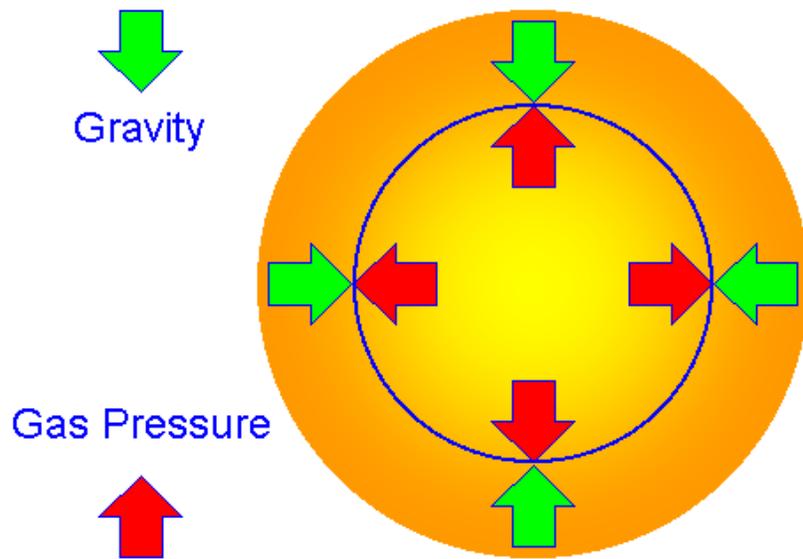


ЭВОЛЮЦИЯ ЗВЕЗД

УСТОЙЧИВОСТЬ ЗВЕЗДЫ

Hydrostatic Equilibrium



Сила тяжести уравновешена градиентом давления.

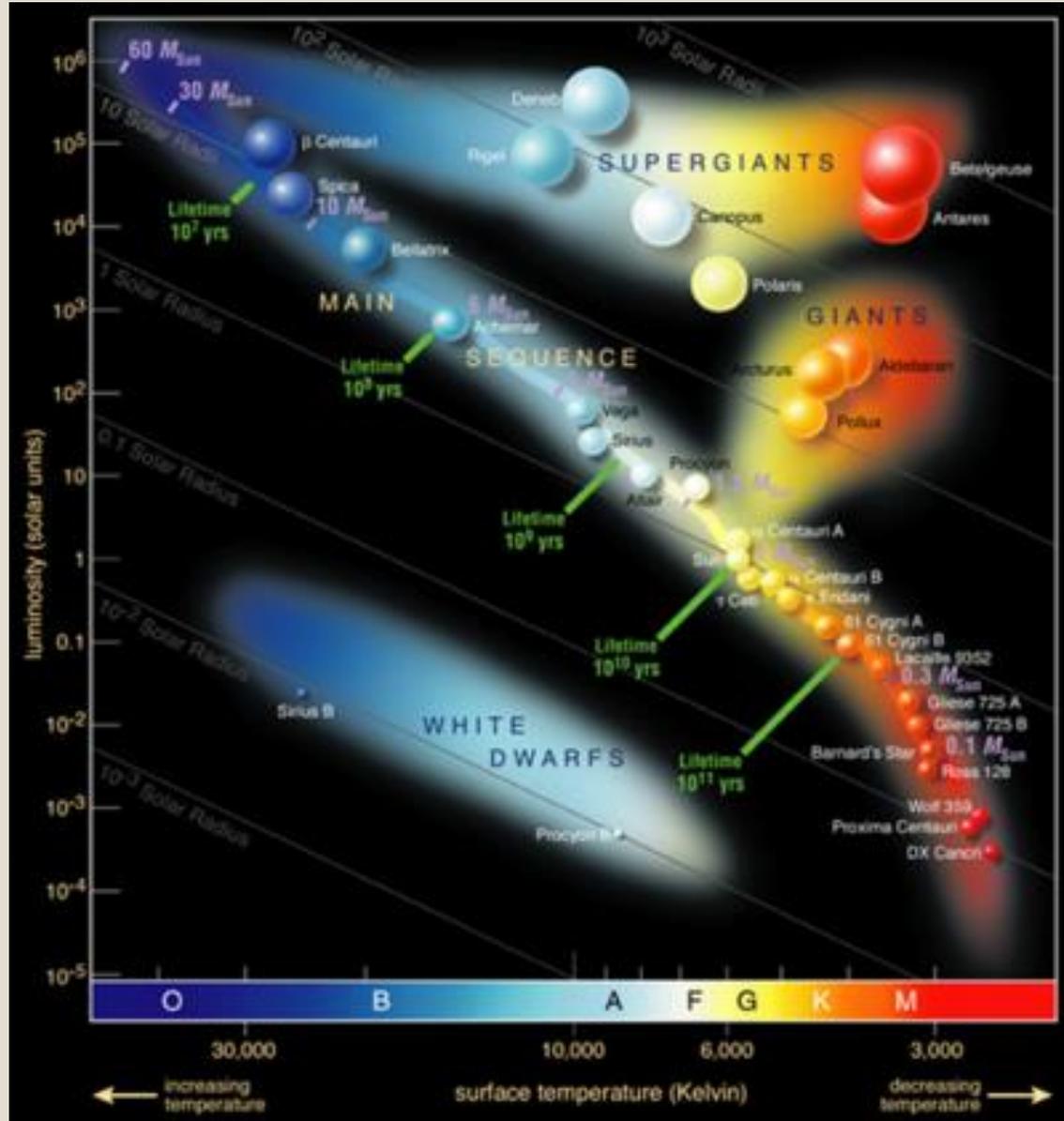
Для приближенных оценок можно использовать $P/\rho \approx GM/R$

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

Diagram illustrating the equation for hydrostatic equilibrium with handwritten annotations:

- ρ is labeled **DENSITY**.
- $\frac{d^2 r}{dt^2}$ is labeled **ACCELERATION**.
- G is labeled **GRAVITATIONAL CONSTANT**.
- M_r is labeled **MASS WITHIN A SPHERE OF RADIUS r** .
- $\frac{dP}{dr}$ is labeled **PRESSURE GRADIENT**.

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.

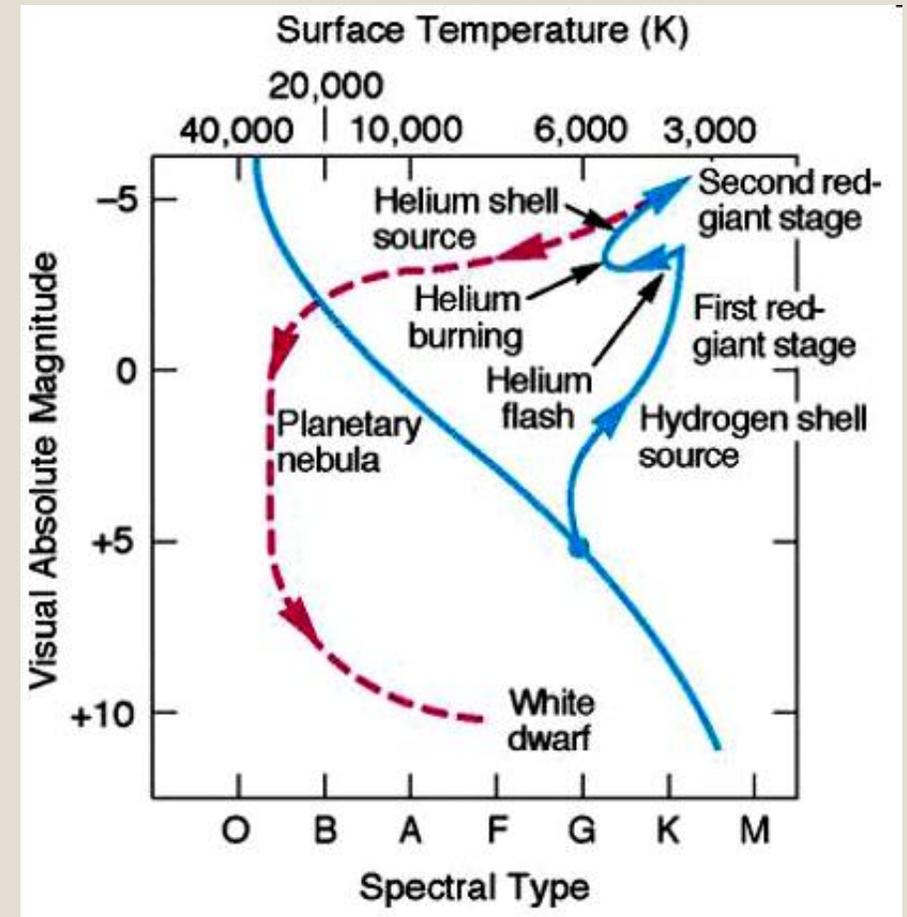
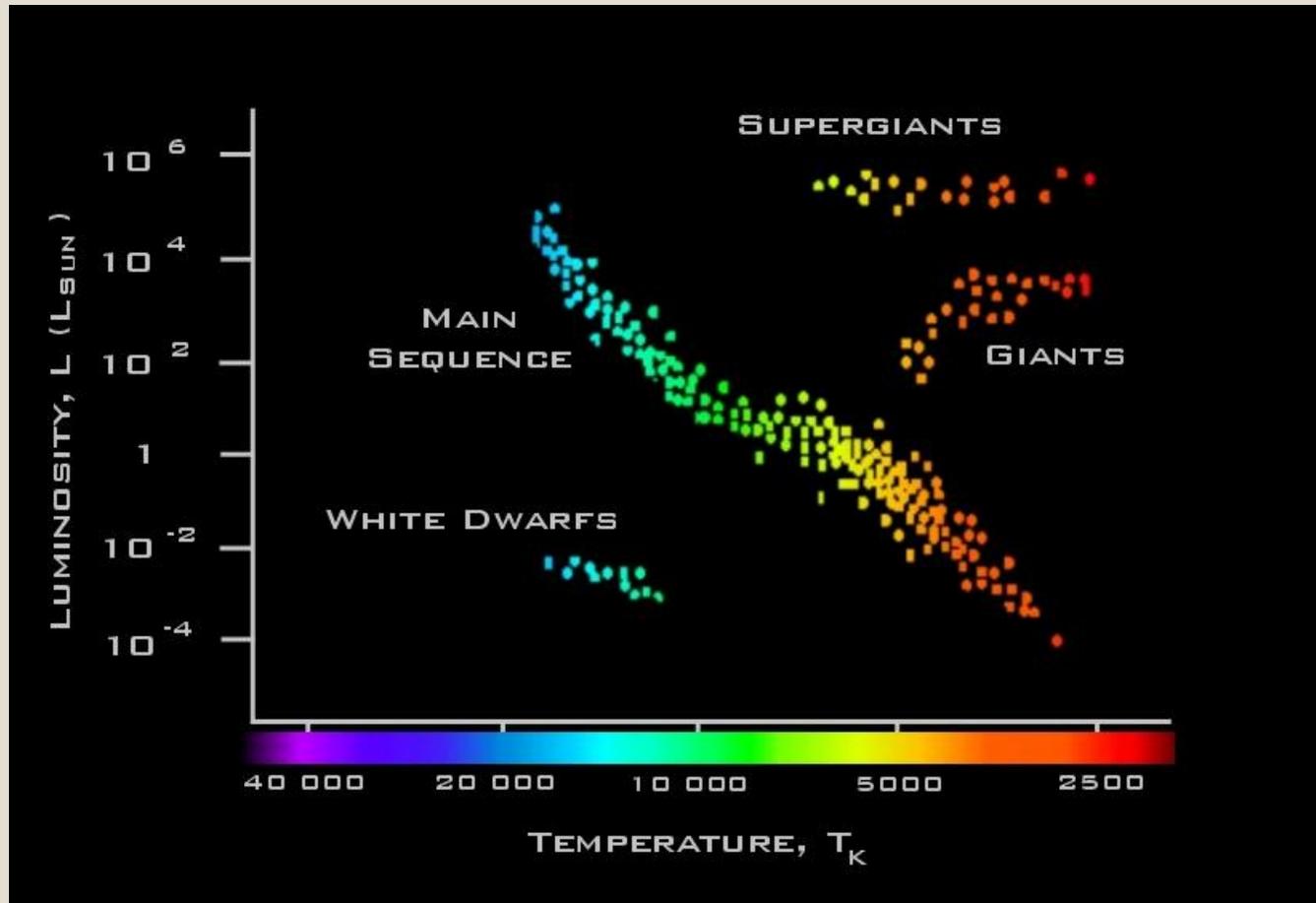
Самые тяжелые из образующихся сейчас около 100-200.

С ростом массы резко растет светимость.

Время жизни тем больше, чем меньше масса звезды.

ЭВОЛЮЦИЯ ОДИНОЧНОЙ ЗВЕЗДЫ

Эволюция звезды – это смена источников горения

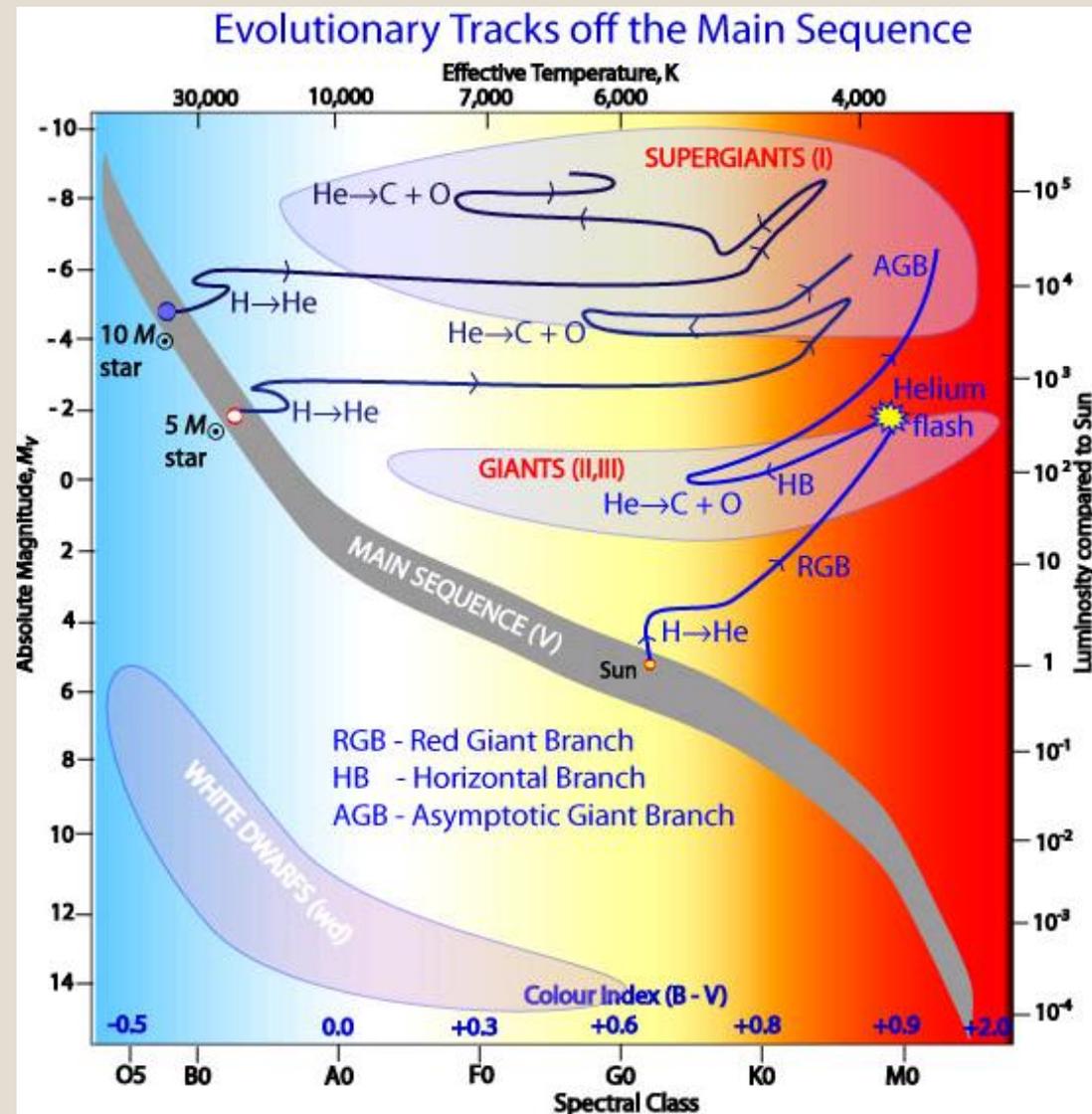


МАССА – ГЛАВНЫЙ ПАРАМЕТР

Судьба звезды зависит от ее массы.

