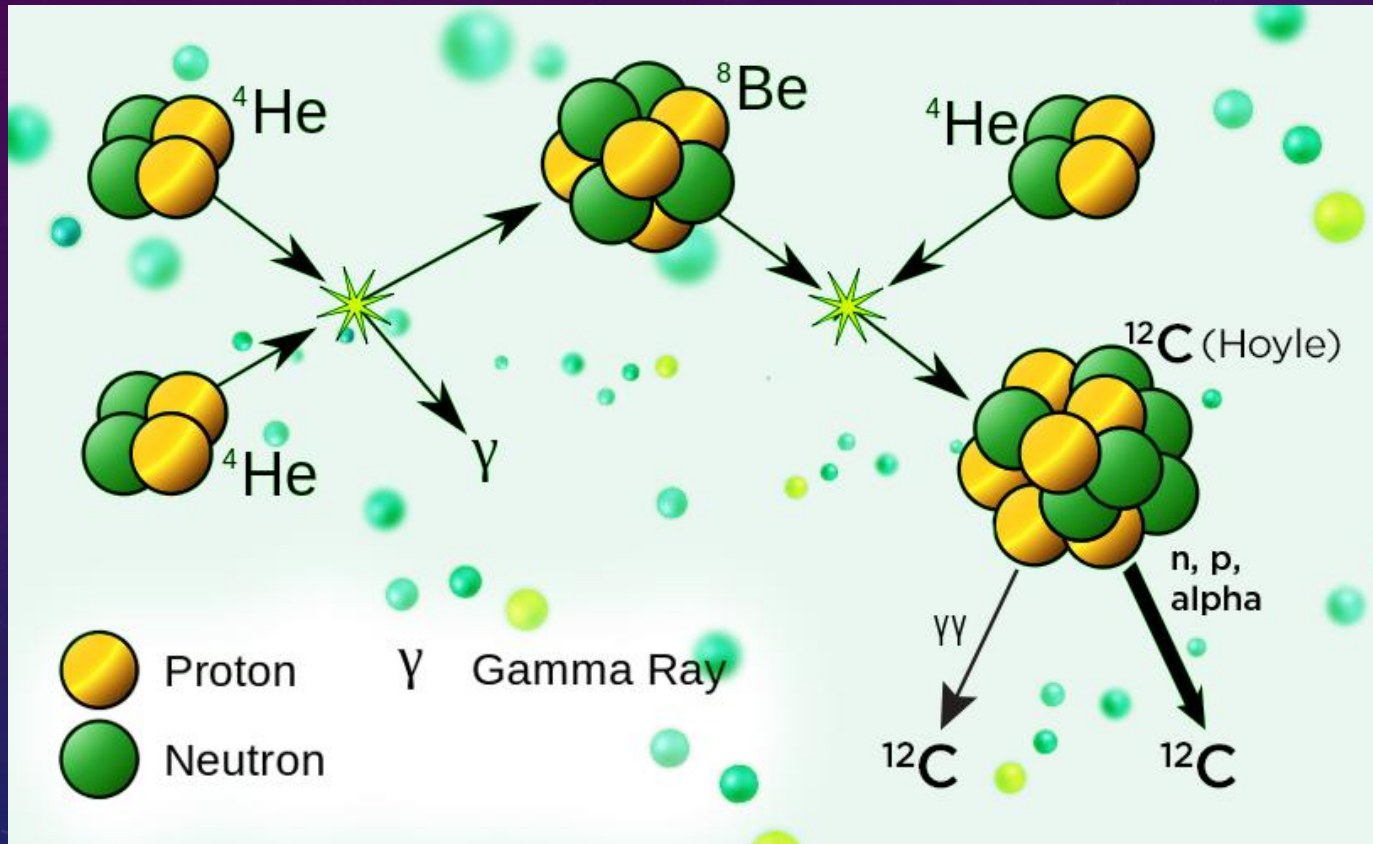
(для релятивистских фермионов, когда $E_F = kT_F > mc^2$
давление слабее зависит от концентрации: $P \propto n^{4/3}$)

ЭВОЛЮЦИЯ СОЛНЦА

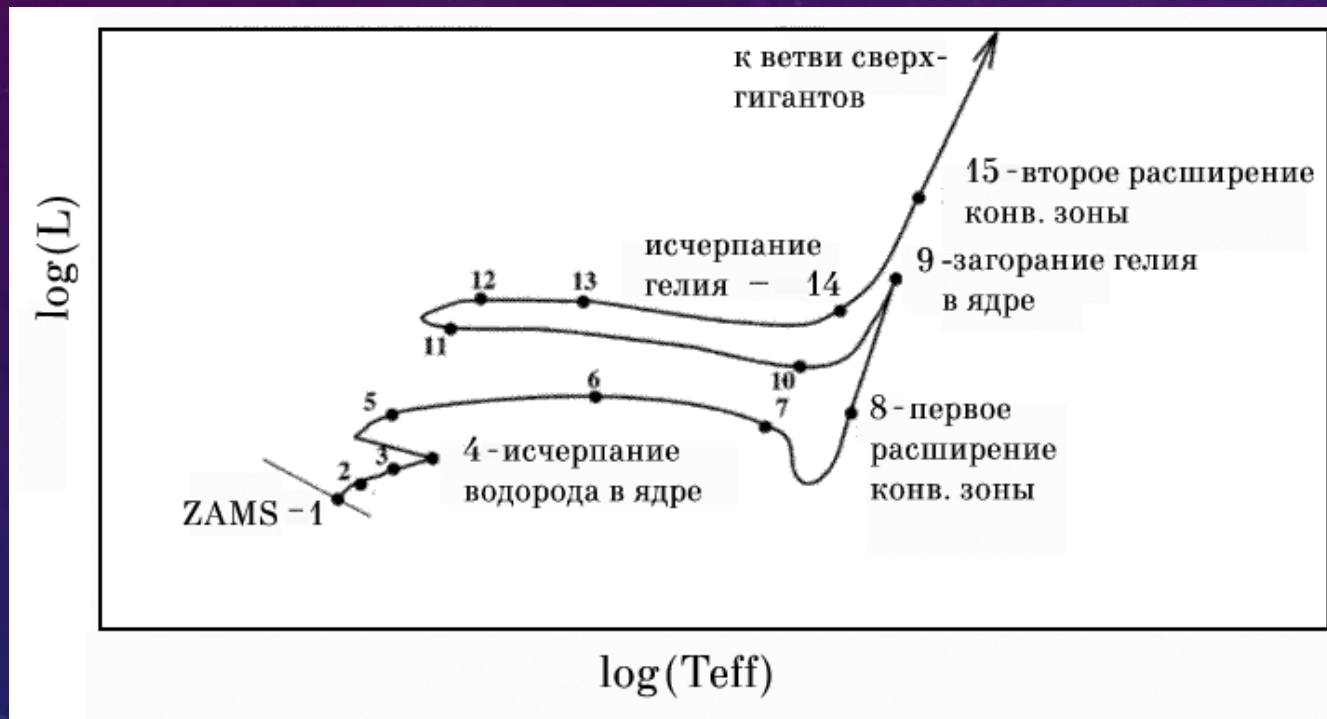
- 1 ZAMS (Zero Age Main Sequence)
- 1-4 Горение водорода в ядре (главная последовательность).
- 5-7 Горение водорода в слоевом источнике (провал Герцшпрунга)
- 8 Расширение внешней конвективной оболочки
- (8-9) Образование красного гиганта (ветвь красных гигантов)
- 9 Гелиевая вспышка (загорается гелий 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



