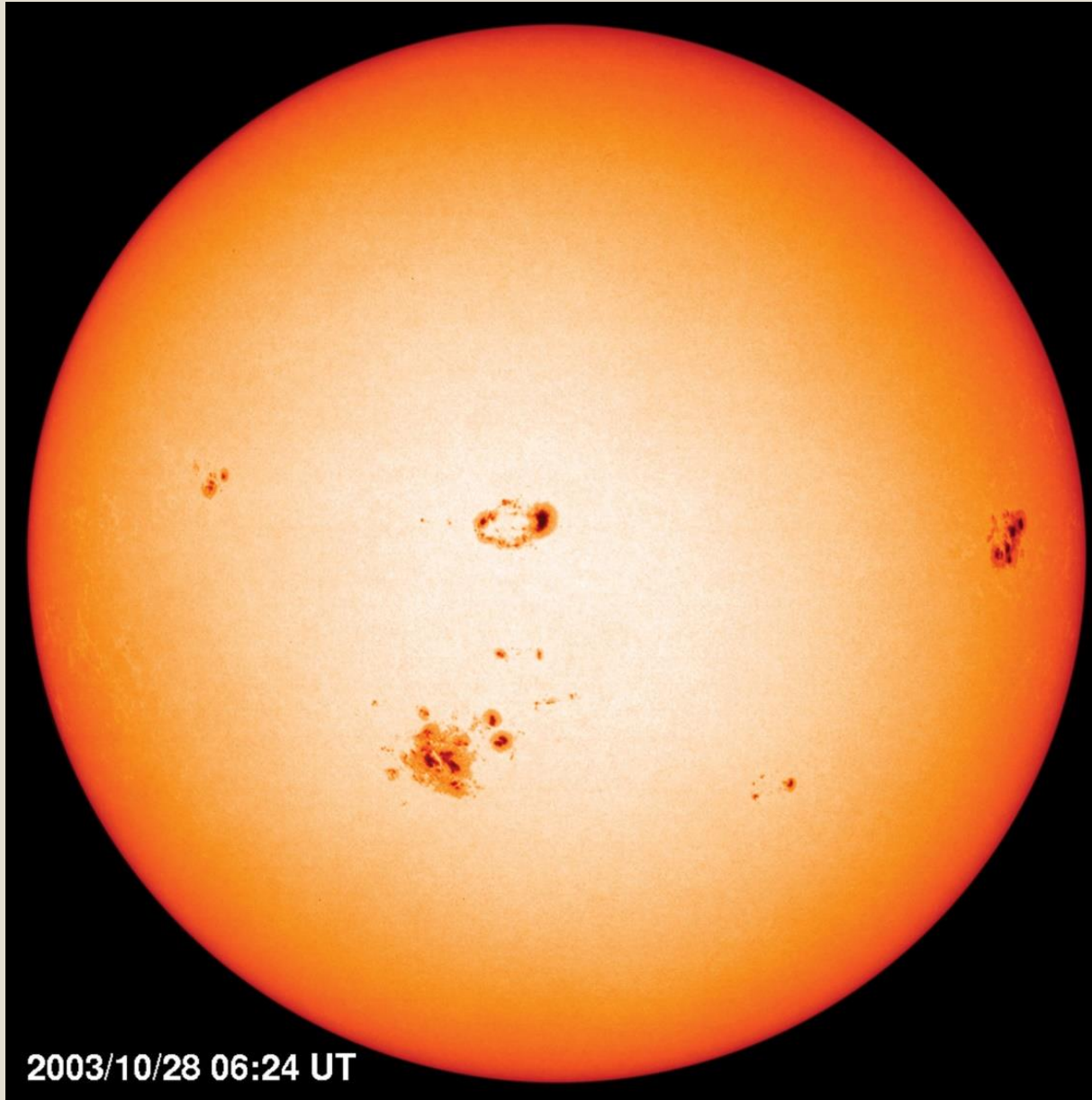


A light gray, stylized sun or star shape with a wavy, scalloped border, centered on a solid orange background. The shape has a soft, glowing appearance.

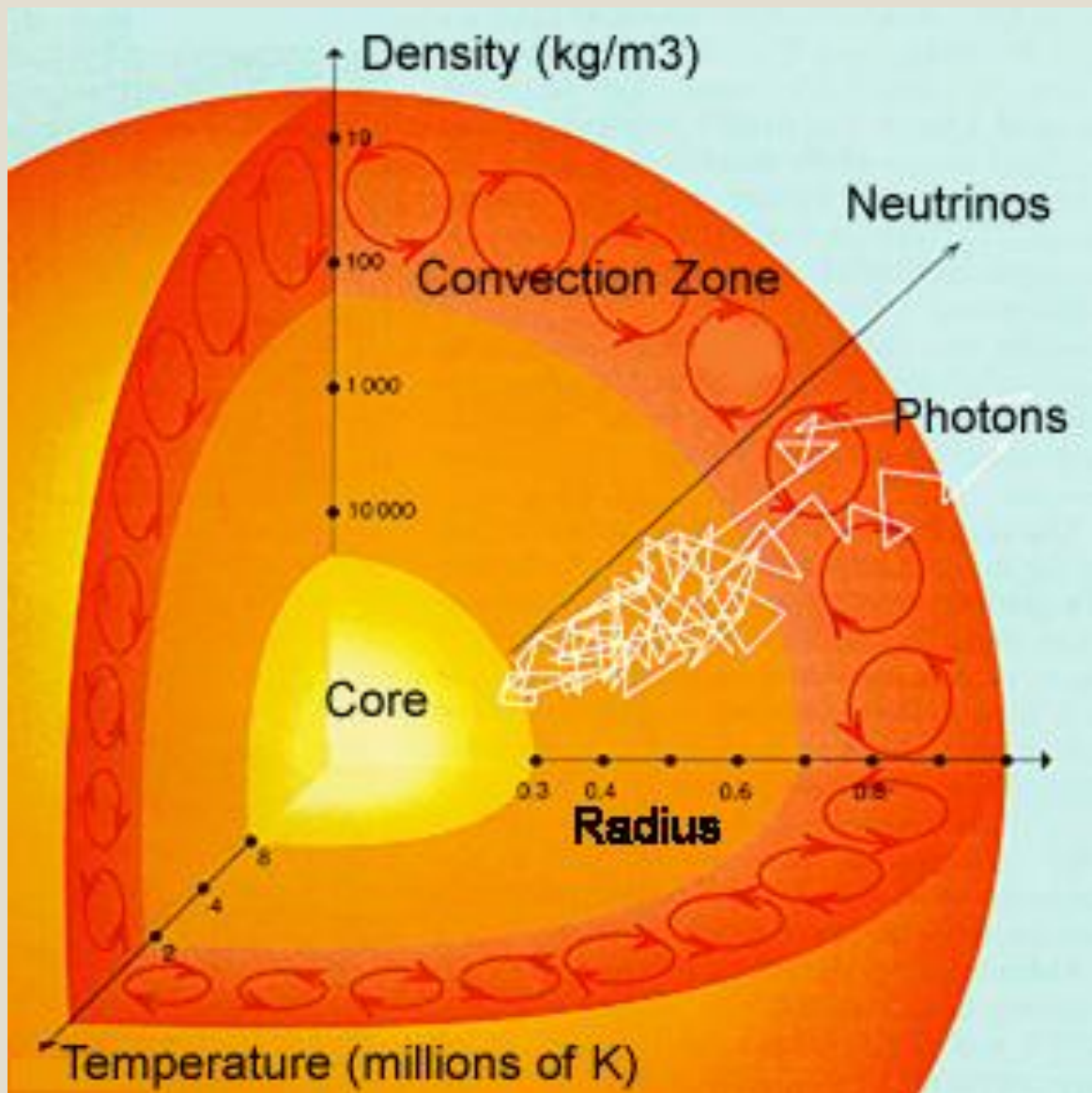
ЭВОЛЮЦИЯ ЗВЕЗД

ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ



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

СТРОЕНИЕ СОЛНЦА

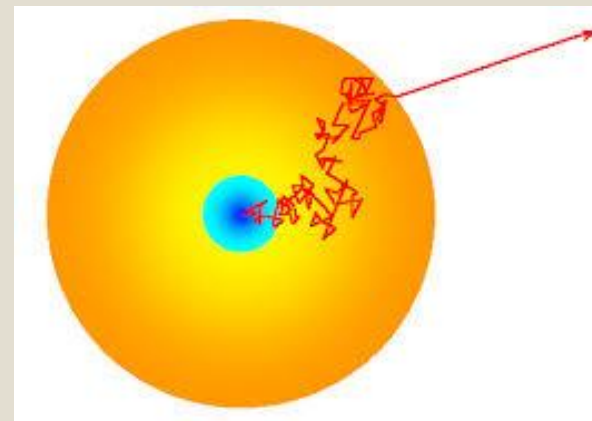


Ядро – термоядерное горение.

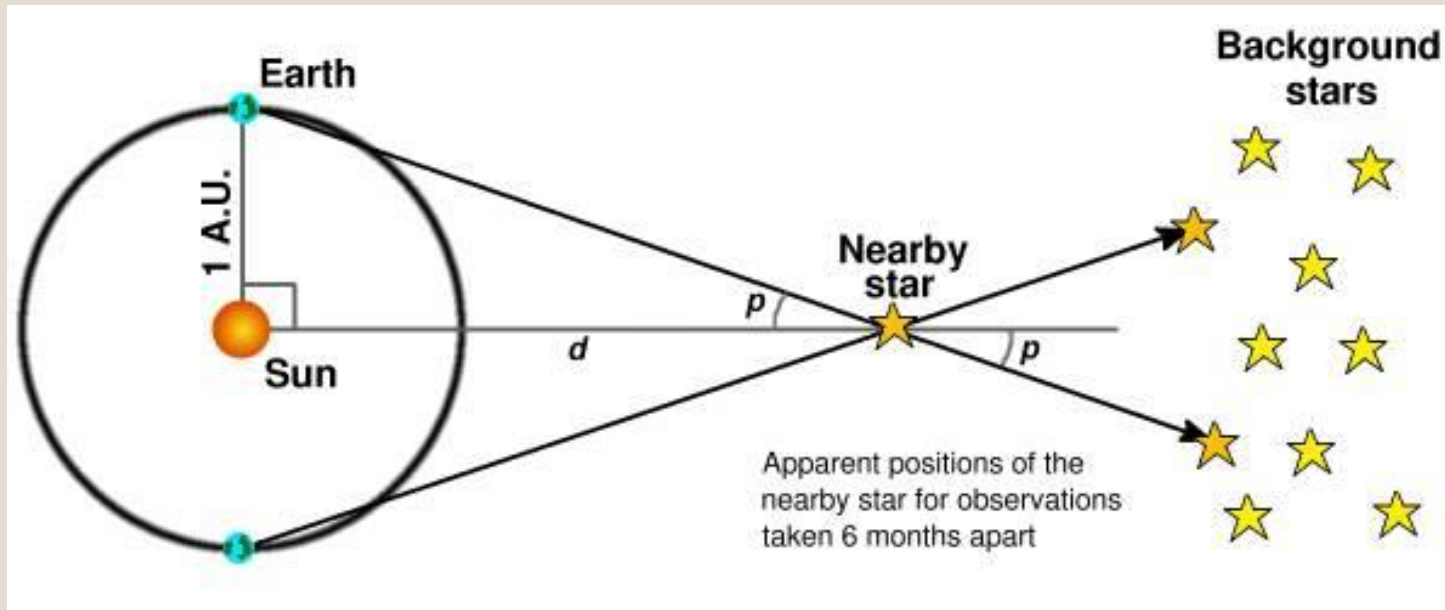
0.25-0.75 радиуса – зона лучистого переноса энергии

Внешняя часть – конвективная зона

Фотон, испущенный в недрах Солнца в результате реакции, после ряда перерождений будет испущен с поверхности через 170 000 лет!



ПАРАЛЛАКС



Угол мал! Поэтому $\text{tg}(\text{параллакс}) \approx \sin(\text{параллакс}) \approx \text{параллакс} [\text{рад}]$

Расстояние = $1 \text{ а.е.} / \text{параллакс} [\text{рад}]$

Расстояние [пк] = $1 / \text{параллакс} [\text{угл.сек.}]$

Парсек – расстояние, соответствующее параллаксу одна угловая секунда
Парсек равен 206265 (число секунд в радиане) астрономических единиц.

$1 \text{ пк} = 3.1 \cdot 10^{18} \text{ см}$

ПЕРВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАЛЛАКСОВ



В.Я. Струве.
Вега. 1837 г.



Ф. Бессель.
61 Лебедя 1838 г.

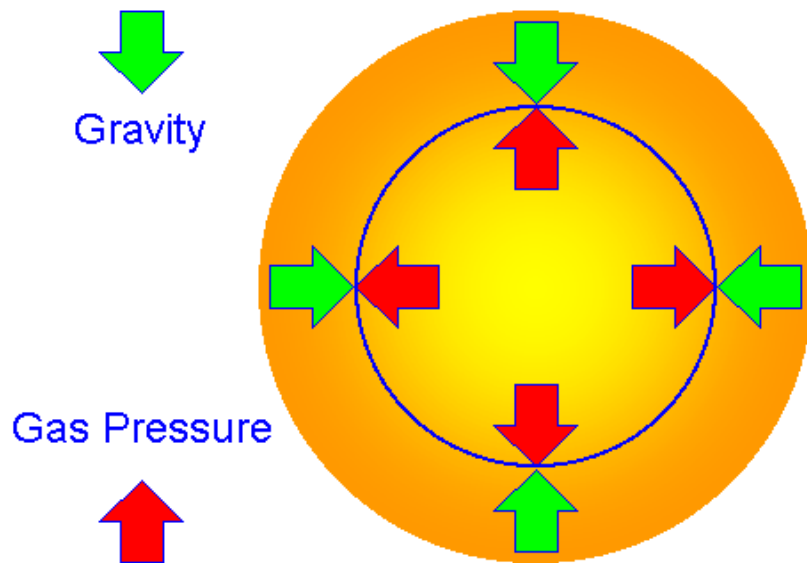


Томас Хендерсон
Альфа Центавра 1833

Недавно был повторен анализ первых измерений параллаксов, см. 2009.11913

УСТОЙЧИВОСТЬ ЗВЕЗДЫ

Hydrostatic Equilibrium



Для приближенных оценок
можно использовать
 $P/\rho \approx GM/R$

Сила тяжести уравновешена
градиентом давления.

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

Diagram illustrating the forces in a star's interior, with handwritten annotations:

- DENSITY** (circled in pink) points to ρ .
- MASS WITHIN A SPHERE OF RADIUS r** (circled in green) points to M_r .
- ACCELERATION** (circled in orange) points to $\frac{d^2 r}{dt^2}$.
- GRAVITATIONAL CONSTANT** (circled in black) points to G .
- PRESSURE GRADIENT** (circled in blue) points to $\frac{dP}{dr}$.

«ОТРИЦАТЕЛЬНАЯ ТЕПЛОЕМКОСТЬ»

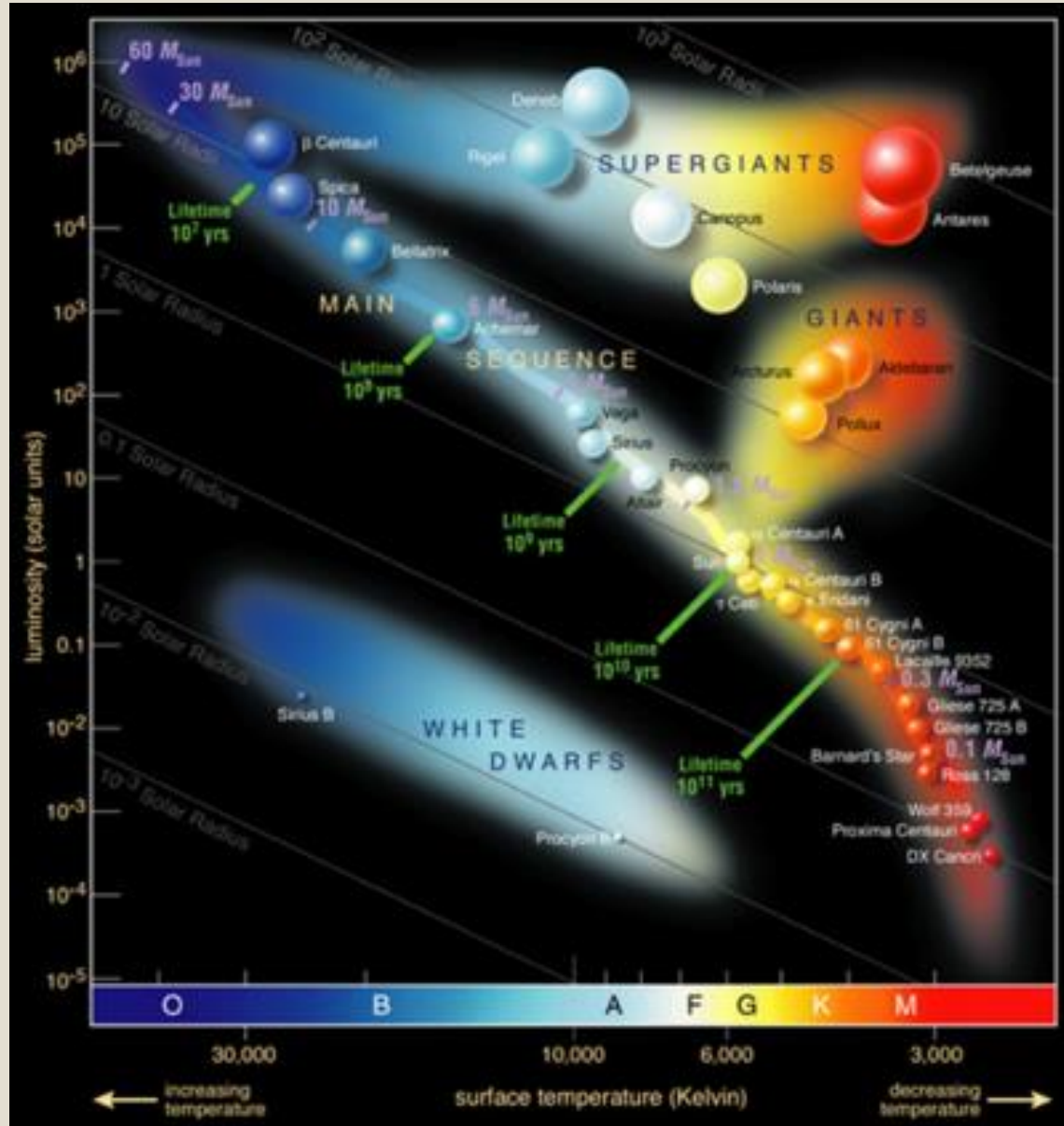
Для звезды можно записать теорему вириала.

Отвод тепловой энергии приводит к сжатию звезды (например, из-за падения темпа выделения энергии), что влечет за собой ее нагрев.

Наоборот, подвод избыточной энергии (например, из-за роста энерговыделения в ядре) приводит к расширению и остыванию.



ДИАГРАММА ГЕРЦШПРУНГА -РАССЕЛА



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.

С ростом массы резко растет светимость.

Время жизни тем больше, чем меньше масса звезды.

ЭВОЛЮЦИЯ ЗВЁЗД



Популяция III – самые первые звёзды

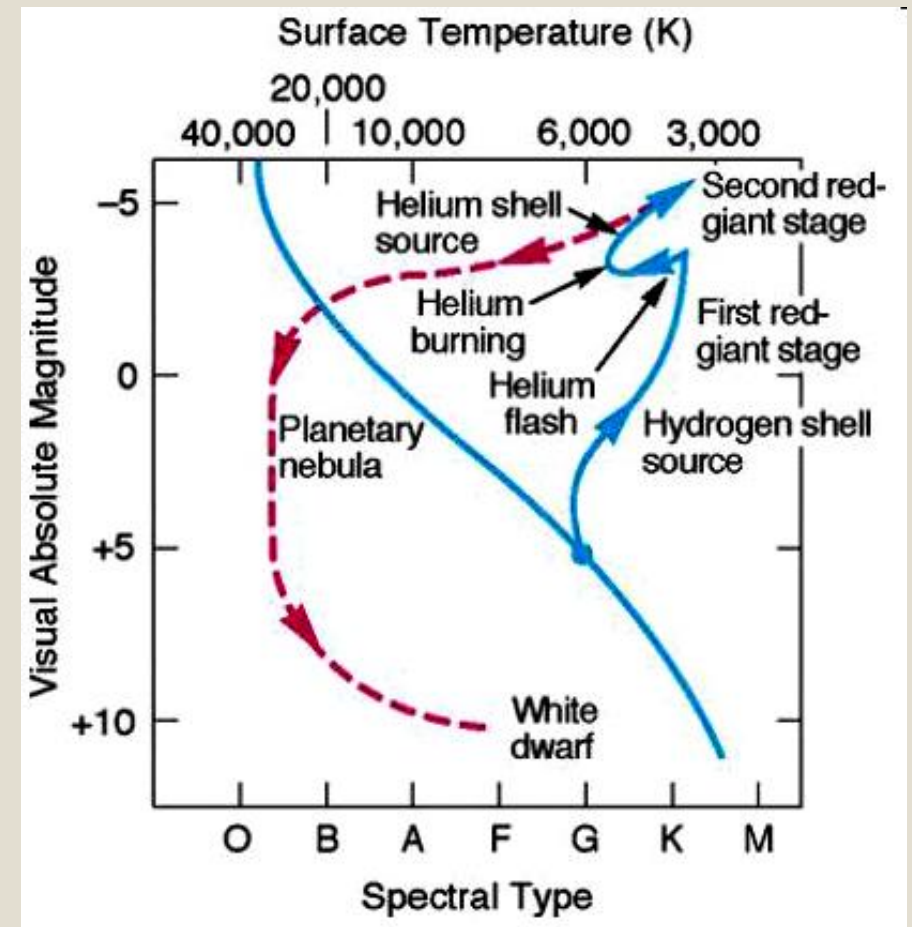
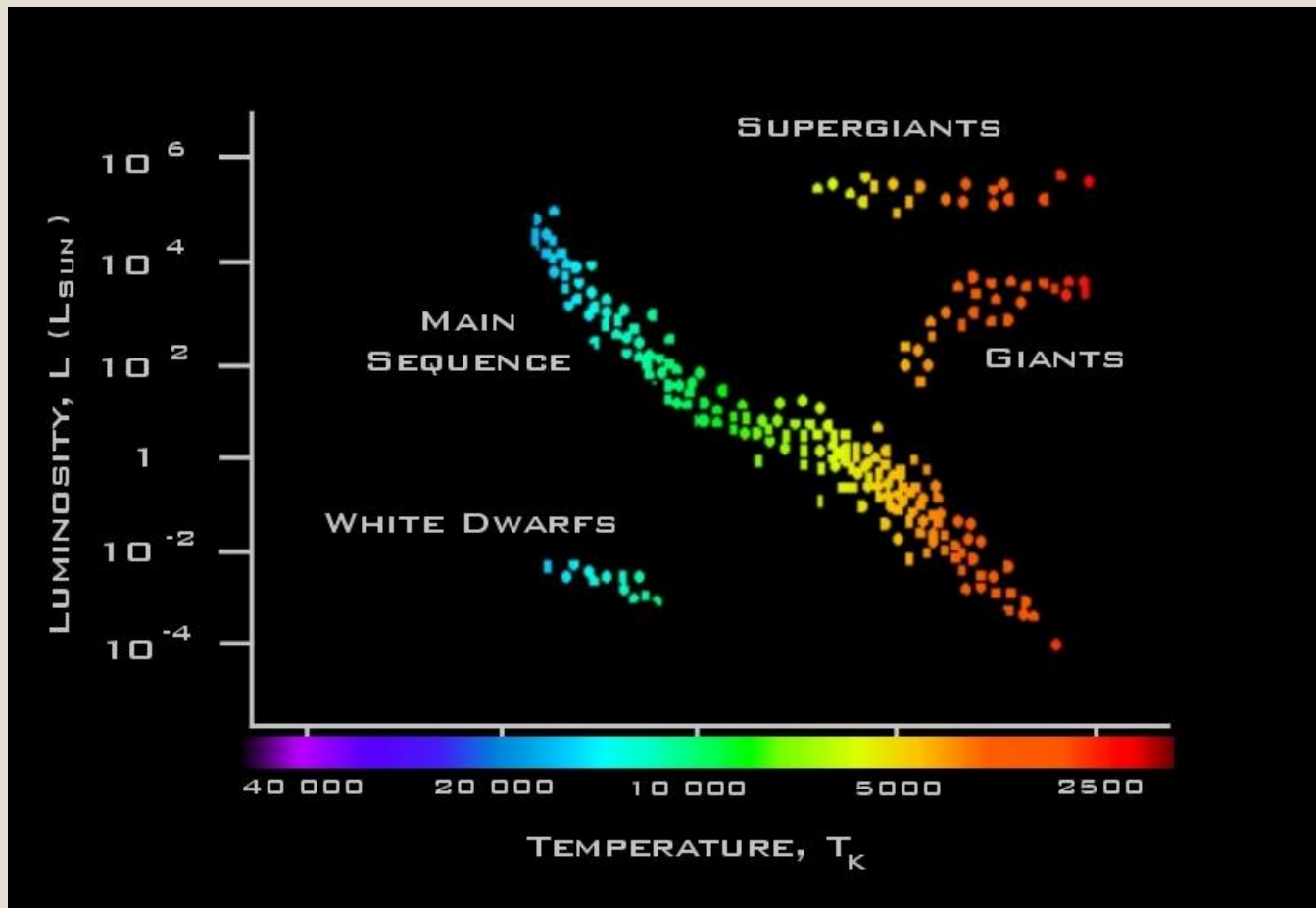
Популяция II – старые звёзды в Галактике

Популяция I – «современные» звёзды (Солнце)

Меняется состав звёзд, меняются звёзды,
меняется их судьба

ЭВОЛЮЦИЯ ОДИНОЧНОЙ ЗВЕЗДЫ

Эволюция звезды – это смена источников горения

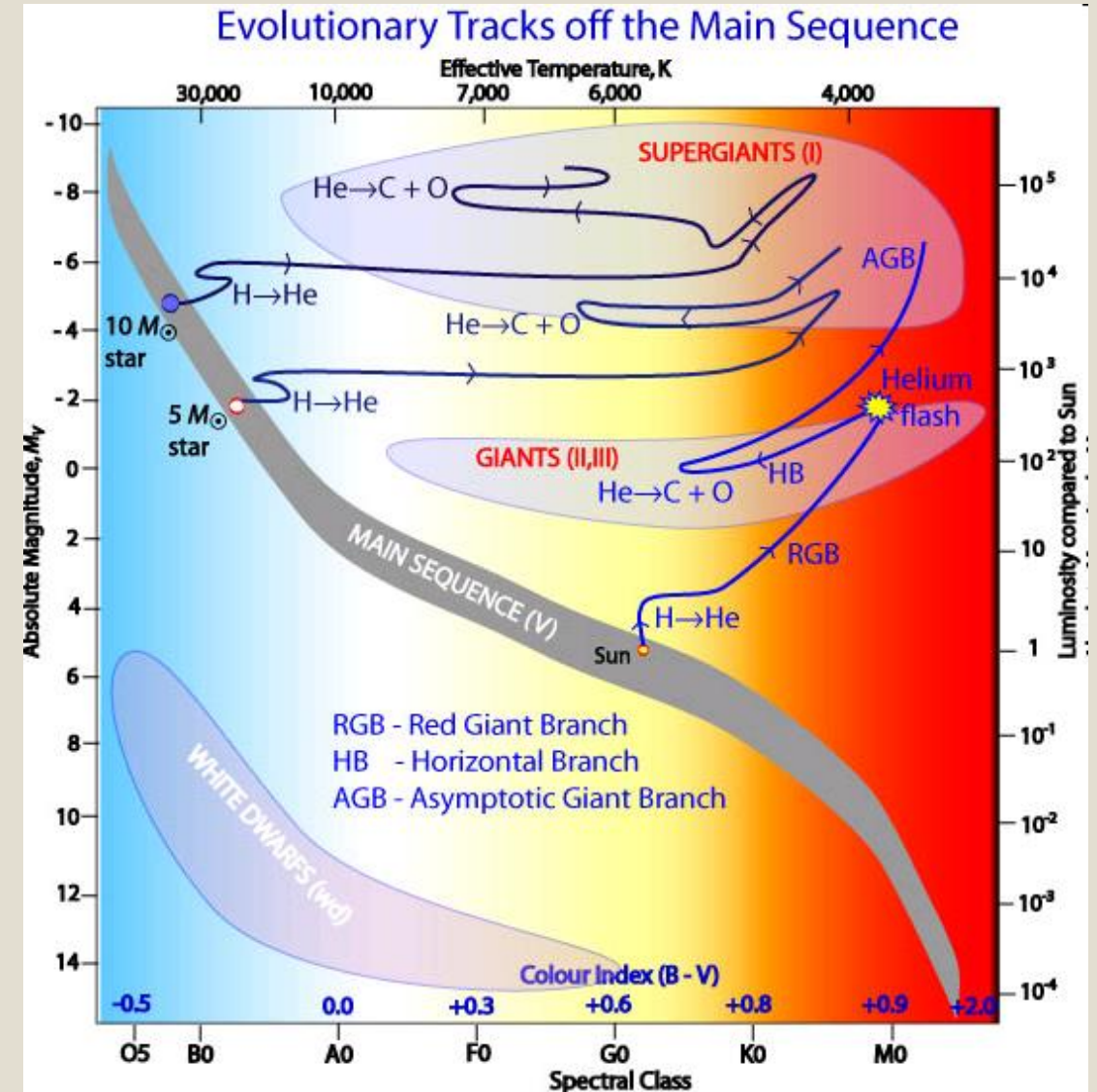


МАССА – ГЛАВНЫЙ ПАРАМЕТР

Судьба звезды зависит от ее массы.