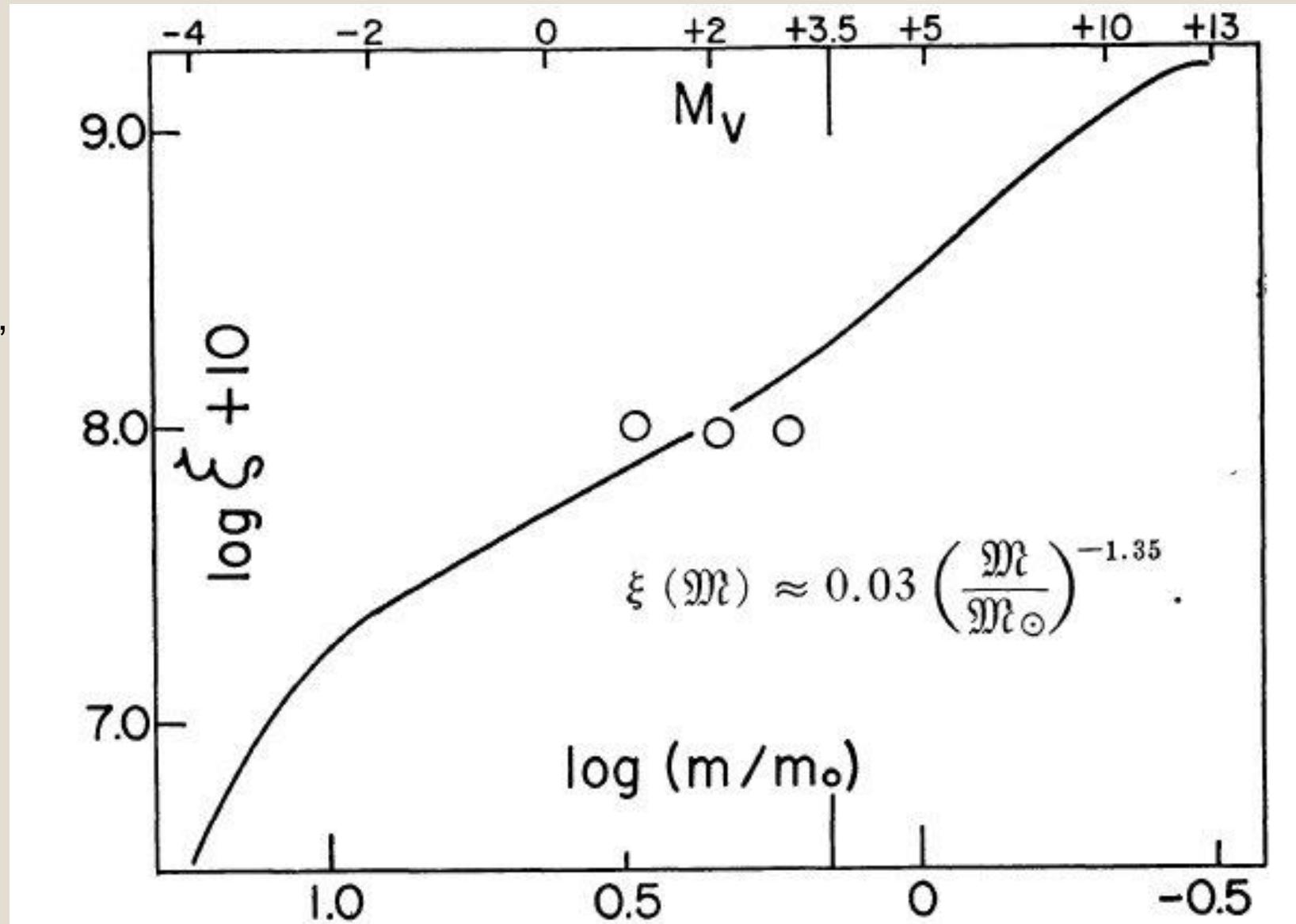
- Чем массивнее звезда – тем больше она излучает и меньше живет
- Массивные звезды в конце жизни взрываются, а их ядра становятся нейтрон. звездами или черными дырами
- Маломассивные звезды сбрасывают оболочки, и их ядра становятся белыми карликами

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

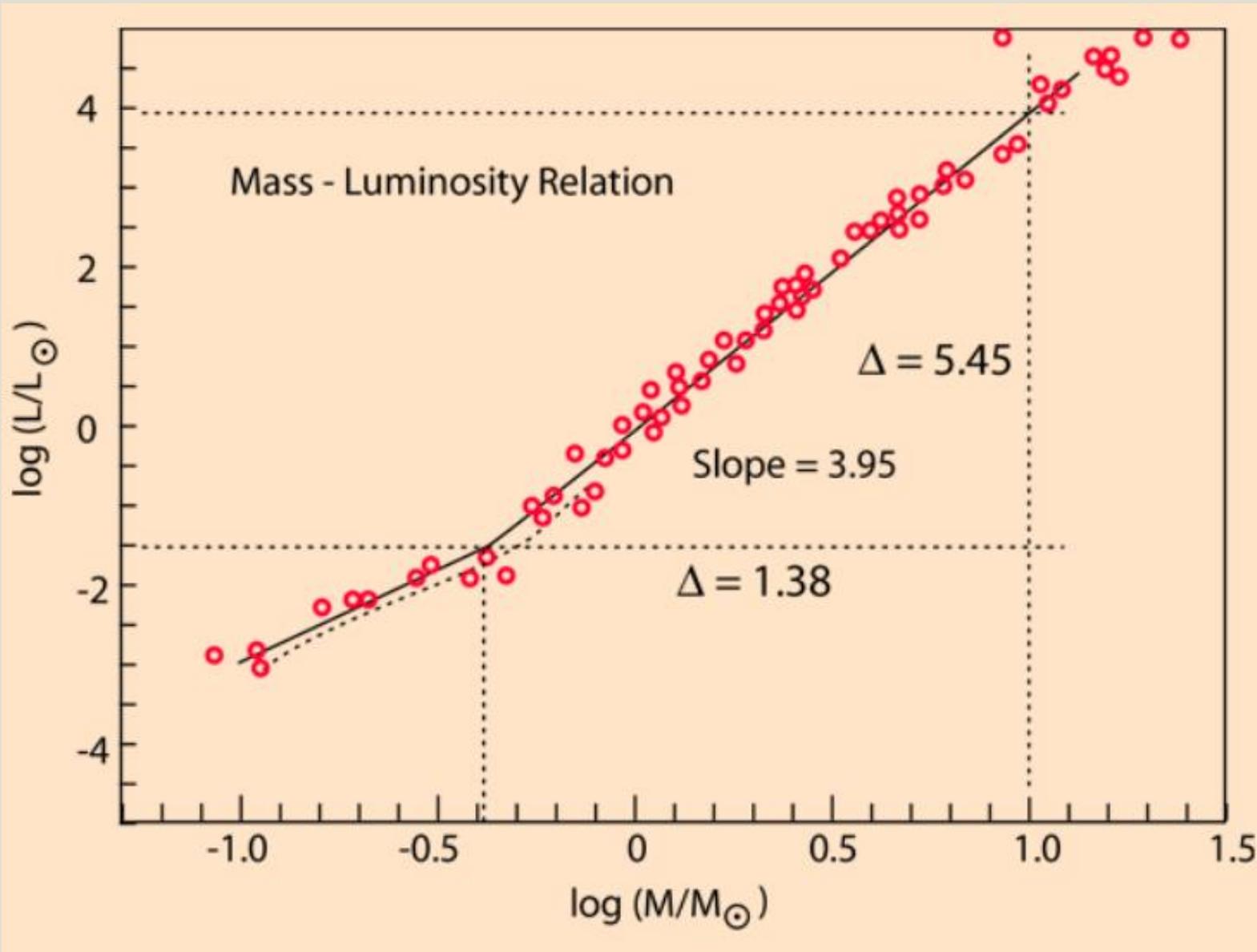


РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЗВЕЗД ПО МАССАМ

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



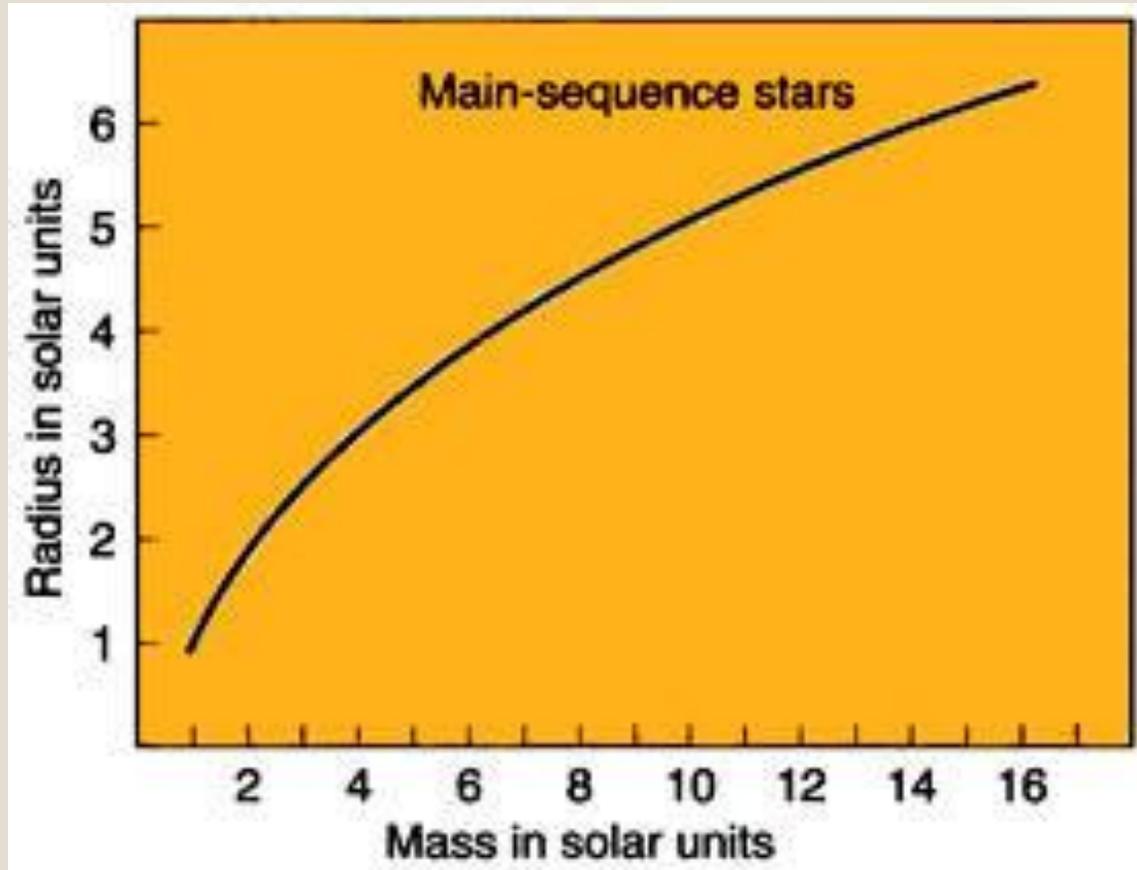
СОТНОШЕНИЕ МАССА-СВЕТИМОСТЬ



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

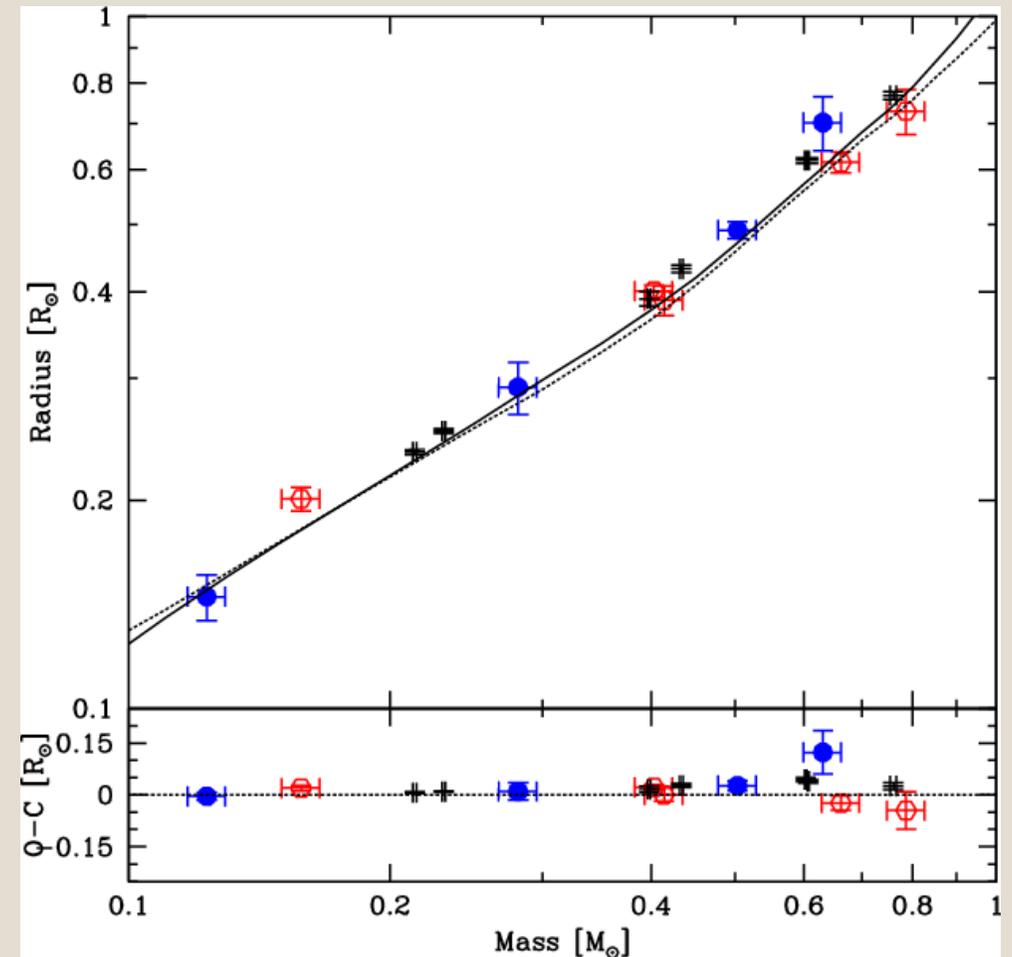
Для тяжелых звезд
(когда давление излучения
становится важнее)
 $L \sim M$

СОТНОШЕНИЕ МАССА-РАДИУС

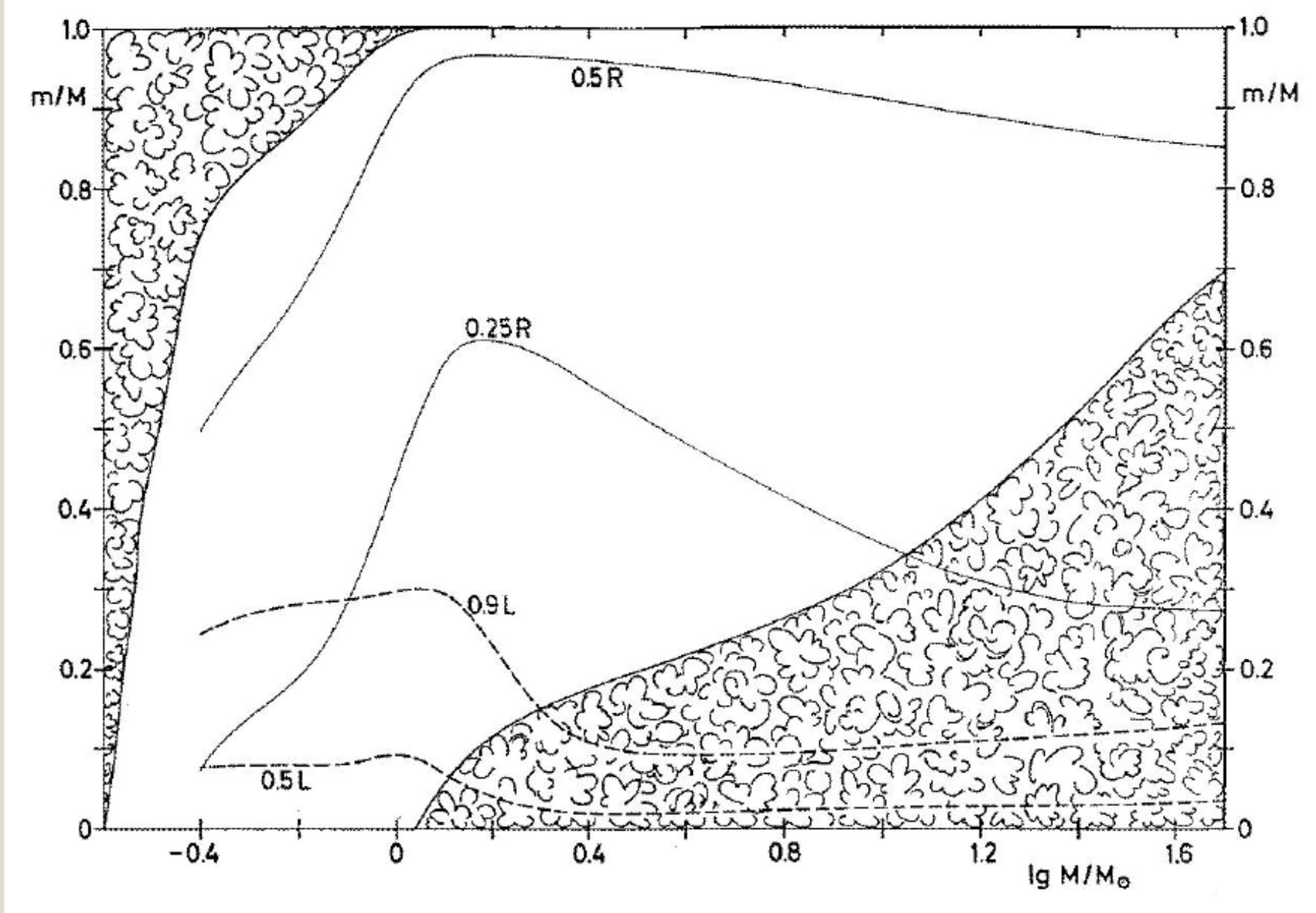


Для масс < 1 солнечной показатель степени равен примерно 0.8-1.
А для больших масс примерно – 0.6.