ТРОЙНОЙ АЛЬФА-ПРОЦЕСС

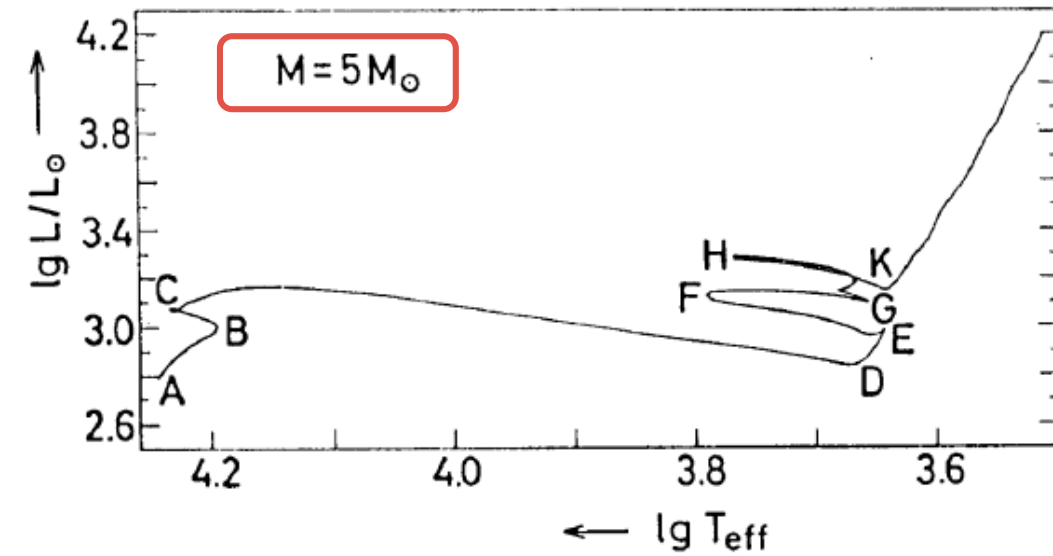
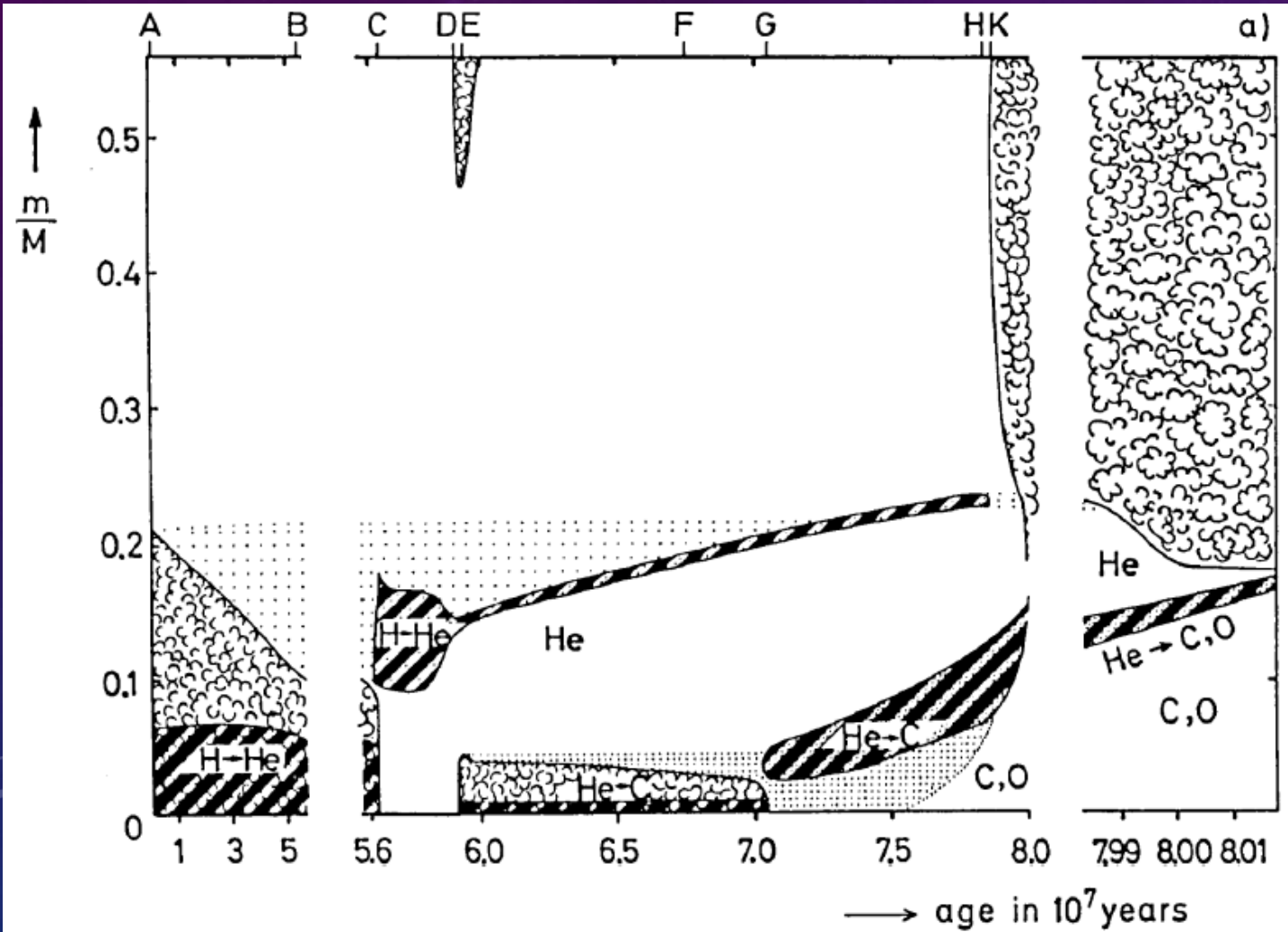


ЭВОЛЮЦИЯ ЗВЕЗДЫ С $M = 5M_{\odot}$



- 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 Герцшпрунга, 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.

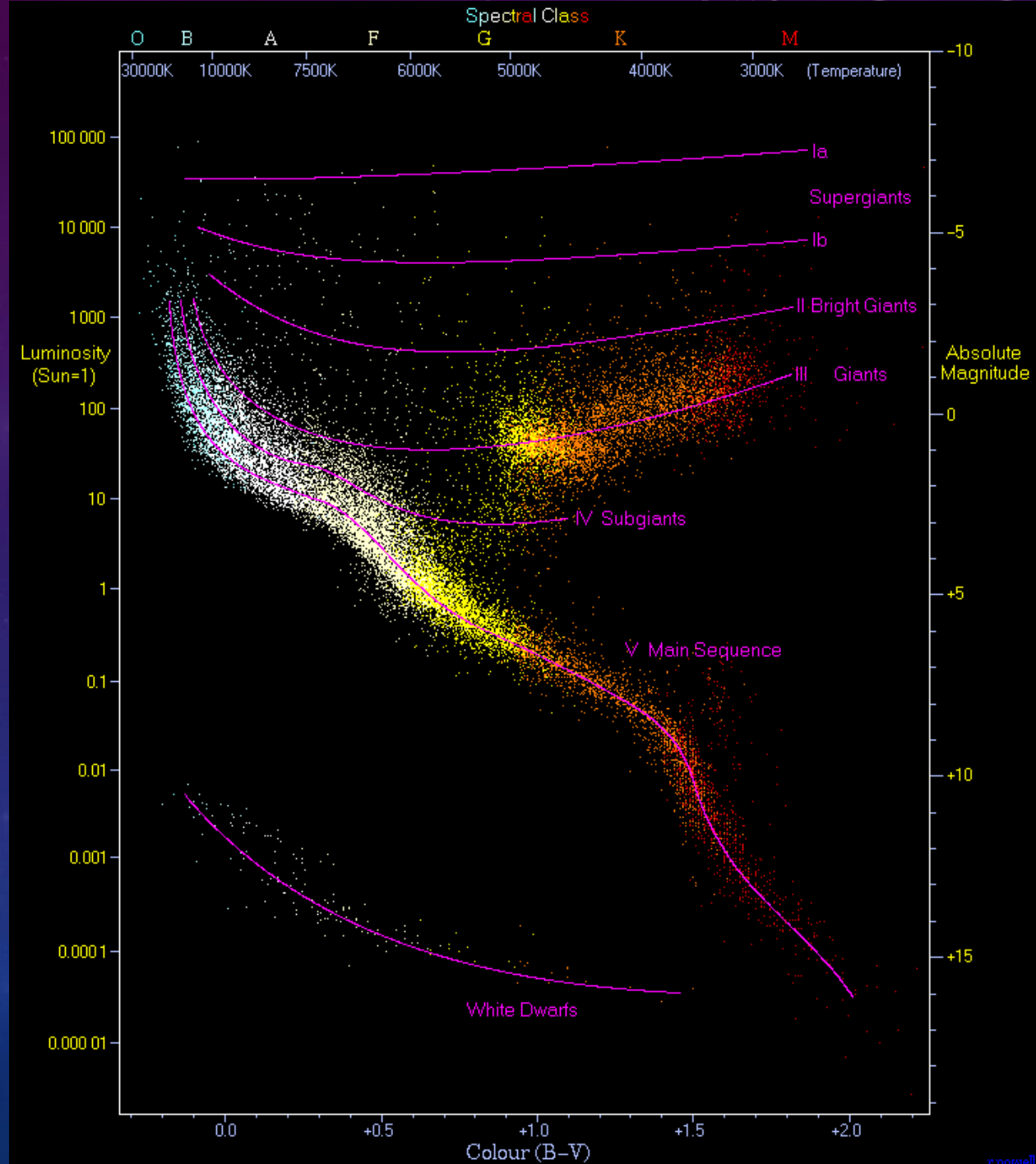
ДИАГРАММА КИППЕНХАЙНА ДЛЯ $M = 5M_{\odot}$