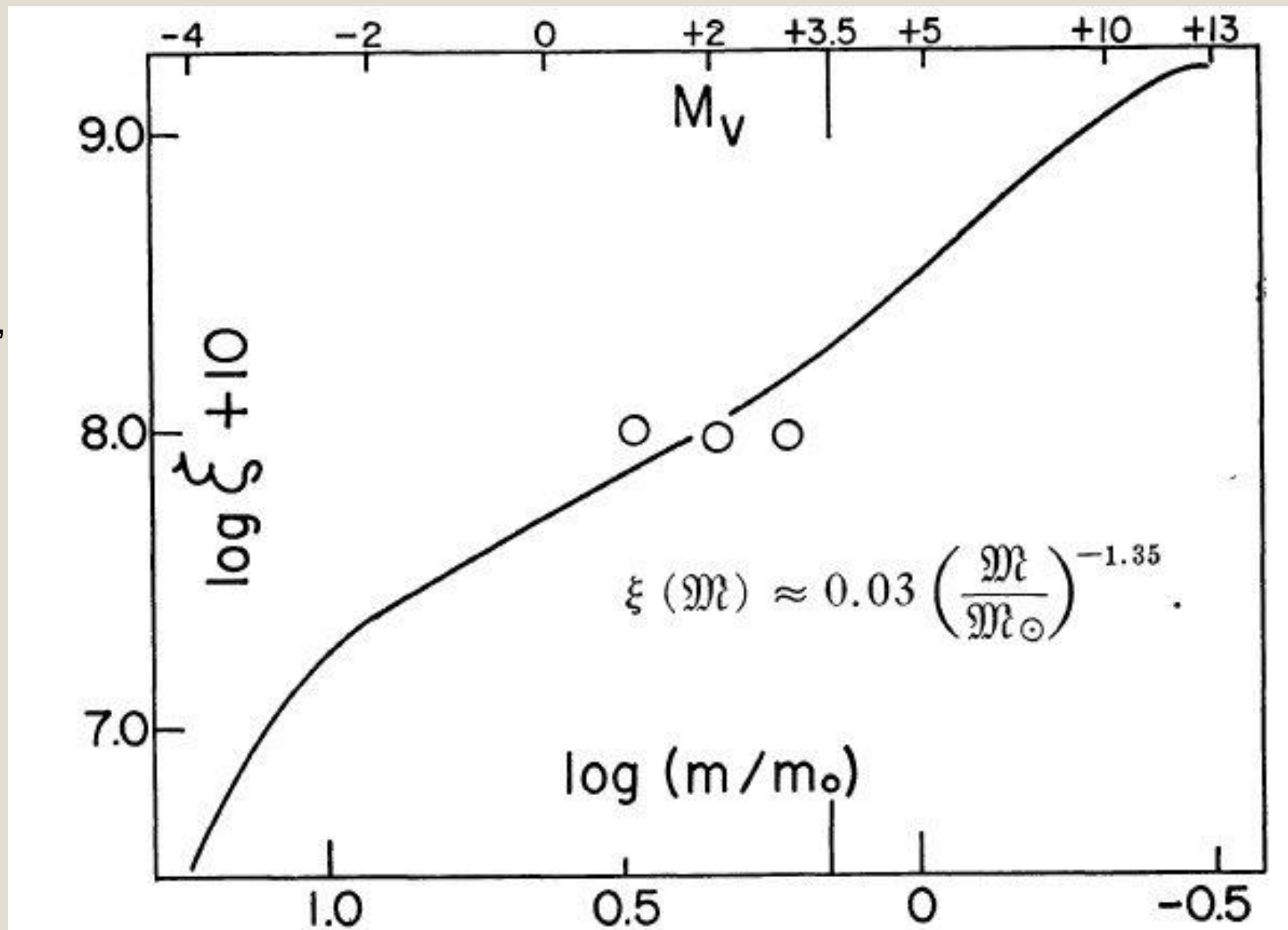
- Чем массивнее звезда – тем больше она излучает и меньше живет
- Массивные звезды в конце жизни взрываются, а их ядра становятся нейтрон. звездами или черными дырами
- Маломассивные звезды сбрасывают оболочки, и их ядра становятся белыми карликами

Надежное определение масс возможно для звезд, входящих в двойные и кратные системы.

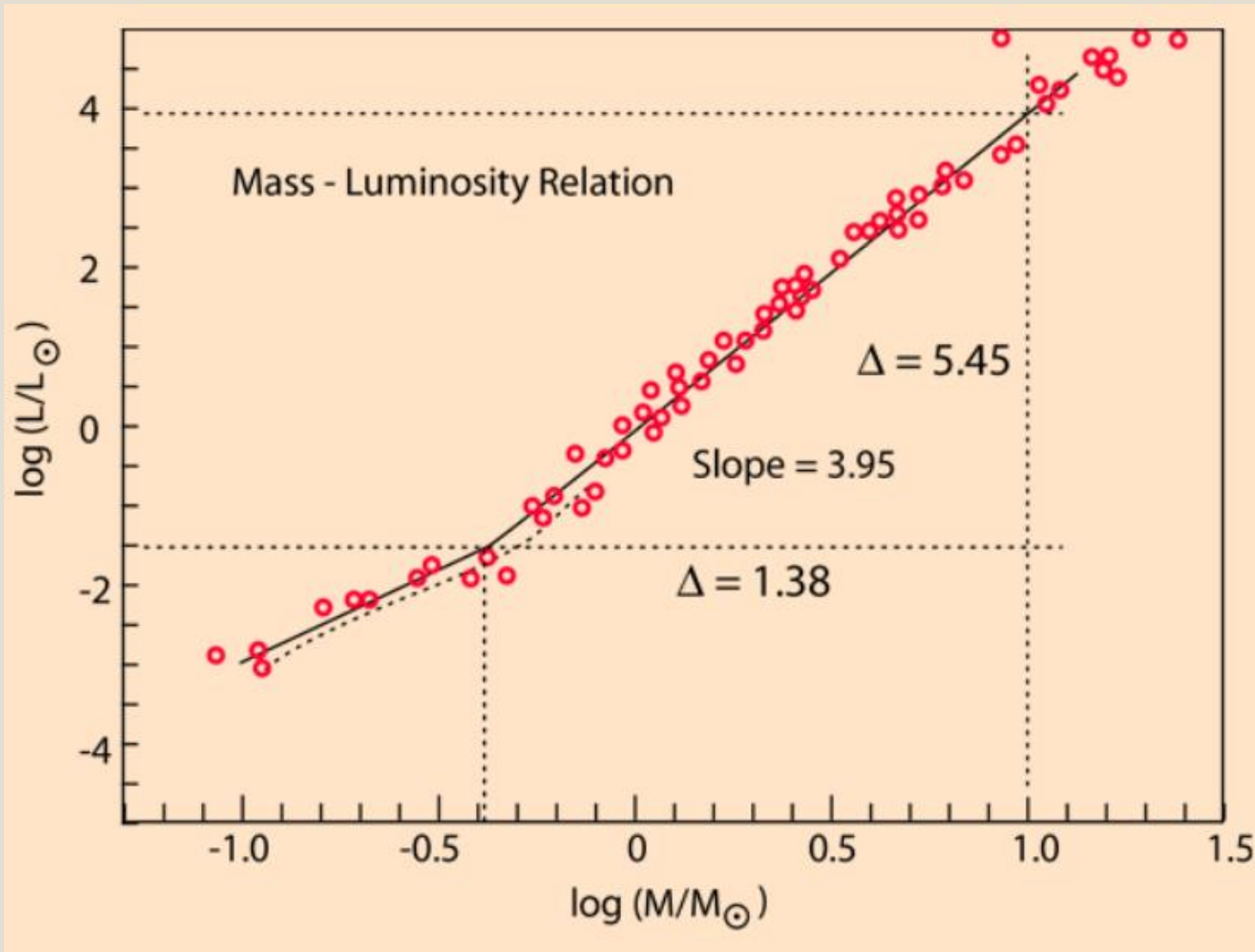


РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЗВЕЗД ПО МАССАМ

Спустя годы функция масс, предложенная Эдом Салпитером, остается хорошим приближением, которое активно применяют в самых разных исследованиях.



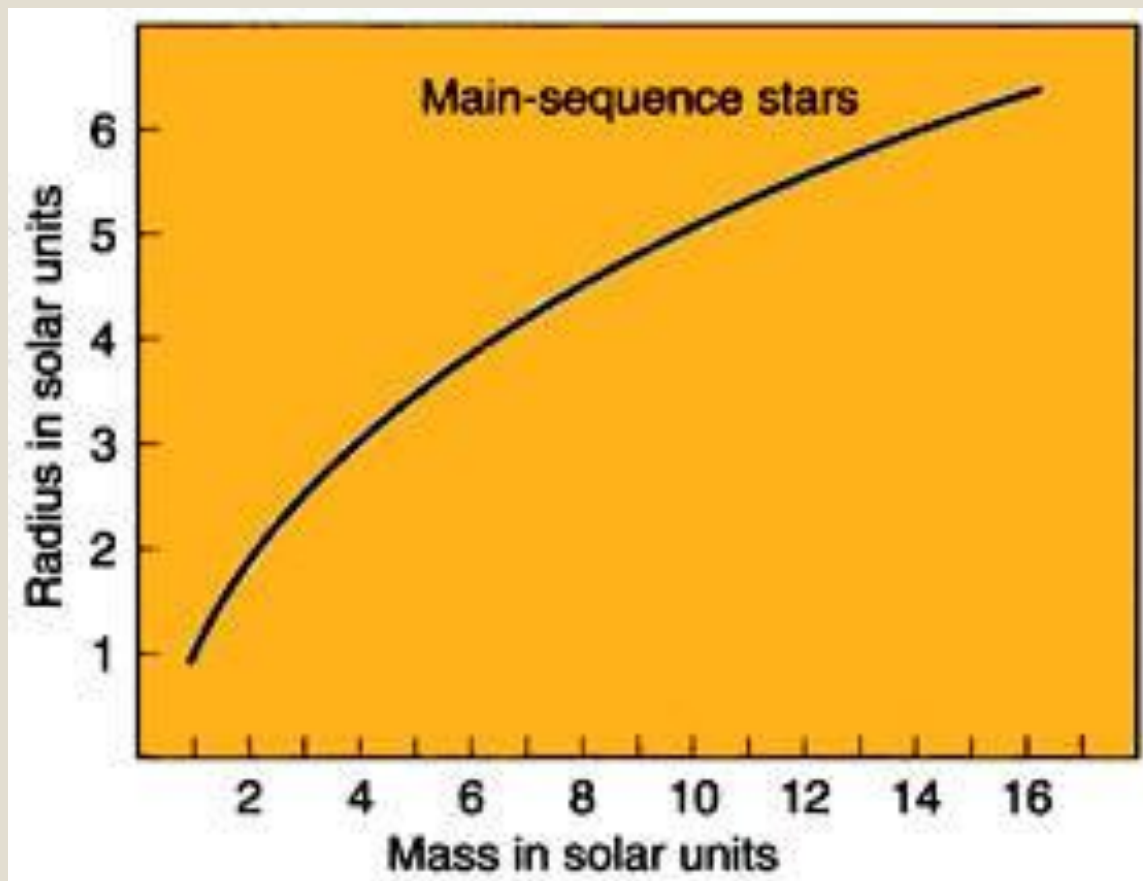
СООТНОШЕНИЕ МАССА-СВЕТИМОСТЬ



Для легких звезд
(пока давление газовое)
 $L \sim M^{3-4}$

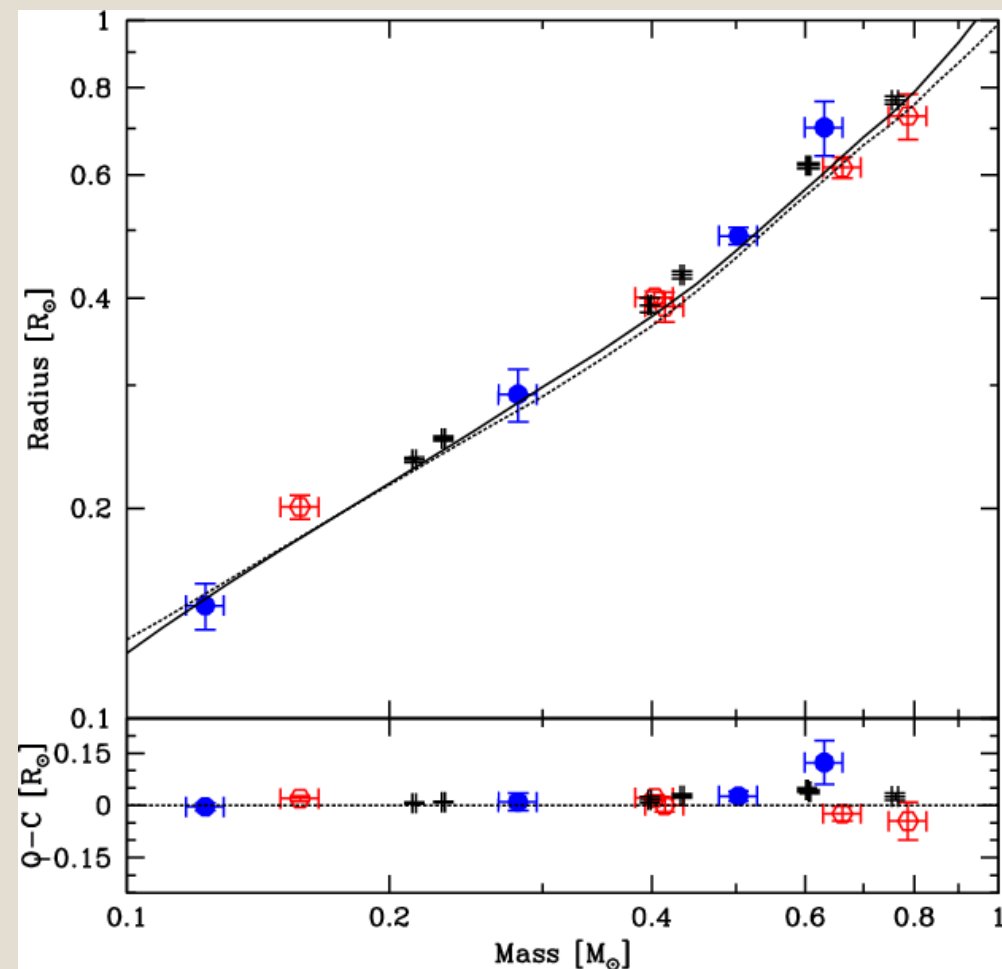
Для тяжелых звезд
(когда давление излучения
становится важнее)
 $L \sim M$

СООТНОШЕНИЕ МАССА-РАДИУС

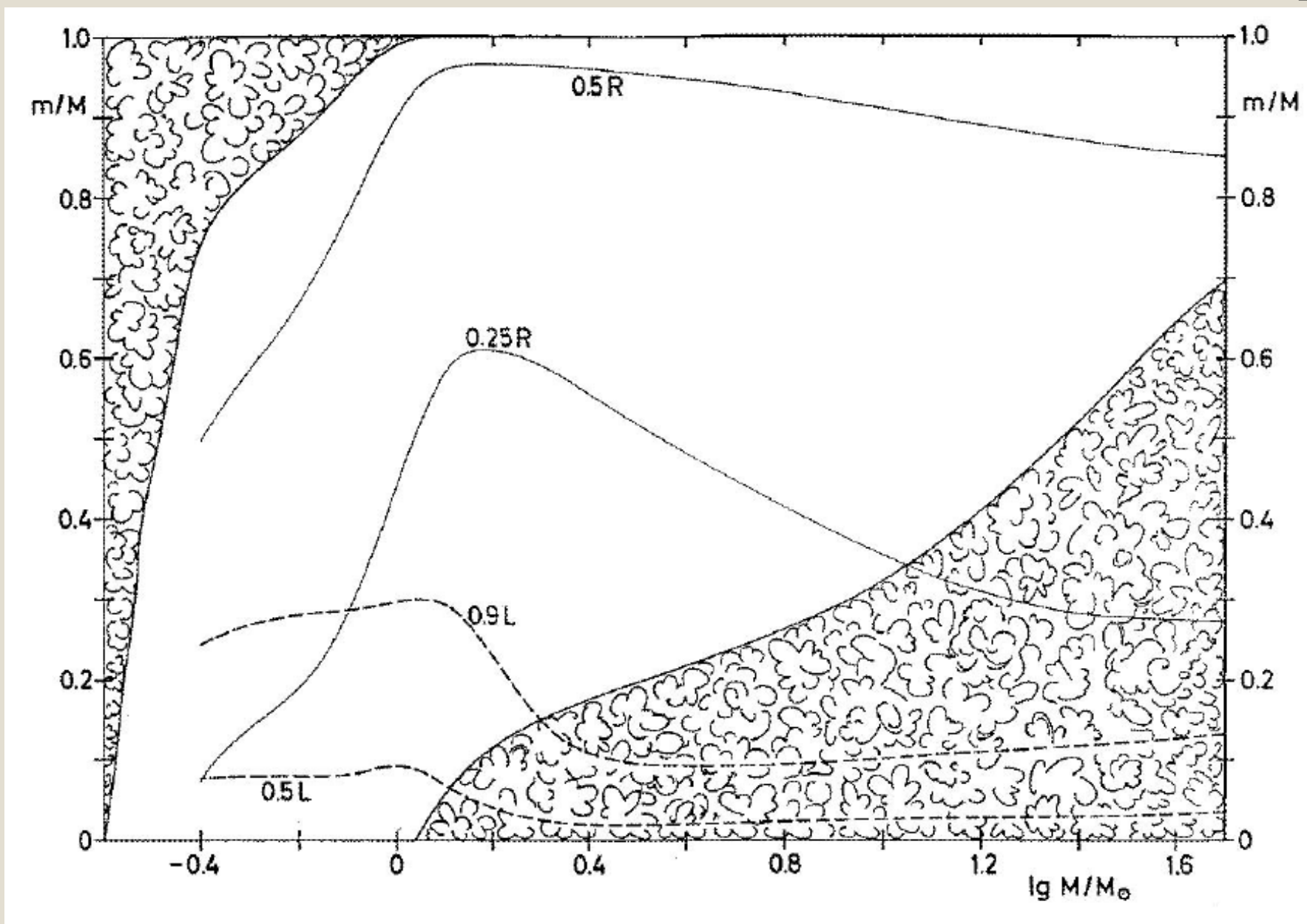


Для масс < 1 солнечной
показатель степени равен
примерно 0.8-1.
А для больших масс примерно – 0.6.

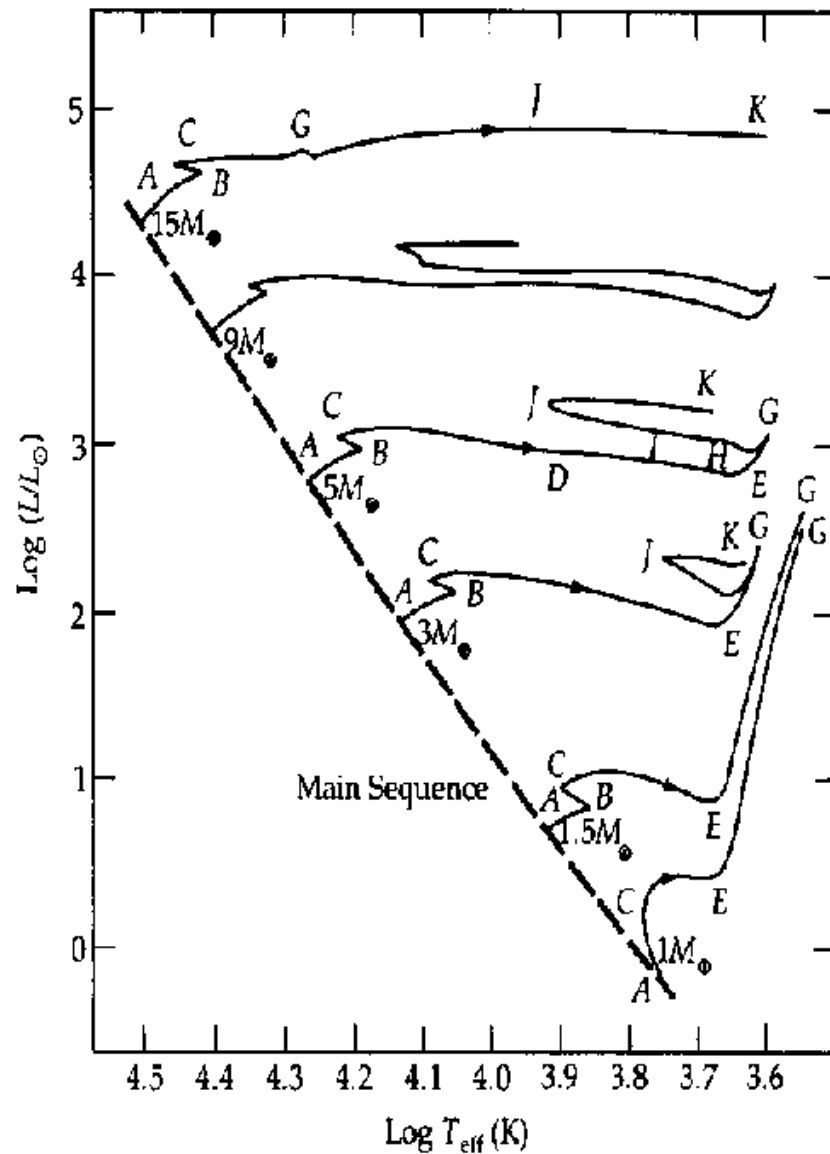
Соотношение зависит
от параметров
конвективной оболочки.



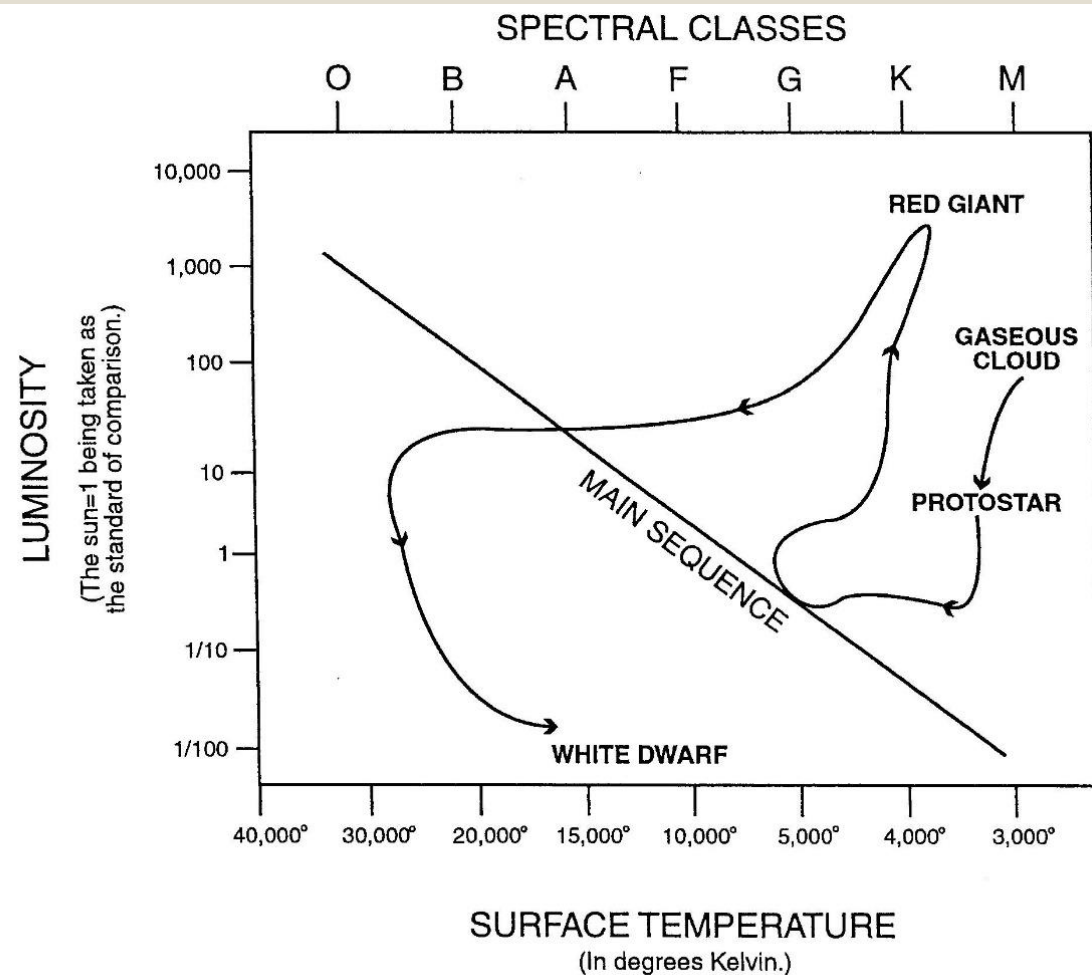
ВНУТРЕННЯЯ СТРУКТУРА ЗВЕЗД



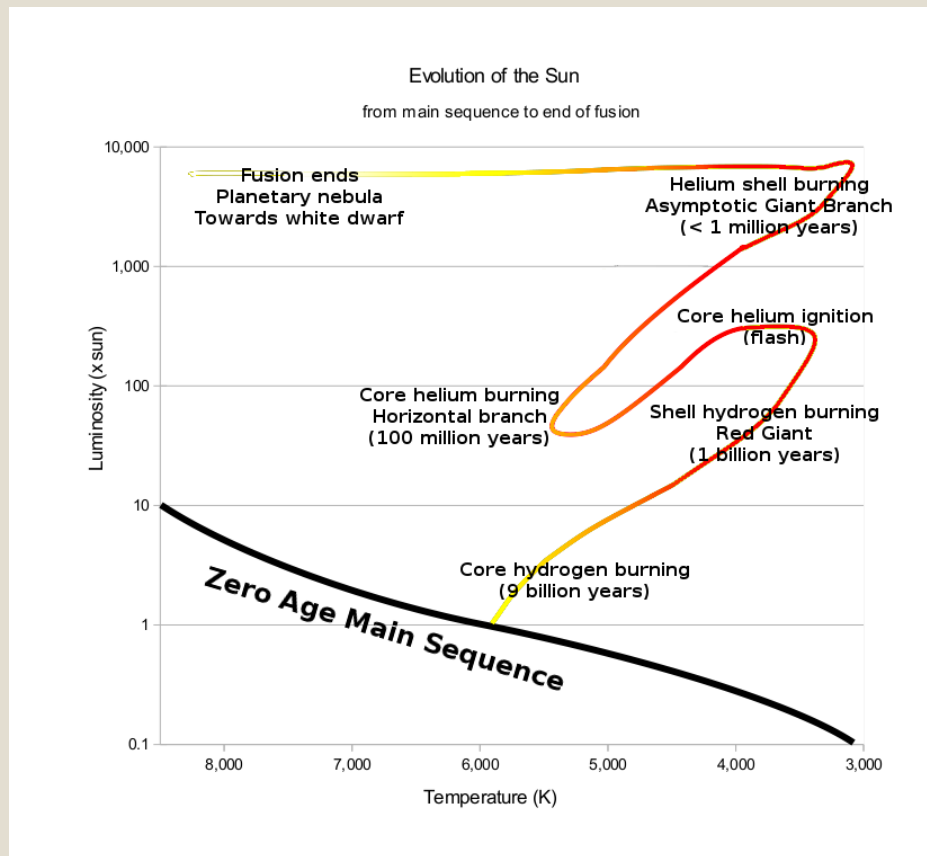
ЭВОЛЮЦИЯ НА ДИАГРАММЕ Г-Р



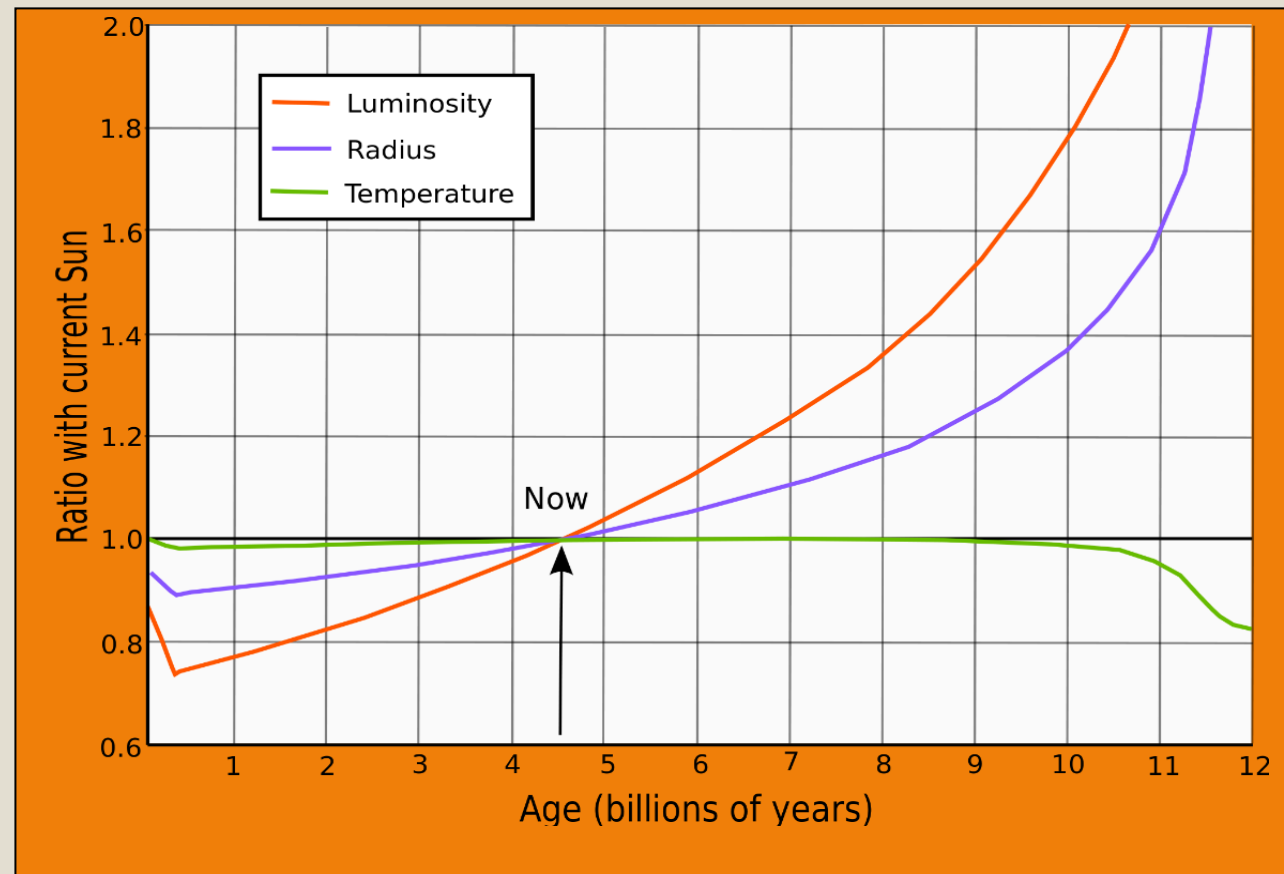
Дольше всего звезды находятся на Главной последовательности.