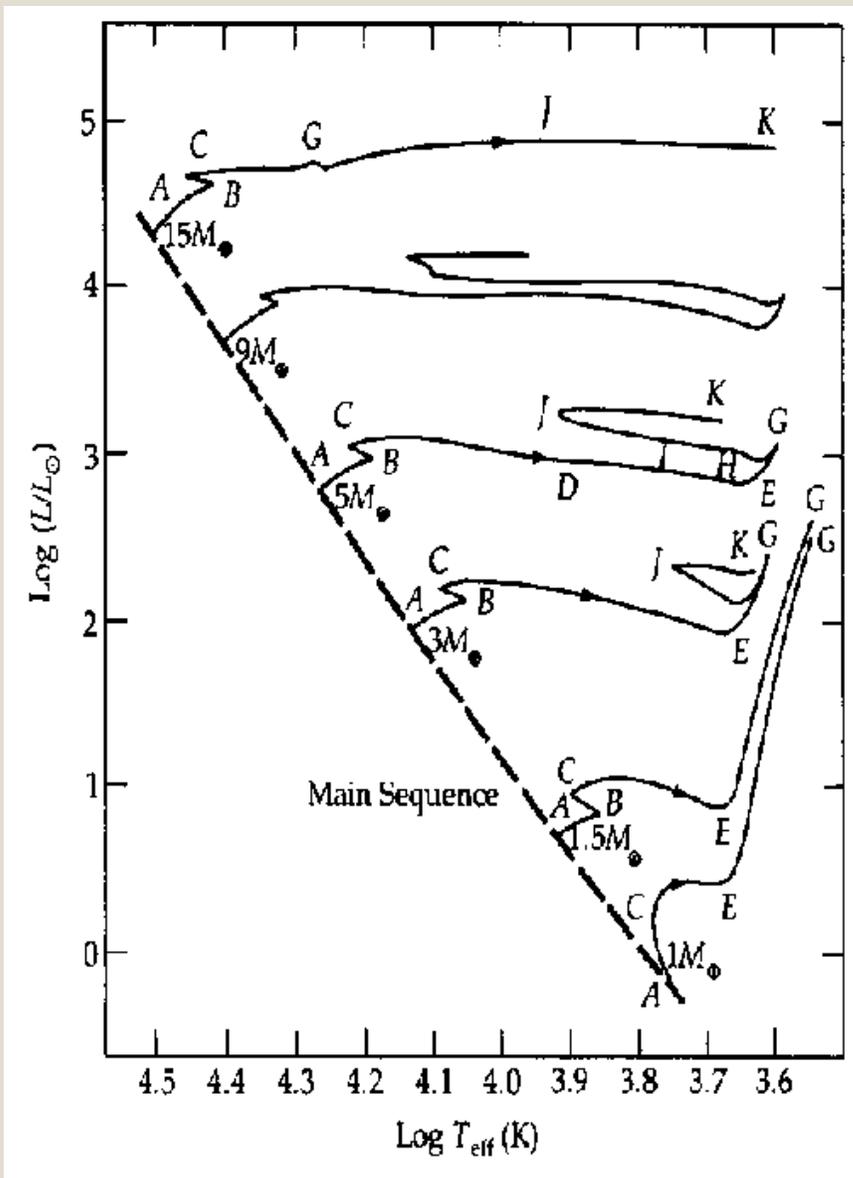
Соотношение зависит от параметров конвективной оболочки.



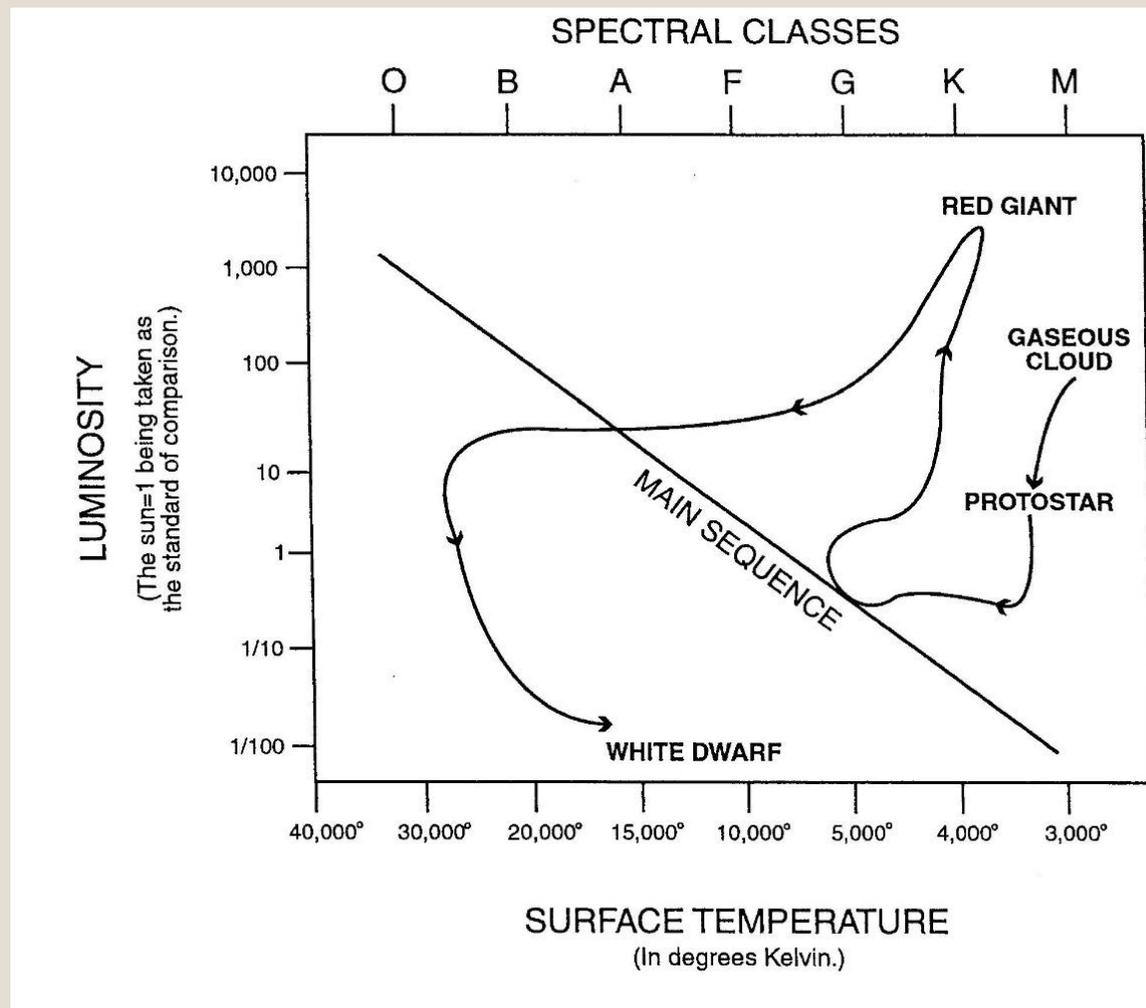
ВНУТРЕННЯЯ СТРУКТУРА ЗВЕЗД



ЭВОЛЮЦИЯ НА ДИАГРАММЕ Г-Р

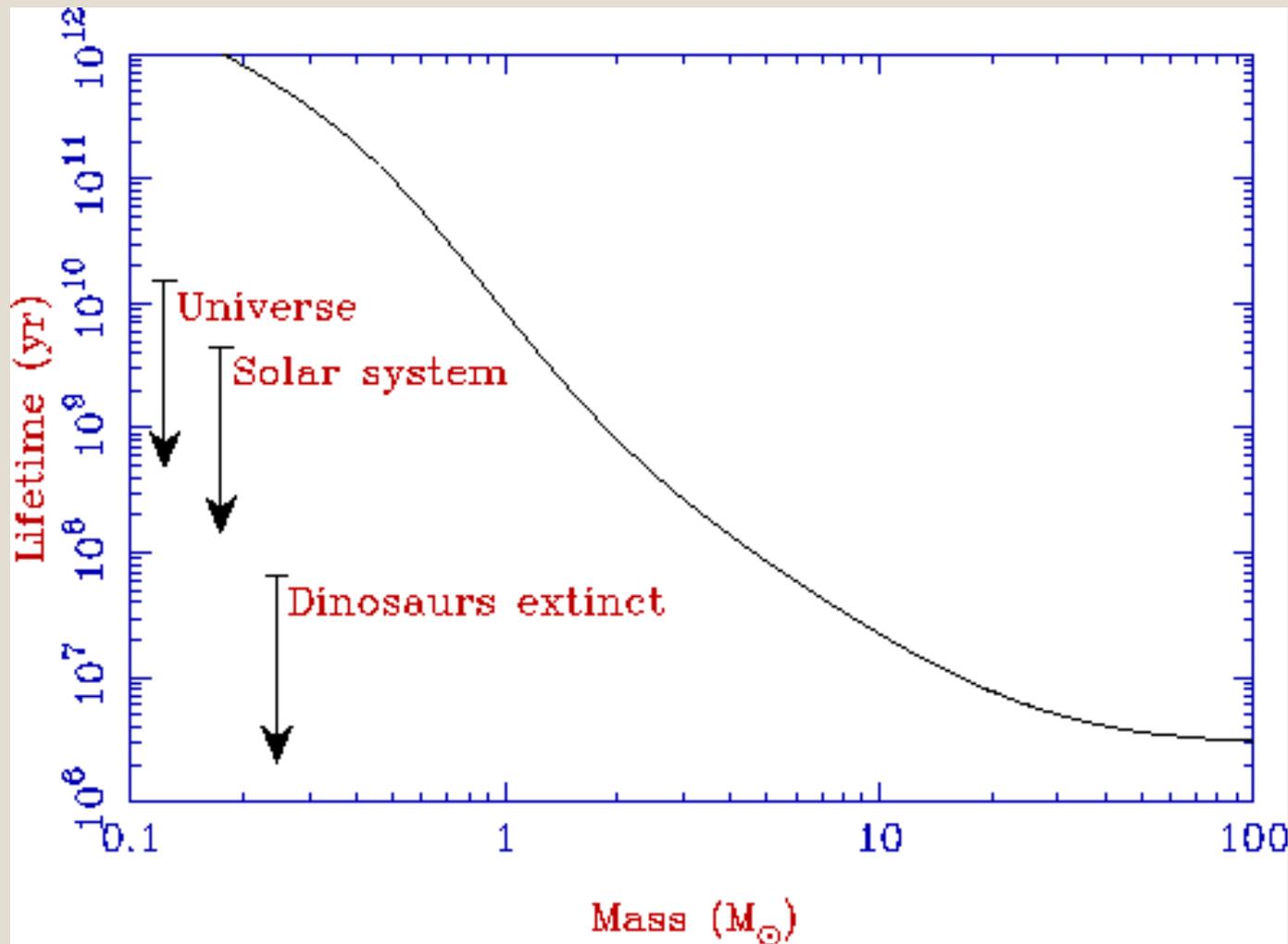


Дольше всего звезды находятся на Главной последовательности.