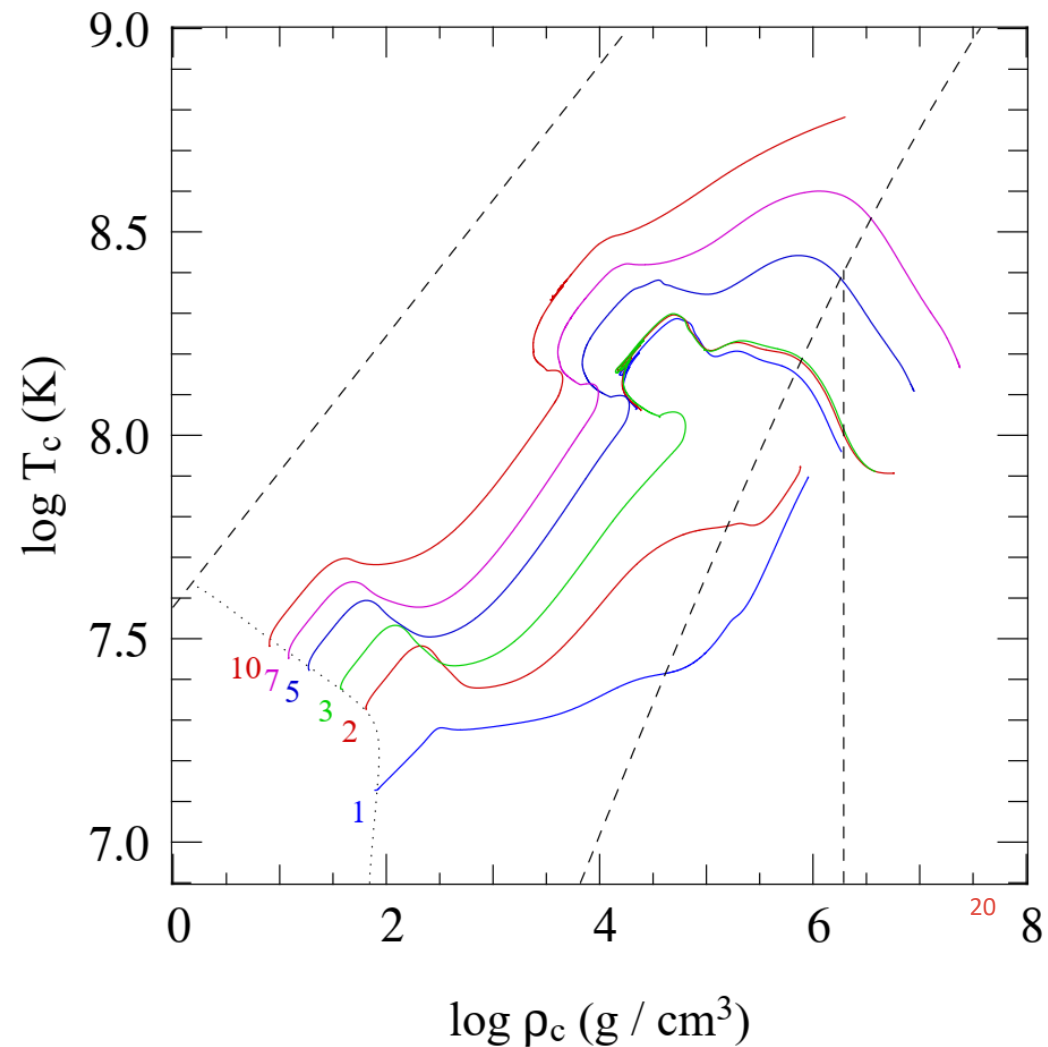
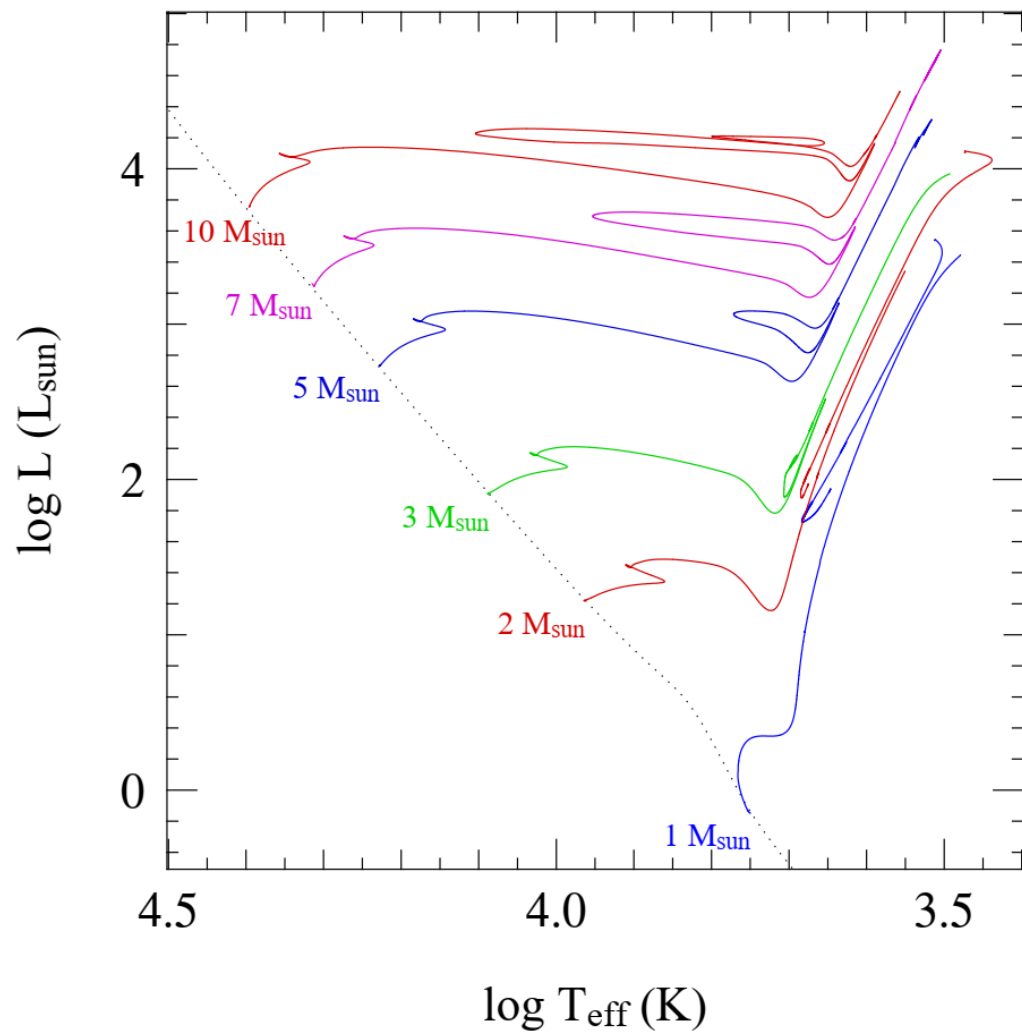
ПРОВАЛ ГЕРЦШПРУНГА

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.

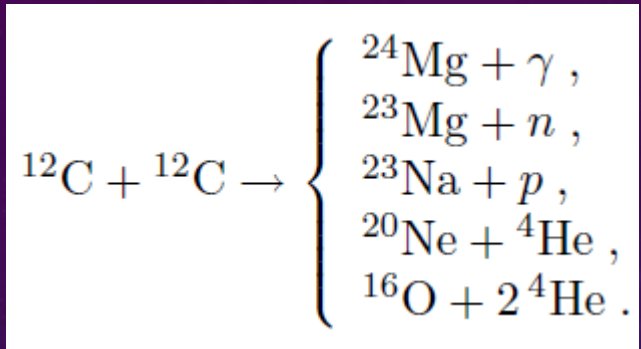
При массе >2 солнечных предельная масса (предел Шенберга-Чандрасекара) достигается быстро. Ядро сжимается – начинается стадия гиганта. Т.о., у таких звезд стадия субгиганта короткая. Поэтому возникает «провал Герцшпрунга» - звезды очень быстро пересекают эту часть диаграммы.



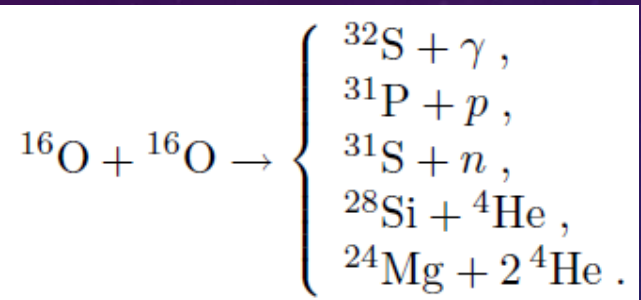
ЭВОЛЮЦИЯ ЗВЕЗД РАЗНЫХ МАСС



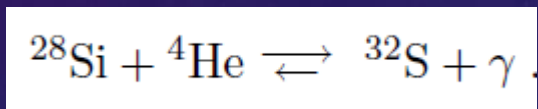
РЕАКЦИИ В МАССИВНЫХ ЗВЕЗДАХ



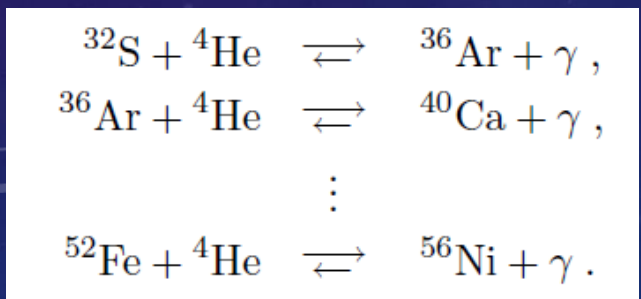
Первая стадия – горение углерода.
Углеродное ядро при $M > 10M_{\odot}$
невырожденное.