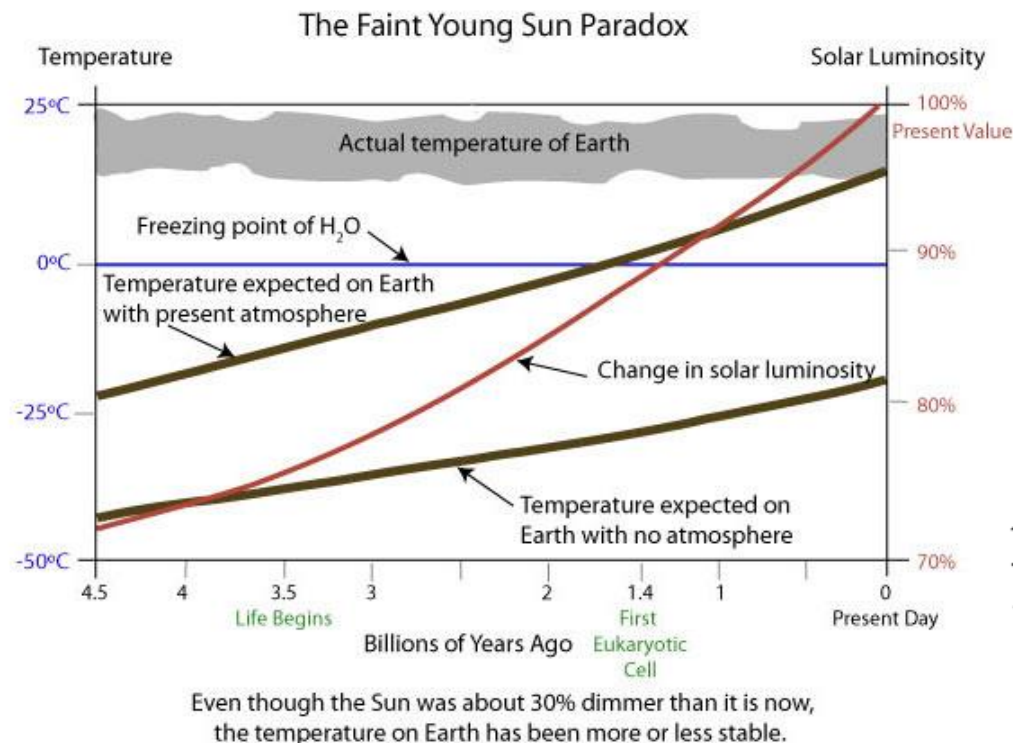
ЭВОЛЮЦИЯ СОЛНЦА



Сейчас Солнце пережигает водород в своих недрах, Очень медленно Солнце становится больше и ярче.

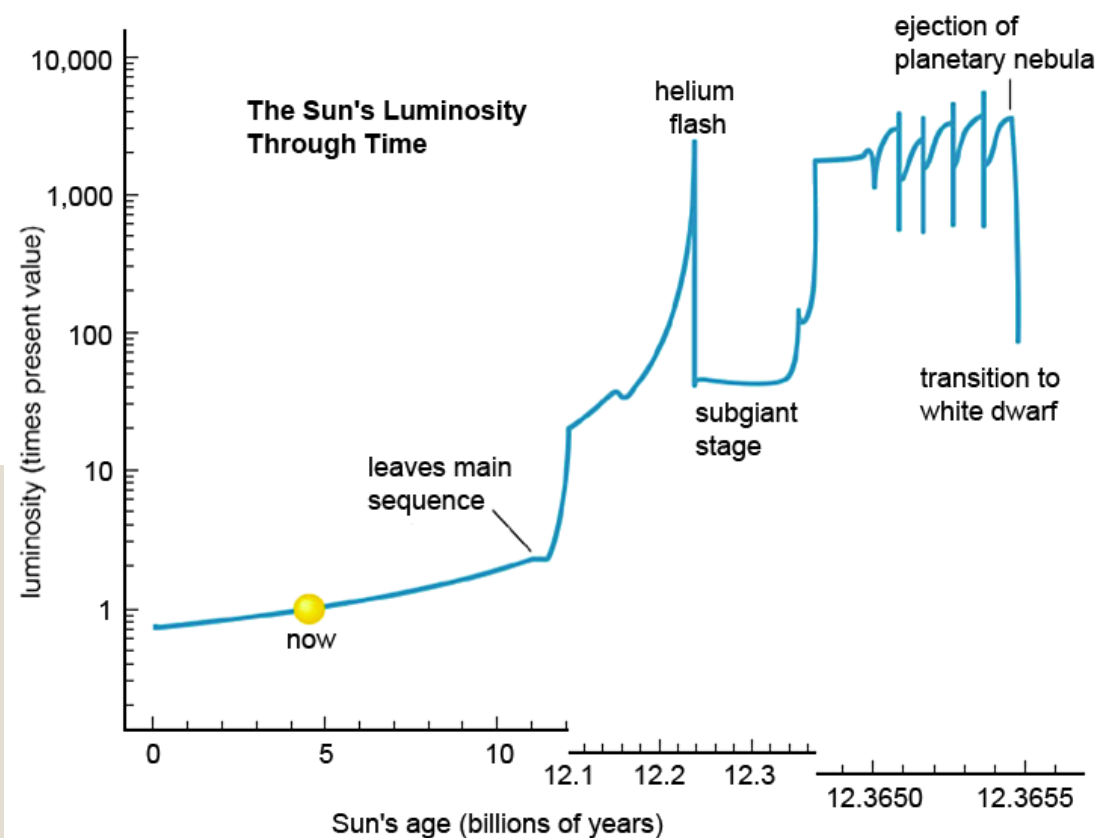


ПАРАДОКС ТУСКЛОГО СОЛНЦА

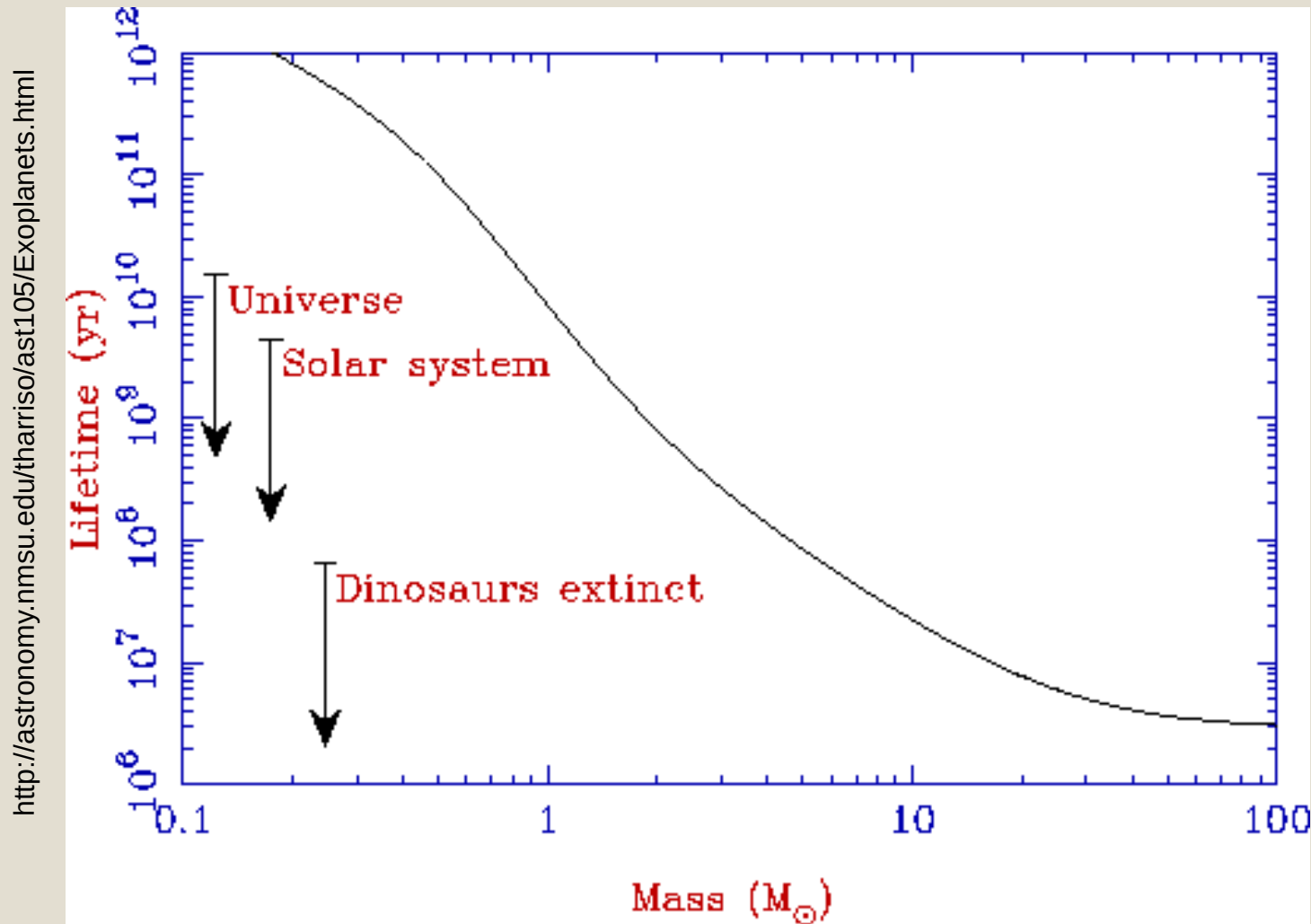


Миллиарды лет назад
Солнце светило менее ярко,
тем не менее, на Земле
существовала жидкая вода.

В 2020 гду появилась работа, в которой
авторы показывают, что причиной был
углекислый газ ([2006.06265](#)).



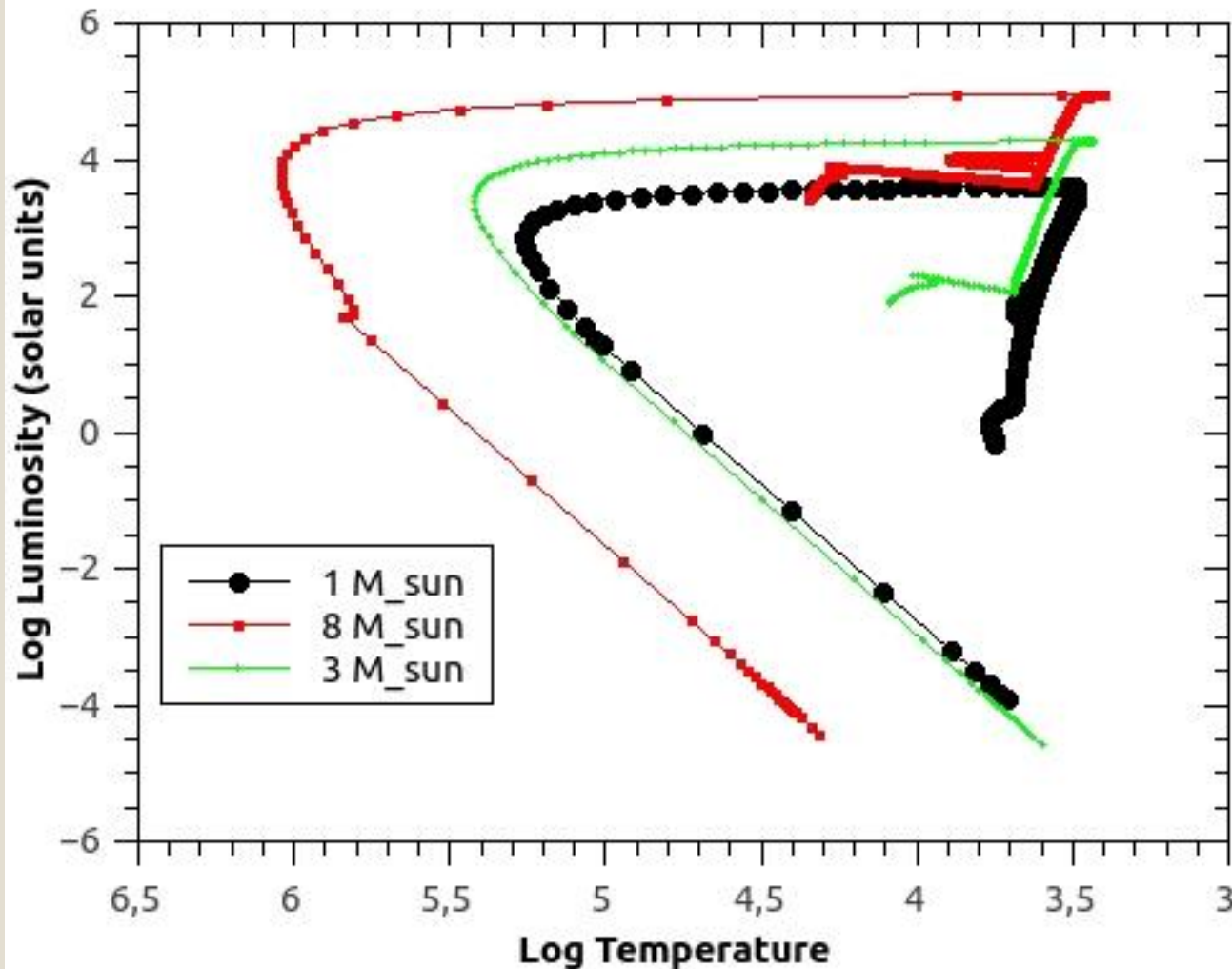
ВРЕМЯ ЖИЗНИ ЗВЕЗДЫ



$T \sim M/L$

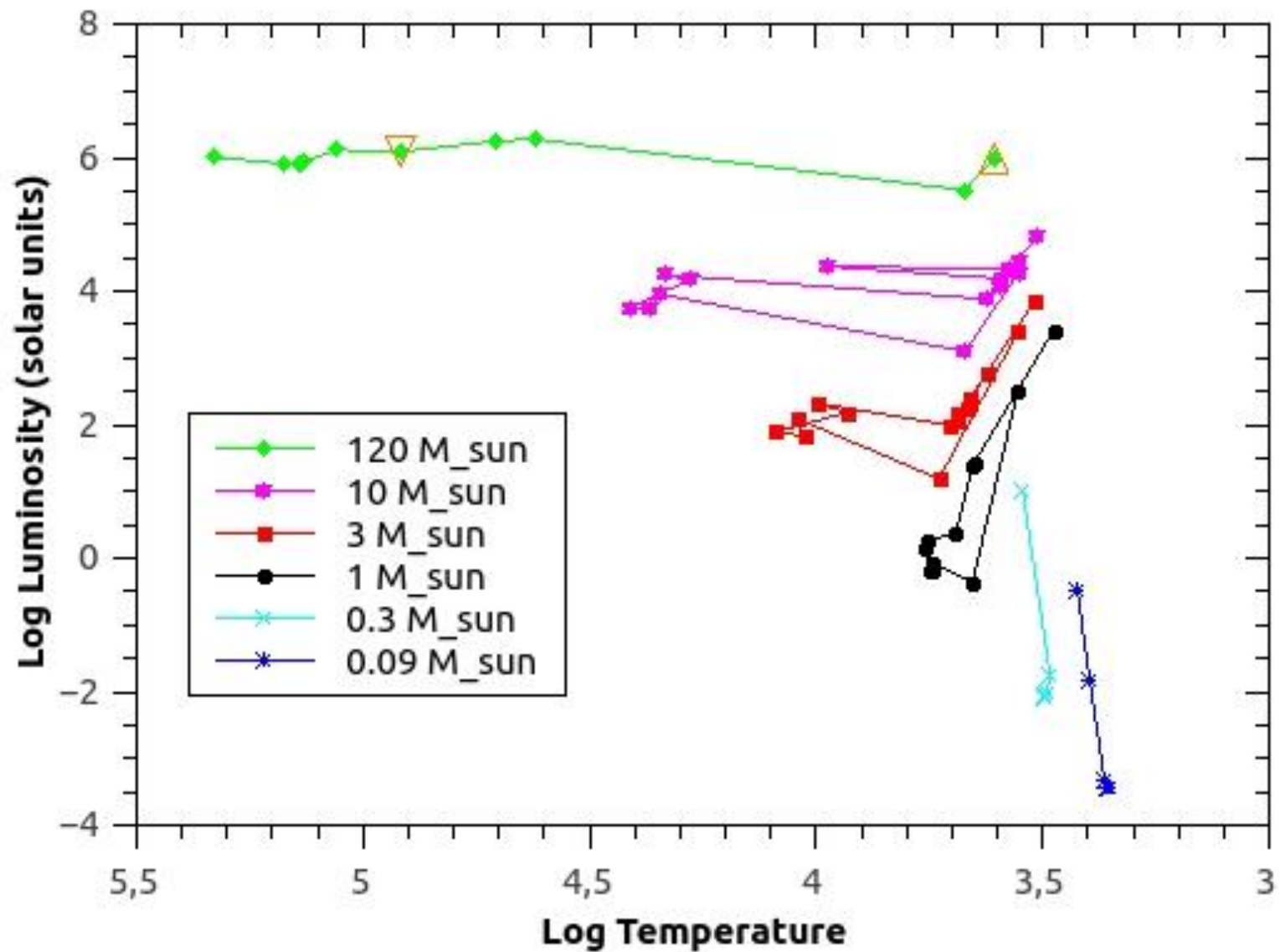
Для маломассивных $T \sim M^{-2}$,
для массивных выходит на константу.

ОТ ГЛАВНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ДО БЕЛЫХ КАРЛИКОВ



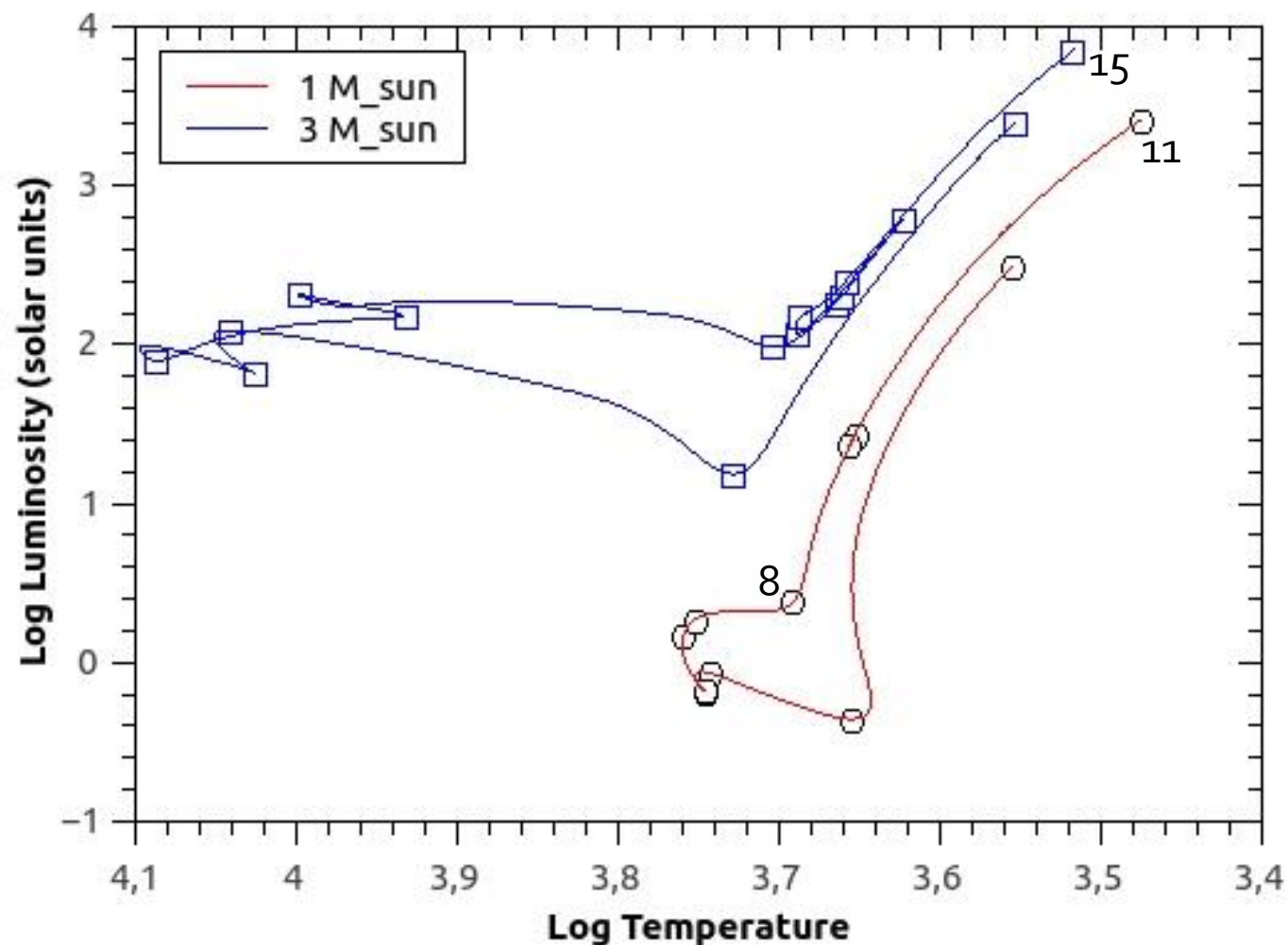
Расчеты проведены
с помощью программы SSE.

ДО И ПОСЛЕ ГП



Использованы треки
падуанской группы
Bressan et al. (2012).

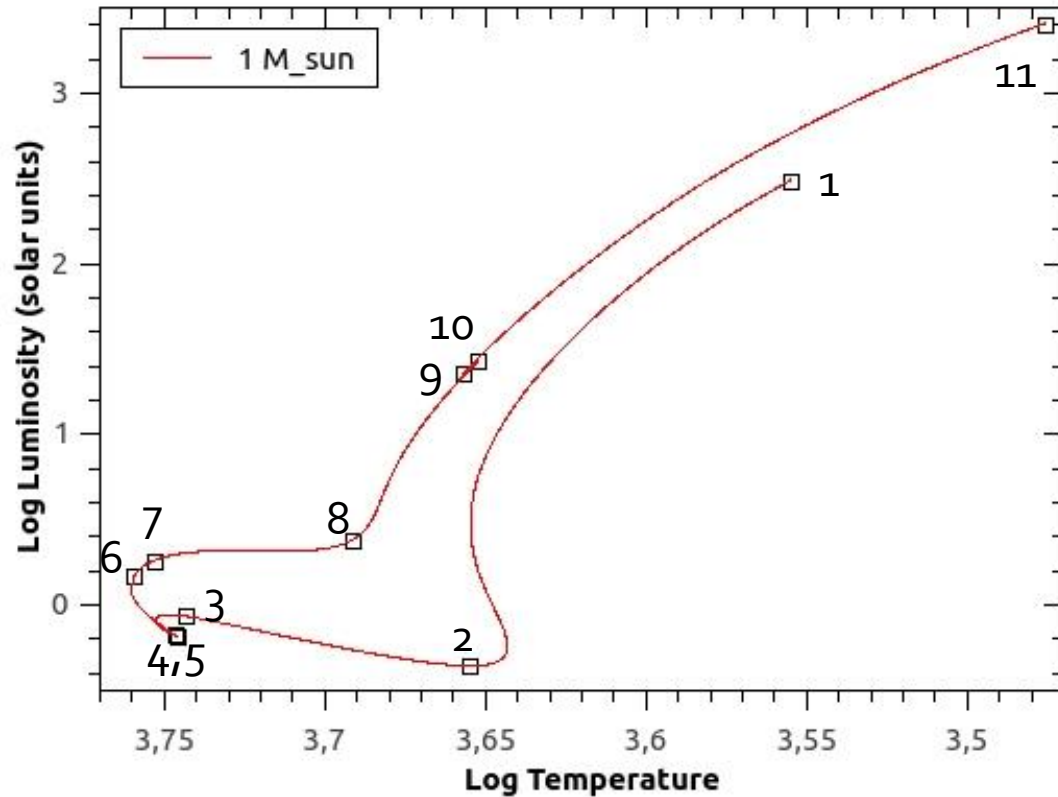
В ДЕТАЛЯХ.....



- 1 Начало
- 2 До-ГП
- 3 До-ГП
- 4 Вблизи начала ГП
- 5 Началось активное горение H
- 6 Конец горения водорода. Сжатие
- 7 Сжатие заканчивается. Выход на КГ
- 8 Основание ветви КГ
- 9 Red bump
- 10 Red bump end
- 11 Гелиевая вспышка или начало горения He (у массивных)
- 12 Base of red He burning
- 13 Самая синяя точка петли
- 14 Истощение гелия в центре
- 15 Начало TPAGB или начало горения C

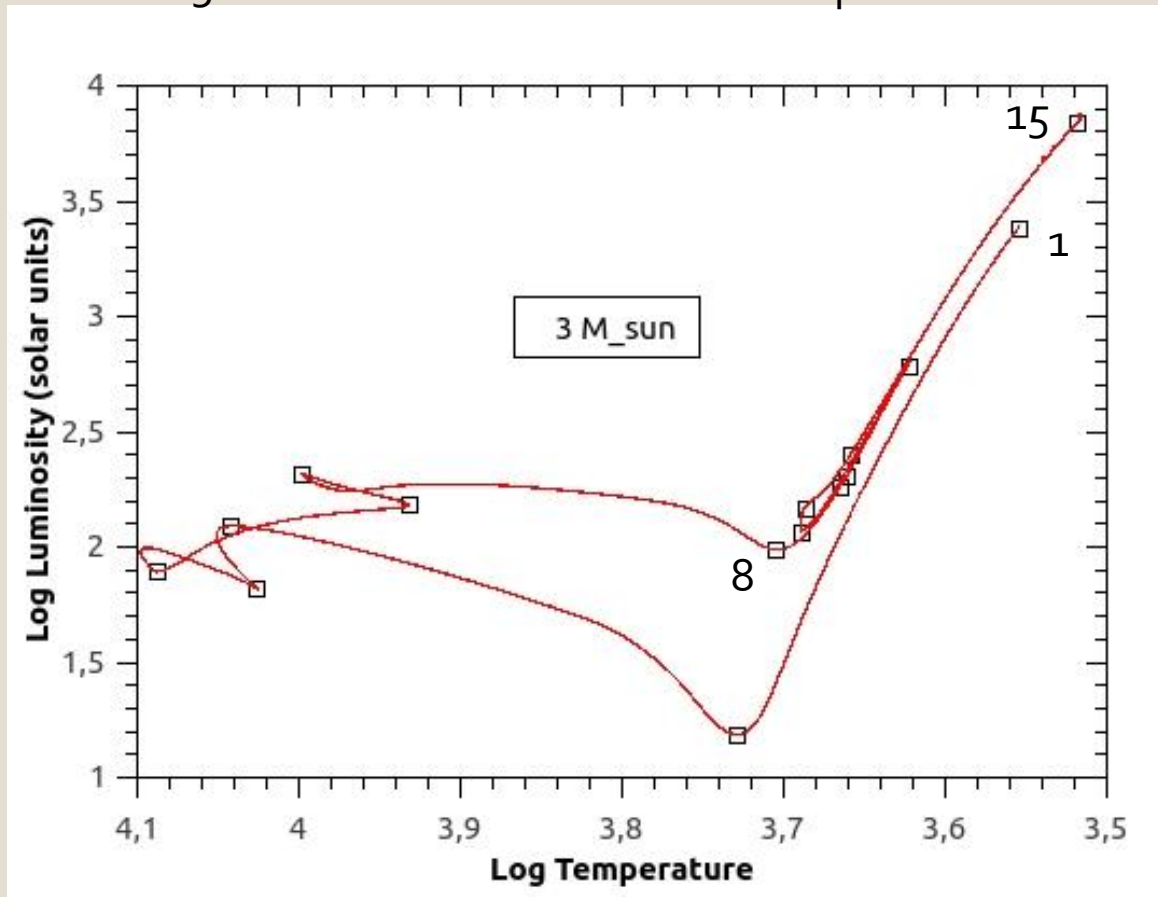
Использованы треки падуанской группы Bressan et al. (2012).