ВРЕМЯ ЖИЗНИ ЗВЕЗДЫ

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

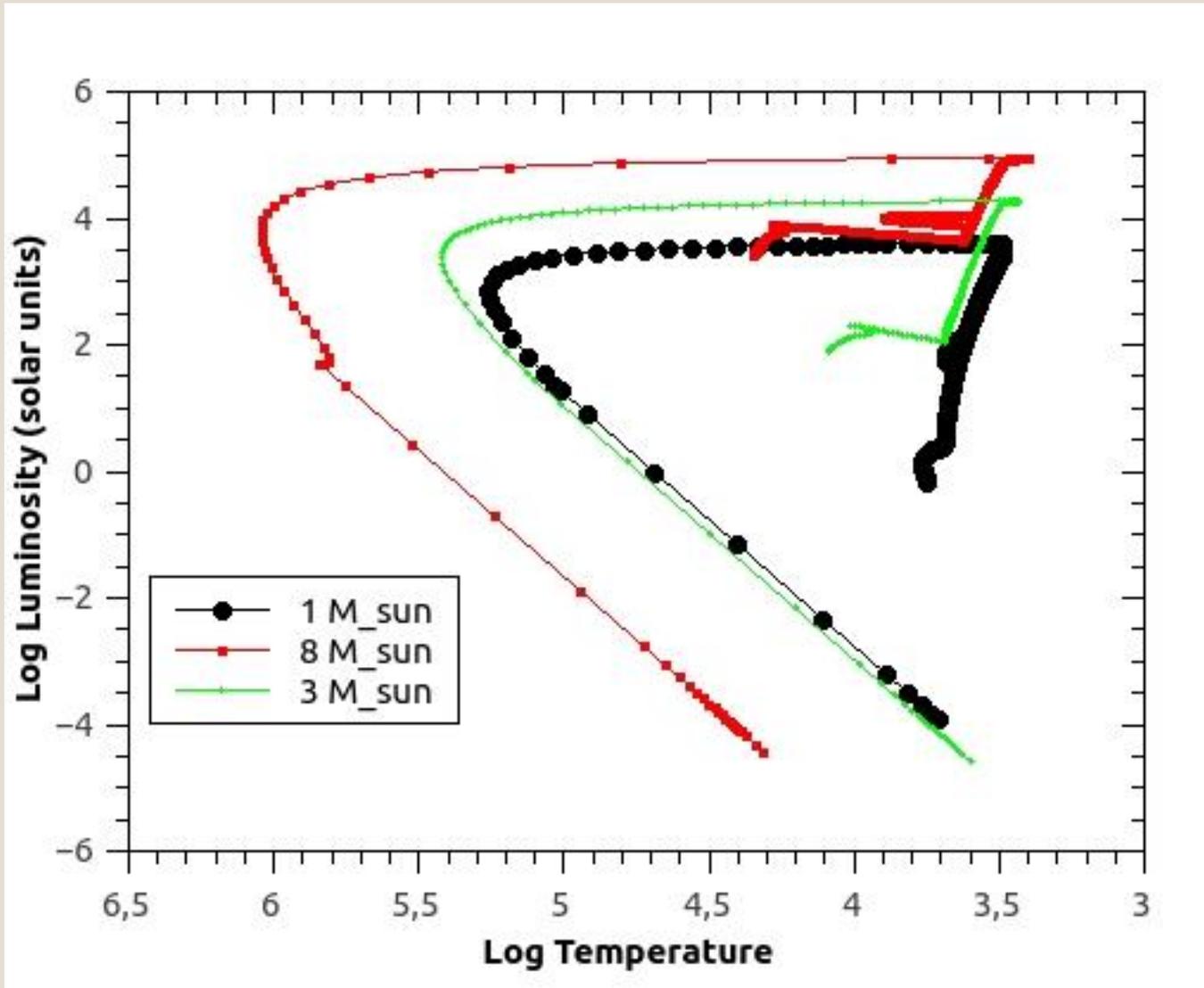


$T \sim M/L$

Для маломассивных $T \sim M^{-2}$,

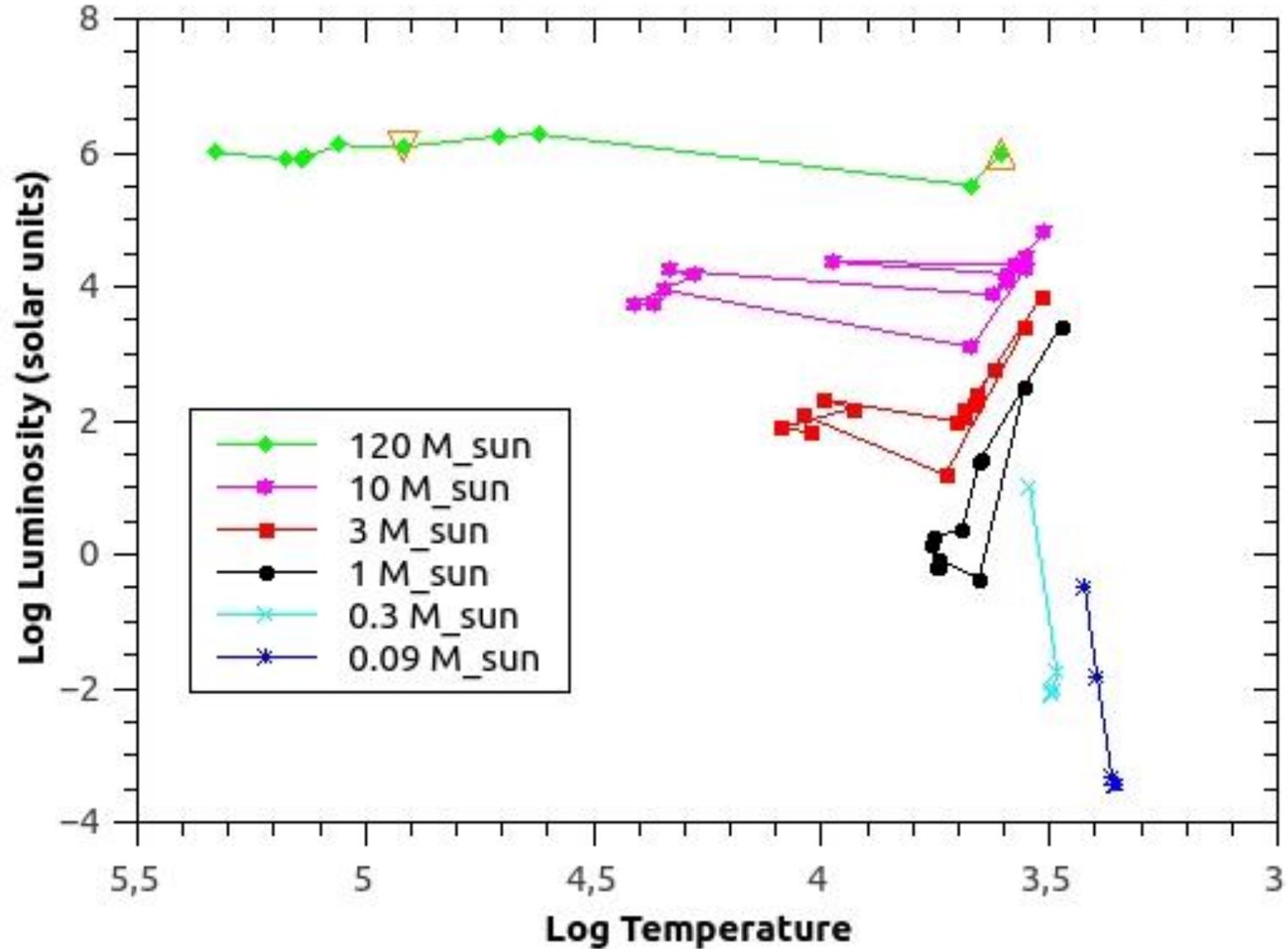
для массивных выходит на константу.

ОТ ГЛАВНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ДО БЕЛЫХ КАРЛИКОВ



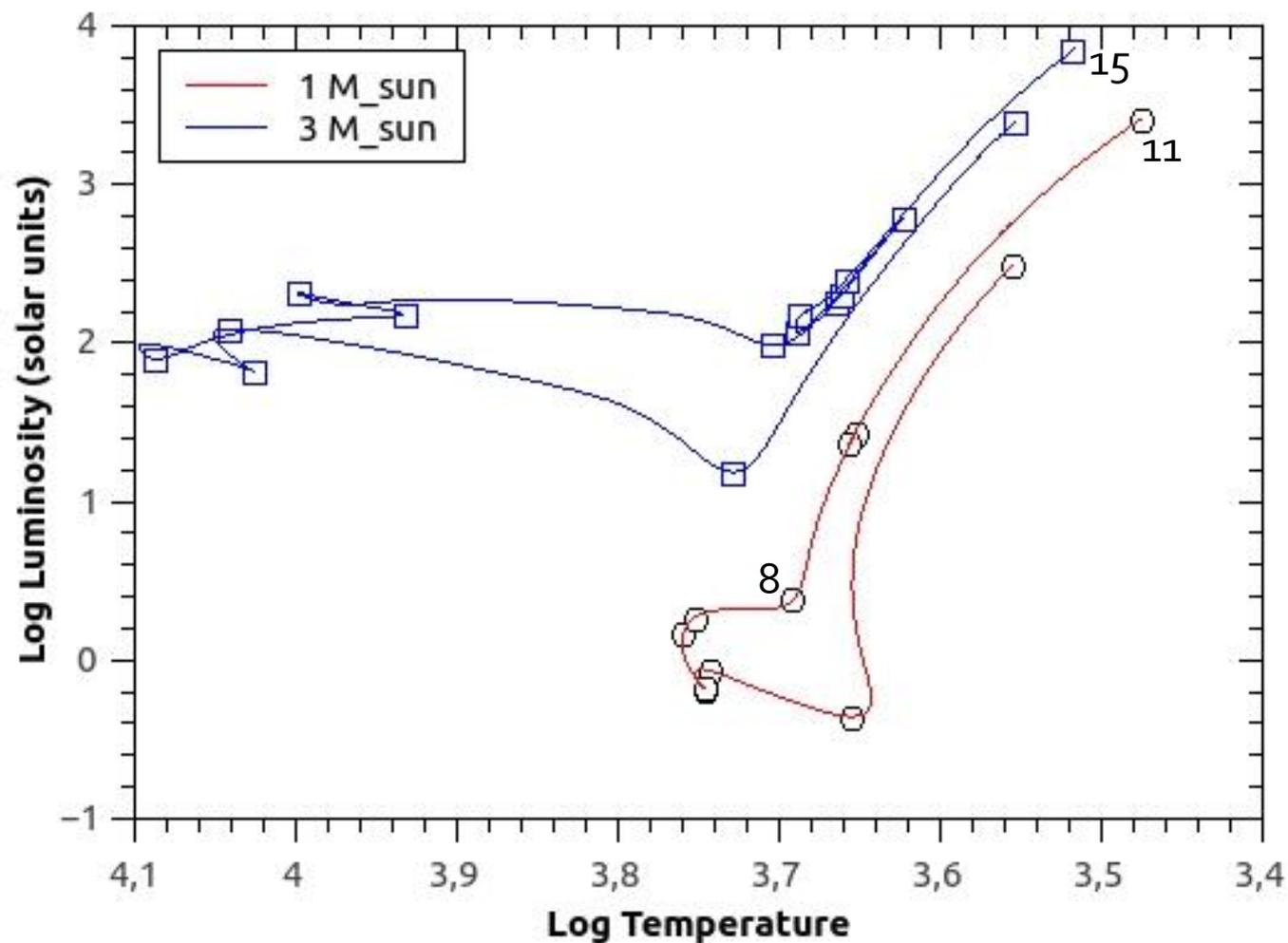
Расчеты проведены
с помощью программы SSE.

ДО И ПОСЛЕ ГП



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

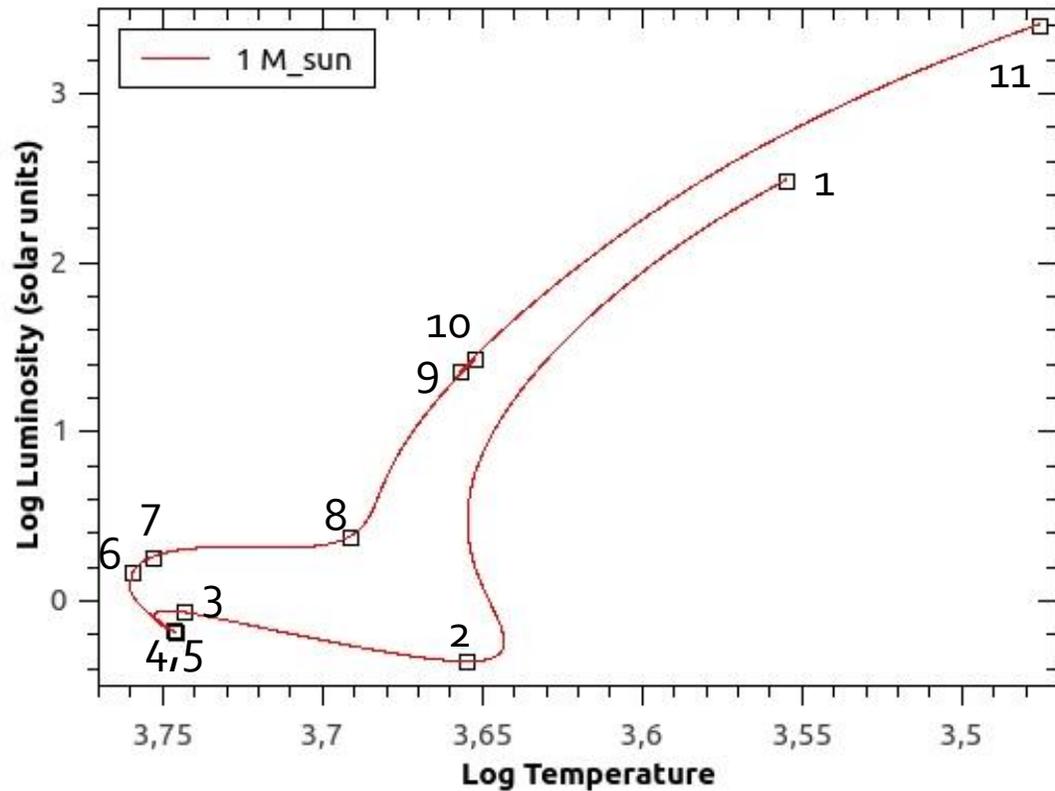
В ДЕТАЛЯХ.....



- 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 Исчерпание гелия в центре
- 15 Начало TRAGB или начало горения C

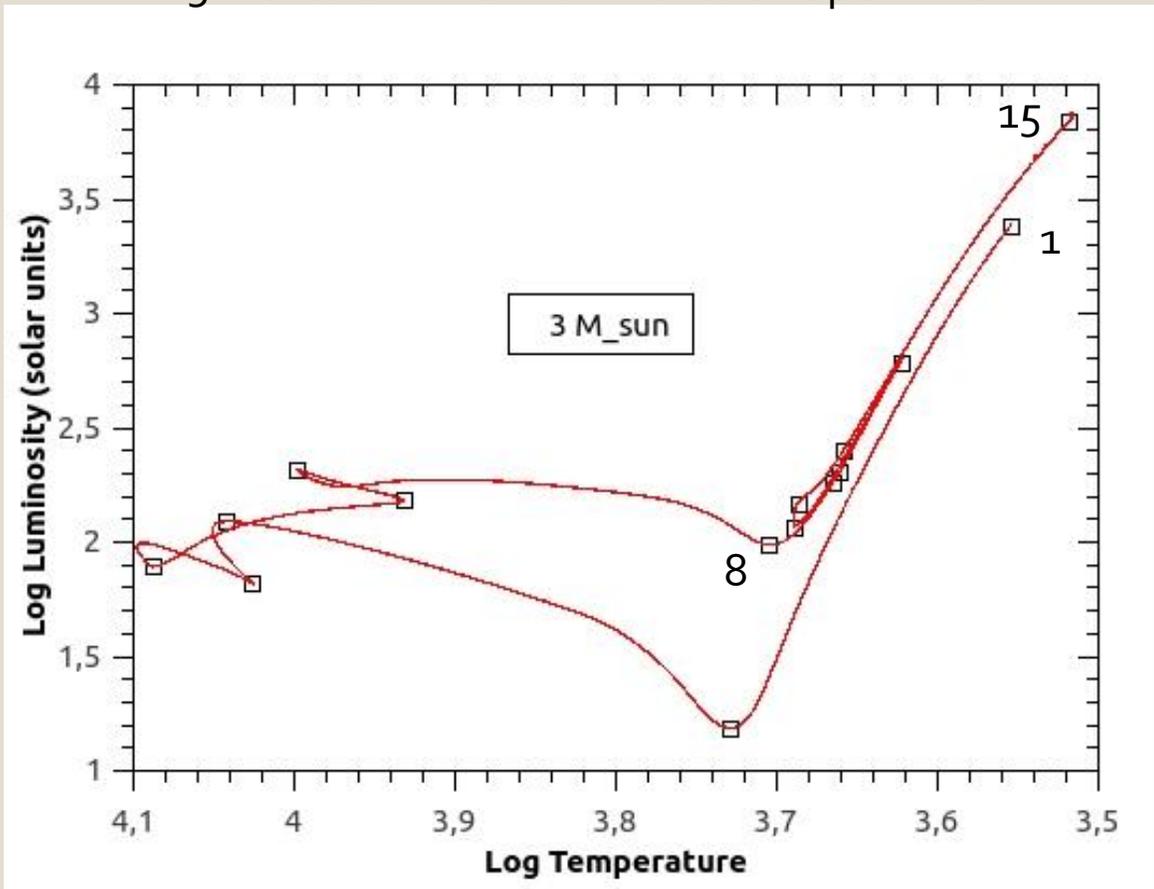
Использованы треки падуанской группы Bressan et al. (2012).

ЧУТЬ ПОДРОБНЕЕ

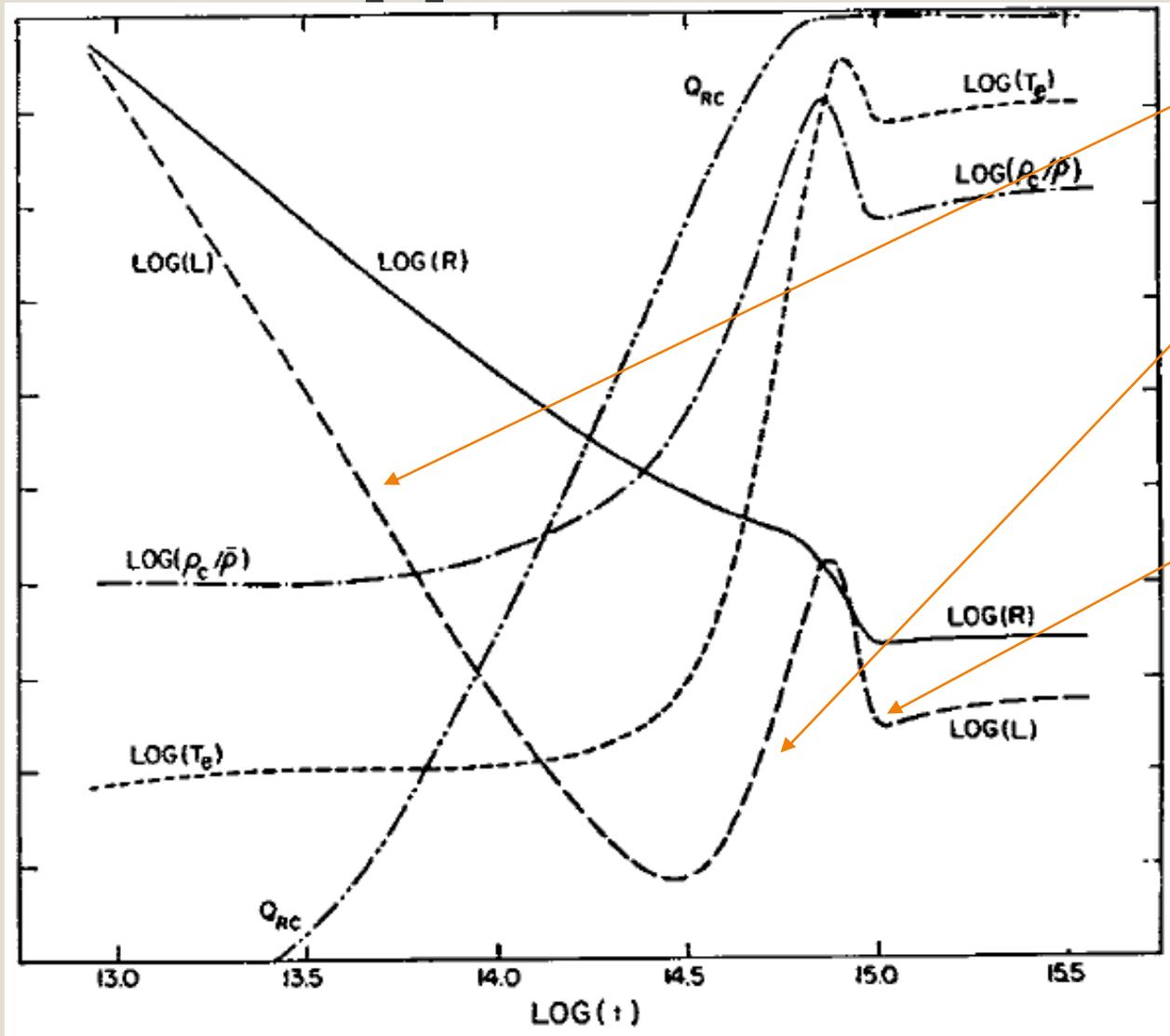


- 1 Начало
- 2 До-ГП
- 3 До-ГП
- 4 Вблизи начала ГП
- 5 Началось активное горение H
- 6 Конец горения водорода. Сжатие
- 7 Сжатие заканчивается. Выход на КГ