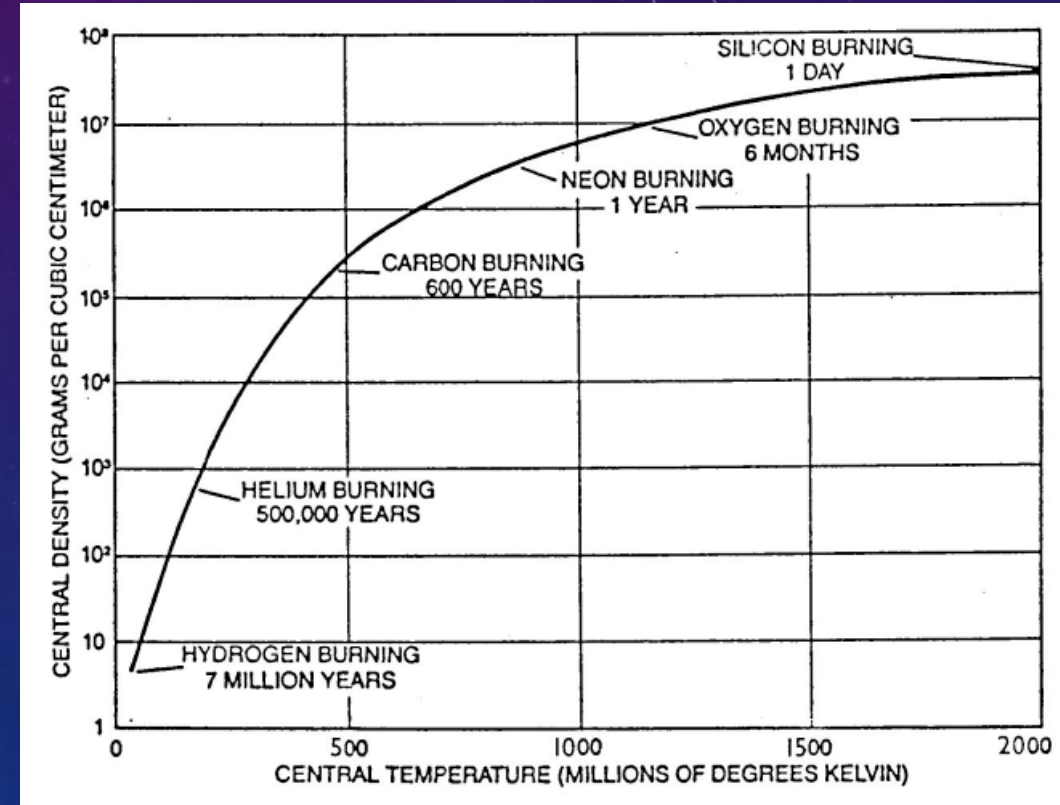
При миллиарде градусов
начинается горение кислорода.



Фотодиссоциация приводит к
Появлению альфа-частиц.

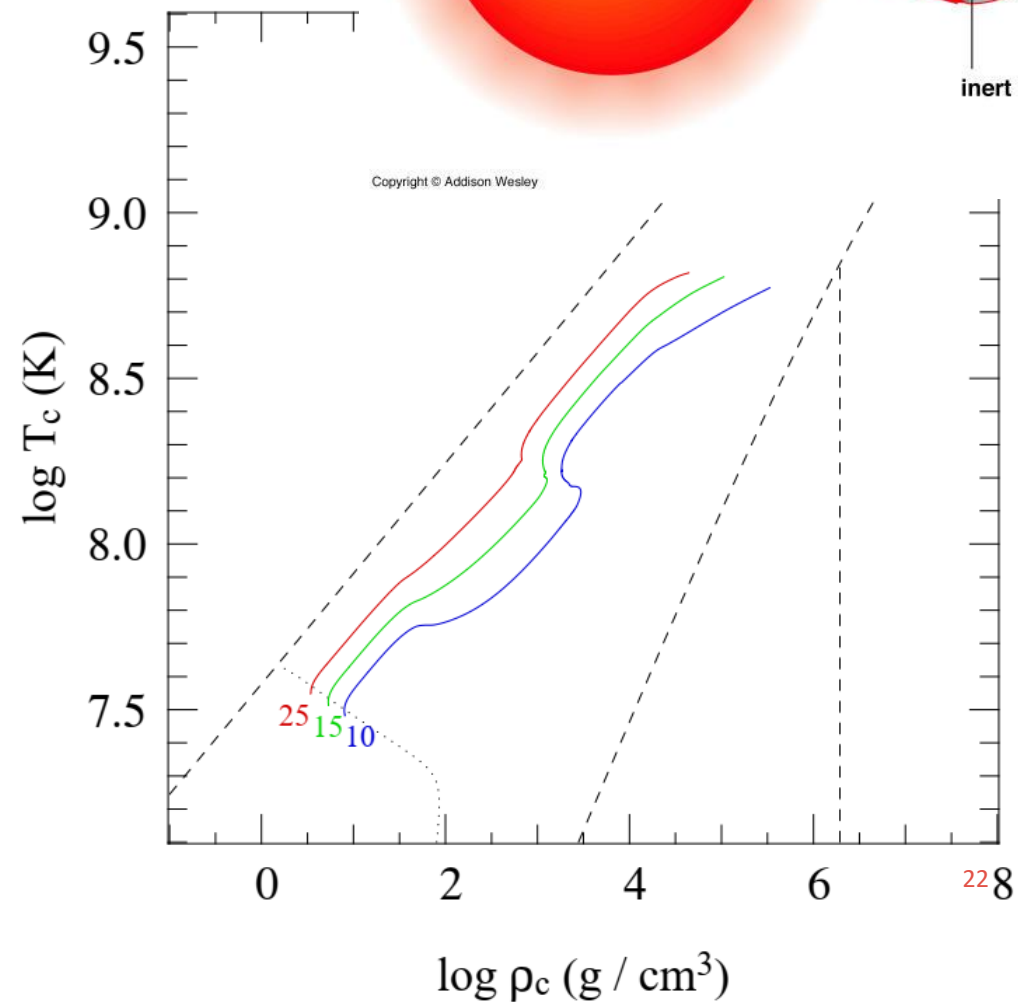
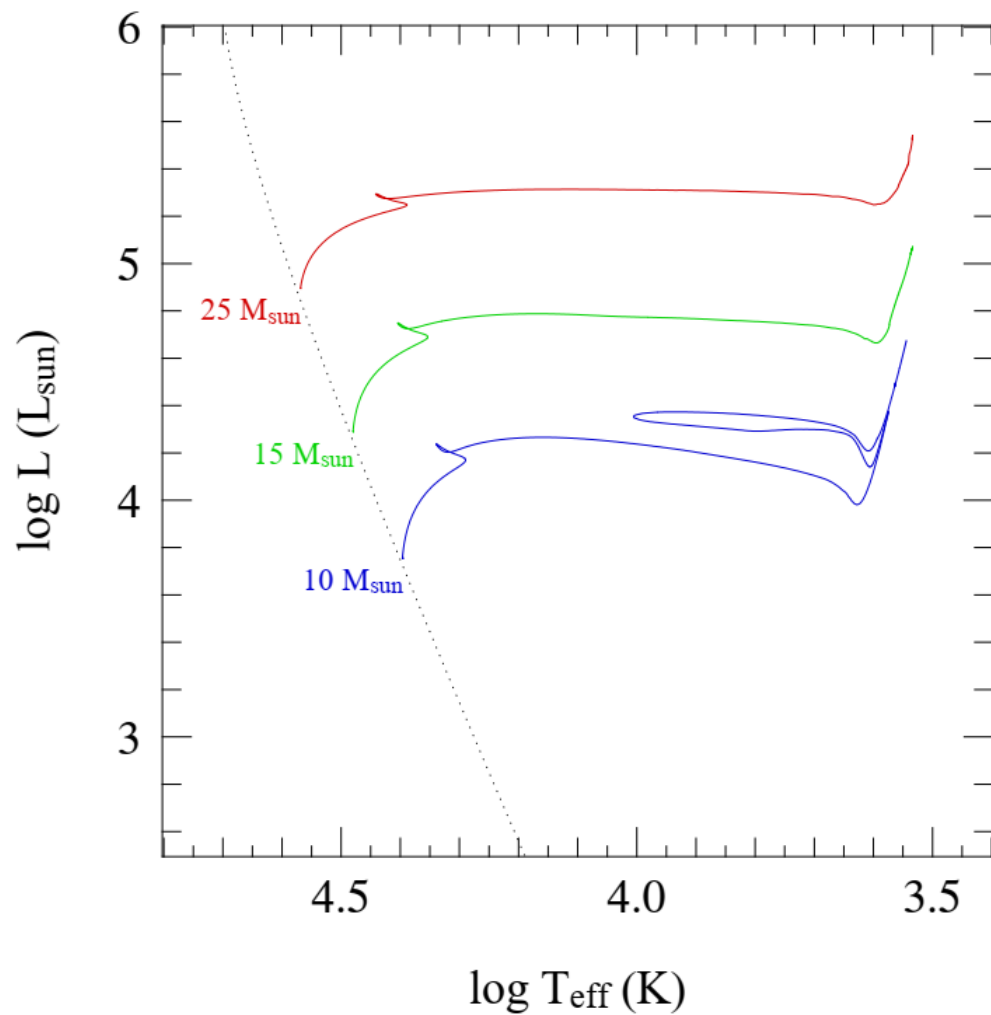
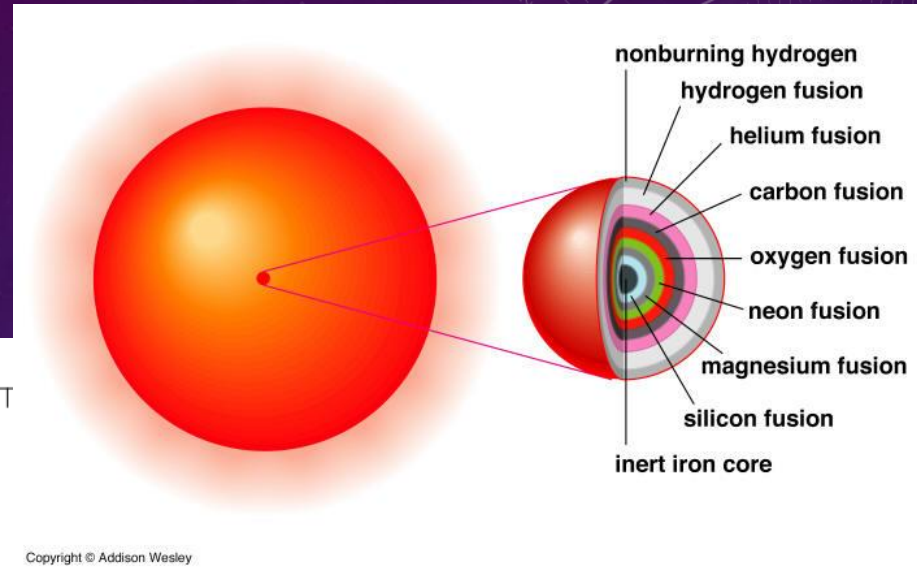