ЧУТЬ ПОДРОБНЕЕ

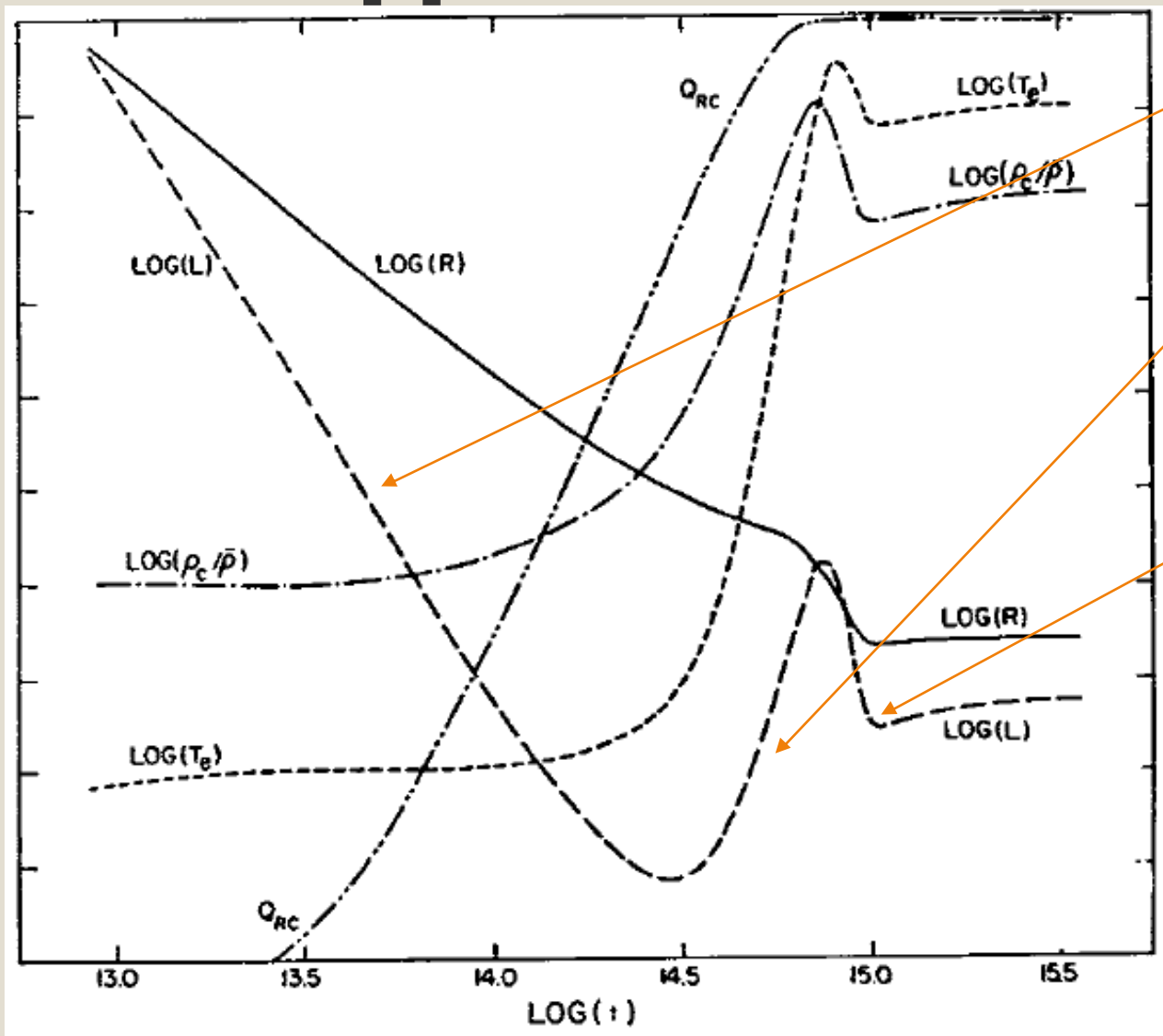


- 1 Начало
- 2 До-ГП
- 3 До-ГП
- 4 Вблизи начала ГП
- 5 Началось активное горение H
- 6 Конец горения водорода. Сжатие
- 7 Сжатие заканчивается. Выход на КГ

- 8 Основание ветви КГ
- 9 Red bump
- 10 Red bump end
- 11 Гелиевая вспышка или начало горения He (у массивных)
- 12 Base of red He burning
- 13 Самая синяя точка петли
- 14 Истощание гелия в центре
- 15 Начало TPAGB или начало горения C



ВЫХОД НА ГЛАВНУЮ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ



Стадия Хаяши

Приближение к ГП.

Появилось лучистое ядро.
Для маломассивных звезд
 $L \sim T_{\text{eff}}^{0.8}$

Начало термоядерных реакций.
Первые реакции – синтез ^{14}N из ^{12}C

ПОЧЕМУ РАСТЕТ СВЕТИМОСТЬ НА ГЛАВНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ

Водород превращается в гелий



Растет молекулярный вес

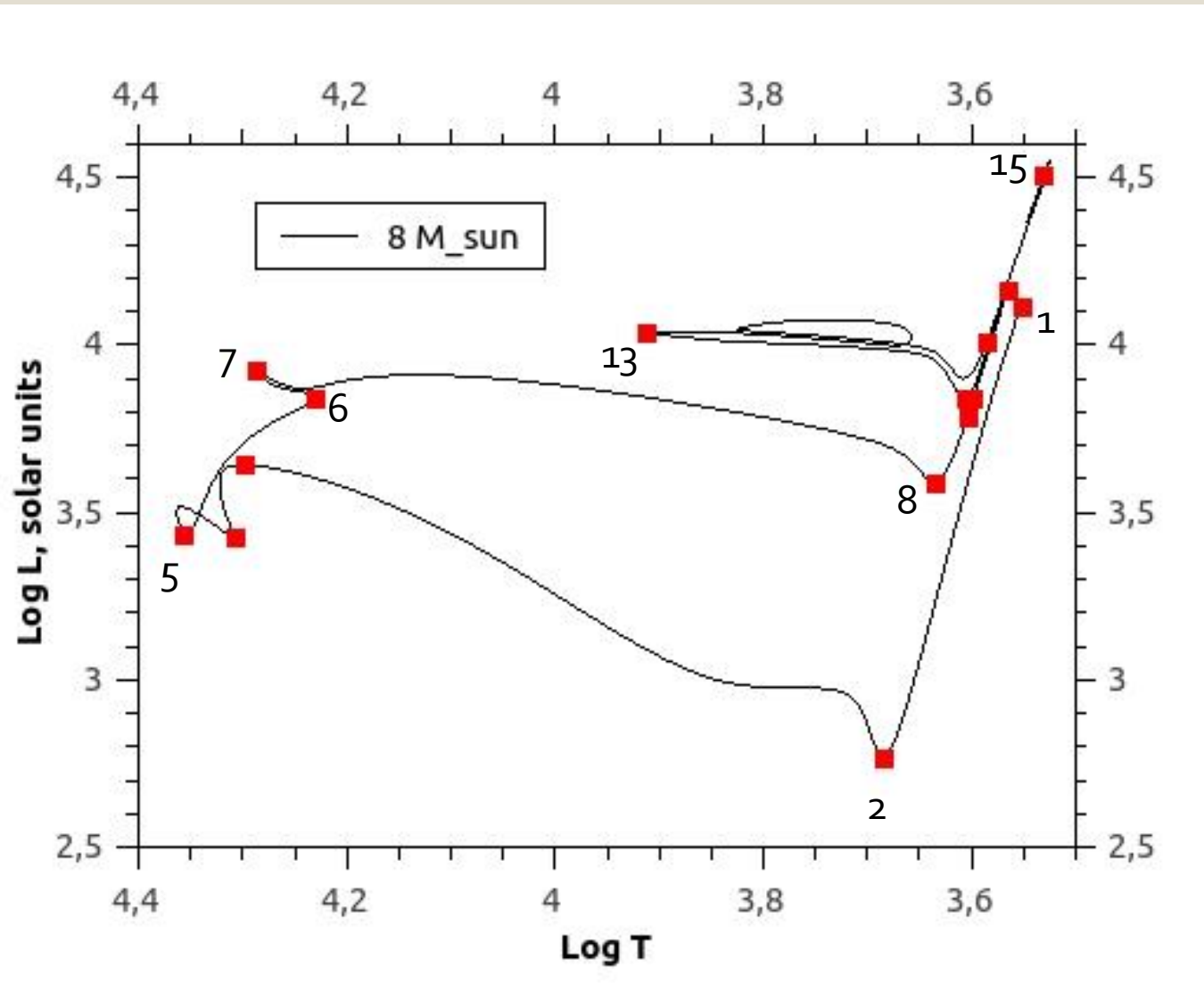
$$\frac{kT\rho}{\mu m_u} = \frac{GM\rho}{R}$$

Рост молекулярного веса компенсируется ростом ρT .

Т.е., ядро сжимается. Растет темп реакций и падает непрозрачность (из-за роста T).

В итоге растет светимость.

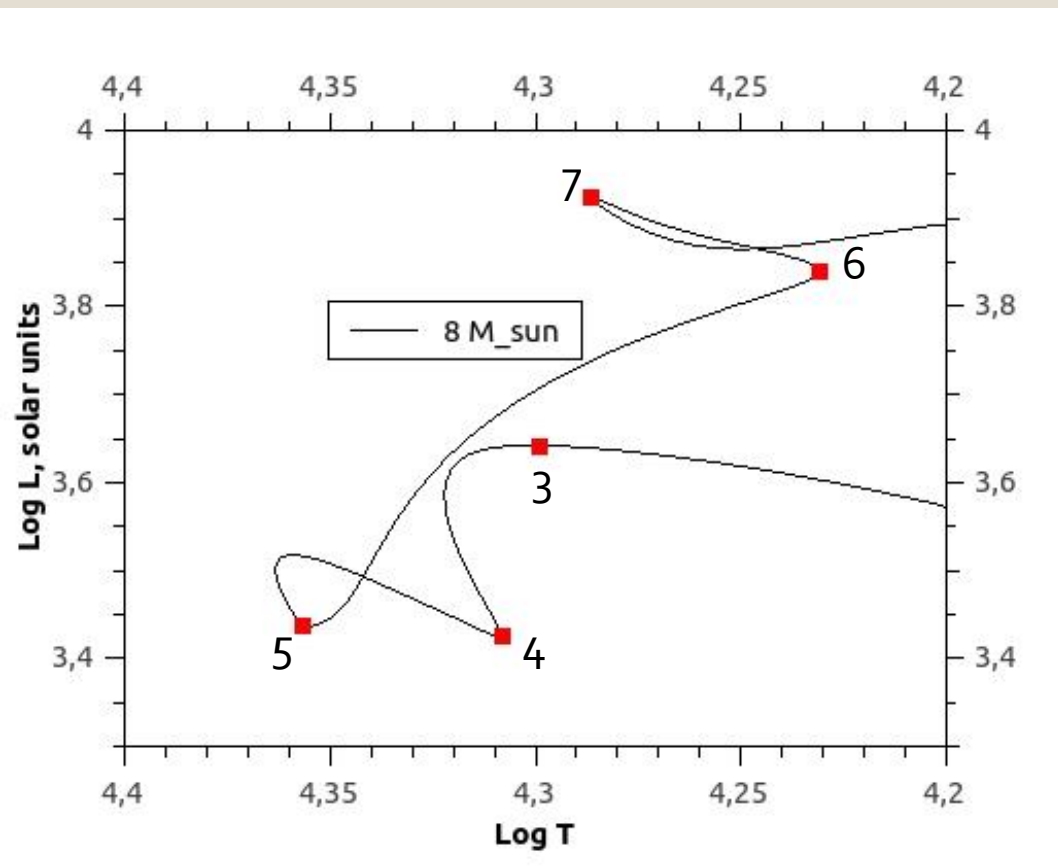
В ДЕТАЛЯХ.....



- 1 Начало
- 2 До-ГП
- 3 До-ГП
- 4 Вблизи начала ГП
- 5 Началось активное горение H
- 6 Конец горения водорода. Сжатие
- 7 Сжатие заканчивается. Выход на КГ
- 8 Основание ветви КГ
- 9 Red bump
- 10 Red bump end
- 11 Гелиевая вспышка или начало горения He (у массивных)
- 12 Base of red He burning
- 13 Самая синяя точка петли
- 14 Истощение гелия в центре
- 15 Начало TPAGB или начало горения C

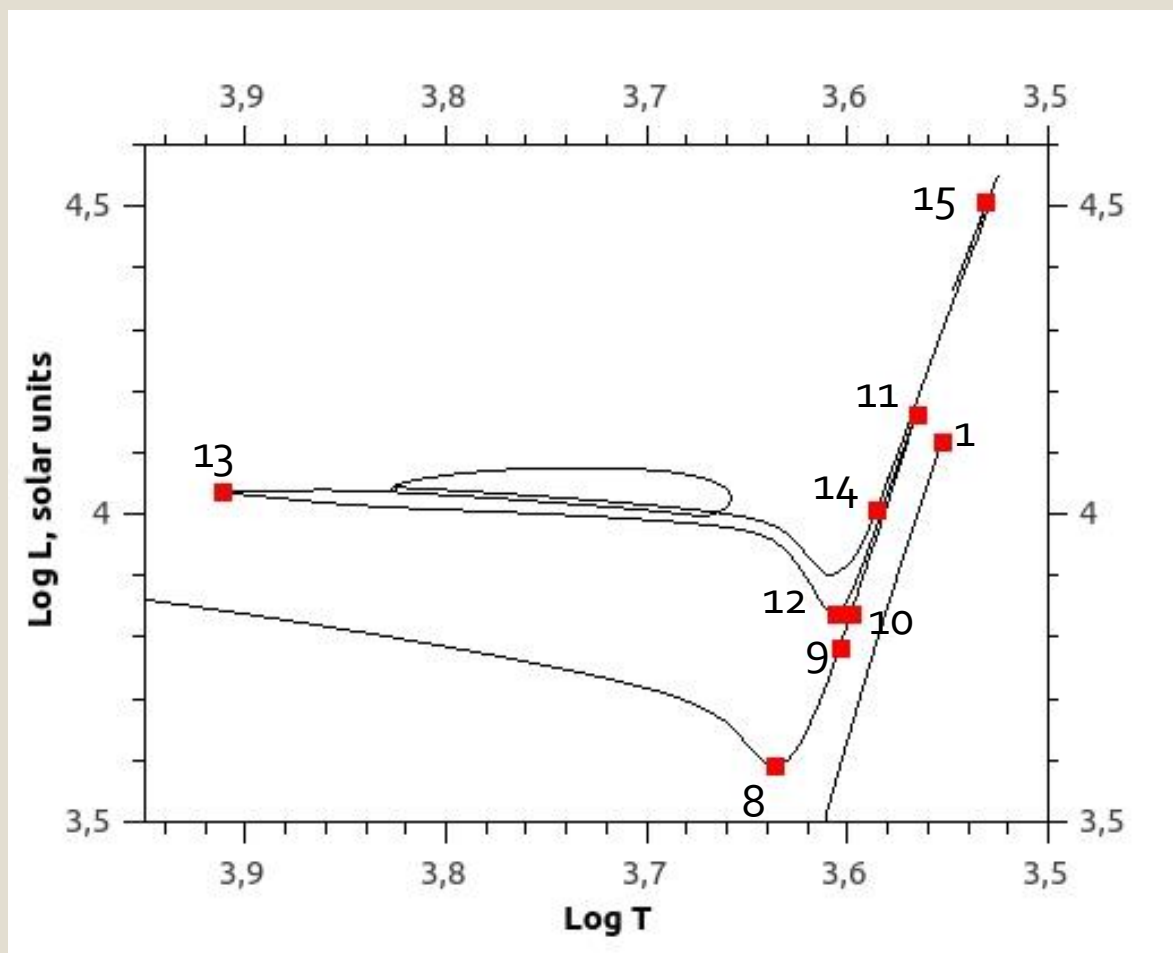
Использованы треки падуанской группы Bressan et al. (2012).

В МЕЛКИХ ДЕТАЛЯХ

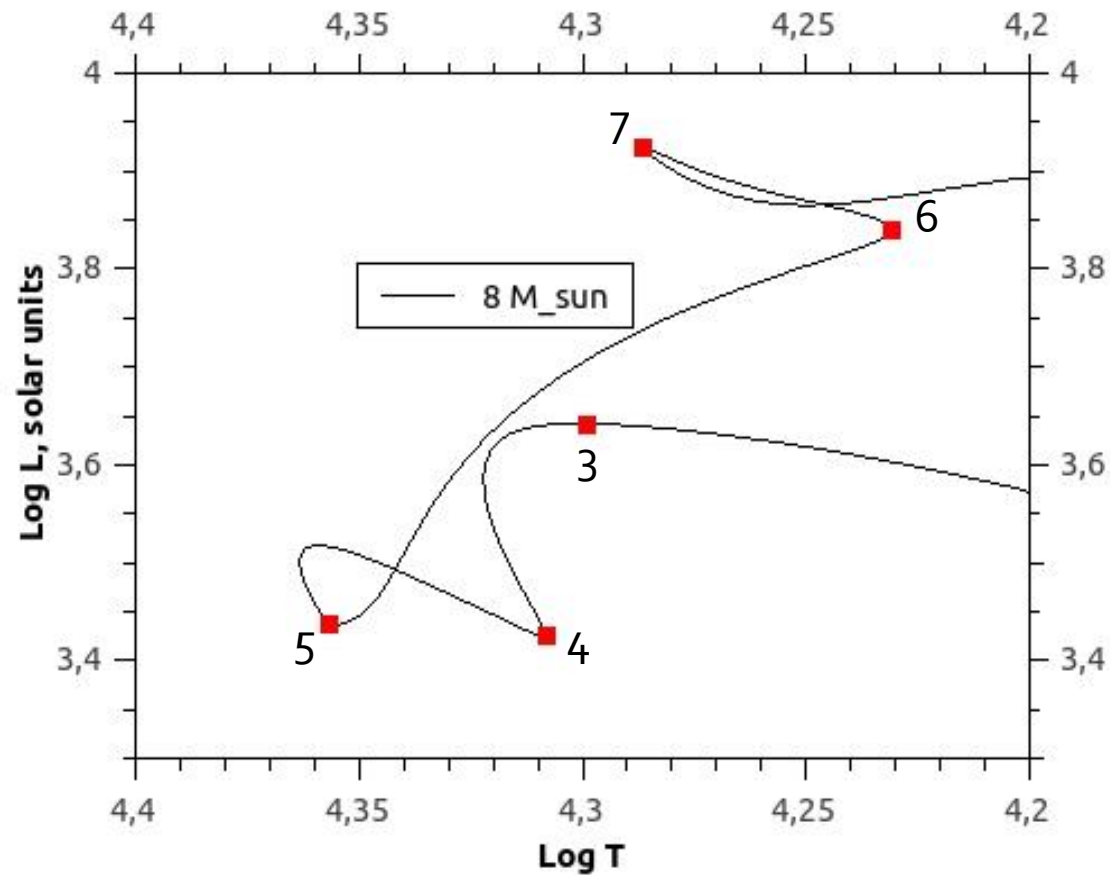


- 1 Начало
- 2 До-ГП
- 3 До-ГП
- 4 Вблизи начала ГП
- 5 Началось активное горение H
- 6 Конец горения водорода. Сжатие
- 7 Сжатие заканчивается. Выход на КГ

- 8 Основание ветви КГ
- 9 Red bump
- 10 Red bump end
- 11 Гелиевая вспышка или начало горения He
- 12 Base of red He burning
- 13 Самая синяя точка петли
- 14 Истощение гелия в центре
- 15 Начало TPAGB или начало горения C



ЧТО ЗА «КРЮК»?



У звезд с $M > 1.25$ солнечных конвективные ядра. Поэтому истощение водорода наступает сразу во всем ядре.

Слоевой источник в этот момент еще не работает.

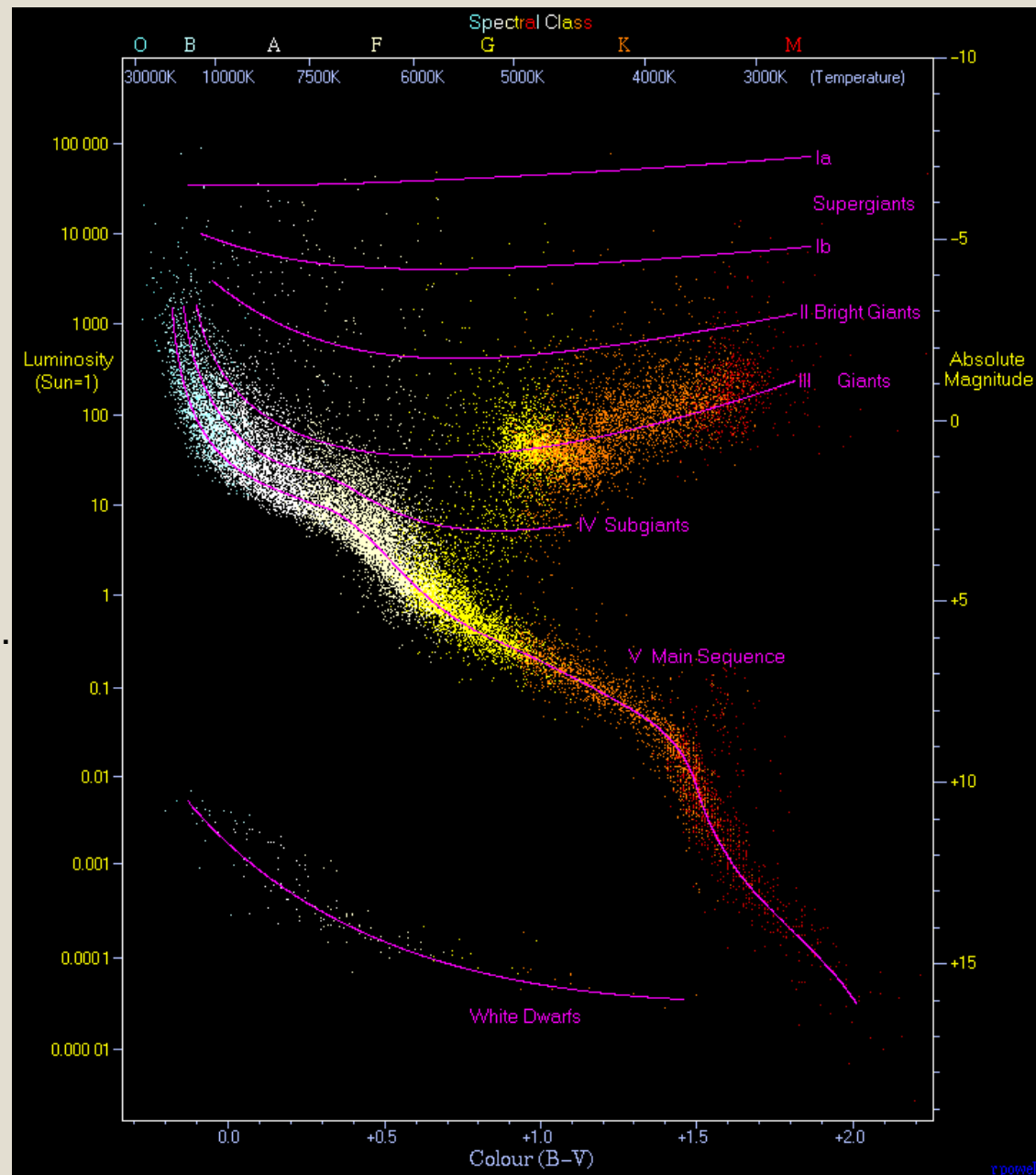
Происходит сжатие ядра и звезды в целом.

В результате растут светимость и эффективная температура.

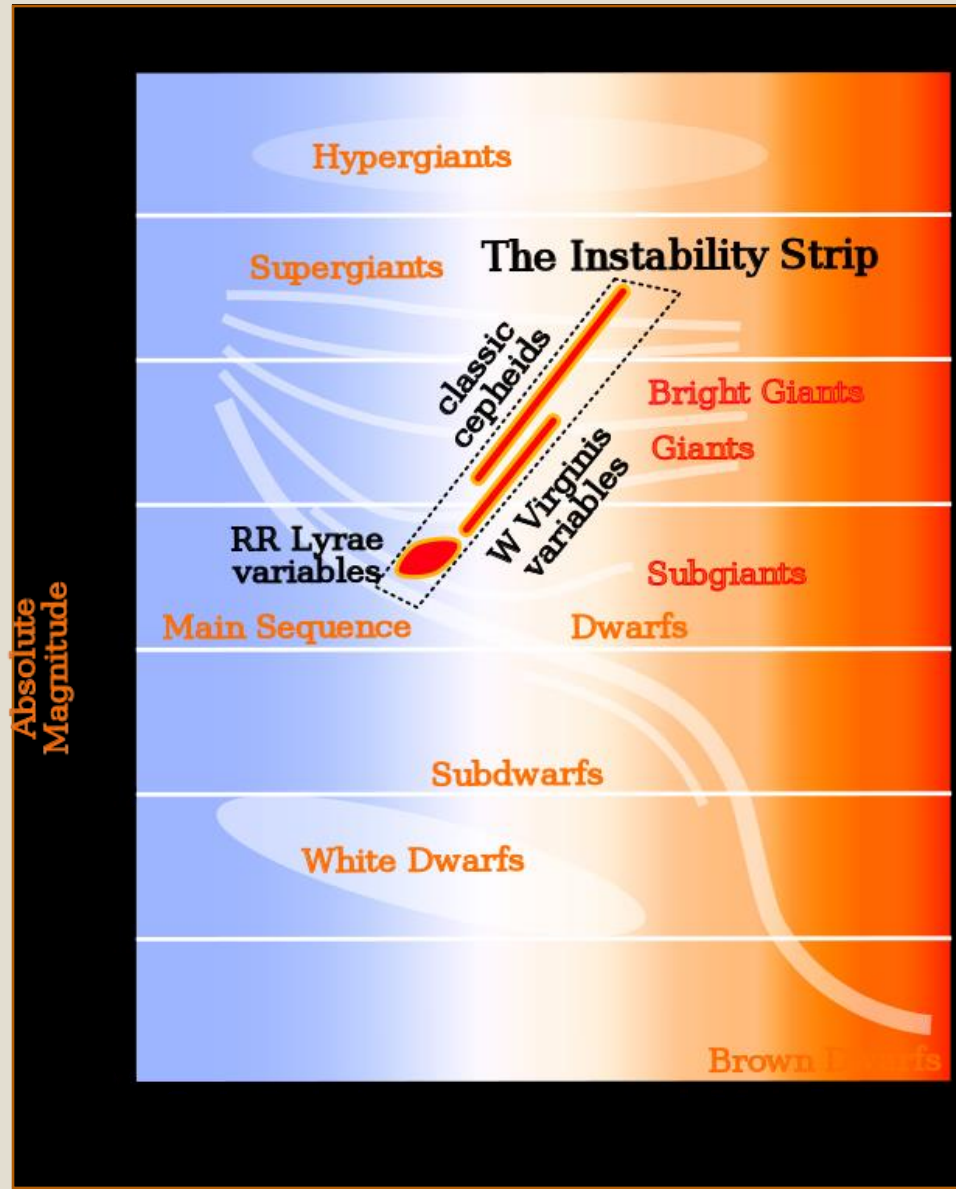
ПРОВАЛ ГЕРЦШПРУНГА И СУБГИГАНТЫ

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.



ОБЛАСТЬ НЕУСТОЙЧИВОСТИ



В ходе своей эволюции массивные звезды попадают в область, где они становятся неустойчивыми. Начинаются пульсации.

Известным классом пульсирующих звезд являются цефеиды.

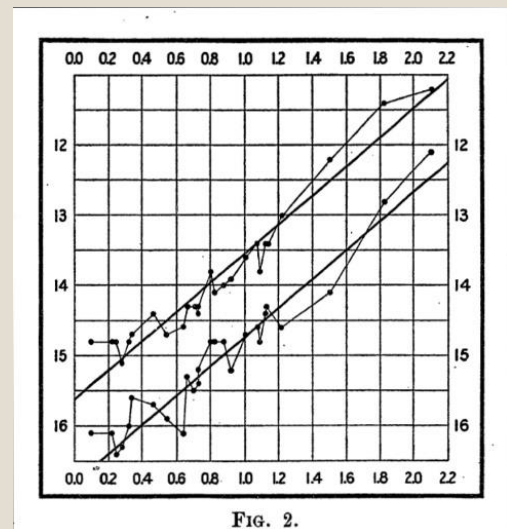
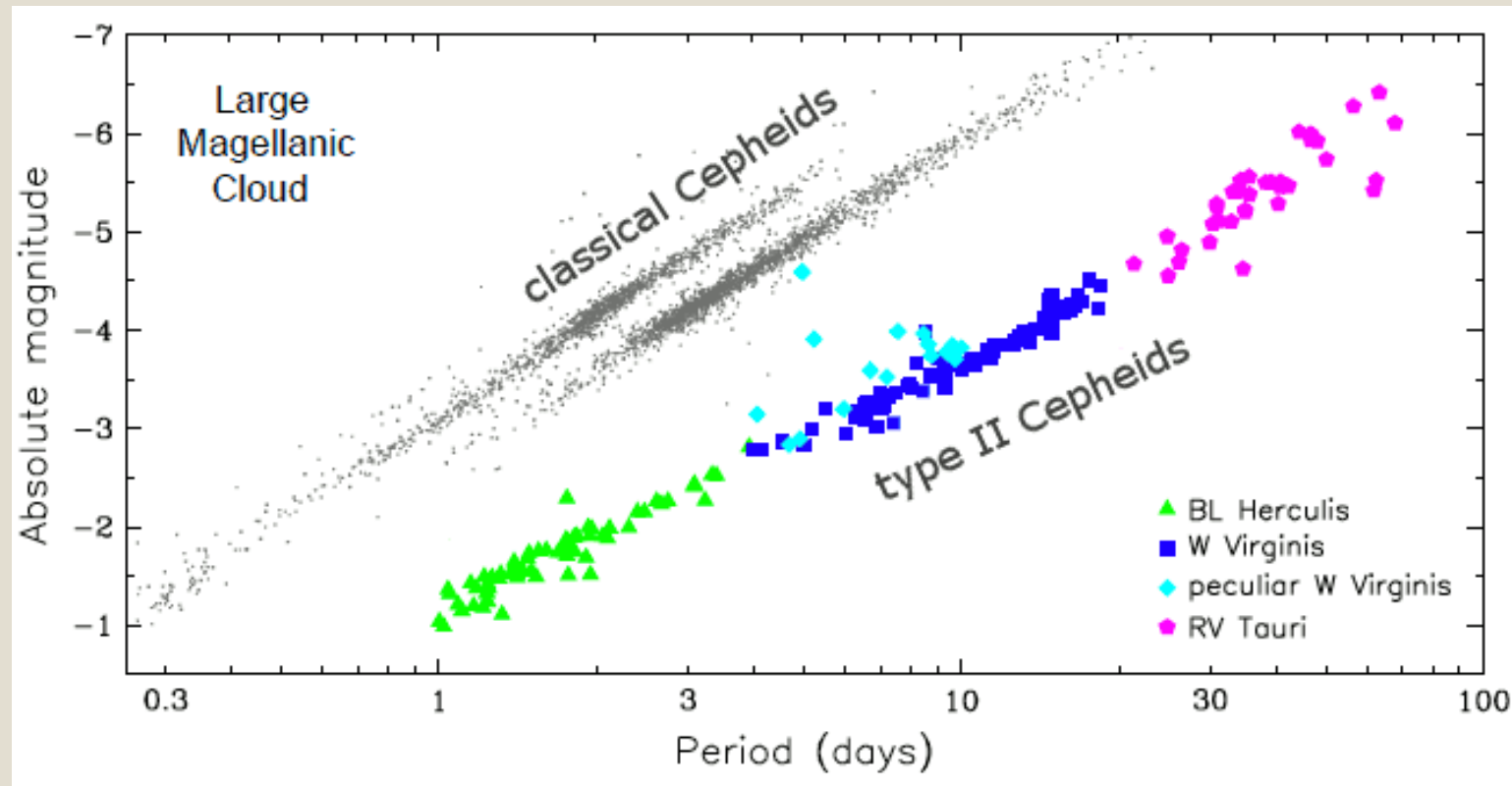
Они характерны тем, что у них светимость коррелирует с периодом пульсаций.

Это позволяет использовать их для измерения расстояний.

$$\text{Период} \sim (G\rho)^{-1/2}$$

ЗАВИСИМОСТЬ ПЕРИОД-СВЕТИМОСТЬ

Зависимость зависит от диапазона (фильтра) и от металличности.