- 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 Исчерпание гелия в центре
- 15 Начало TRAGB 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

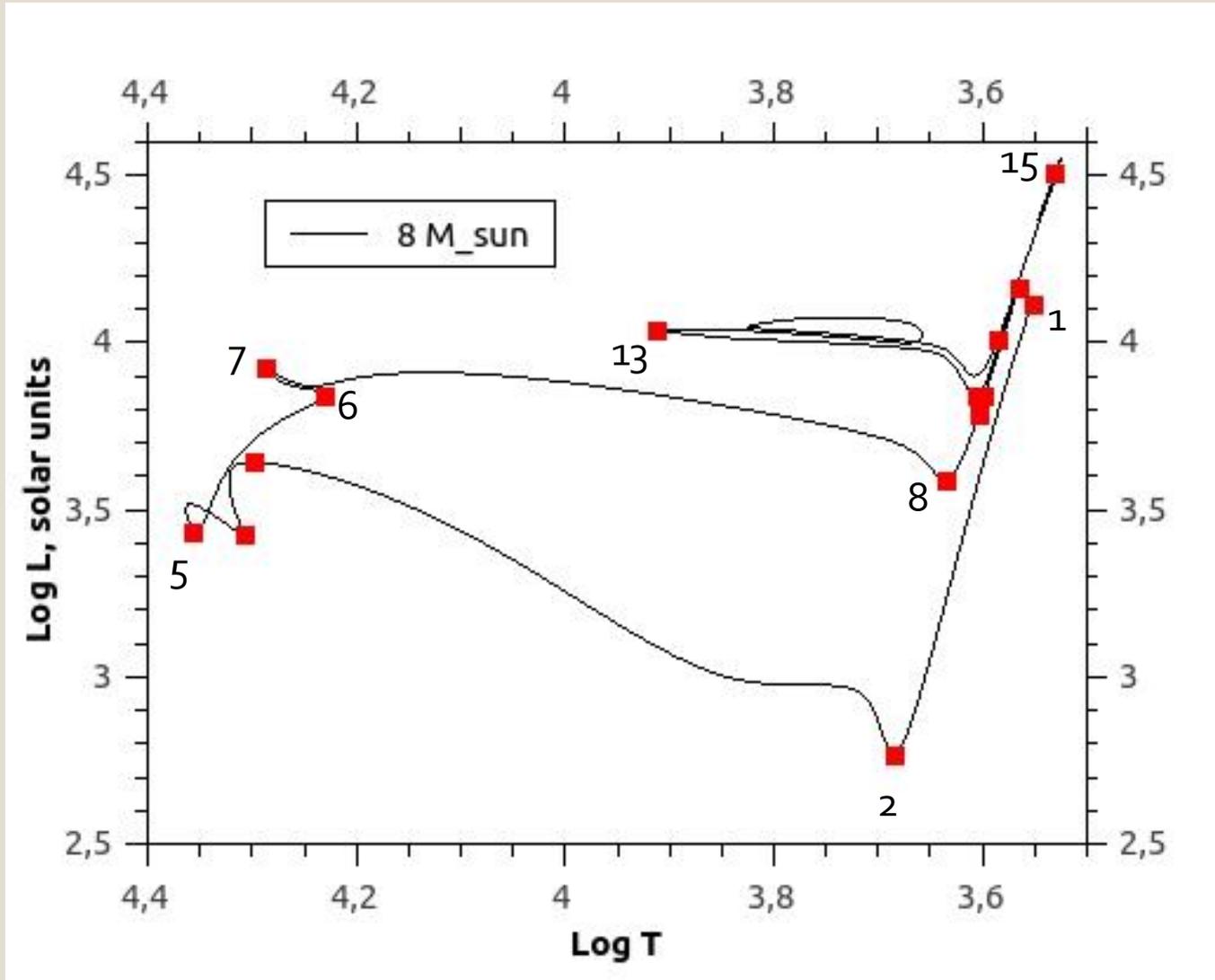
$$\frac{kT\rho}{\mu m_u} = \frac{GM\rho}{R}$$

Рост молекулярного веса компенсируется ростом ρT .

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

В итоге растет светимость.

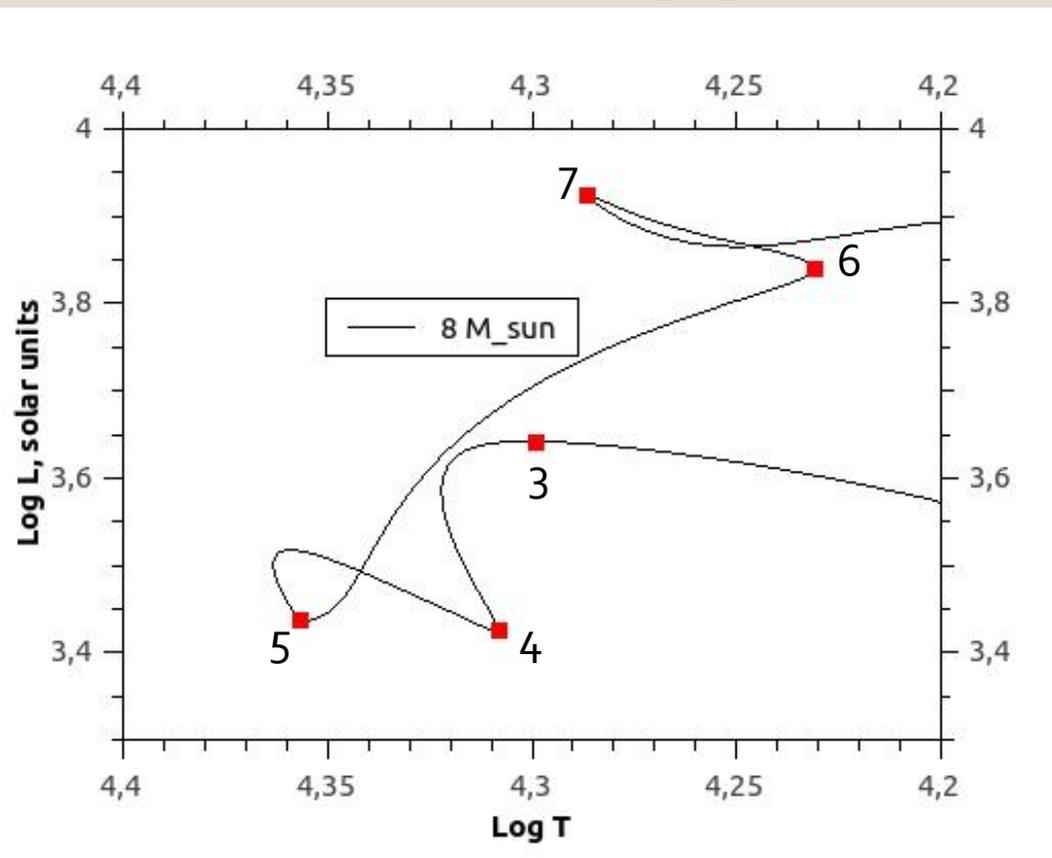
В ДЕТАЛЯХ.....



- 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 Исчерпание гелия в центре
- 15 Начало TRAGB или начало горения C

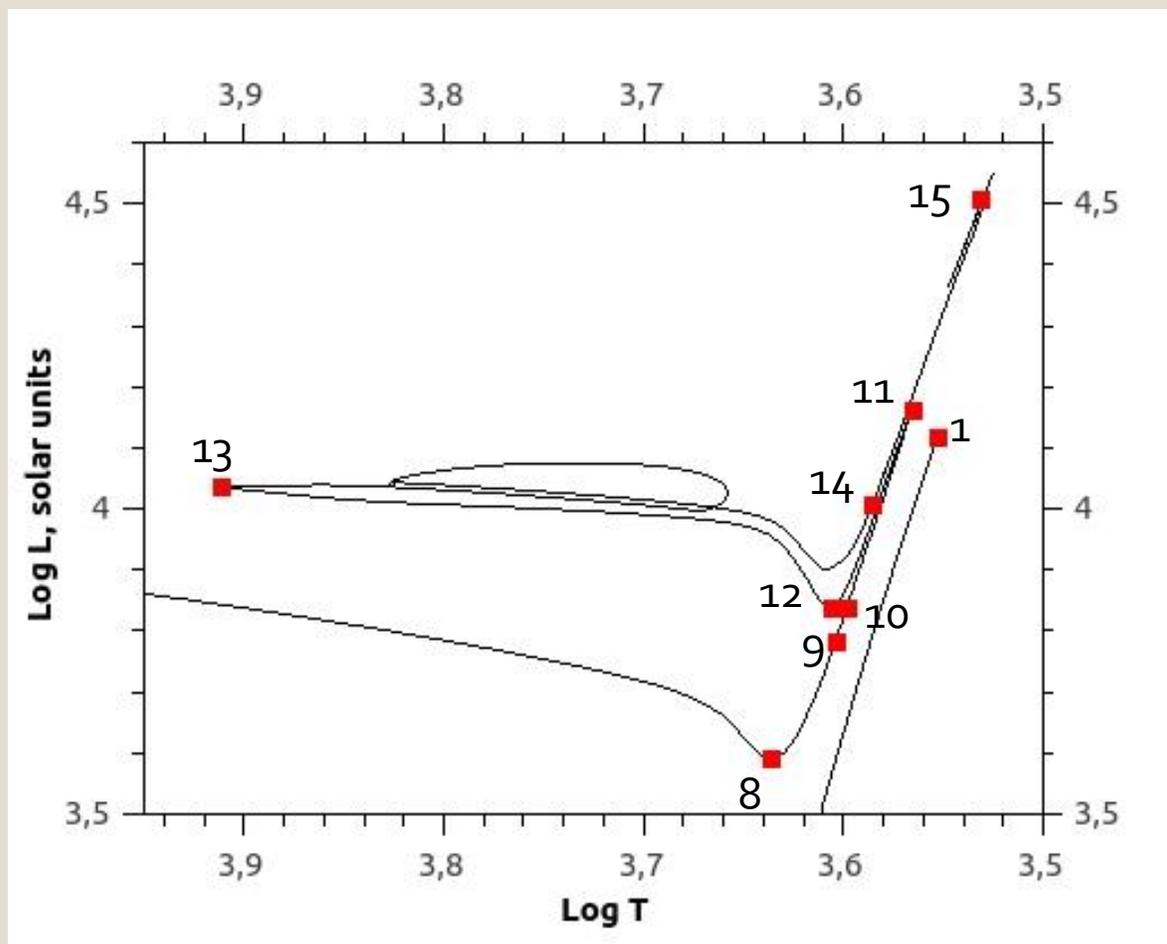
Использованы треки падуанской группы Bressan et al. (2012).

В МЕЛКИХ ДЕТАЛЯХ

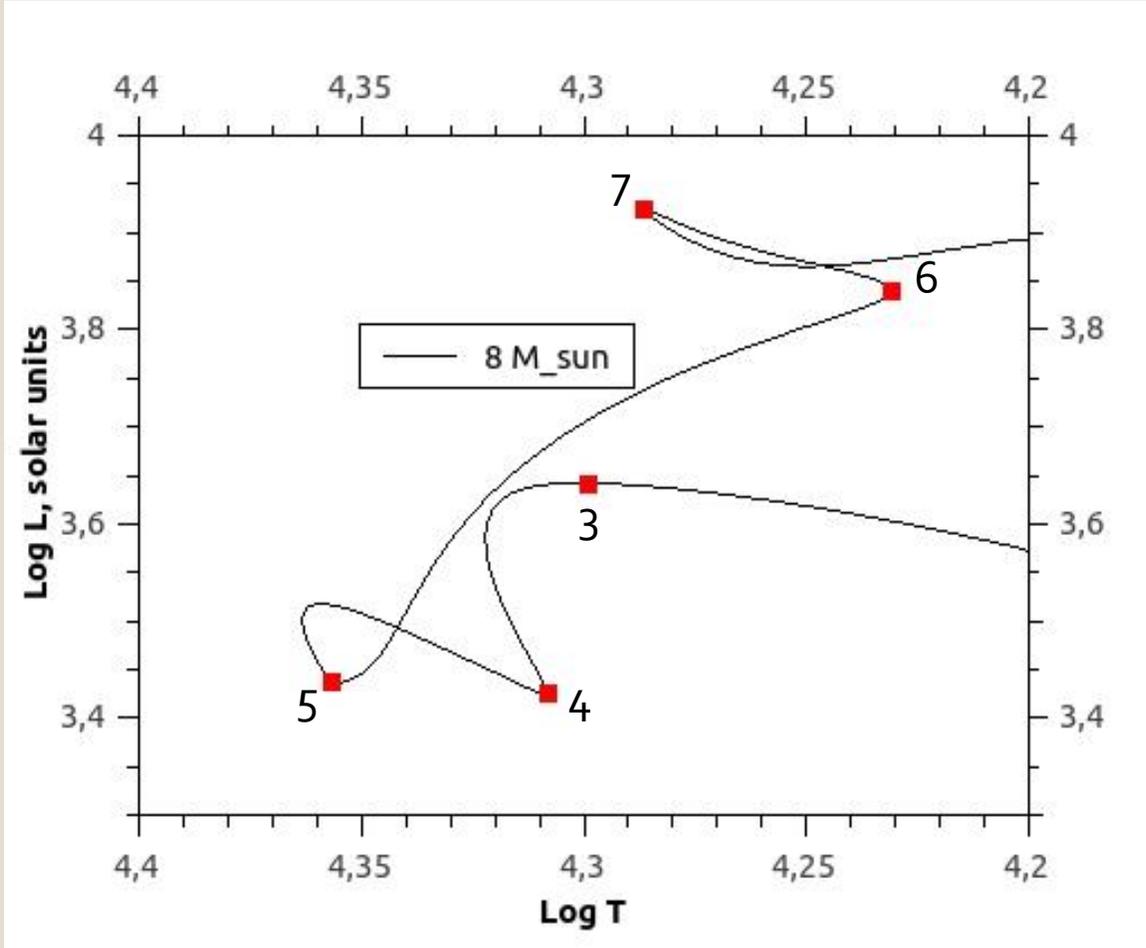


- 1 Начало
- 2 До-ГП
- 3 До-ГП
- 4 Вблизи начала ГП
- 5 Началось активное горение Н
- 6 Конец горения водорода. Сжатие
- 7 Сжатие заканчивается. Выход на КГ

- 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 Исчерпание гелия в центре
- 15 Начало TPAGB или начало горения C



ЧТО ЗА «КРЮК»?



У звезд с $M > 1.25$ солнечных конвективные ядра. Поэтому исчерпание 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.

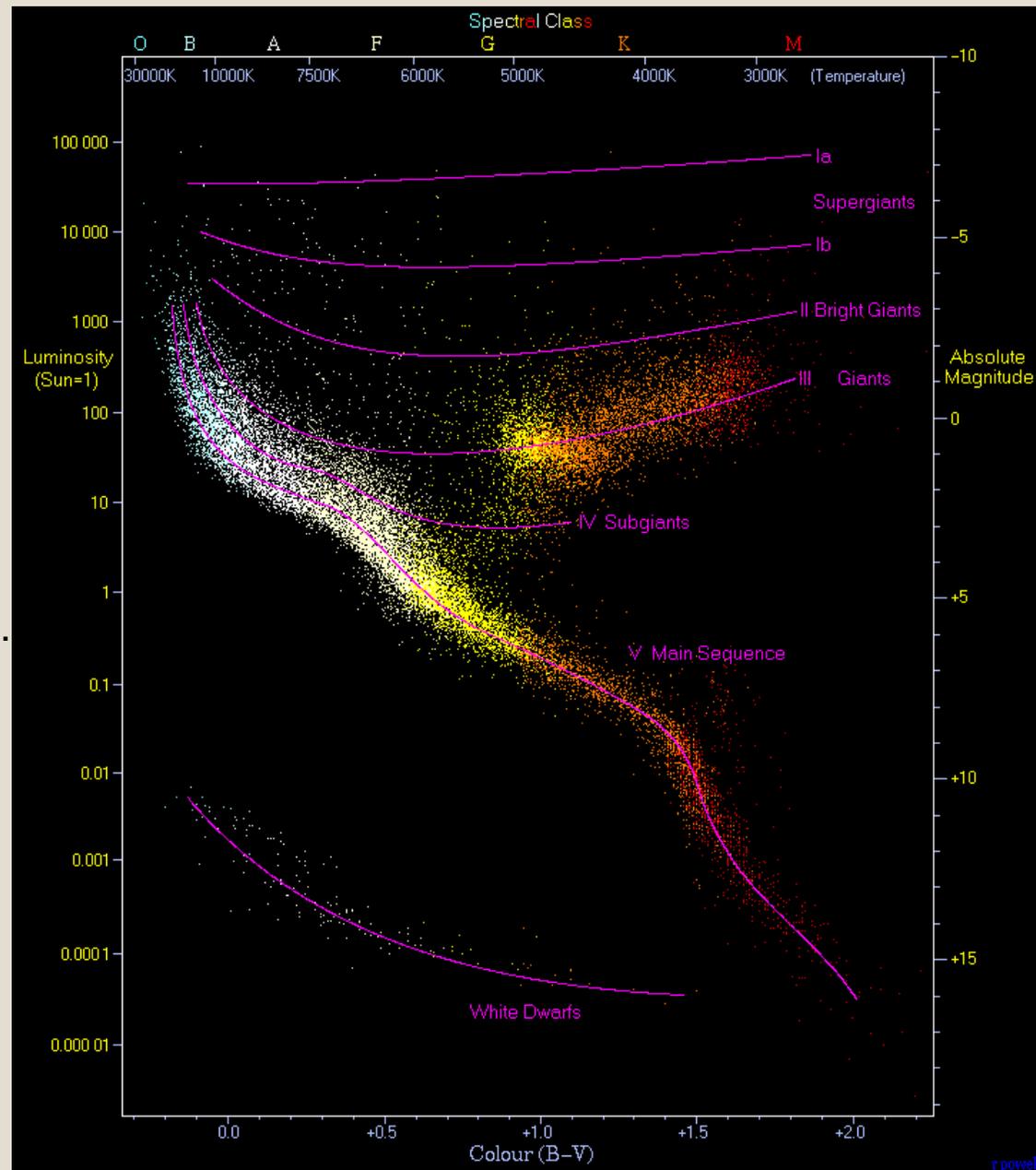
Это приводит к резкому сжатию – начинается RGB.