Наконец, начинаются реакции,
доходящие до элементов
группы железа.



25 масс Солнца

ЭВОЛЮЦИЯ МАССИВНЫХ ЗВЕЗД



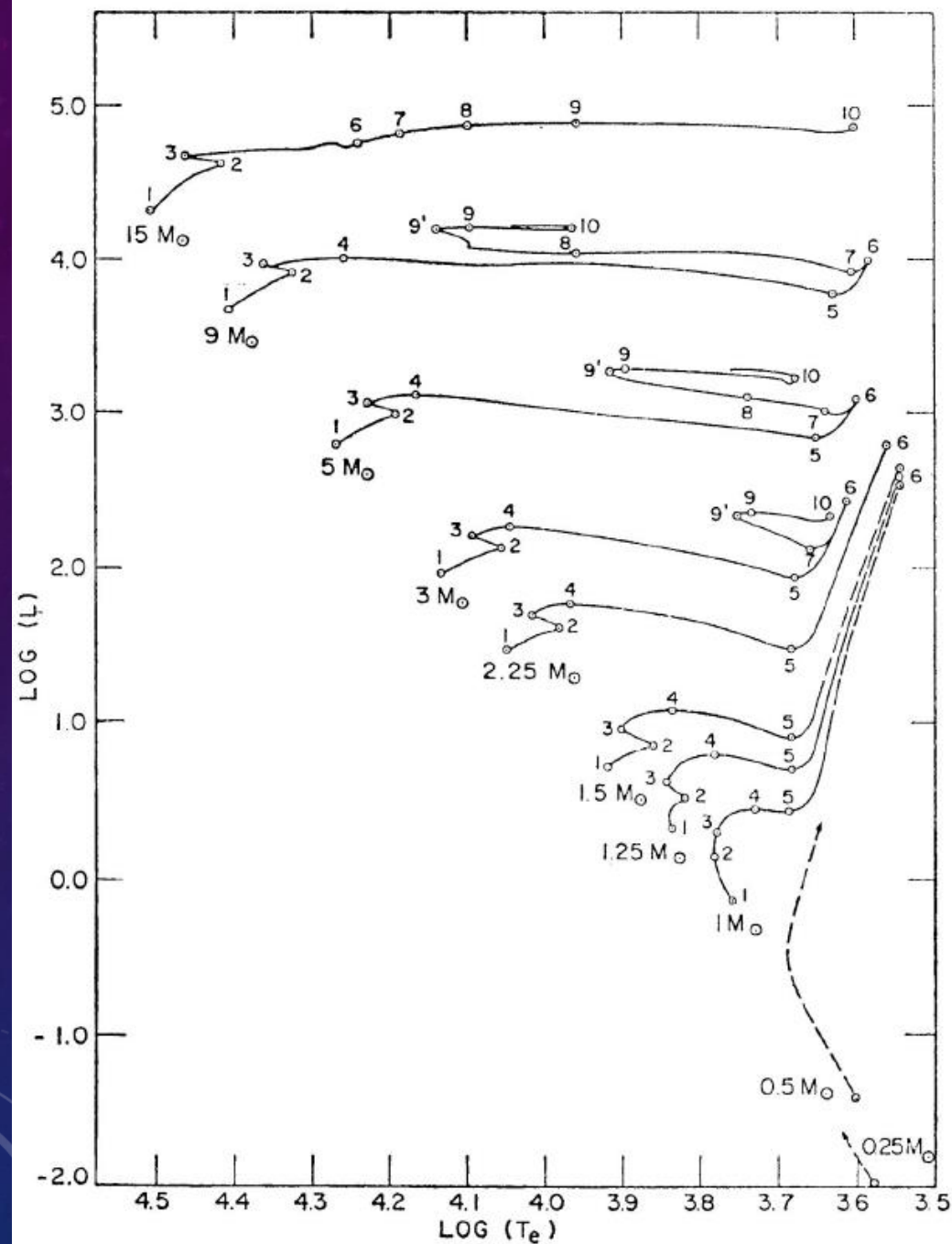
ХАРАКТЕРНЫЕ ВРЕМЕНА

Bressan et al. (2012)

	1 масса Солнца	3 массы Солнца	20 масс Солнца	120 масс Солнца
Исчерпание водорода в ядре	$1.05 \cdot 10^{10}$ лет	$3.98 \cdot 10^8$ лет	$8.6 \cdot 10^6$ лет	$2.77 \cdot 10^6$ лет
Исчерпание гелия в ядре		$4.8 \cdot 10^8$ лет	$9.34 \cdot 10^6$ лет	$3.12 \cdot 10^6$ лет

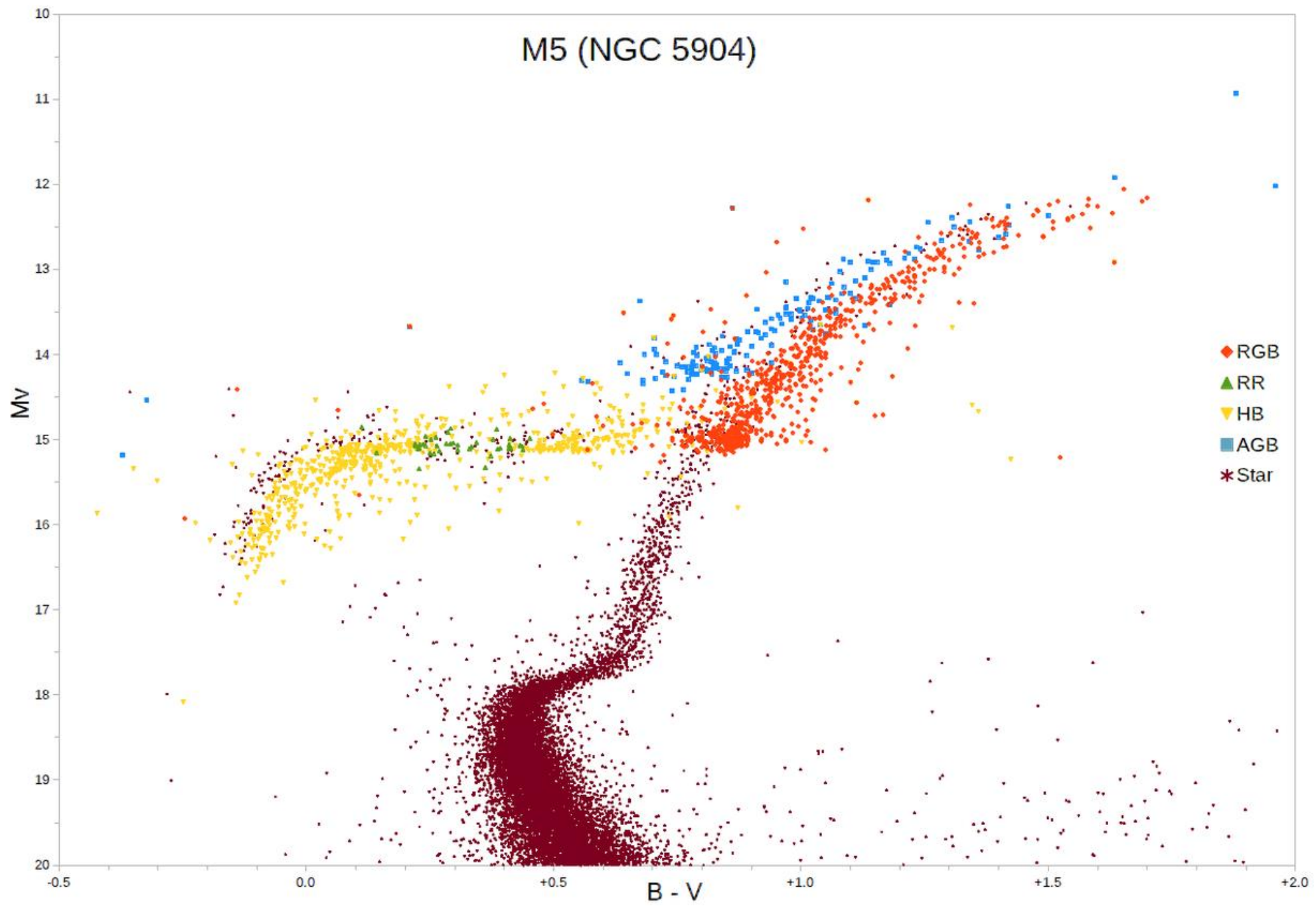
Стадии горения более тяжелых элементов продолжаются все меньшее и меньшее время.