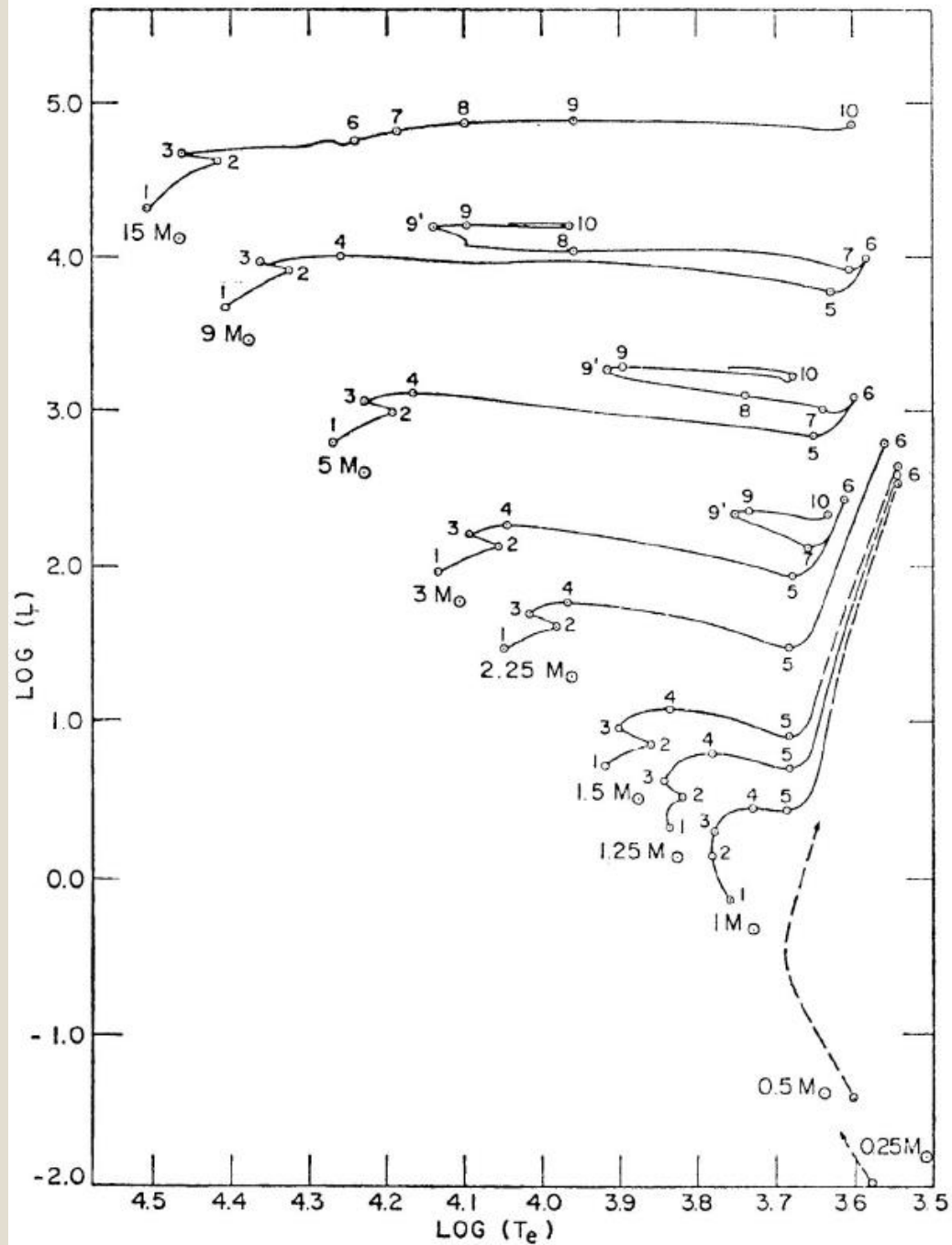
ХАРАКТЕРНЫЕ ВРЕМЕНА

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 продолжают 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

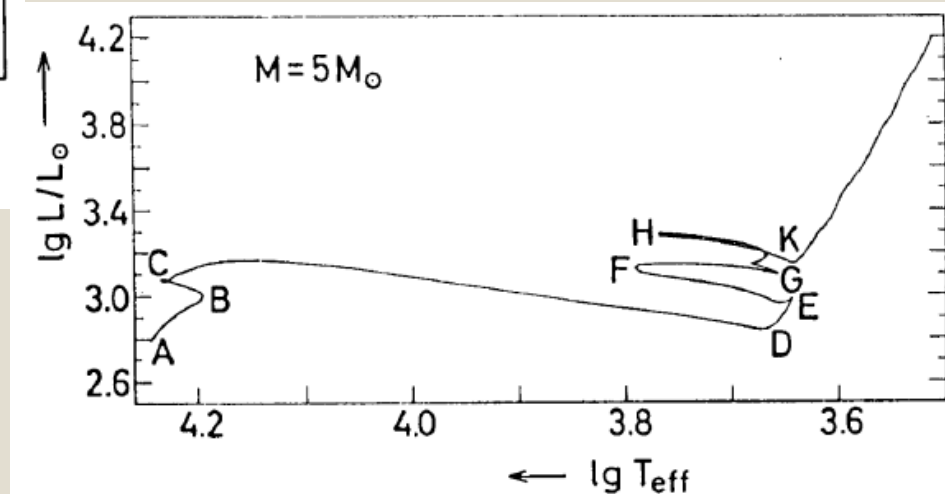
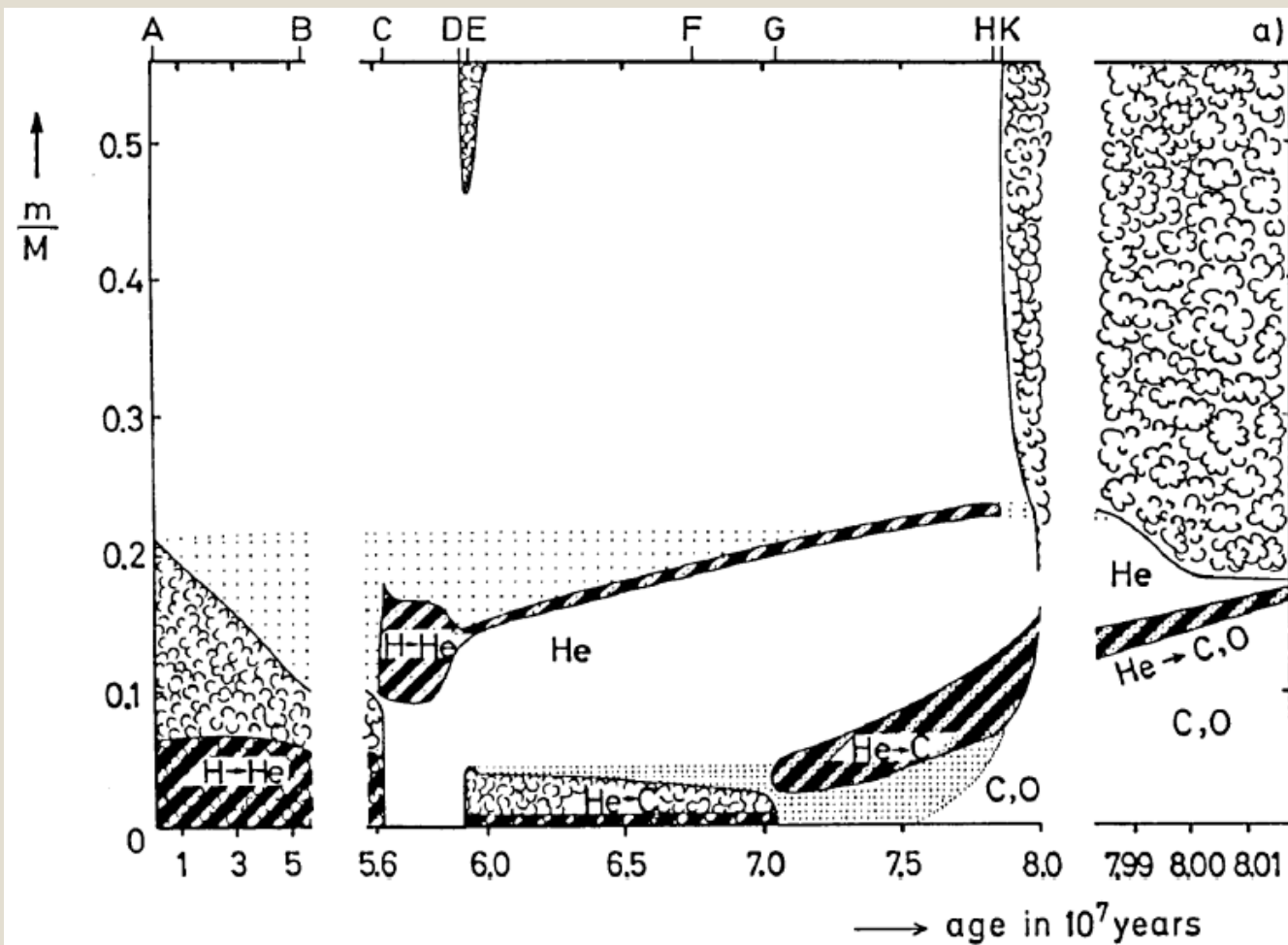


Interval (i-j)					
	(1-2)	(2-3)	(3-4)	(4-5)	(5-6)
Mass ($M_{\odot}$)					
15	1.010 (7)	2.270 (5)		7.55 (4)	
9	2.144 (7)	6.053 (5)	9.113 (4)	1.477 (5)	6.552 (4)
5	6.547 (7)	2.173 (6)	1.372 (6)	7.532 (5)	4.857 (5)
3	2.212 (8)	1.042 (7)	1.033 (7)	4.505 (6)	4.238 (6)
2.25	4.802 (8)	1.647 (7)	3.696 (7)	1.310 (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)

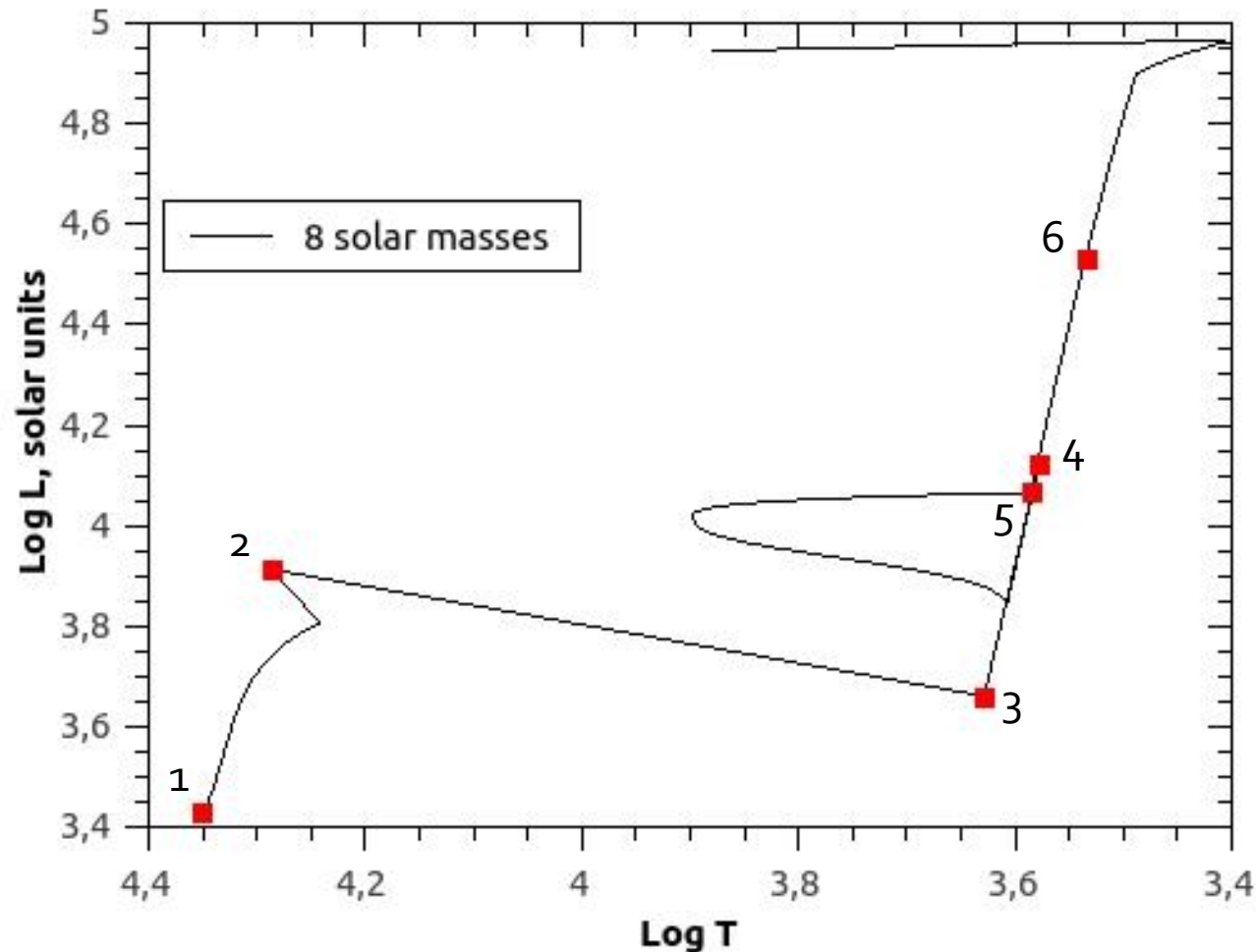
Interval (i-j)				
	(6-7)	(7-8)	(8-9)	(9-10)
Mass ($M_{\odot}$)				
15	7.17 (5)	6.20 (5)	1.9 (5)	3.5 (4)
9	4.90 (5)	9.50 (4)	3.28 (6)	1.55 (5)
5	6.05 (6)	1.02 (6)	9.00 (6)	9.30 (5)
3	2.51 (7)	4.08 (7)		6.00 (6)

ЭВОЛЮЦИЯ СТРУКТУРЫ ЗВЕЗДЫ

<http://astro.phys.au.dk/jcd/>

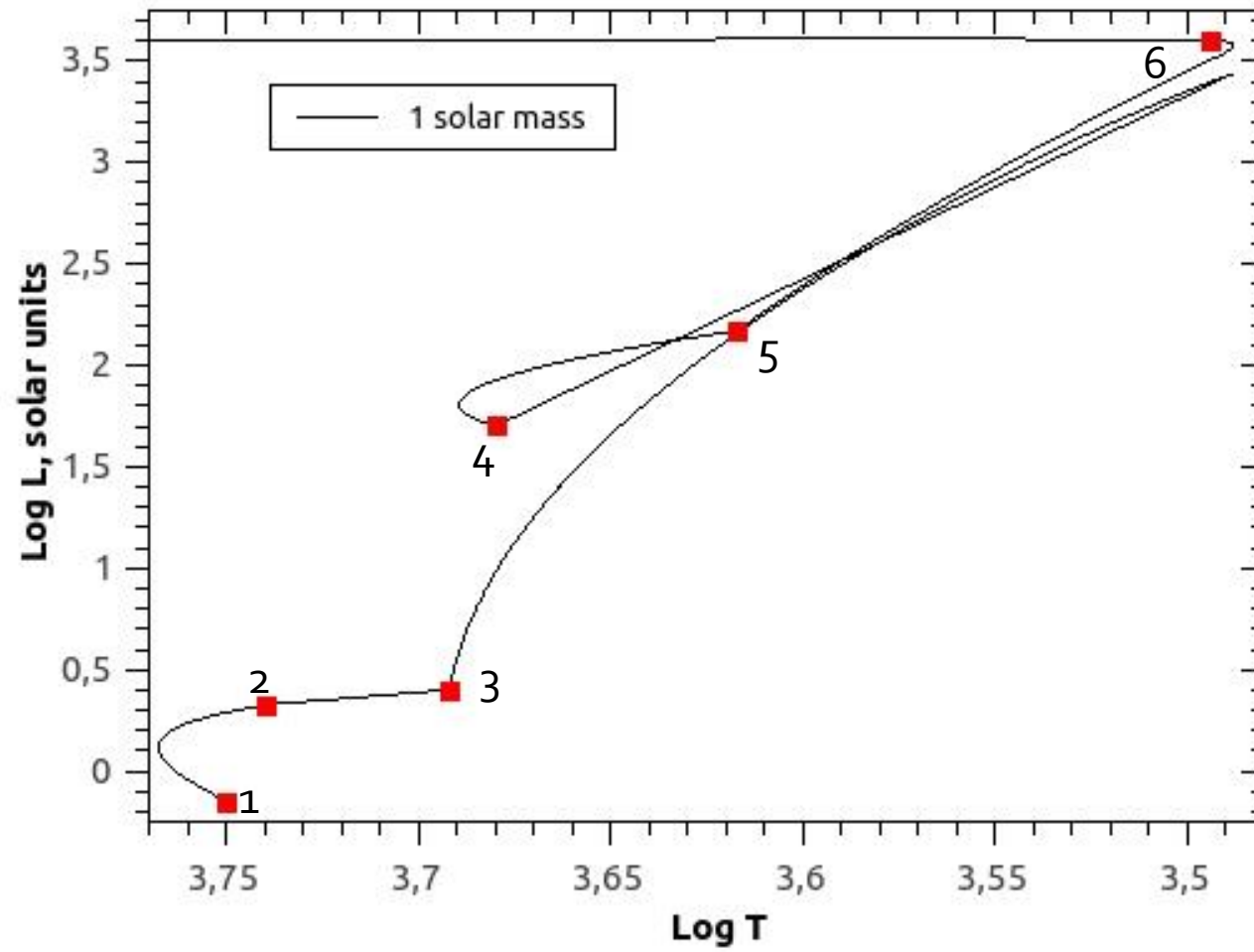


СТАДИИ SSE



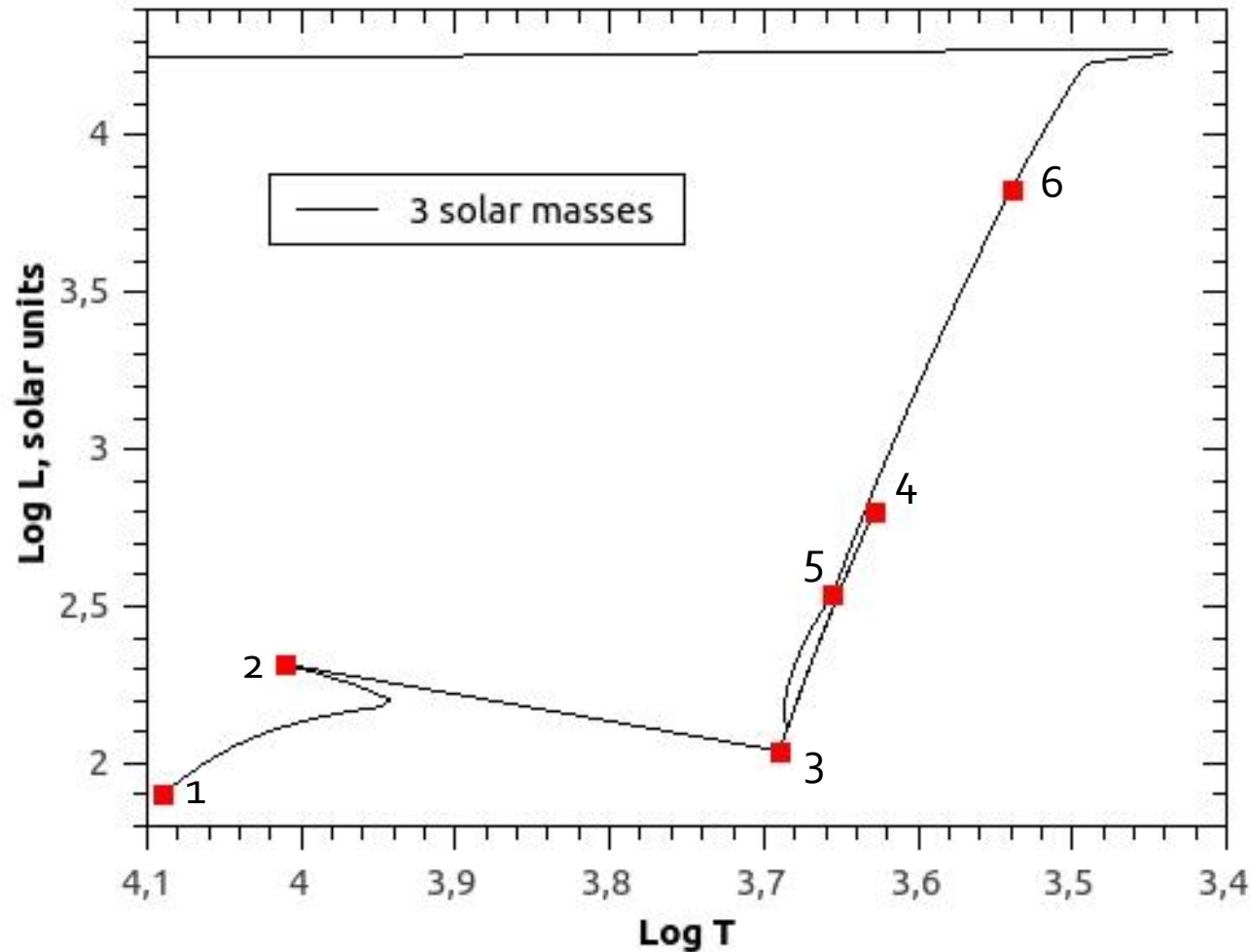
- 0 – ГП, $M < 0.7$
- 1 – ГП, $M > 0.7$
- 2 – Провал Герцшпрунга
- 3 – Первая ветвь гигантов
- 4 – Горение гелия в ядре
- 5 – EAGB
- 6 – TPAGB
- 7 – Гелиевое ядро (гелиевая ГП)
- 8 – Провал Герцшпрунга для гелиевых звезд
- 9 – Ветвь гигантов для гелиевых звезд
- 10 – Гелиевый БК
- 11 – СО белый карлик
- 12 – ONeMg белый карлик
- 13 – Нейтронная звезда
- 14 – Черная дыра
- 15 – Безмассовый остаток

СТАДИИ SSE

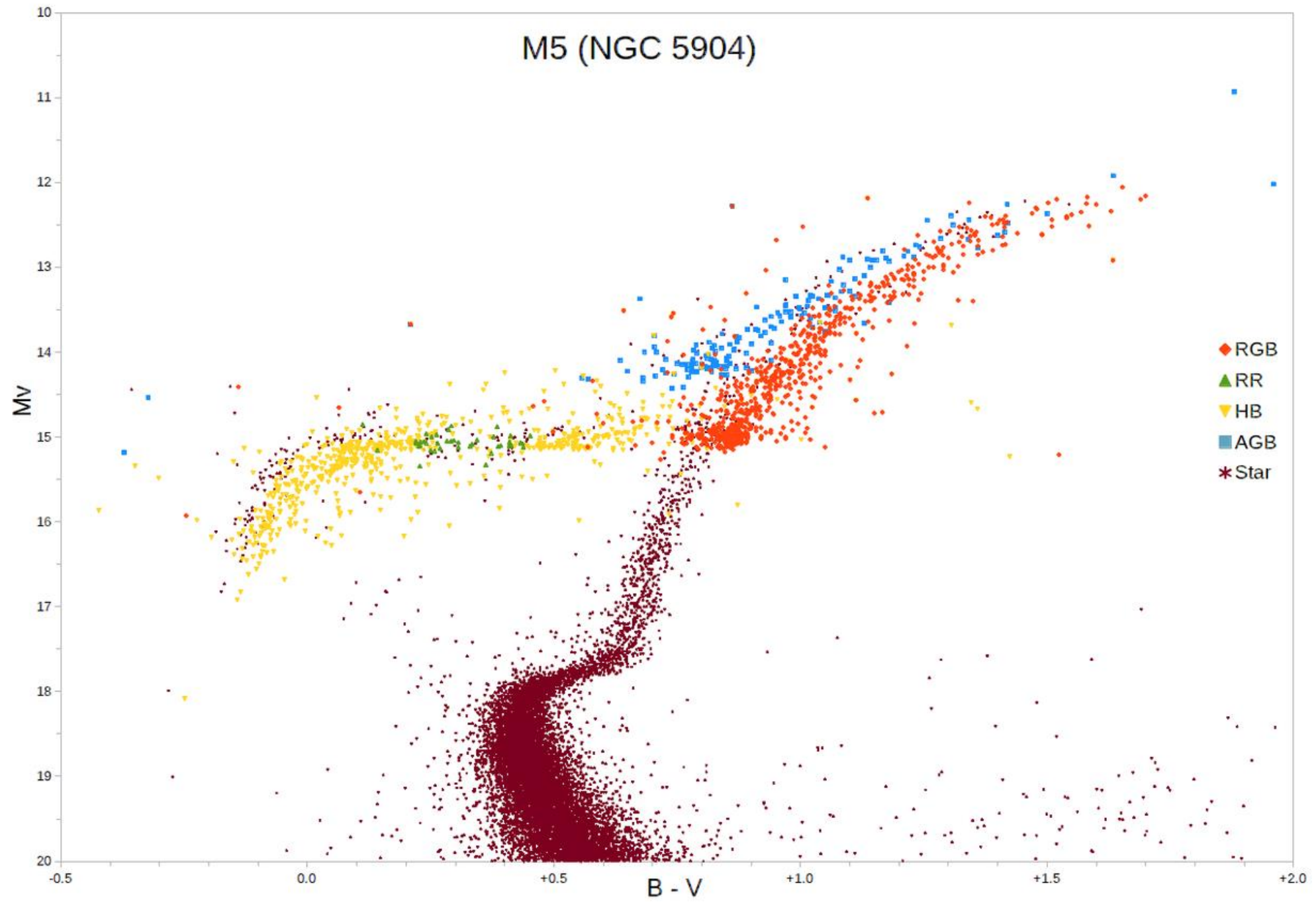


- 0 – ГП, $M < 0.7$
- 1 – ГП, $M > 0.7$
- 2 – Провал Герцшпрунга
- 3 – Первая ветвь гигантов
- 4 – Горение гелия в ядре
- 5 – EAGB
- 6 – TRAGB
- 7 – Гелиевое ядро (гелиевая ГП)
- 8 – Провал Герцшпрунга для гелиевых звезд
- 9 – Ветвь гигантов для гелиевых звезд
- 10 – Гелиевый БК
- 11 – СО белый карлик
- 12 – ONeMg белый карлик
- 13 – Нейтронная звезда
- 14 – Черная дыра
- 15 – Безмассовый остаток

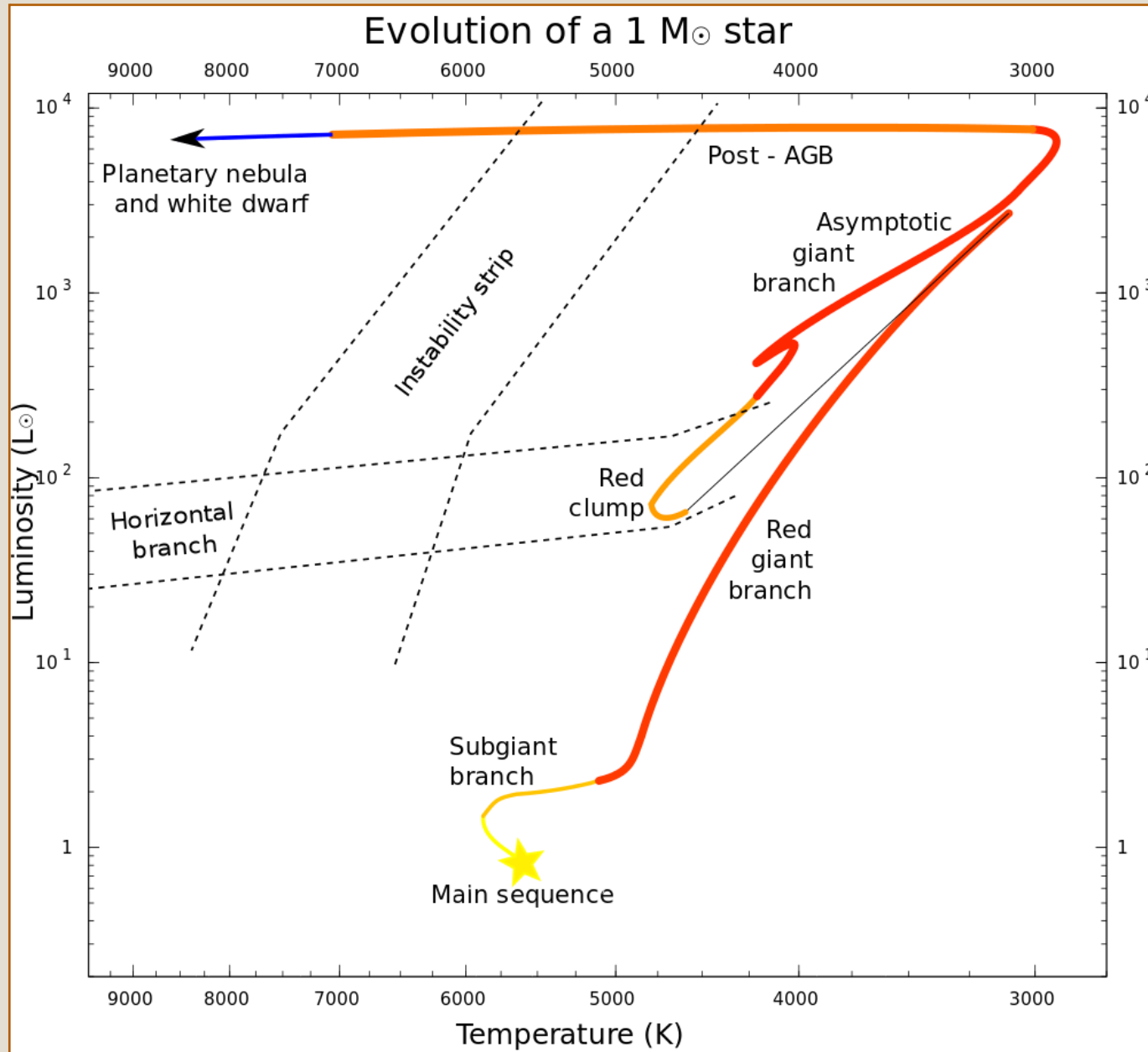
СТАДИИ SSE



- 0 – ГП, $M < 0.7$
- 1 – ГП, $M > 0.7$
- 2 – Провал Герцшпрунга
- 3 – Первая ветвь гигантов
- 4 – Горение гелия в ядре
- 5 – EAGB
- 6 – TPAGB
- 7 – Гелиевое ядро (гелиевая ГП)
- 8 – Провал Герцшпрунга для гелиевых звезд
- 9 – Ветвь гигантов для гелиевых звезд
- 10 – Гелиевый БК
- 11 – СО белый карлик
- 12 – ONeMg белый карлик
- 13 – Нейтронная звезда
- 14 – Черная дыра
- 15 – Безмассовый остаток