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.



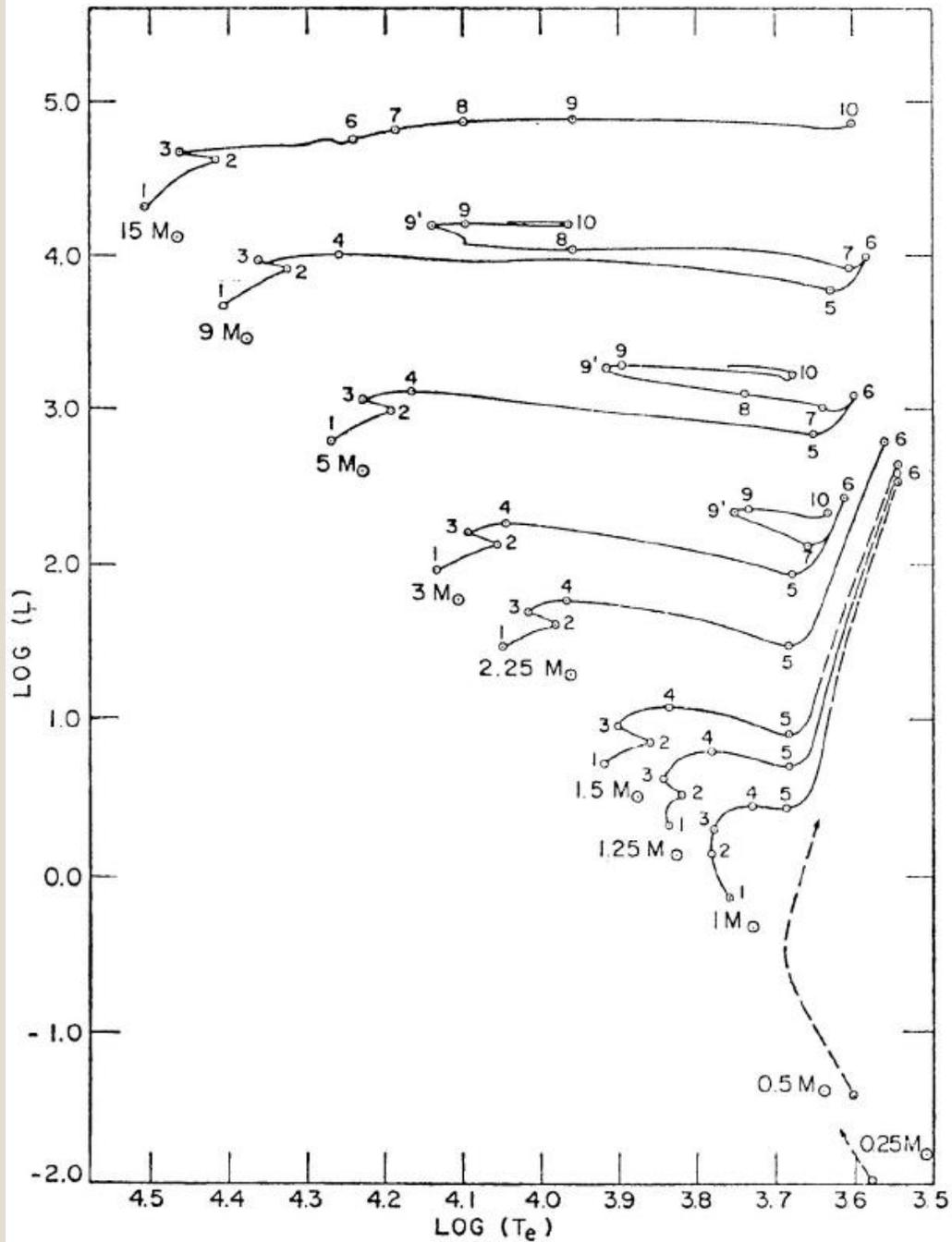
ХАРАКТЕРНЫЕ ВРЕМЕНА

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 меньше и меньше 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

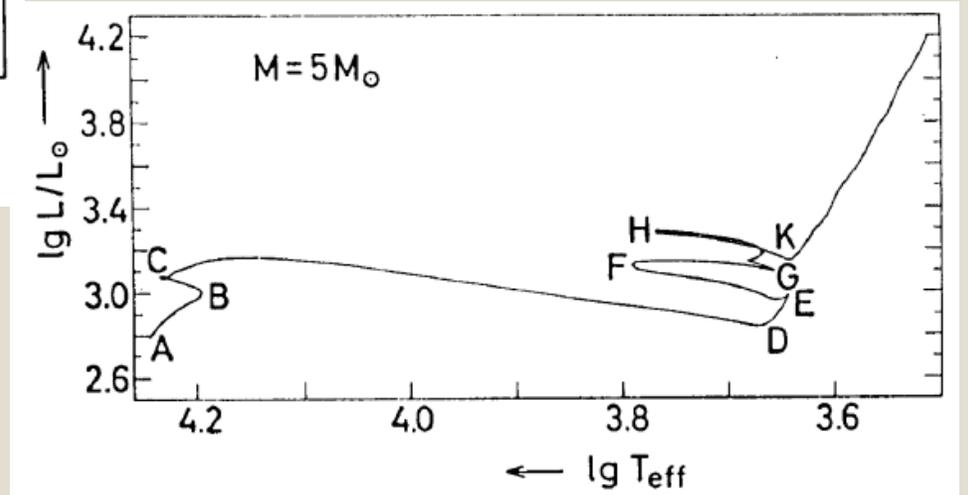
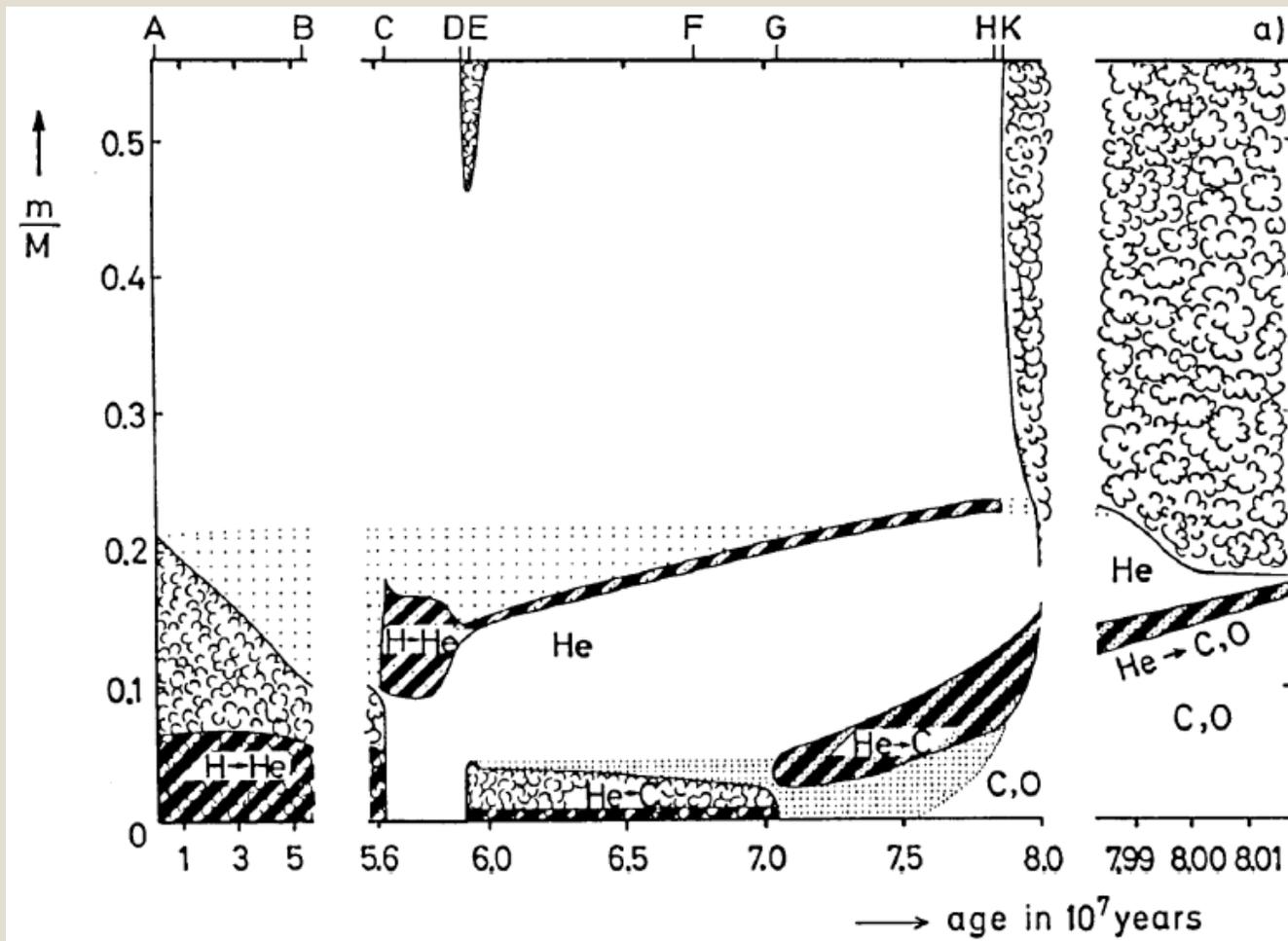


Mass (M_\odot)	Interval ($i-j$)				
	(1-2)	(2-3)	(3-4)	(4-5)	(5-6)
15	1.010 (7)	2.270 (5)		7.55 (4)	
9	2.144 (7)	6.053 (5)	9.113 (4)	1.477 (5)	6.552 (4)
5	6.547 (7)	2.173 (6)	1.372 (6)	7.532 (5)	4.857 (5)
3	2.212 (8)	1.042 (7)	1.033 (7)	4.505 (6)	4.238 (6)
2.25	4.802 (8)	1.647 (7)	3.696 (7)	1.310 (7)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

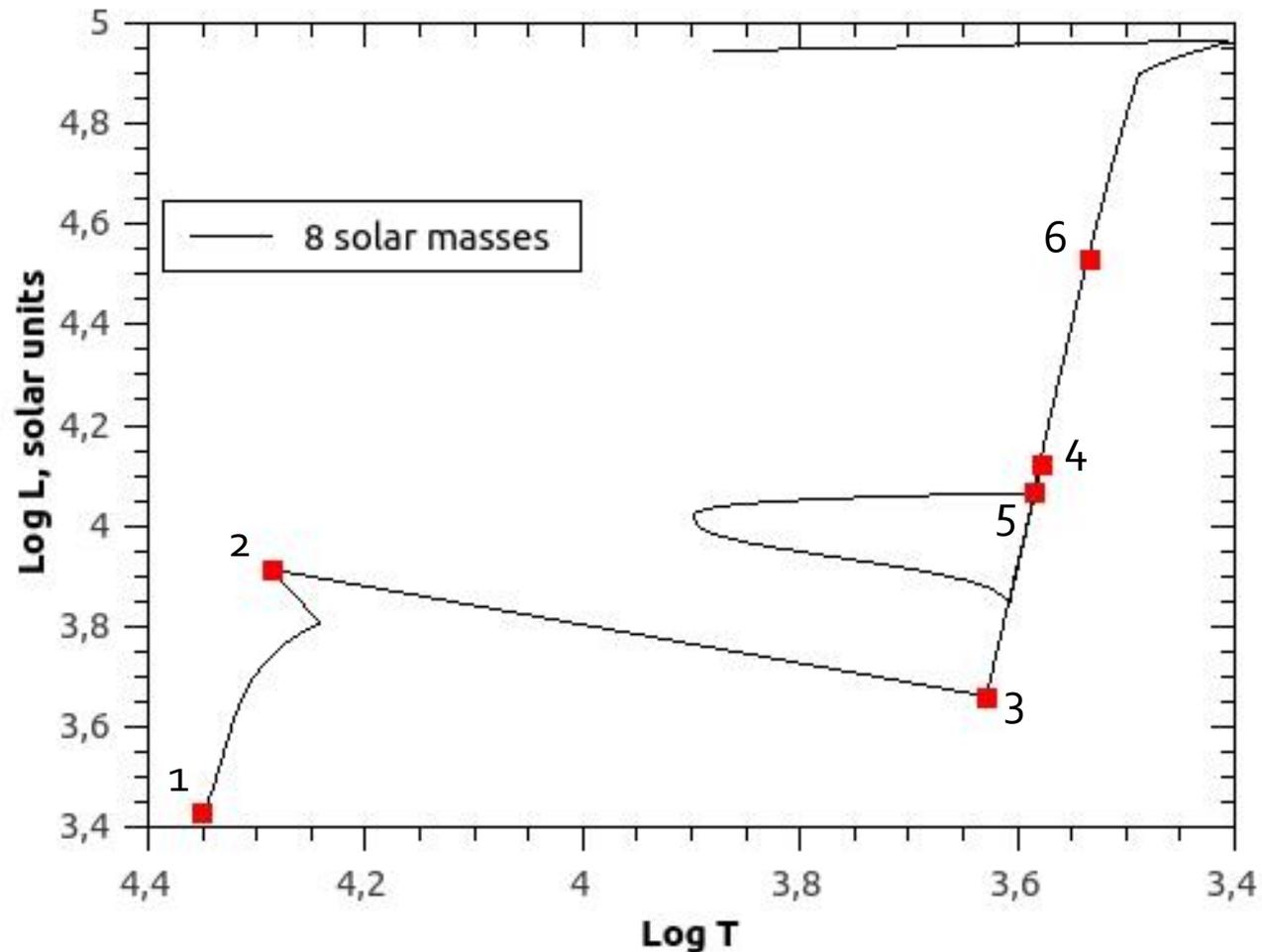
Mass (M_\odot)	Interval ($i-j$)			
	(6-7)	(7-8)	(8-9)	(9-10)
15	7.17 (5)	6.20 (5)	1.9 (5)	3.5 (4)
9	4.90 (5)	9.50 (4)	3.28 (6)	1.55 (5)
5	6.05 (6)	1.02 (6)	9.00 (6)	9.30 (5)
3	2.51 (7)		4.08 (7)	6.00 (6)