Mass (M_{\odot})	MS (GYrs)	SB (MYrs)	RGB (MYrs)	RGB _{foot}				RGB _{end}			
				Core mass (M_{\odot})	T _{eff} (K)	Radius (R_{\odot})	Luminosity (L_{\odot})	Core mass (M_{\odot})	T _{eff} (K)	Radius (R_{\odot})	Luminosity (L_{\odot})
0.6	58.8	5,100	2,500	0.10	4,634	1.2	0.6	0.48	2,925	207	2,809
1.0	9.3	2,600	760	0.13	5,034	2.0	2.2	0.48	3,140	179	2,802
2.0	1.2	10	25	0.25	5,220	5.4	19.6	0.34	4,417	23.5	188
5.0	0.1	0.4	0.3	0.83	4,737	43.8	866.0	0.84	4,034	115	3,118

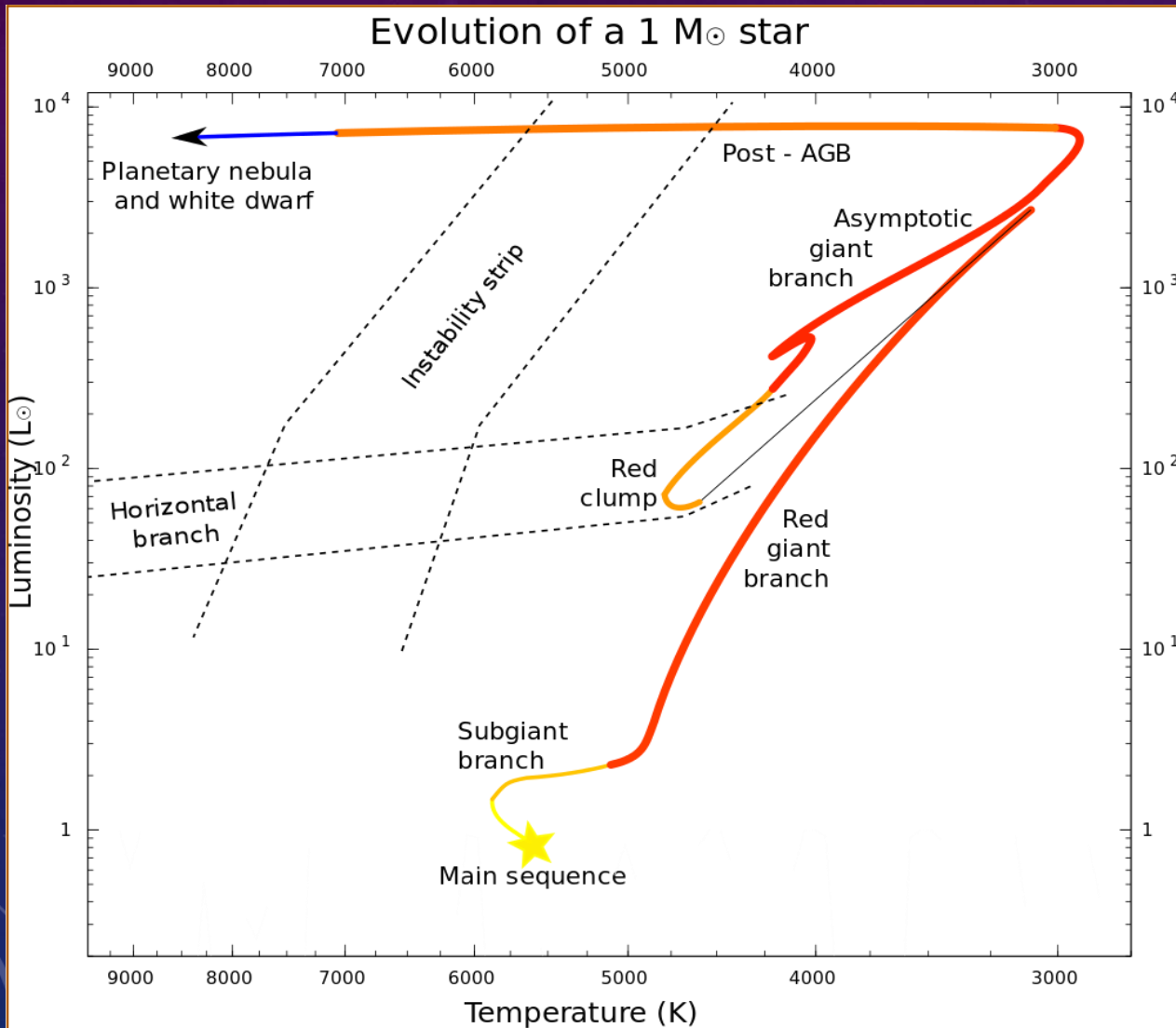


Interval (i-j)					
	(1-2)	(2-3)	(3-4)	(4-5)	(5-6)
Mass (M_{\odot})					
15	1.010 (7)	2.270 (5)		7.55 (4)	
9	2.144 (7)	6.053 (5)	9.113 (4)	1.477 (5)	6.552 (4)
5	6.547 (7)	2.173 (6)	1.372 (6)	7.532 (5)	4.857 (5)
3	2.212 (8)	1.042 (7)	1.033 (7)	4.505 (6)	4.238 (6)
2.25	4.802 (8)	1.647 (7)	3.696 (7)	1.310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

Interval (i-j)				
	(6-7)	(7-8)	(8-9)	(9-10)
Mass (M_{\odot})				
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)