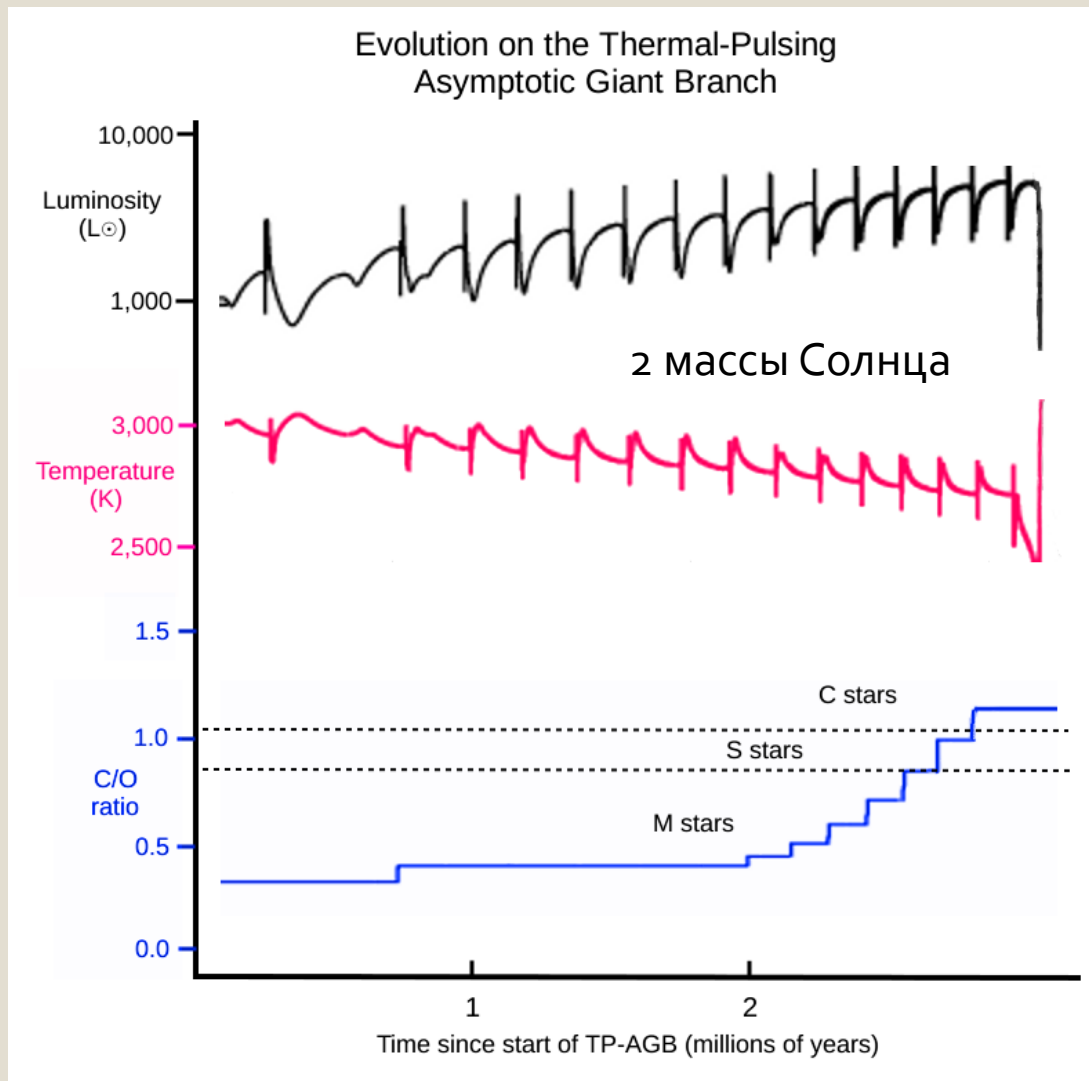
ГОРИЗОНТАЛЬНАЯ ВЕТВЬ



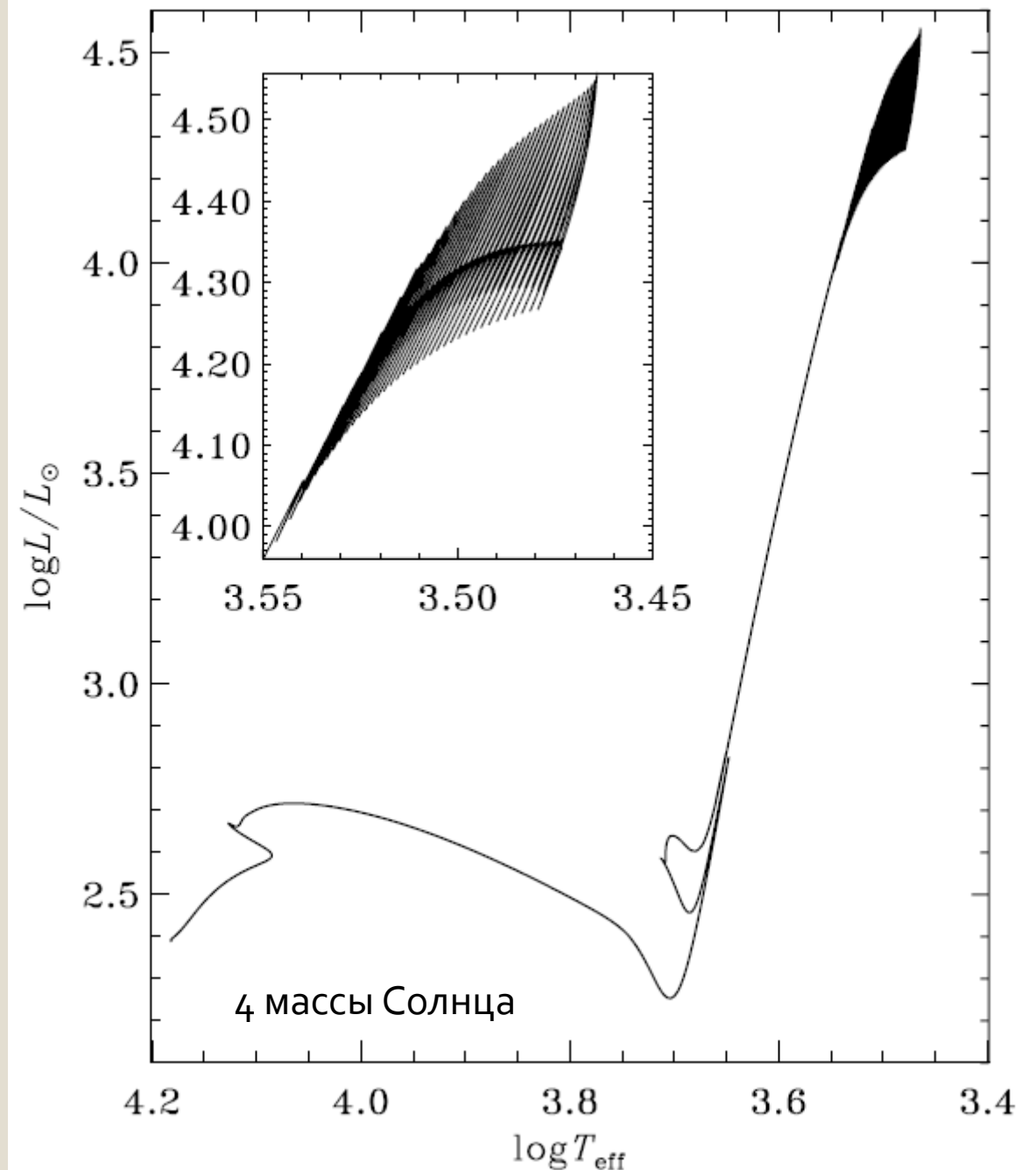
На горизонтальной ветви идет горение гелия в ядре звезды. Массы ядер у разных звезд примерно одинаковы. Поэтому светимость отличается слабо. А вот температура зависит от массы водородной оболочки. И этот параметр отличается сильно.

Типичное время жизни на горизонтальной ветви - 100 млн. лет.

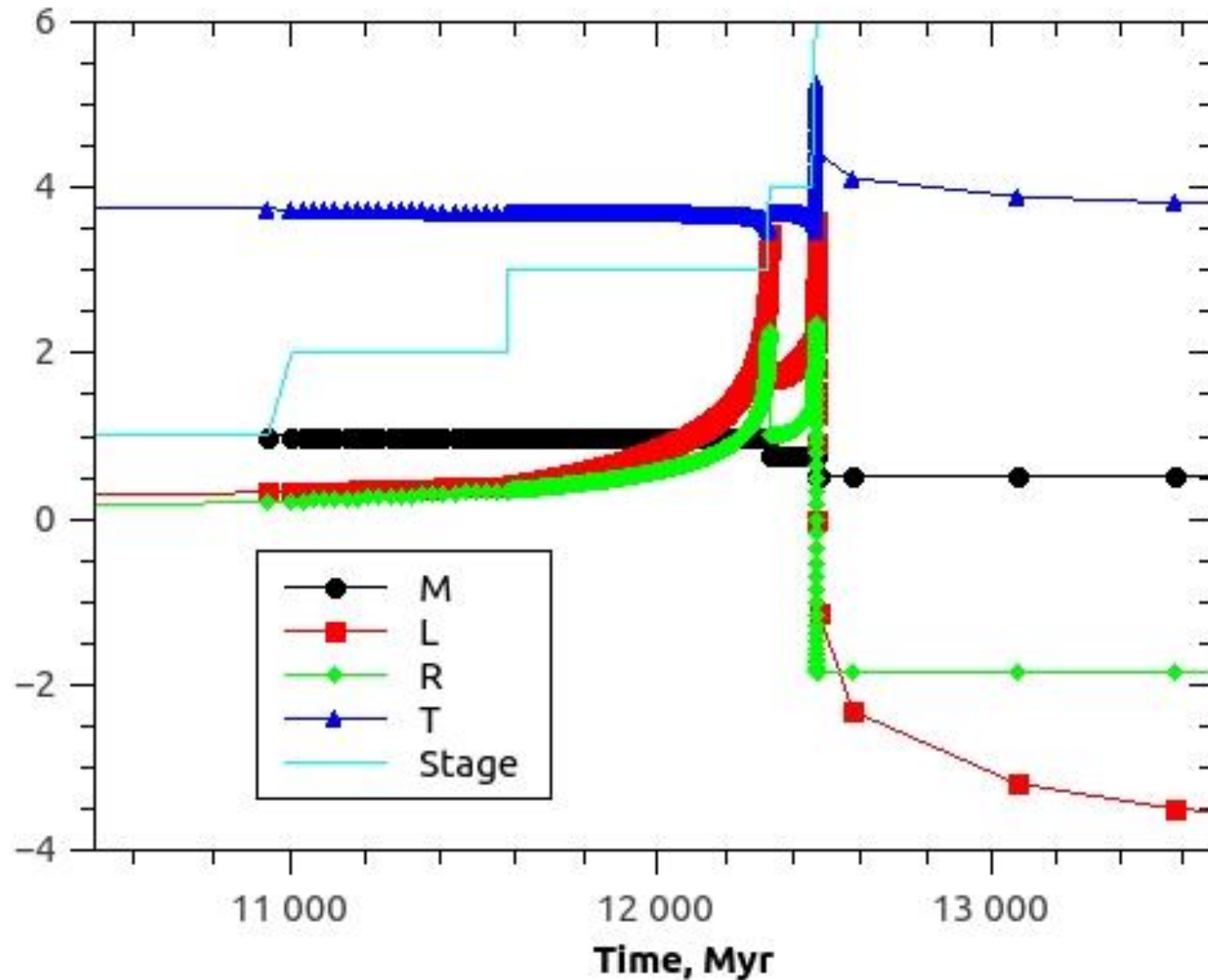
TP-AGB



Горение водорода в слоевом источнике дает гелий. Включается гелиевый слоевой источник. Вспышка. Расширение приводит к выключению источников.

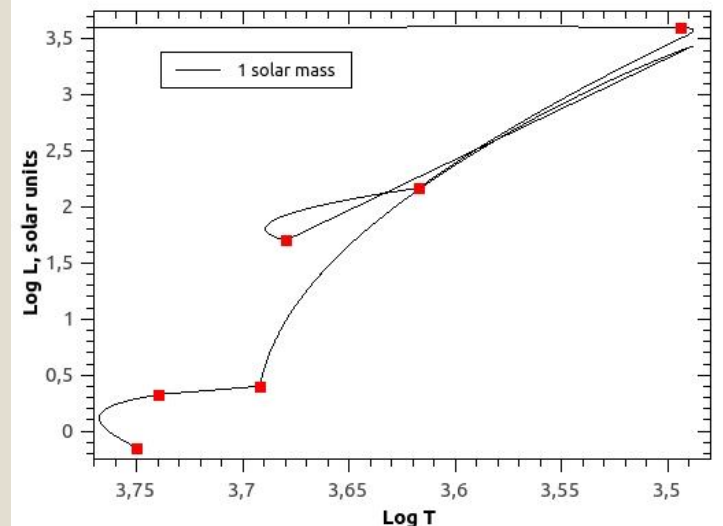


ЭВОЛЮЦИЯ ЗВЕЗДЫ МАССОЙ $1M_{\text{SUN}}$

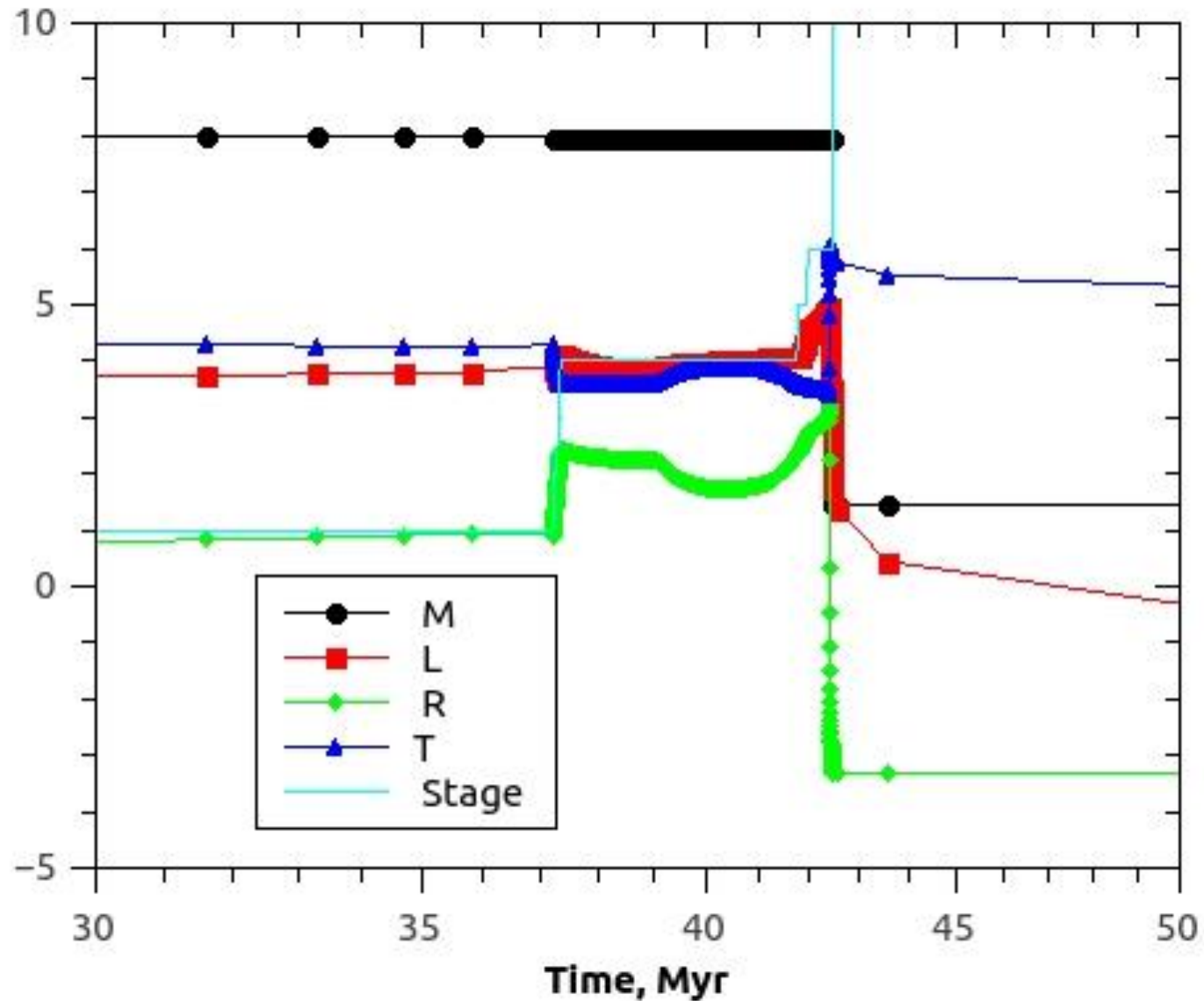


Расчеты проведены
с помощью программы SSE.

- 1 – ГП, $M > 0.7$
- 2 – Провал Герцшпрунга
- 3 – Первая ветвь гигантов
- 4 – Горение гелия в ядре
- 5 – EAGB

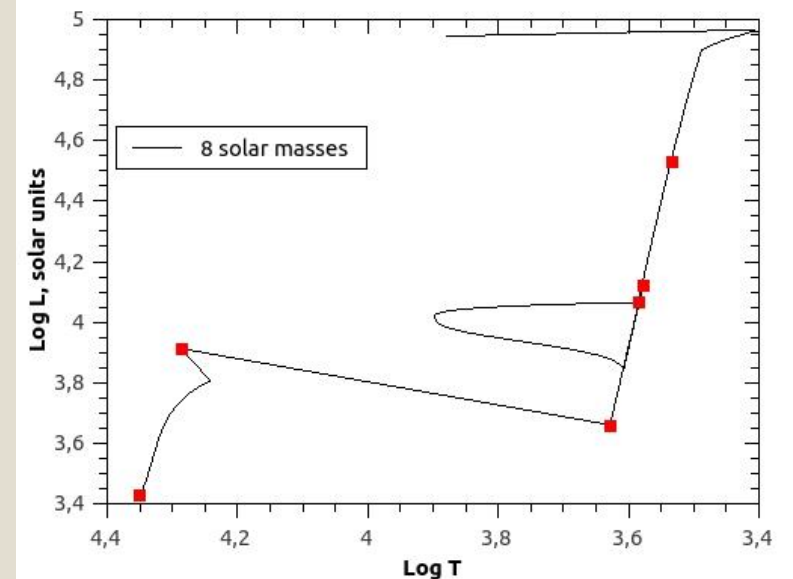


ЭВОЛЮЦИЯ ЗВЕЗДЫ МАССОЙ $8M_{\text{SUN}}$

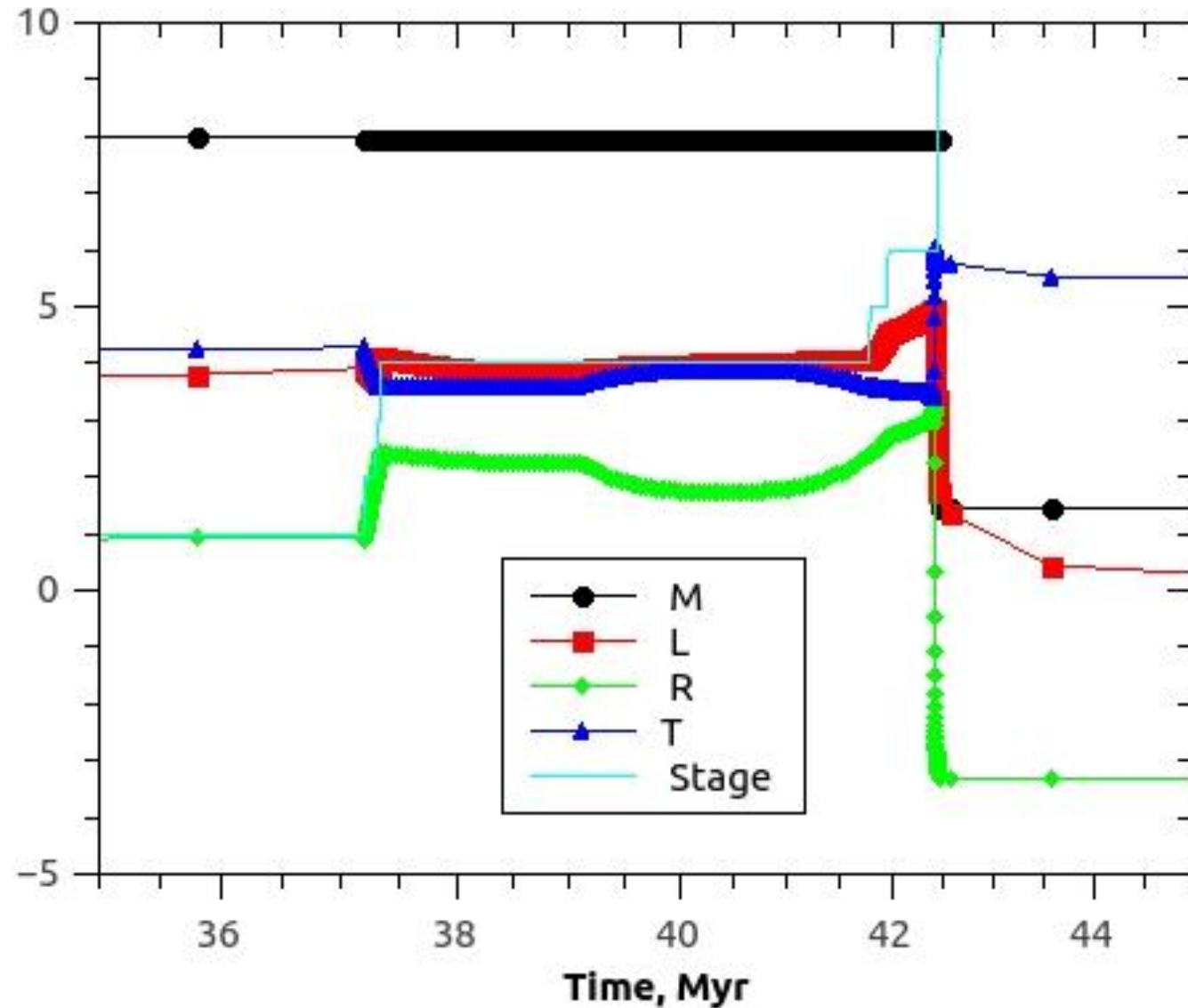


Расчеты проведены с помощью программы SSE.

- 1 – ГП, $M > 0.7$
- 2 – Провал Герцшпрунга
- 3 – Первая ветвь гигантов
- 4 – Горение гелия в ядре
- 5 – EAGB
- 6 – TPAGB

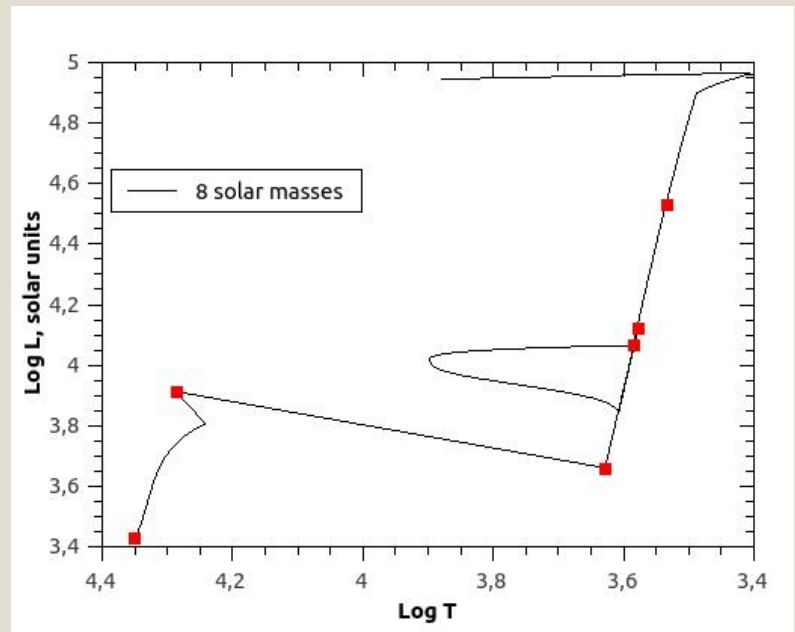


ЭВОЛЮЦИЯ ЗВЕЗДЫ МАССОЙ $8M_{\text{SUN}}$

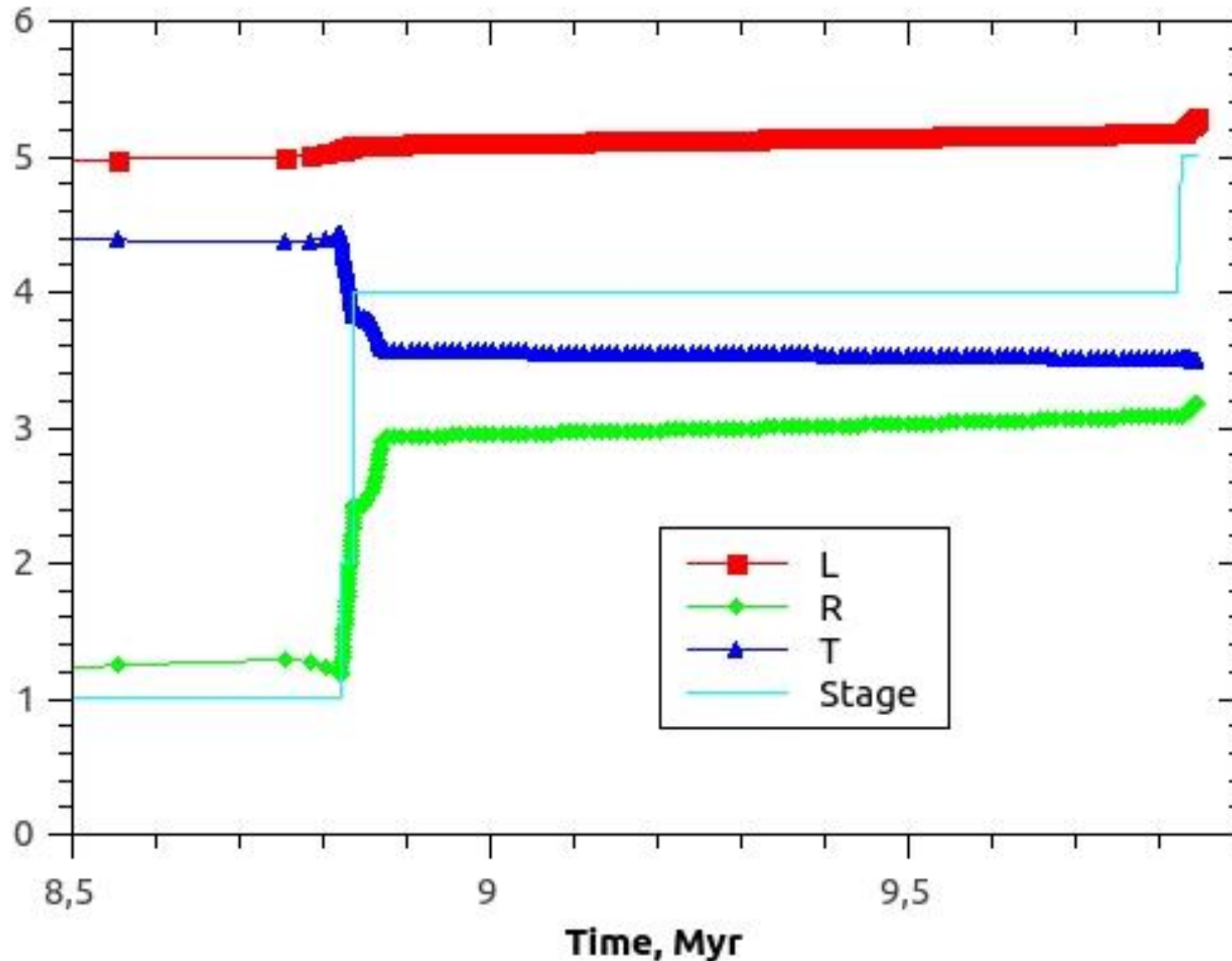


Расчеты проведены с помощью программы SSE.