ЭВОЛЮЦИЯ СТРУКТУРЫ ЗВЕЗДЫ

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

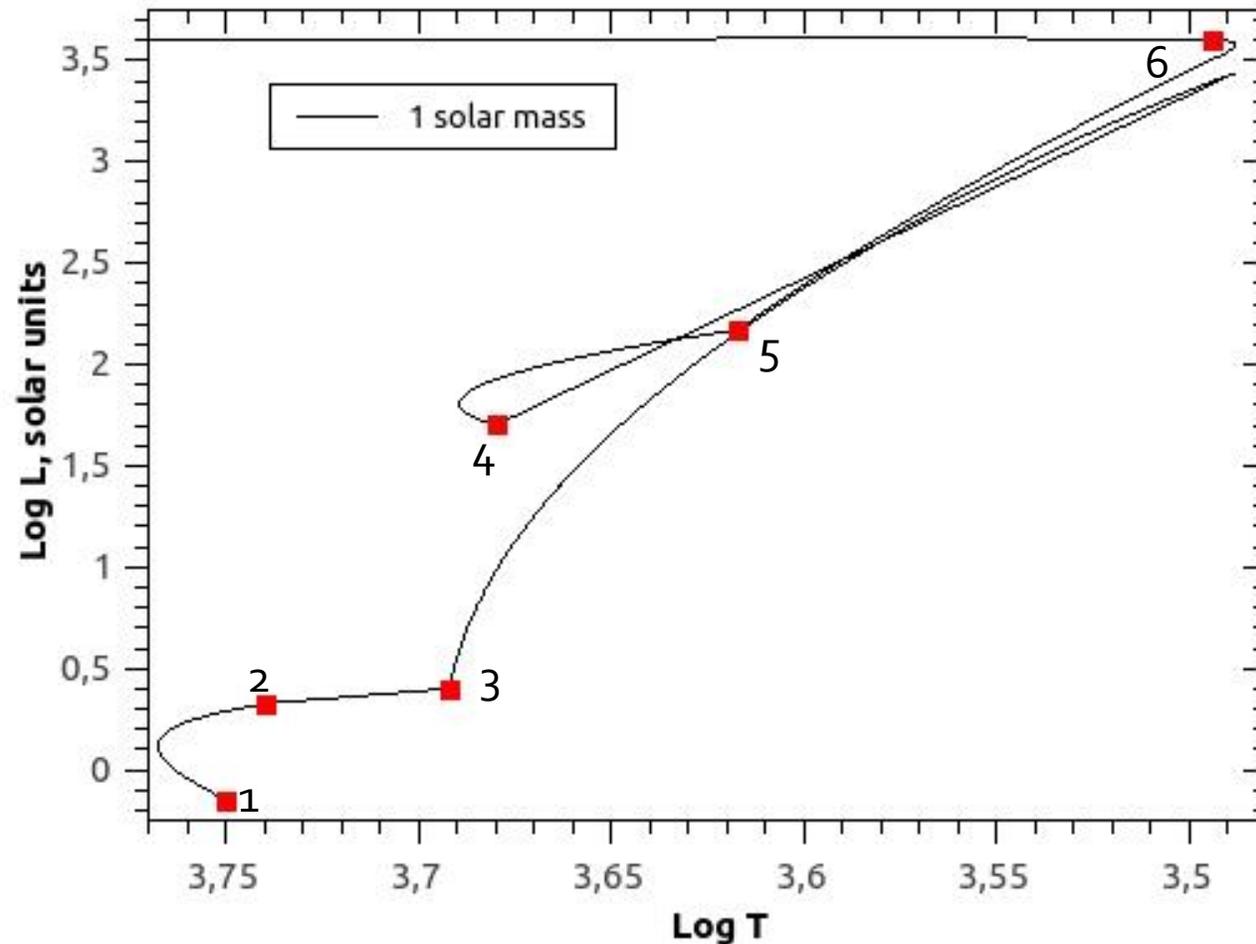


СТАДИИ SSE



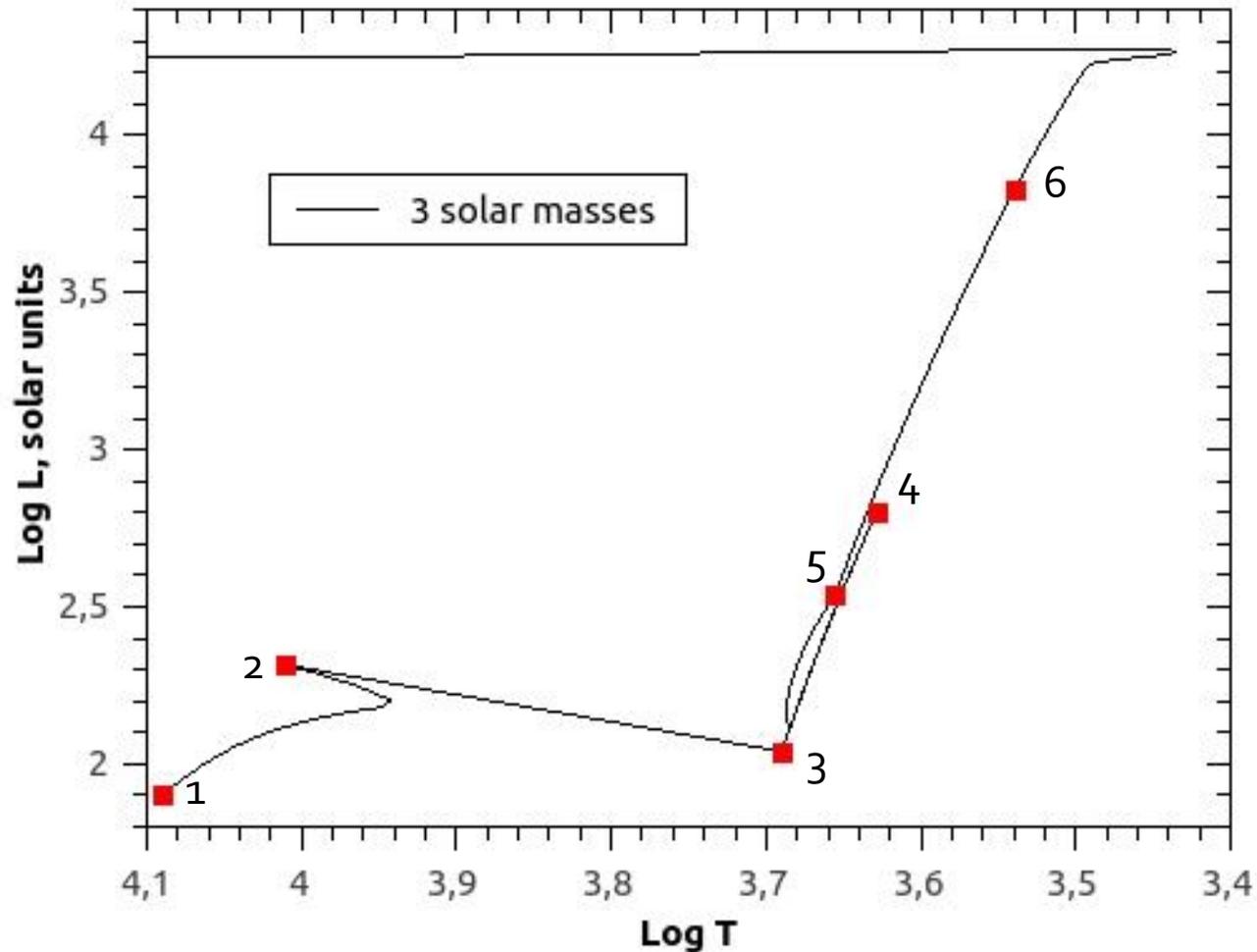
- 0 – ГП, $M < 0.7$
- 1 – ГП, $M > 0.7$
- 2 – Провал Герцшпрунга
- 3 – Первая ветвь гигантов
- 4 – Горение гелия в ядре
- 5 – EAGB
- 6 – TRAGB
- 7 – Гелиевое ядро (гелиевая ГП)
- 8 – Провал Герцшпрунга для гелиевых звезд
- 9 – Ветвь гигантов для гелиевых звезд
- 10 – Гелиевый БК
- 11 – СО белый карлик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

СТАДИИ SSE

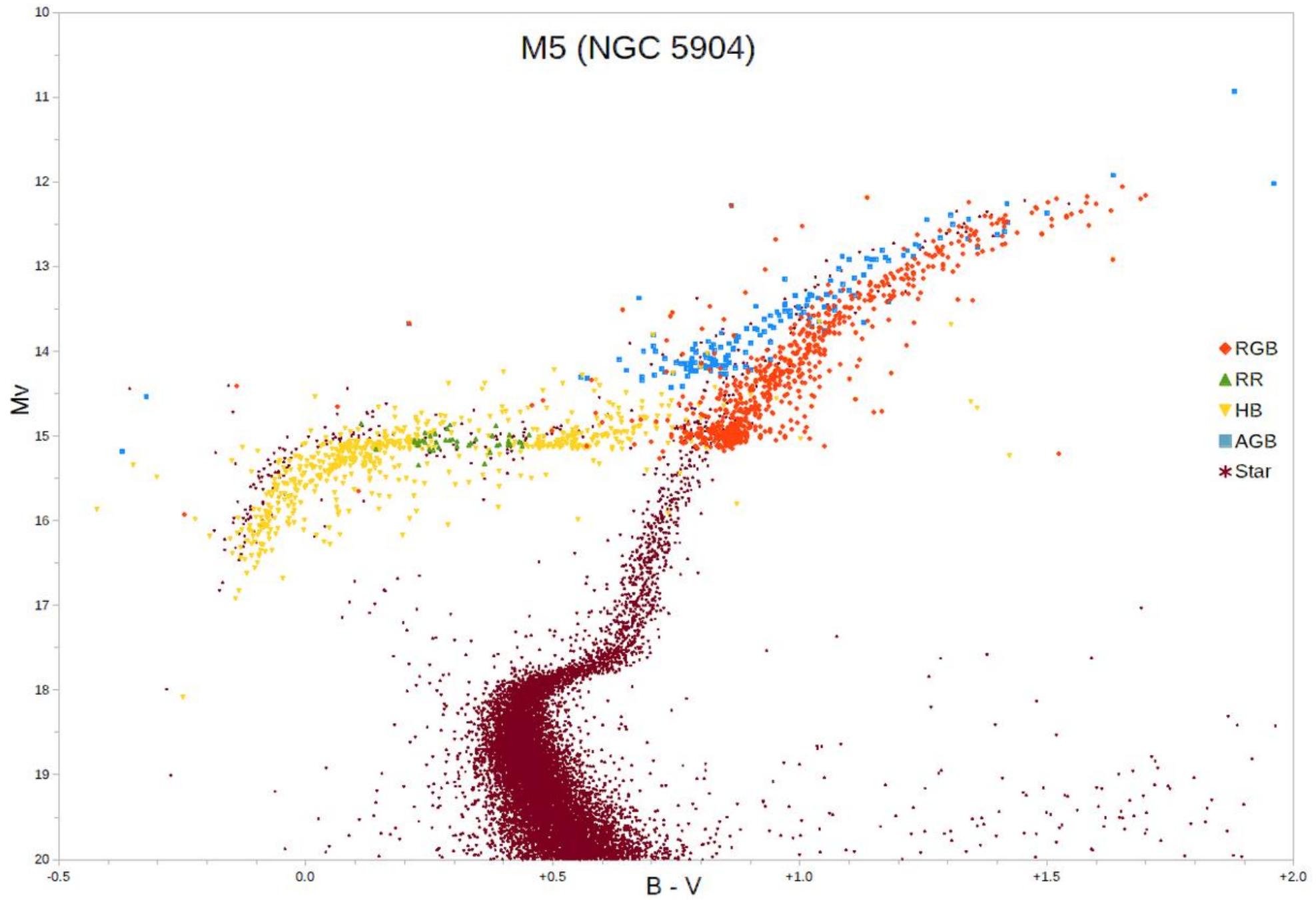


- 0 – ГП, $M < 0.7$
- 1 – ГП, $M > 0.7$
- 2 – Провал Герцшпрунга
- 3 – Первая ветвь гигантов
- 4 – Горение гелия в ядре
- 5 – EAGB
- 6 – TRAGB
- 7 – Гелиевое ядро (гелиевая ГП)
- 8 – Провал Герцшпрунга для гелиевых звезд
- 9 – Ветвь гигантов для гелиевых звезд
- 10 – Гелиевый БК
- 11 – СО белый карлик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