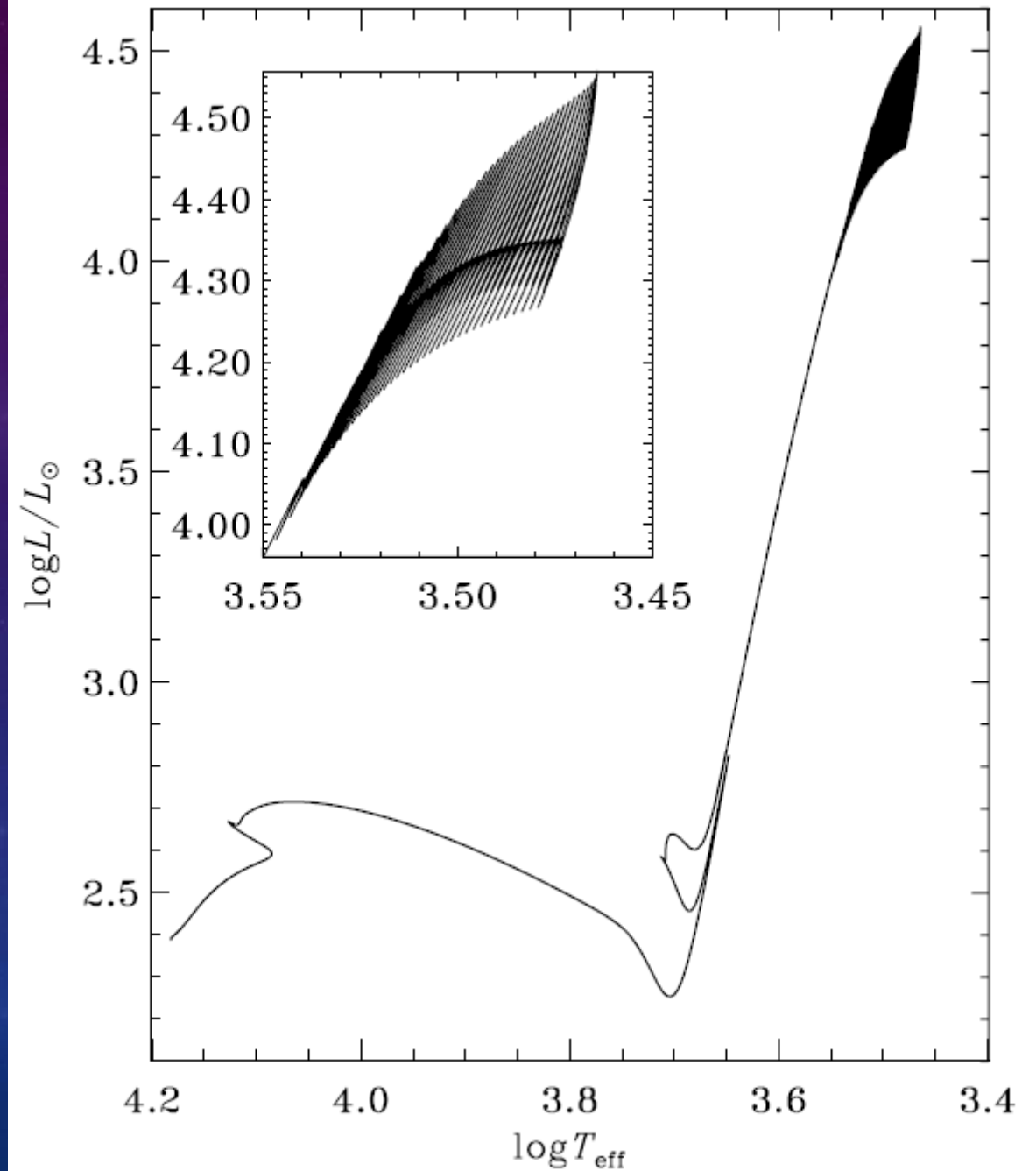
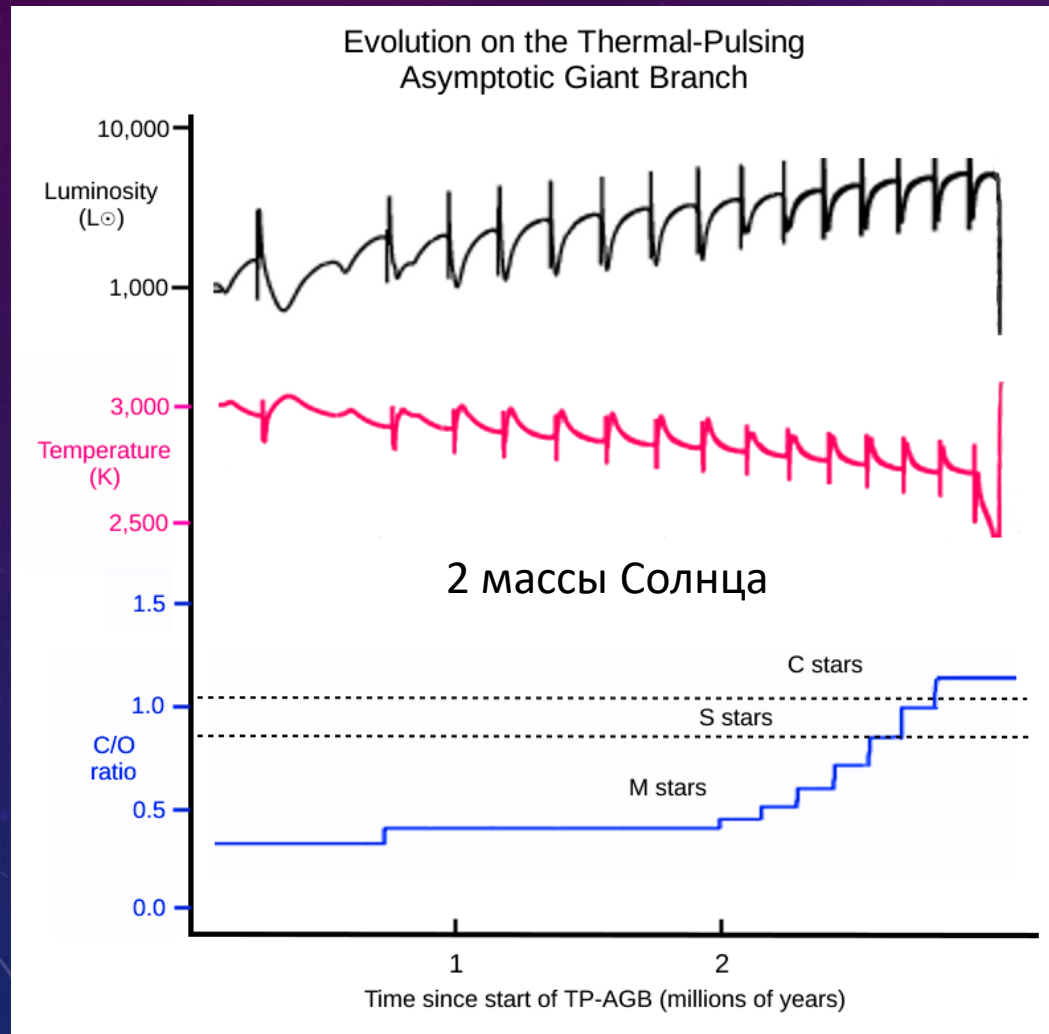


ГОРИЗОНТАЛЬНАЯ ВЕТВЬ И ПОЛОСА НЕСТАБИЛЬНОСТИ

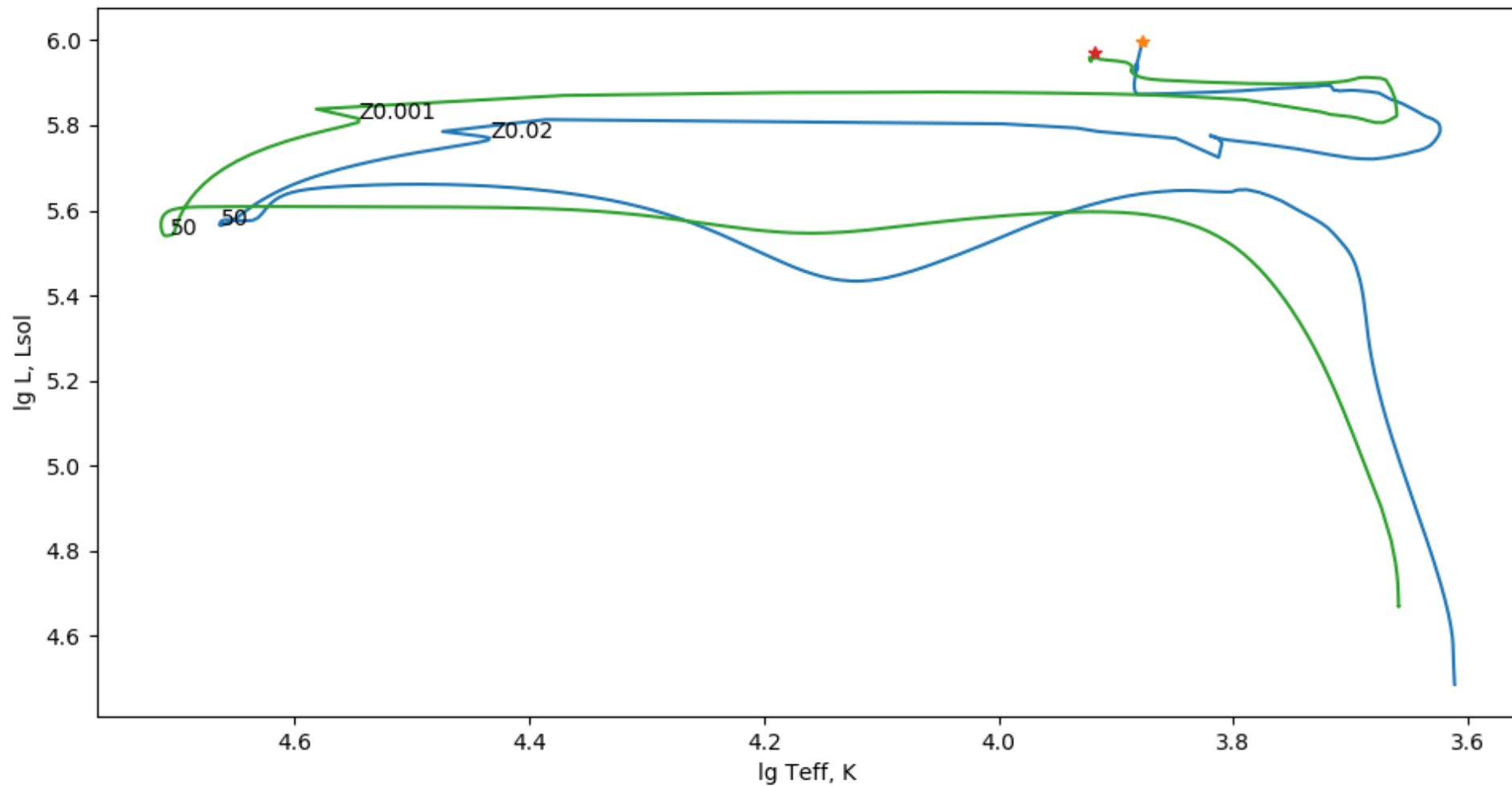


- На горизонтальной ветви идет горение гелия в ядре звезды.
- Массы ядер у разных звезд примерно одинаковы, поэтому светимость отличается слабо.
- А вот температура зависит от массы водородной оболочки. И этот параметр отличается сильно.
- Типичное время жизни на горизонтальной ветви - 100 млн. лет.