- 1 – ГП, $M > 0.7$
- 2 – Провал Герцшпрунга
- 3 – Первая ветвь гигантов
- 4 – Горение гелия в ядре
- 5 – EAGB
- 6 – TPAGB



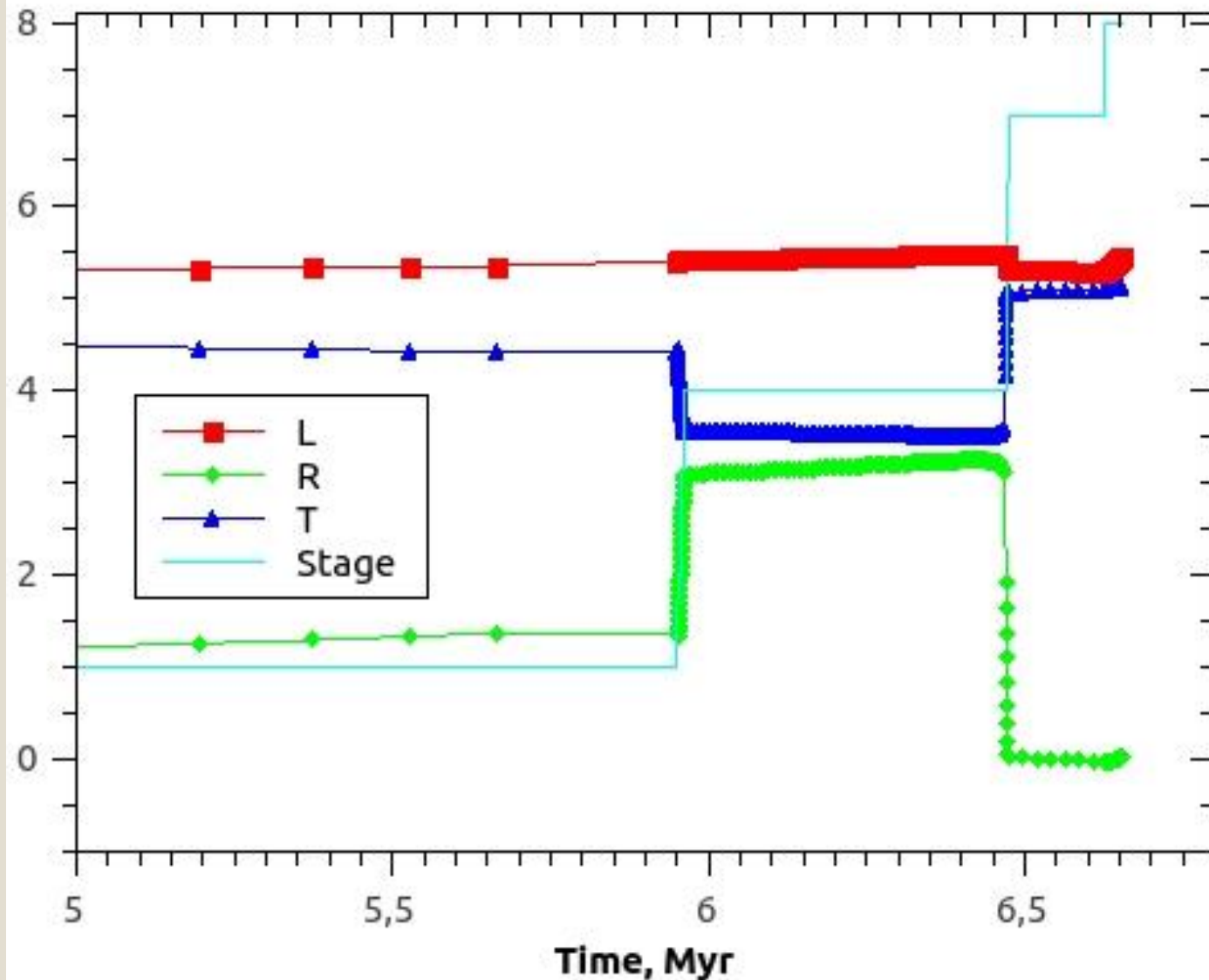
ЭВОЛЮЦИЯ ЗВЕЗДЫ МАССОЙ $20M_{\text{SUN}}$



Расчеты проведены с помощью программы SSE.

- 1 – ГП, $M > 0.7$
- 2 – Провал Герцшпрунга
- 3 – Первая ветвь гигантов
- 4 – Горение гелия в ядре
- 5 – EAGB

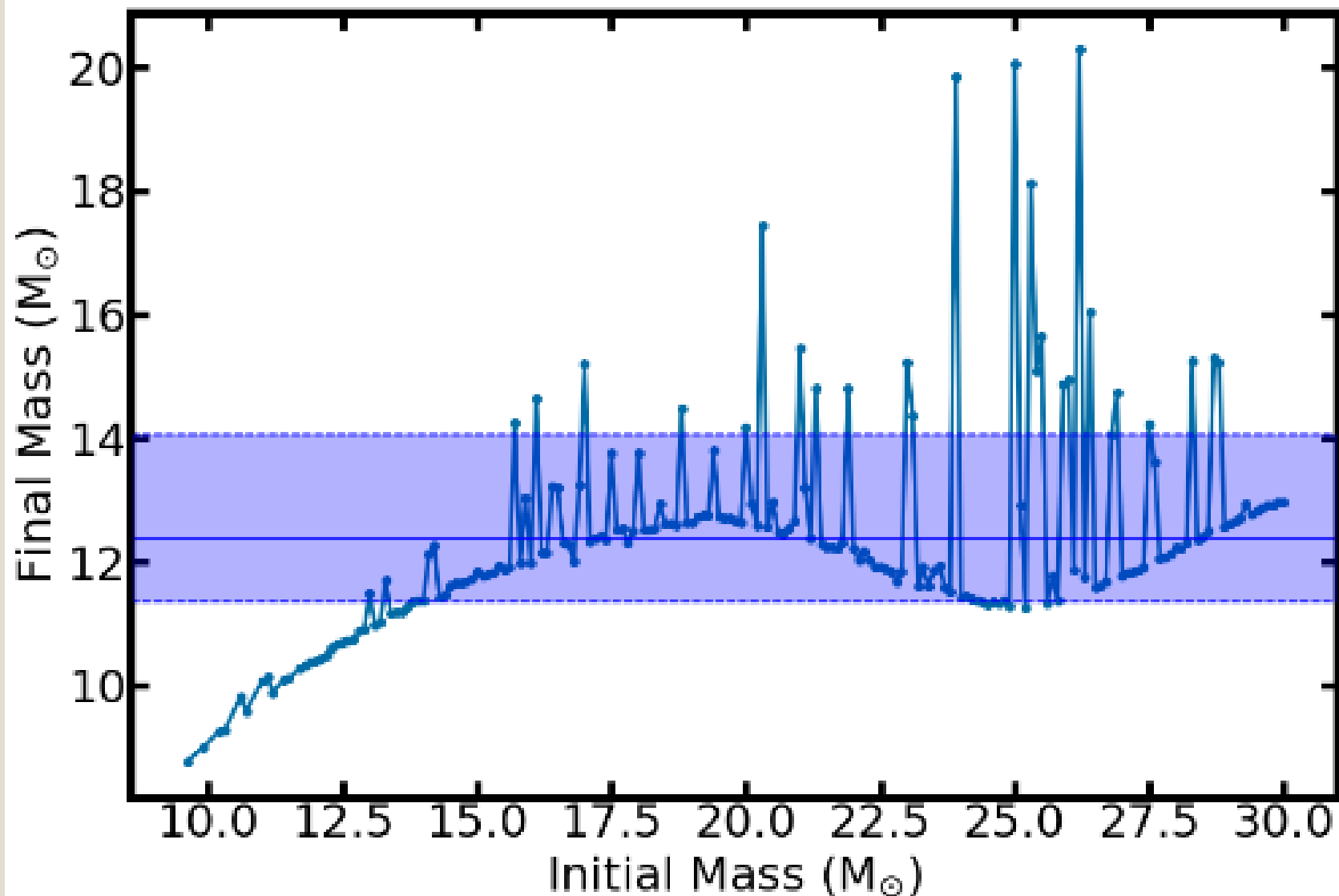
ЭВОЛЮЦИЯ ЗВЕЗДЫ МАССОЙ $30M_{\text{SUN}}$



Расчеты проведены с помощью программы SSE.

- 1 – ГП, $M > 0.7$
- 2 – Провал Герцшпрунга
- 3 – Первая ветвь гигантов
- 4 – Горение гелия в ядре
- 5 – EAGB
- 6 – TPAGB
- 7 – Гелиевое ядро (гелиевая ГП)
- 8 – Провал Герцшпрунга для гелиевых звезд

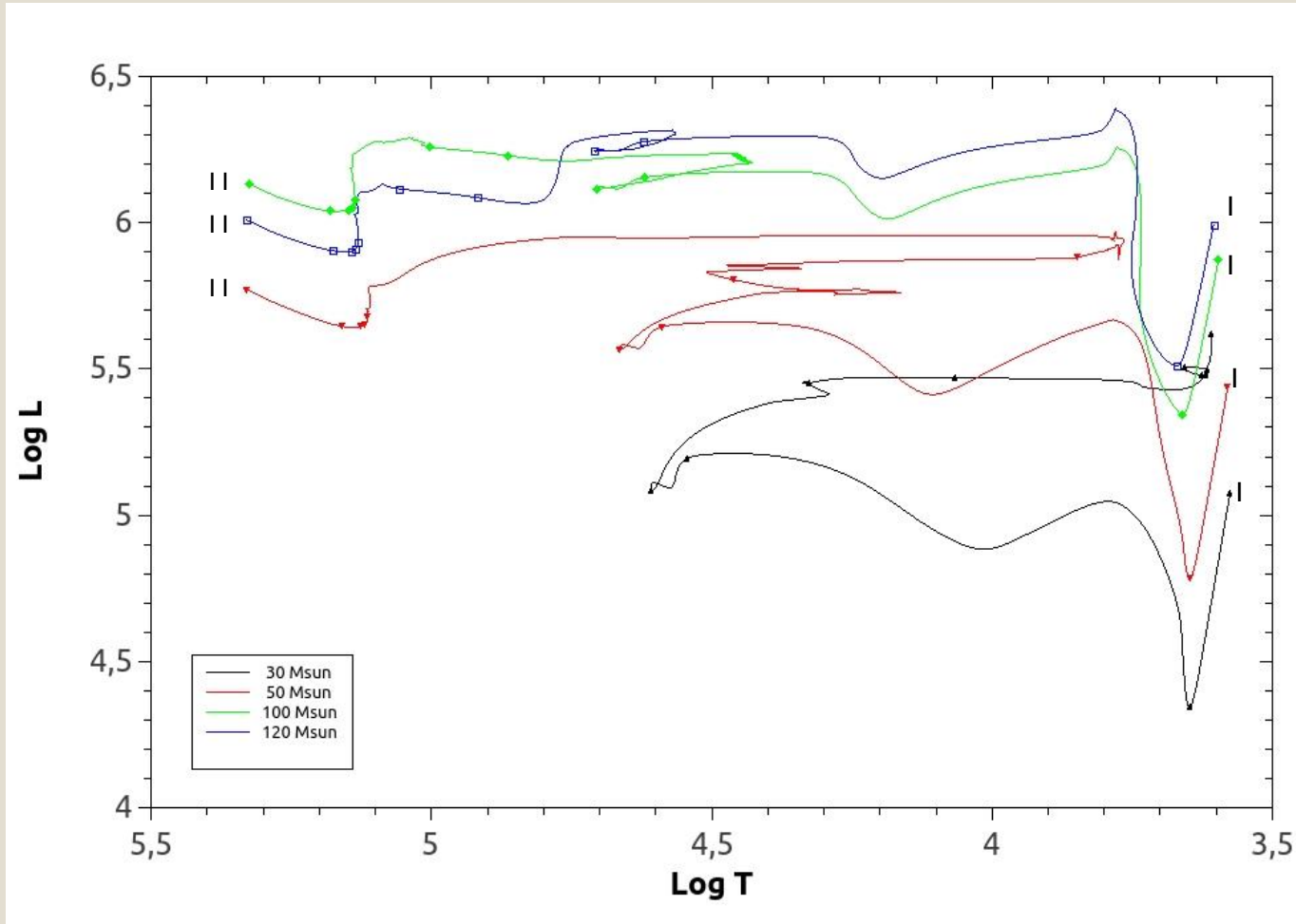
ПОТЕРЯ МАССЫ



За время жизни массивные звезды могут терять значительную часть своей массы за счет звездного ветра.

Еще более значительной может быть потеря массы в двойной системе за счет взаимодействия компонент.

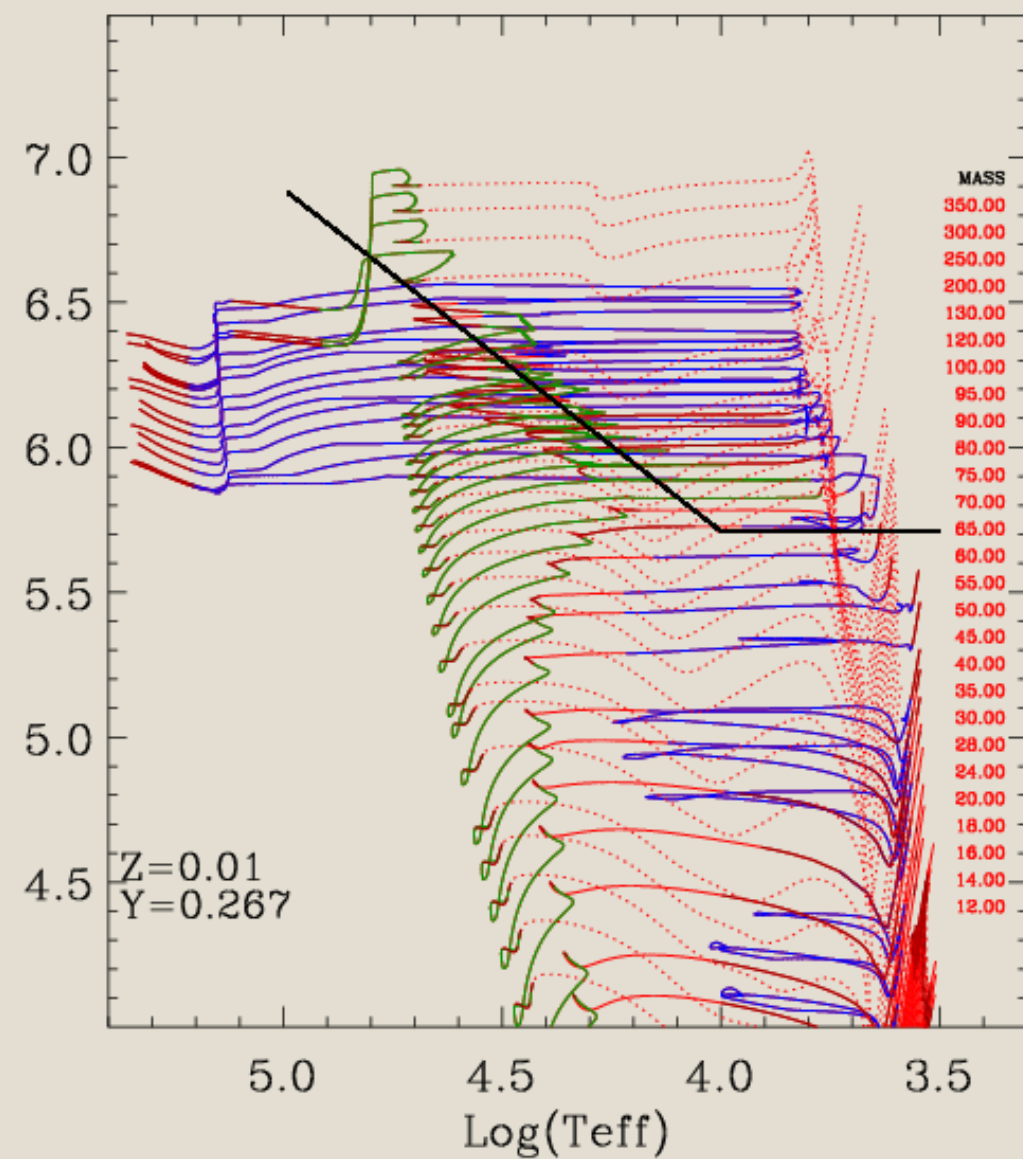
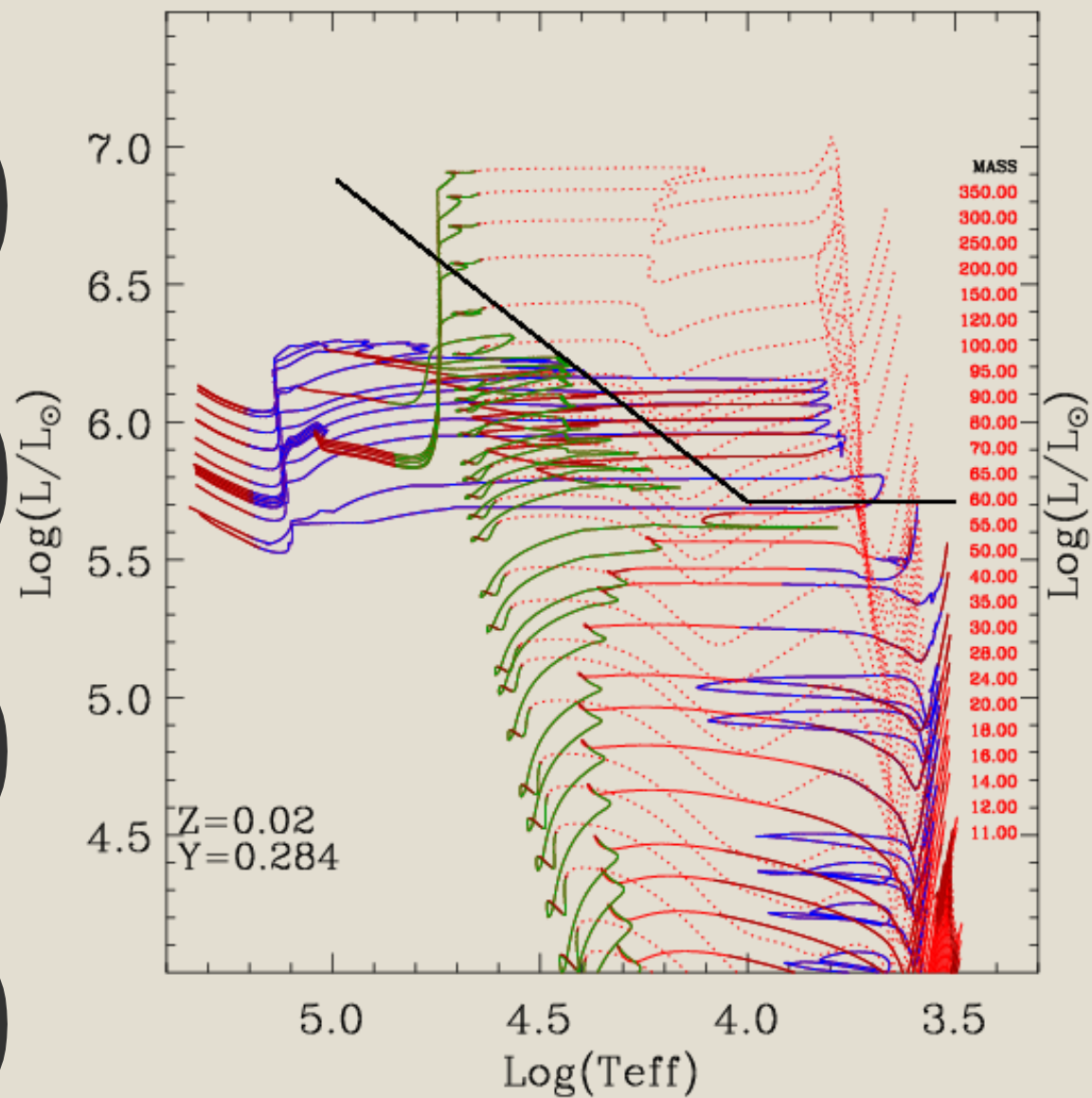
ЭВОЛЮЦИЯ МАССИВНЫХ ЗВЕЗД



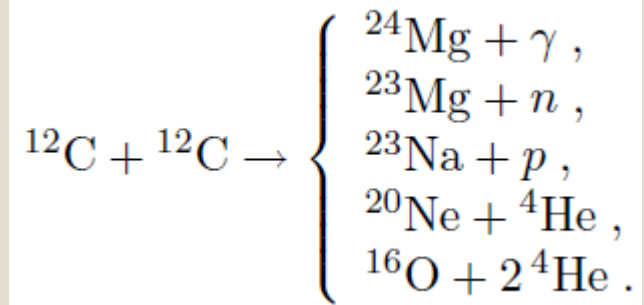
- 1 Начало
- 2 До-ГП
- 3 До-ГП
- 4 Вблизи начала ГП
- 5 Началось активное горение H
- 6 Конец горения водорода. Сжатие
- 7 Сжатие заканчивается. Выход на КГ
- 8 Основание ветви КГ
- 9 Red bump
- 10 Red bump end
- 11 Начало горения He (у массивных)

Использованы треки падуанской группы Bressan et al. (2012).
https://people.sissa.it/~sbressan/CAFo9_V1.2S_M36_LT/

МАССИВНЫЕ ЗВЕЗДЫ

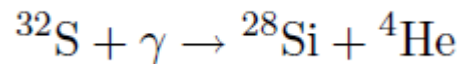
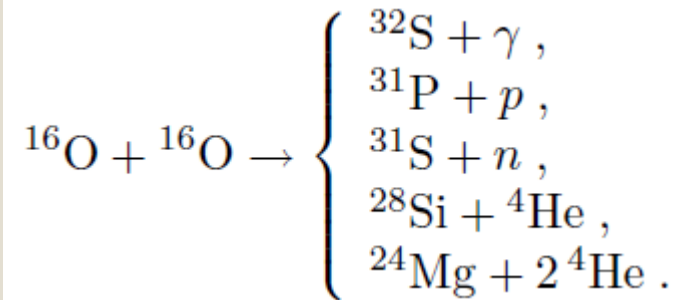


РЕАКЦИИ В МАССИВНЫХ ЗВЕЗДАХ

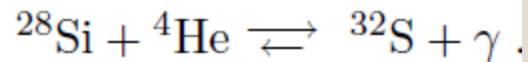


Первая стадия – горение углерода. Углеродное ядро при $M > 10 M_{\text{Solar}}$ невырожденное.

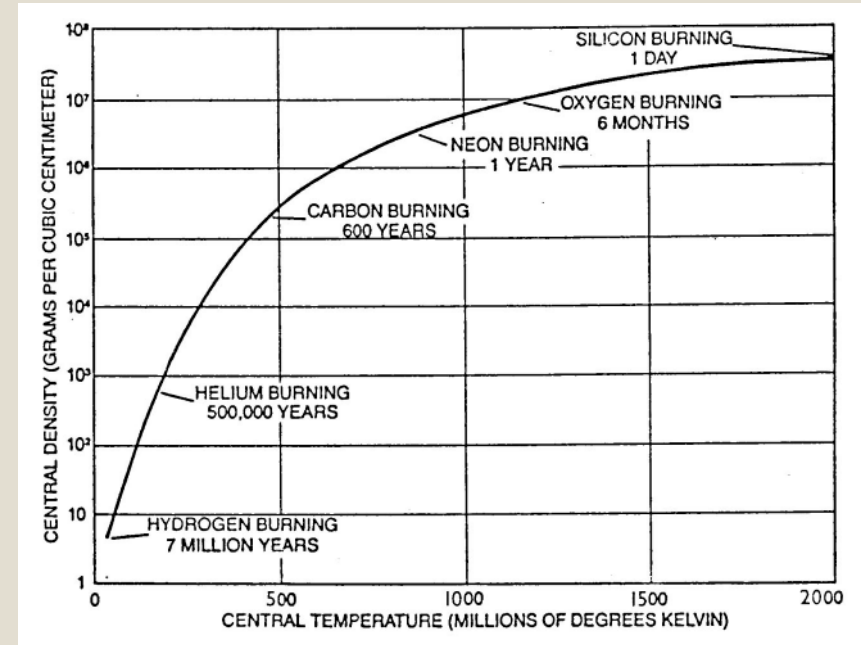
При миллиарде градусов начинается горение кислорода.



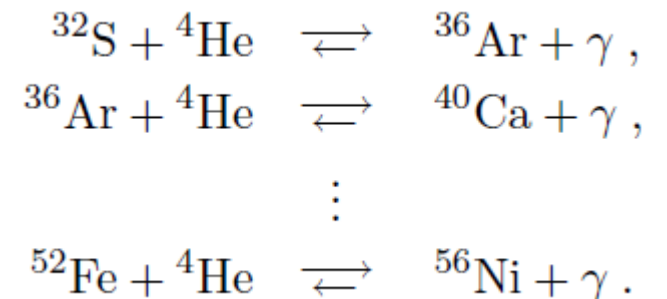
Фотодиссоциация приводит к появлению альфа-частиц.



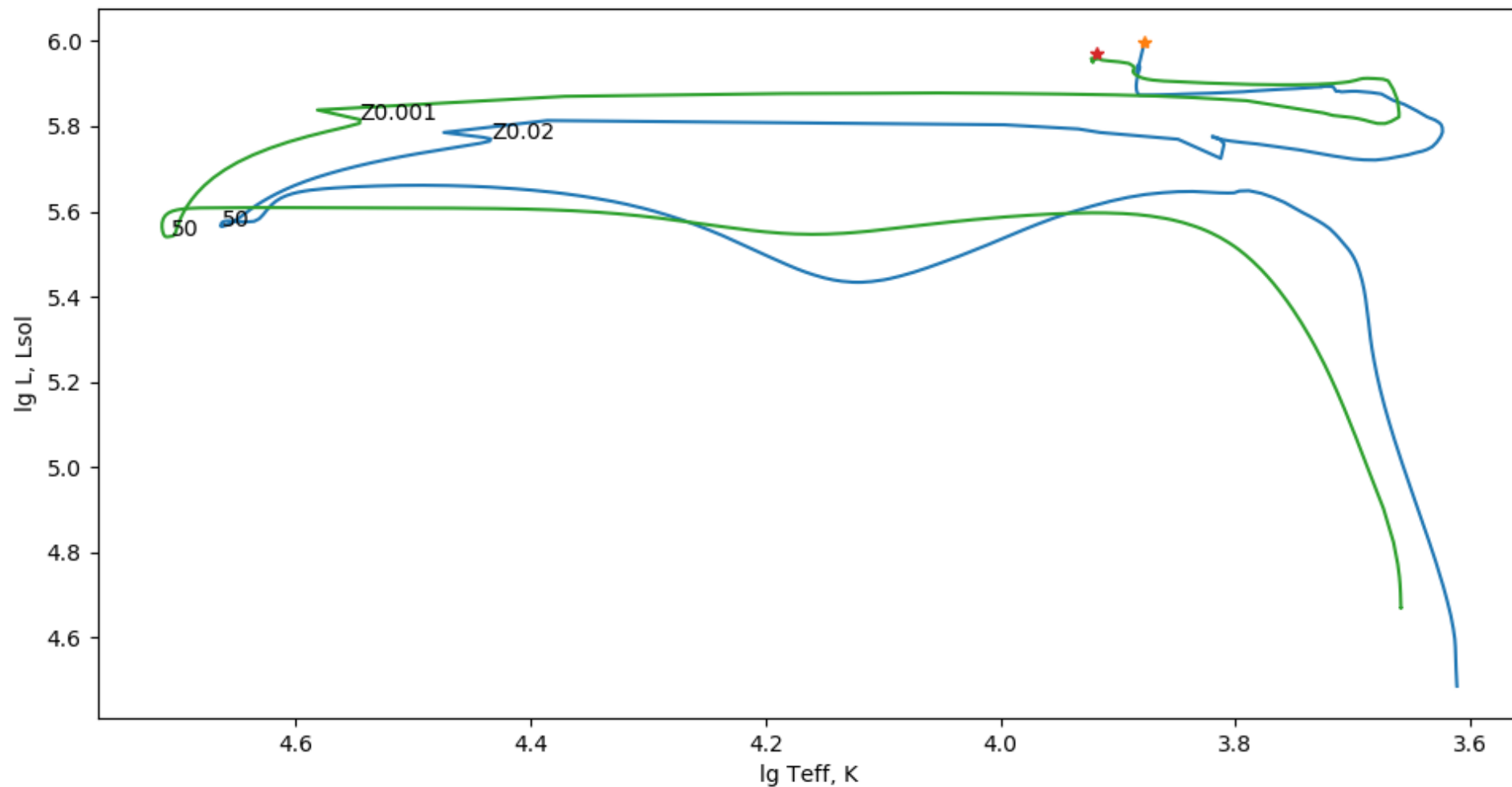
Наконец, начинаются реакции, доходящие до элементов группы железа.



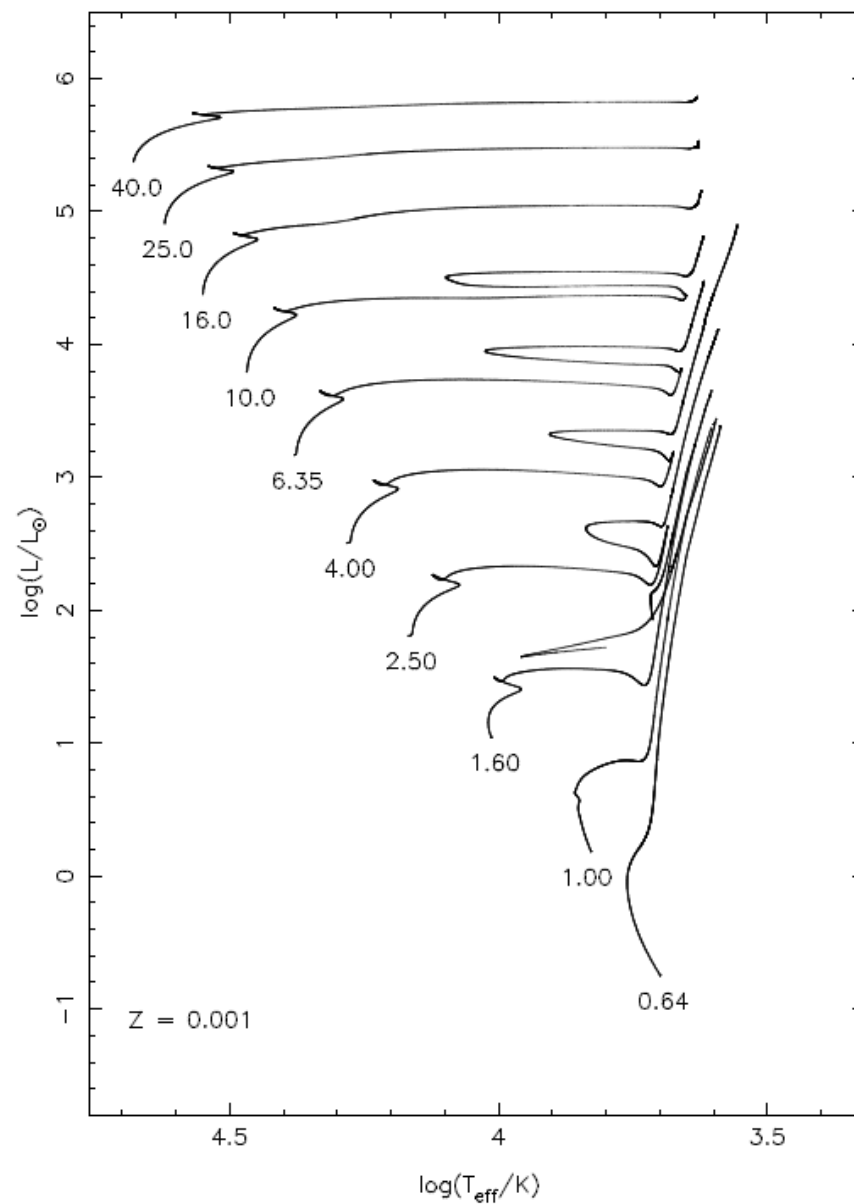
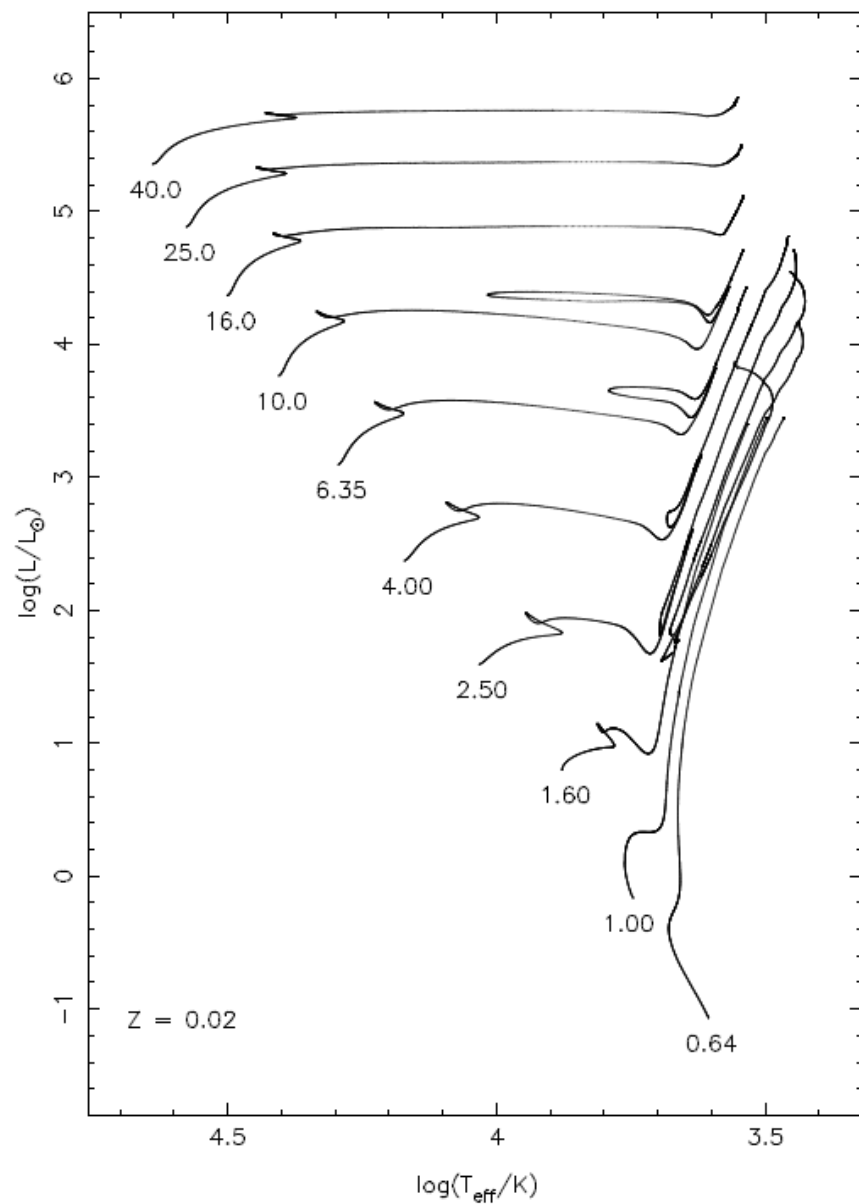
25 масс Солнца



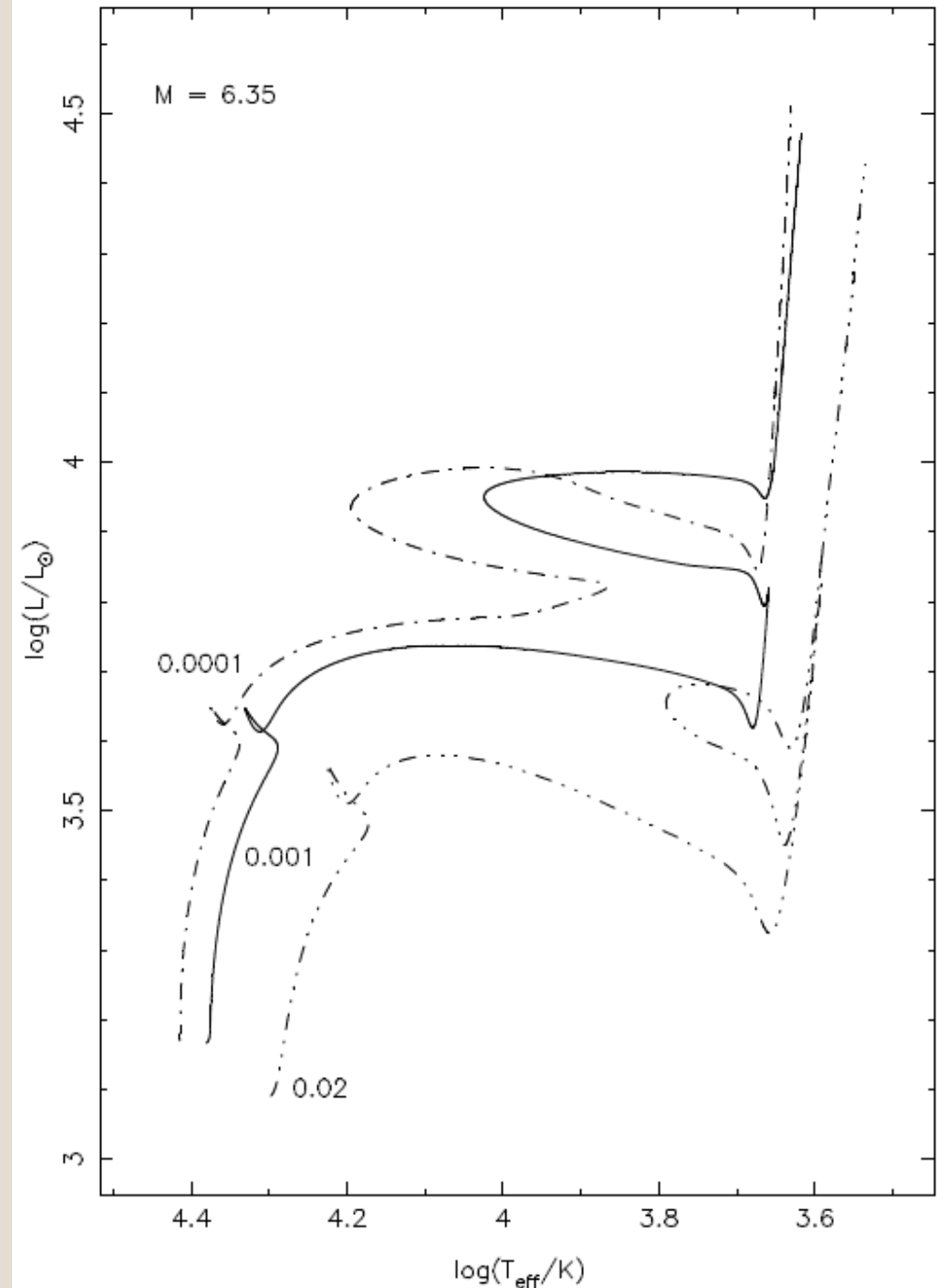
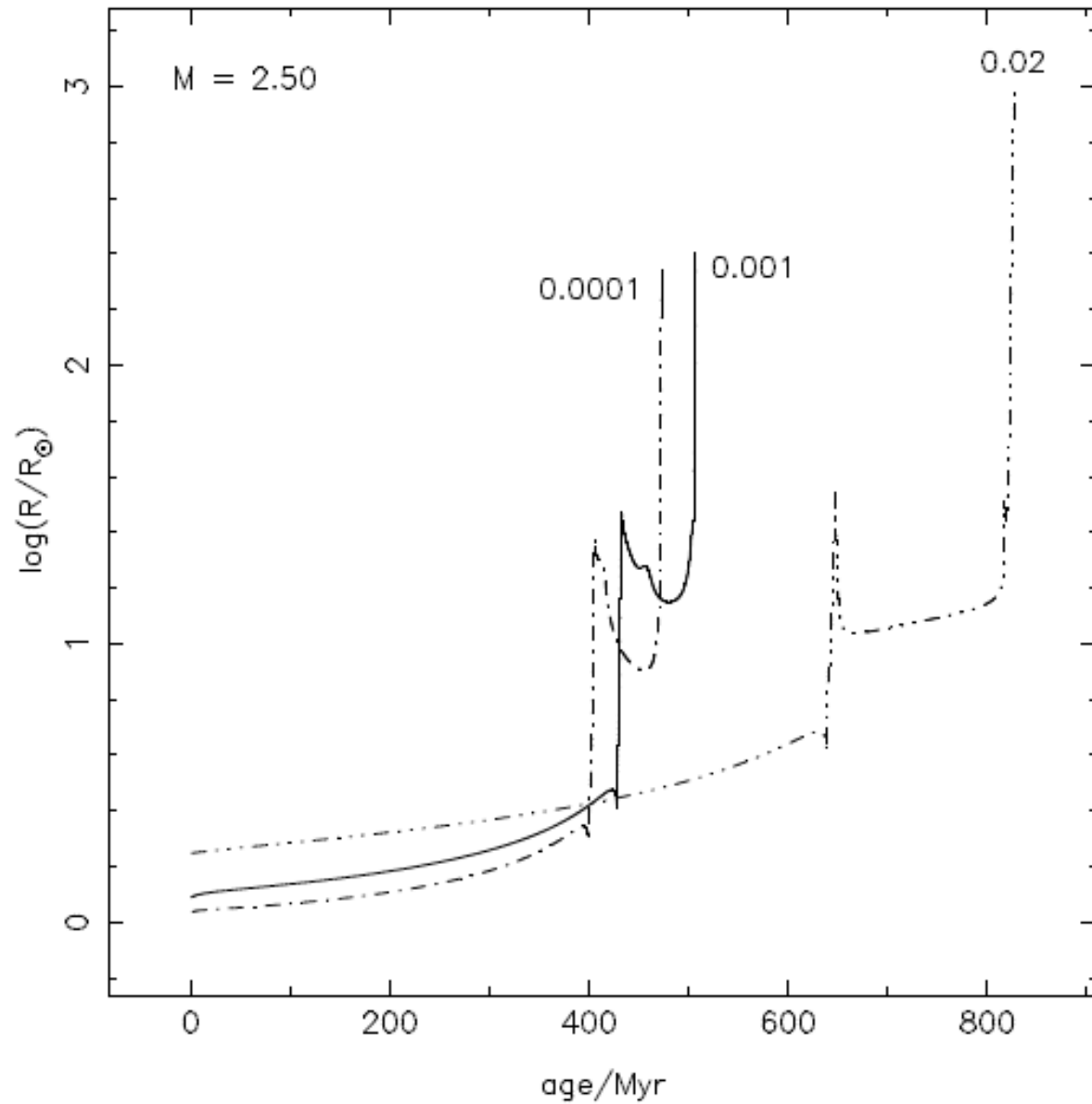
ТРЕКИ МЕСА: 50 МАСС СОЛНЦА



РОЛЬ МЕТАЛЛИЧНОСТИ

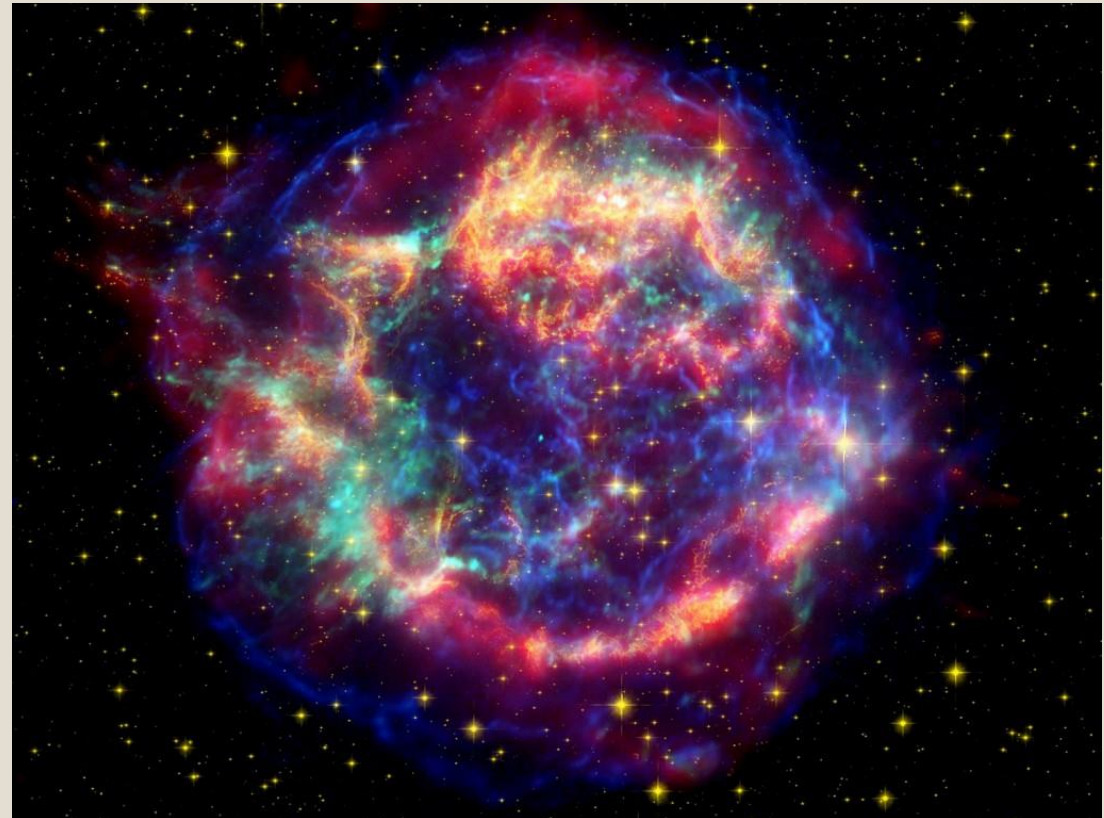


МЕТАЛЛИЧНОСТЬ



ХИМИЧЕСКАЯ ЭВОЛЮЦИЯ И ЗВЕЗДЫ

В течение своей жизни и по ее окончании звезды сбрасывают часть своего вещества, обогащенного синтезированными элементами, в межзвездное пространство. Так в наши дни изменяется химический состав вселенной.



ВОЗНИКНОВЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ВО 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.

H																	He				
Li	Be															B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg															Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr				
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe				
Cs	Ba		Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn				
Fr	Ra																				
		La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu					
		Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr					

Big Bang

Supernovae

Large Stars

Small Stars

Cosmic Rays

1 H	big bang fusion 					cosmic ray fission 					2 He						
3 Li	4 Be	merging neutron stars 					exploding massive stars 					5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg	dying low mass stars 					exploding white dwarfs 					13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55 Cs	56 Ba		72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
87 Fr	88 Ra																

<https://www.sciencealert.com/this-awesome-periodic-table-shows-the-origins-of-every-atom-in-your-body>

См. также «Астрономическая картинка дня» 24.10.2017

<https://apod.nasa.gov/apod/ap171024.html>

S-ПРОЦЕСС

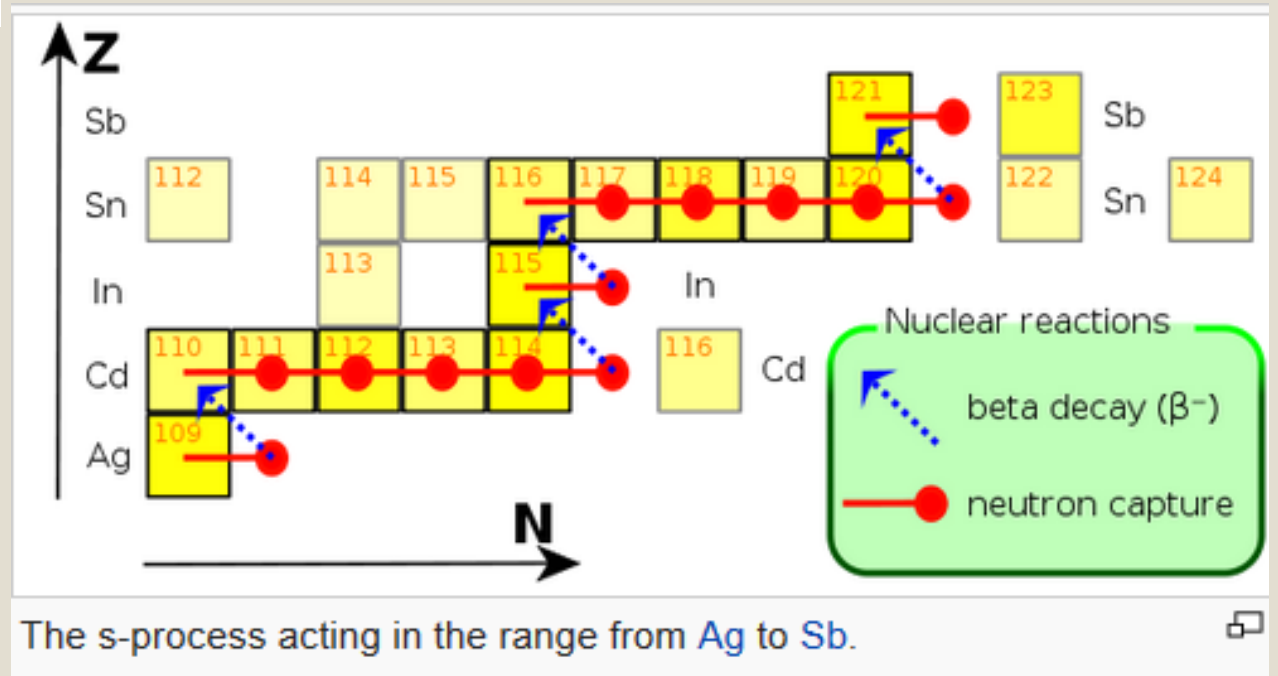


Медленный захват нейтронов.
Идет при относительно низкой
плотности нейтронов.

Захваченный нейтрон испытывает
в ядре бета-распад, превращаясь
в протон.

Этот процесс дает свободные нейтроны,
которые легко проникают в ядра.

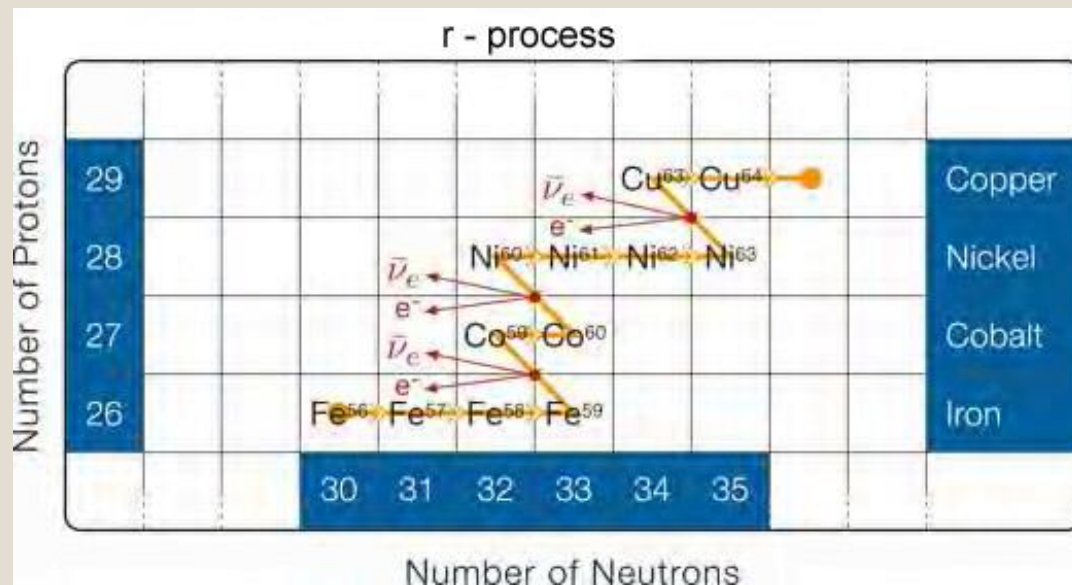
Идет в оболочках звезд-гигантов.



Синтез элементов с массой до сотни и примерно от 138 до 208

R-ПРОЦЕСС

daviddarling.info

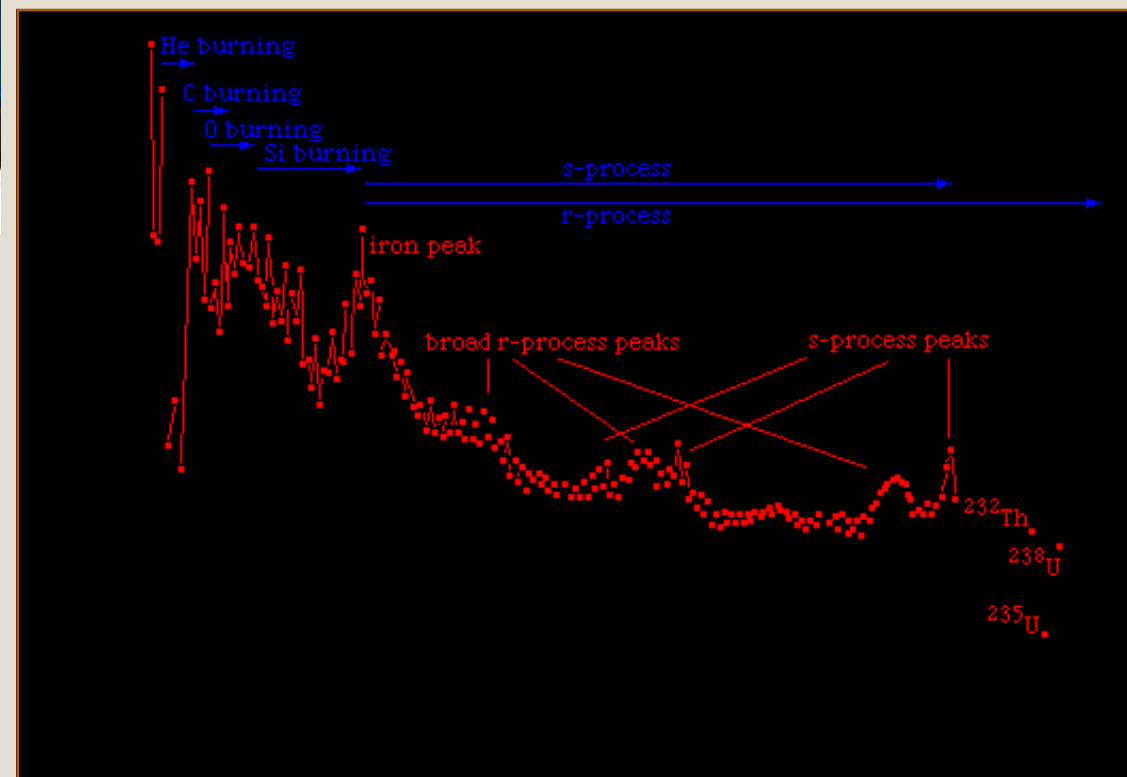


Протекает при очень высокой плотности нейтронов.
Например, при нейтронизации вещества в сверхновых.

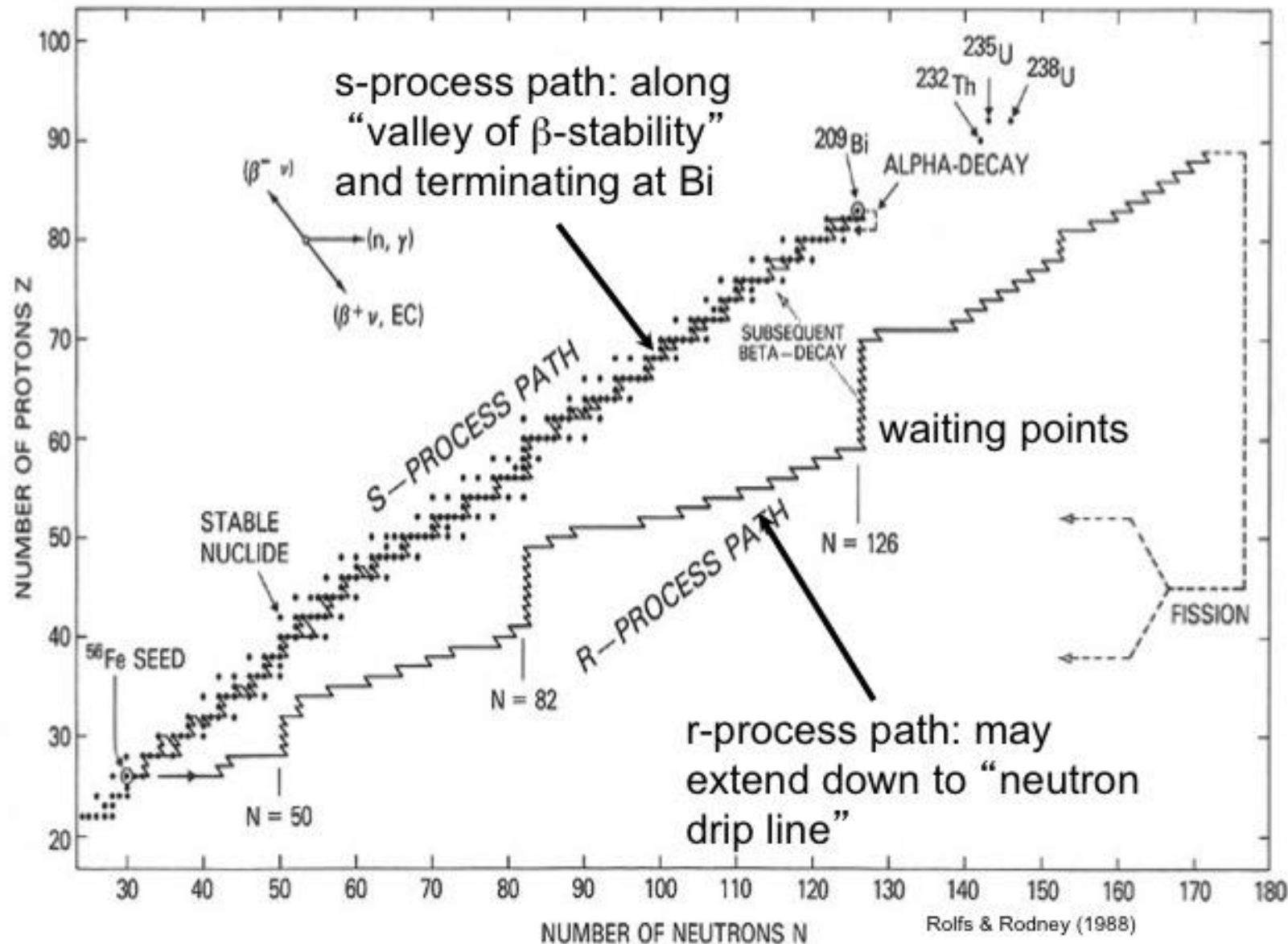
Возникают насыщенные нейтронами ядра.

Идет во вспышках сверхновых и при слиянии нейтронных звезд.

Важен для тяжелых элементов вплоть до урана.



r - and s -process synthesis paths



МАФУСАИЛ: ОЧЕНЬ СТАРАЯ ЗВЕЗДА В СОЛНЕЧНОЙ ОКРЕСТНОСТИ

HD 140283
субгигант
из гало Галактики

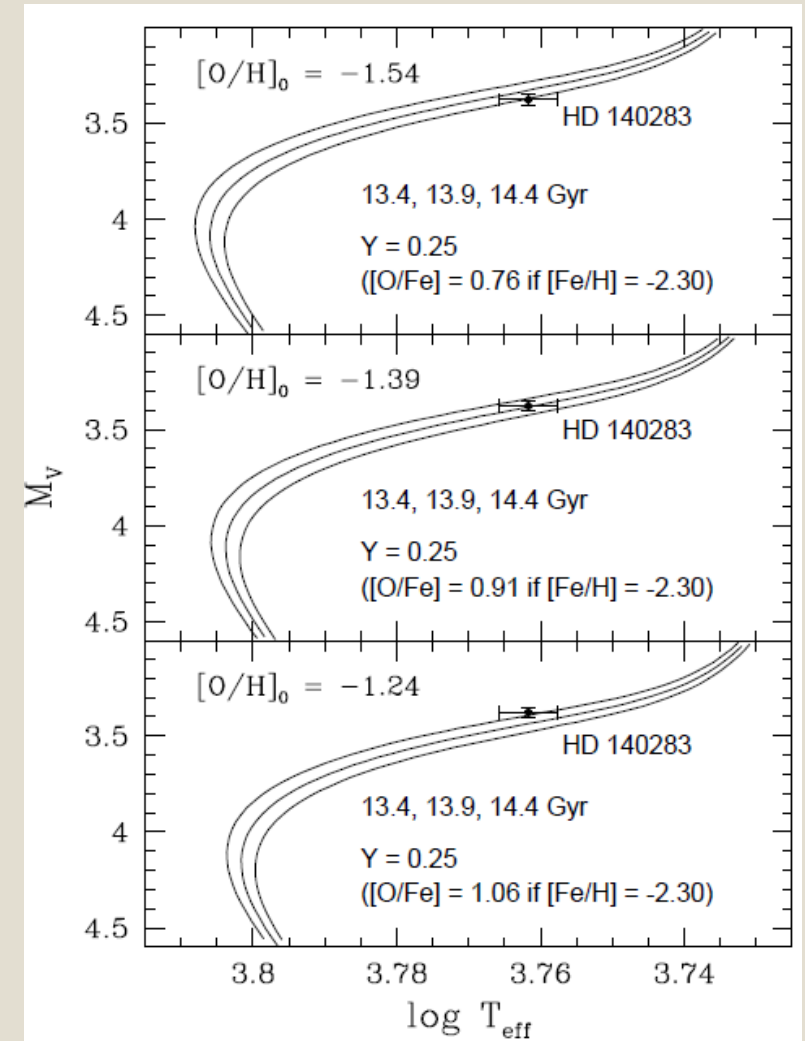
Расстояние
<200 световых лет

Возраст
>13.4 млрд. лет

Эволюционная стадия
звезды позволяет
довольно точно
оценить ее возраст,
зная светимость



Самая старая звезда,
но «металличность»
все-таки не нулевая,
т.е. это не звезда из
самого первого поколения.



СТРУКТУРА ПРЕДСВЕРХНОВОЙ