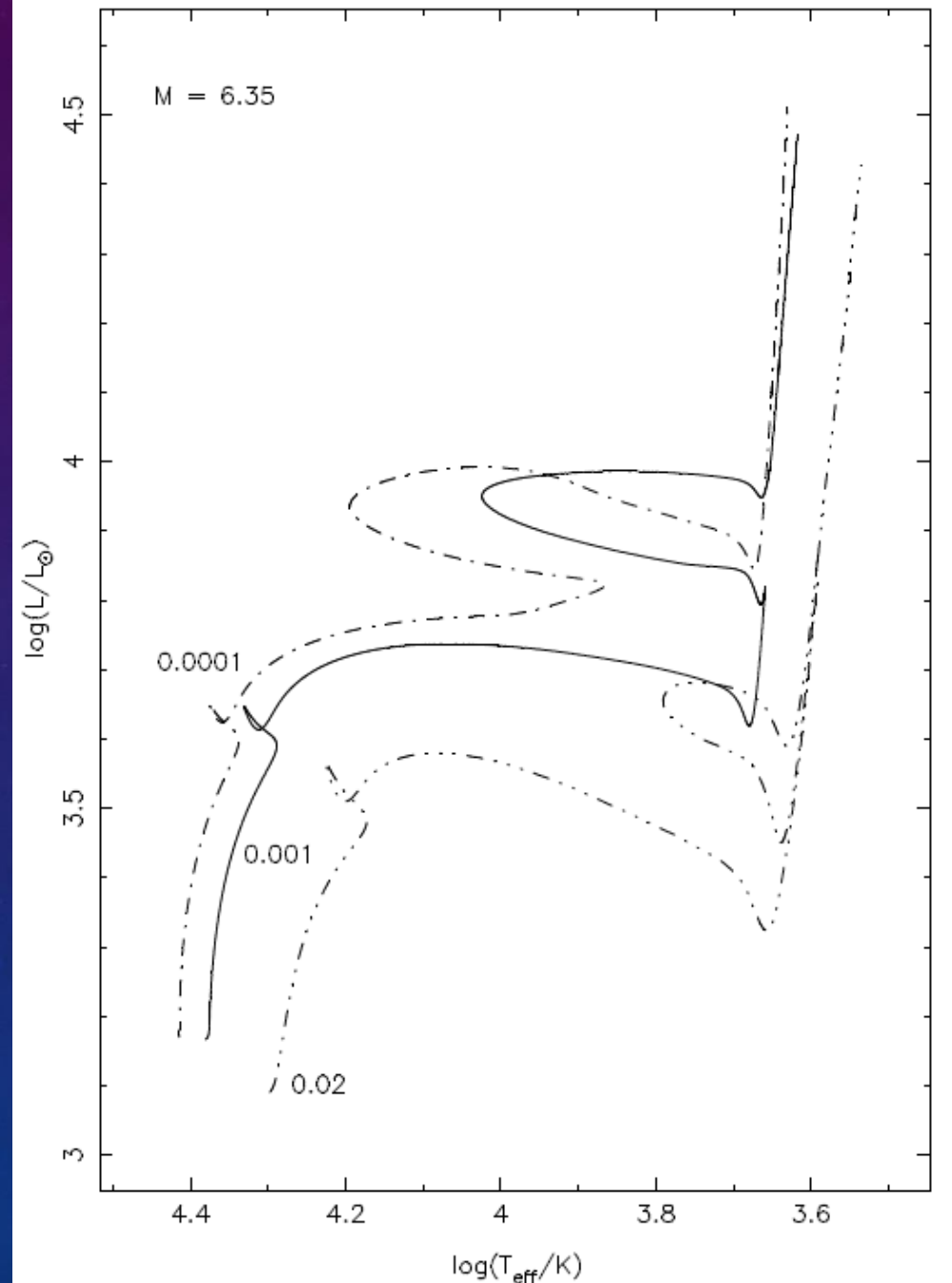
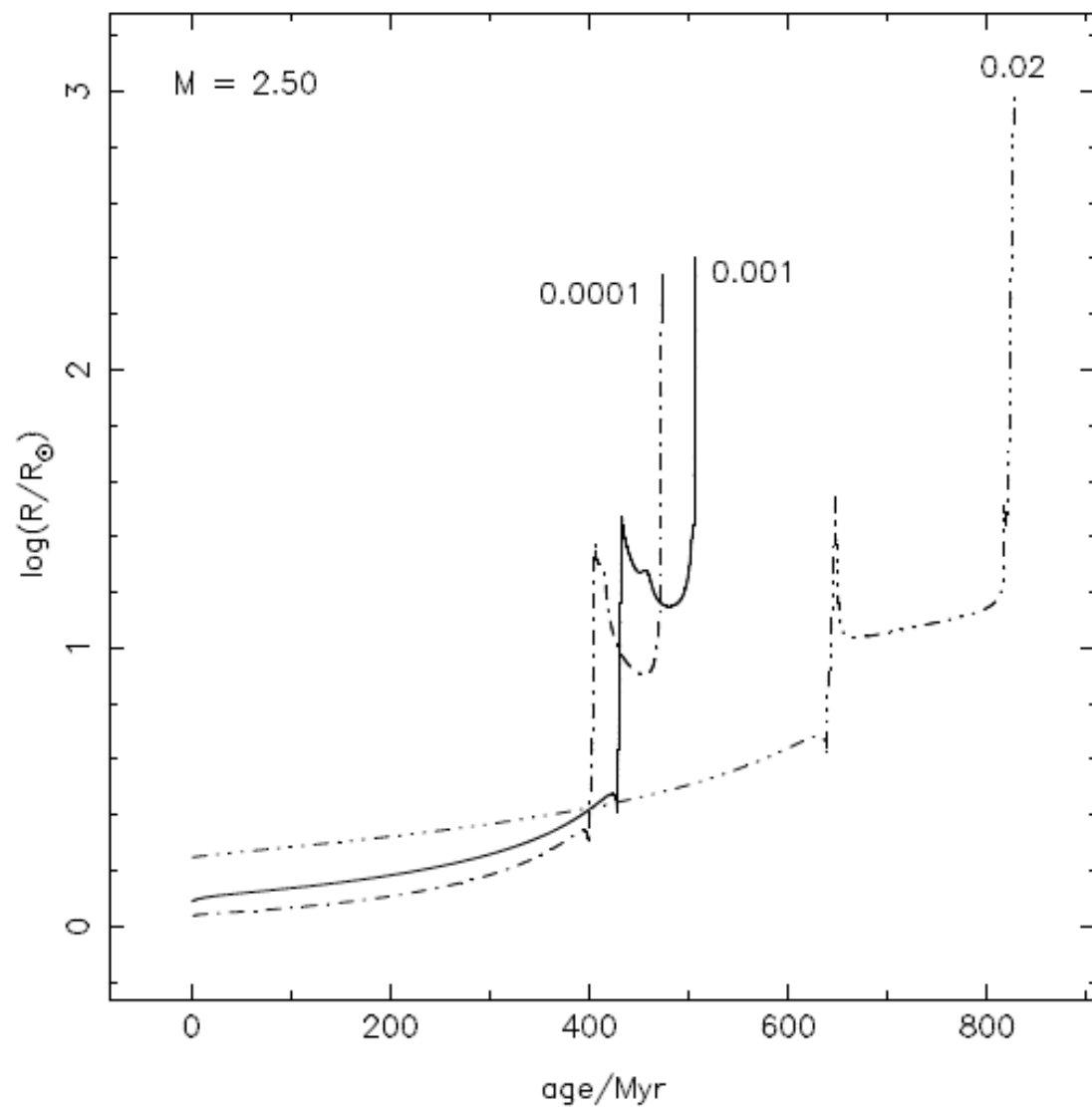
ТЕПЛОВЫЕ ПУЛЬСАЦИИ



ТРЕКИ МЕСА: 50 МАСС СОЛНЦА



МЕТАЛЛИЧНОСТЬ



ЛИТЕРАТУРА К ЛЕКЦИИ

- А.В. Засов, К.А. Постнов, «Общая астрофизика», Гл. 5-6
- С.А. Ламзин, «Физика и эволюция звёзд»
- O.R. Pols «Stellar structure and evolution»,
<https://www.ucolick.org/~woosley/ay112-14/texts/pols11.pdf>