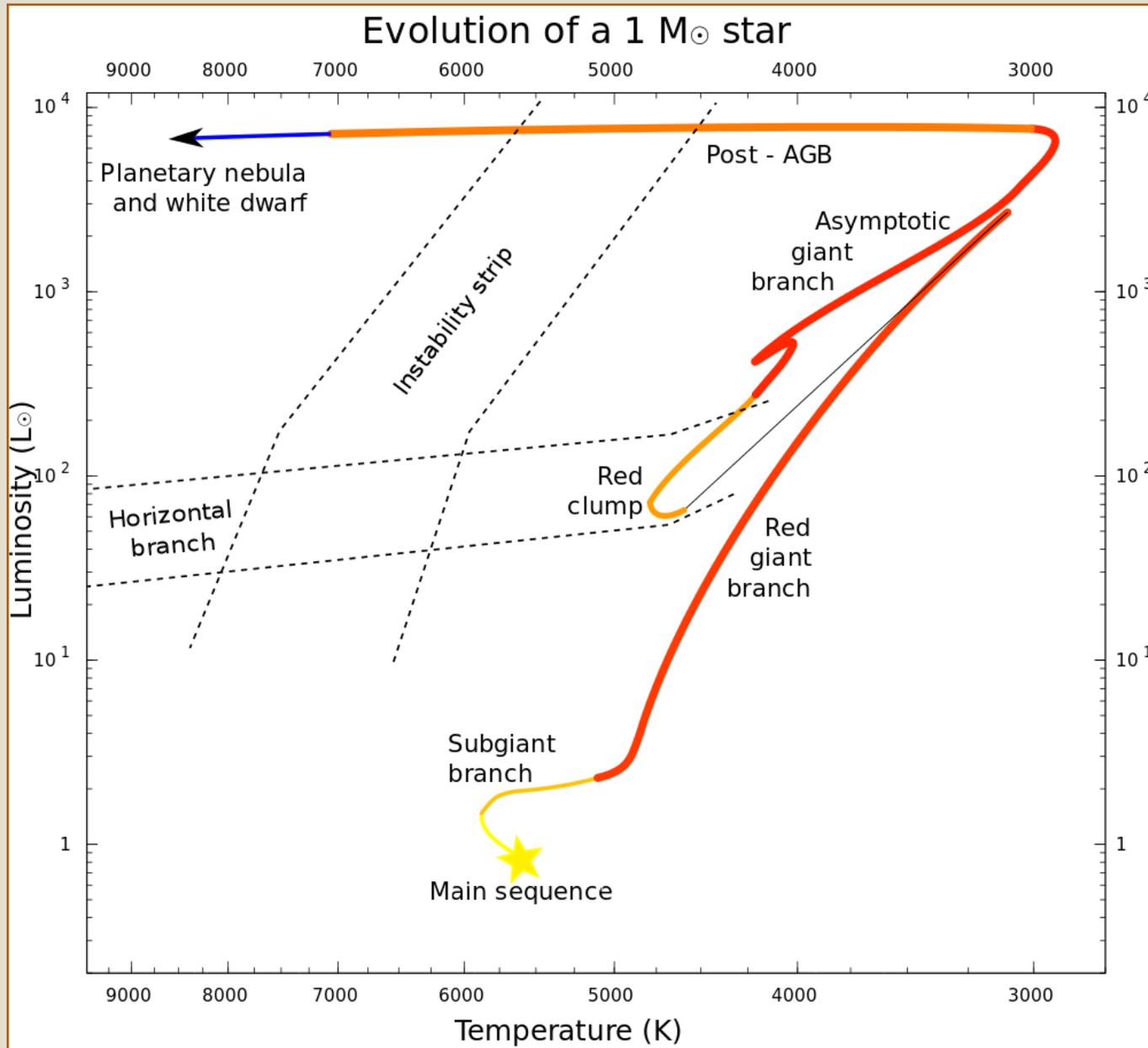
СТАДИИ SSE



- 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



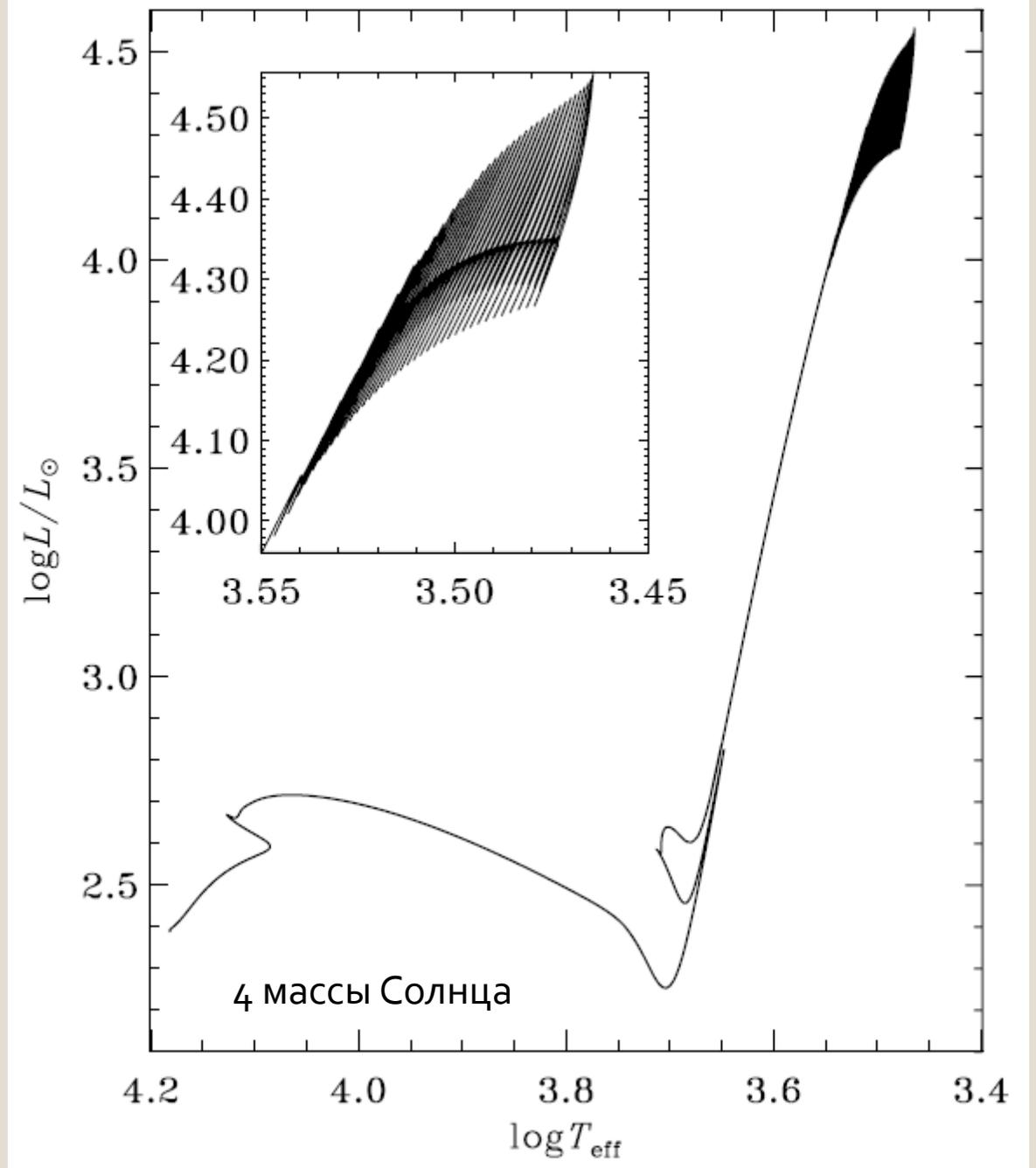
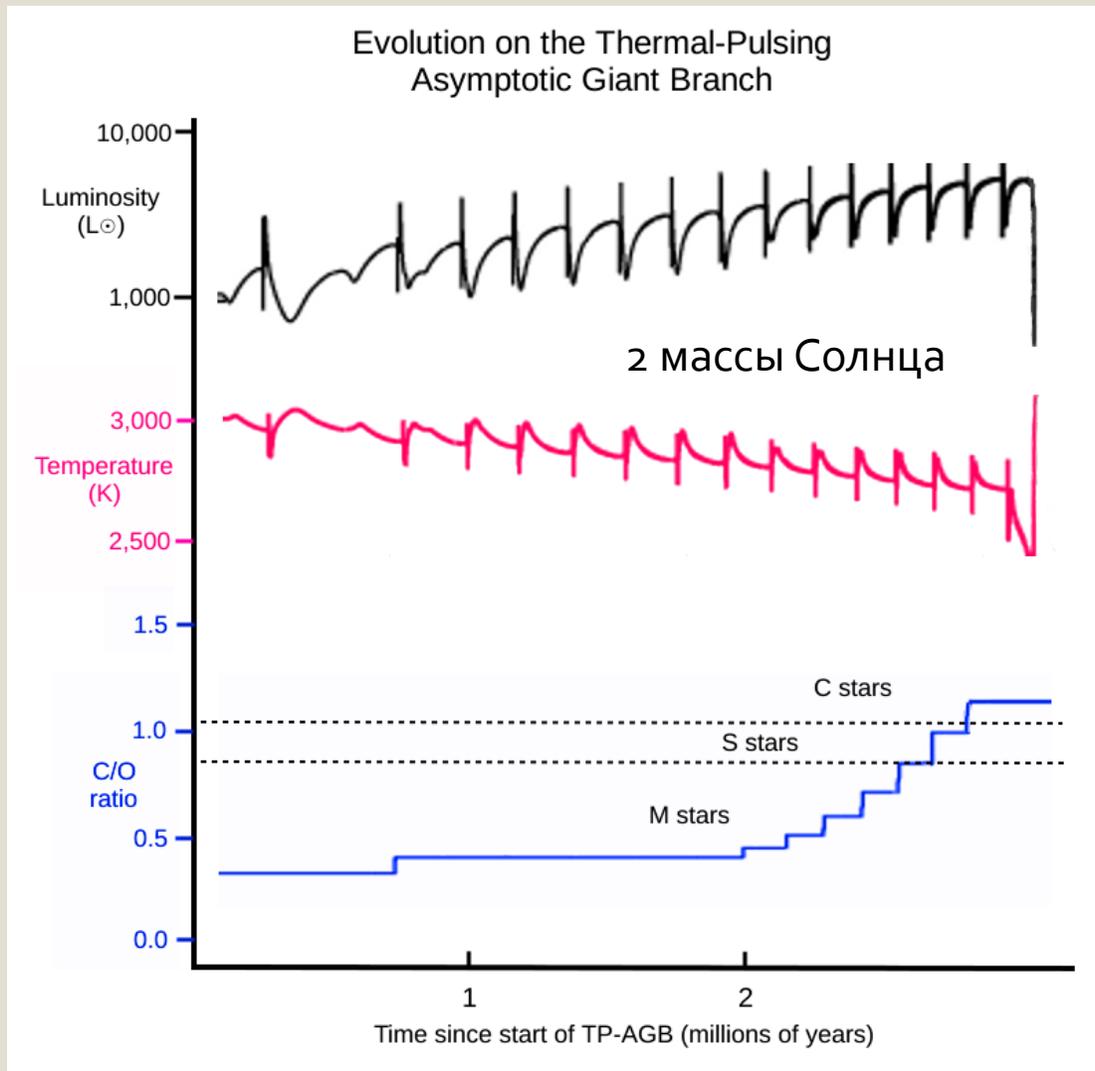
ГОРИЗОНТАЛЬНАЯ ВЕТВЬ



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.

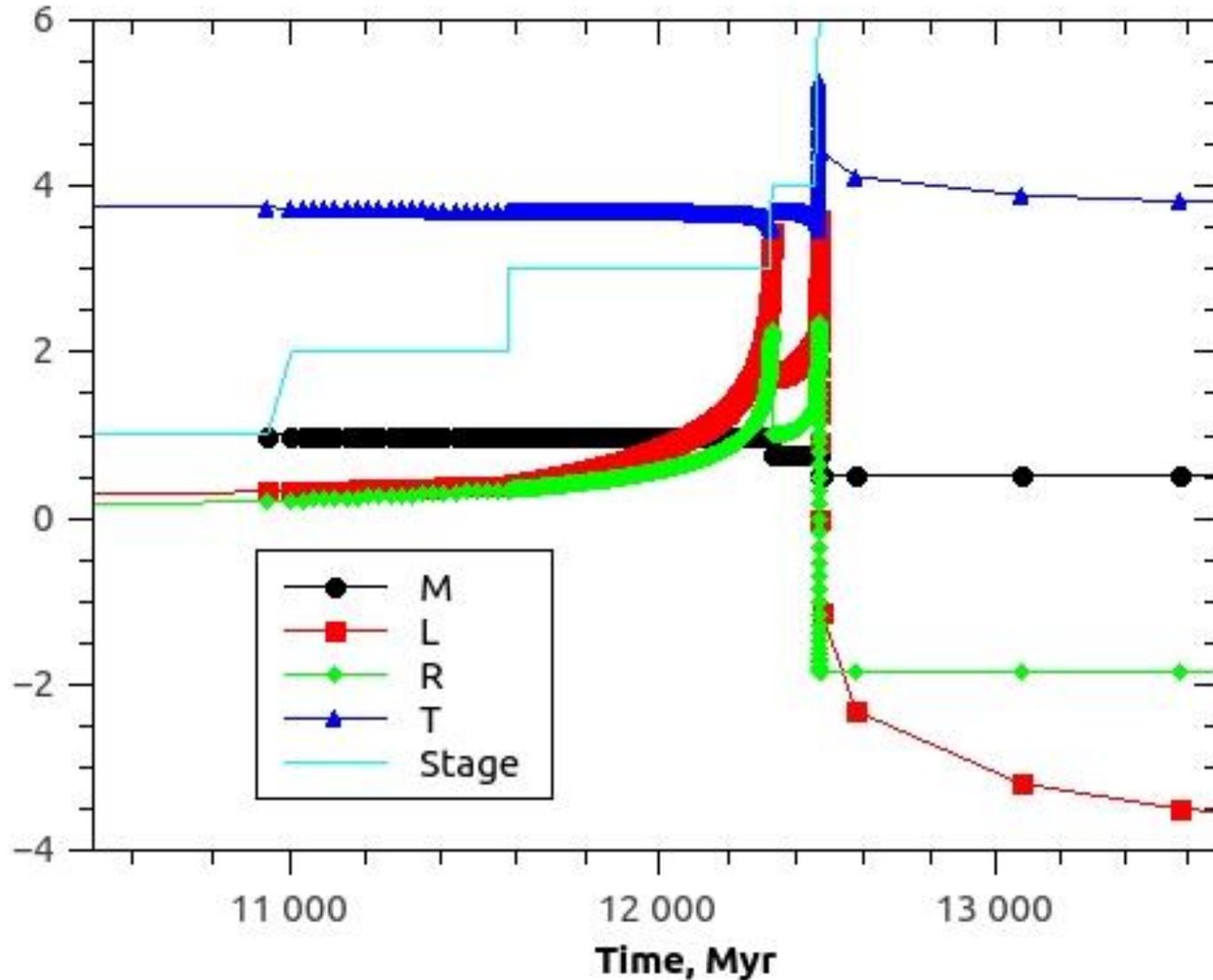
Типичное время жизни на горизонтальной ветви - 100 млн. лет.

TP-AGB



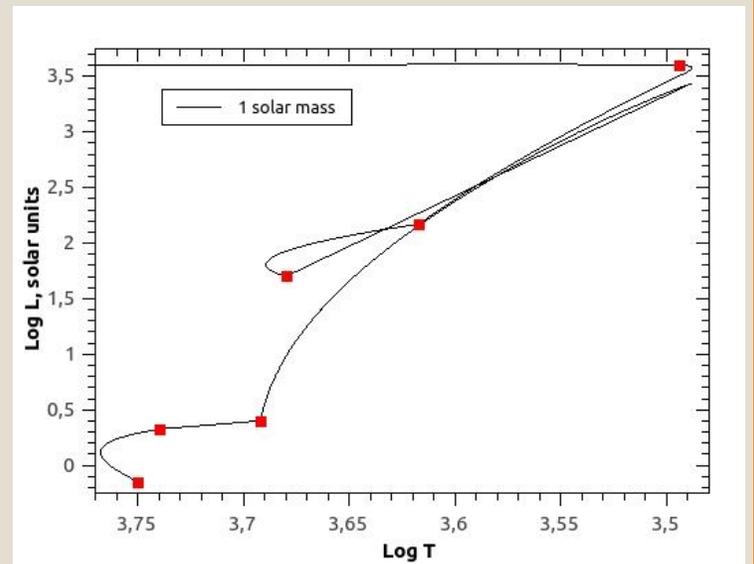
Горение водорода в слоевом источнике дает гелий. Включается гелиевый слоевой источник. Вспышка. Расширение приводит к выключению источников.

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

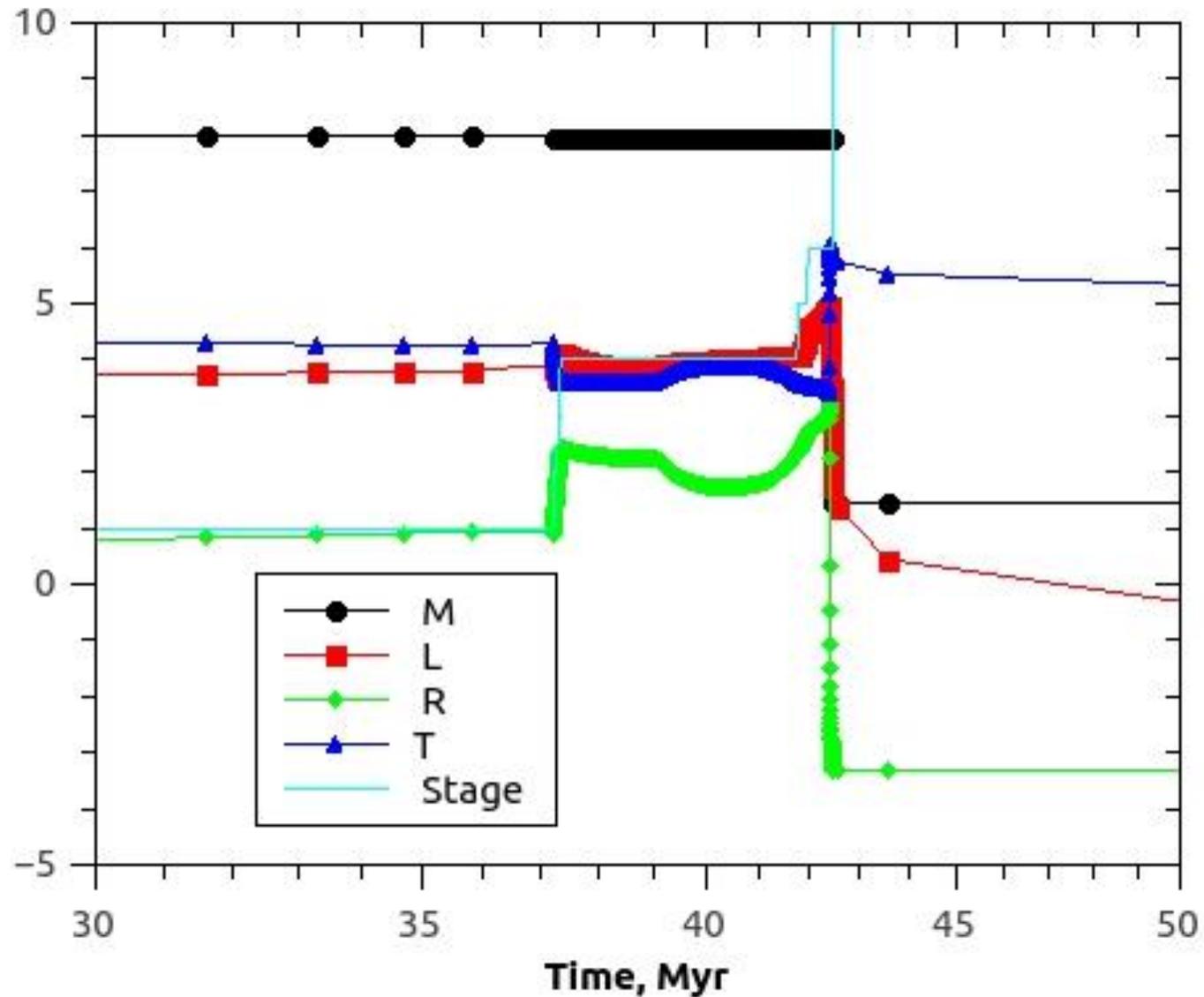


Расчеты проведены с помощью программы SSE.

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

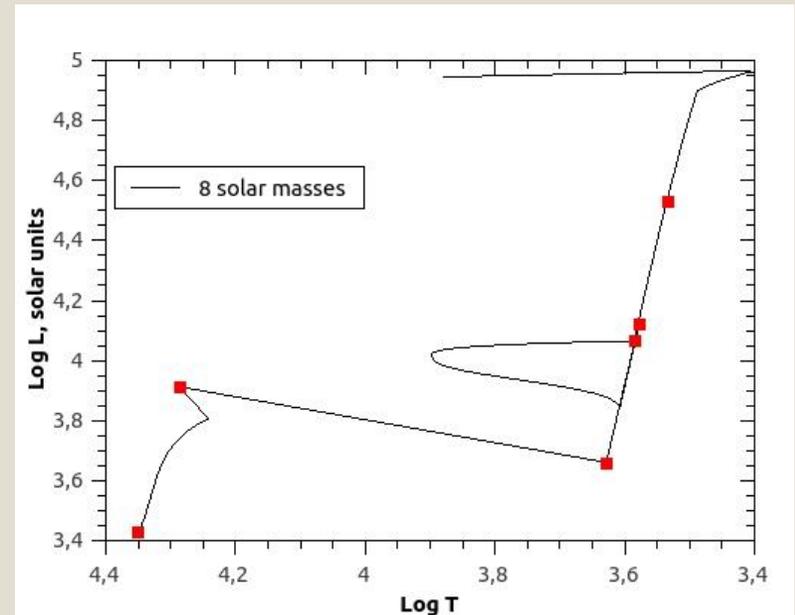


ЭВОЛЮЦИЯ ЗВЕЗДЫ МАССОЙ $8M_{\text{SUN}}$

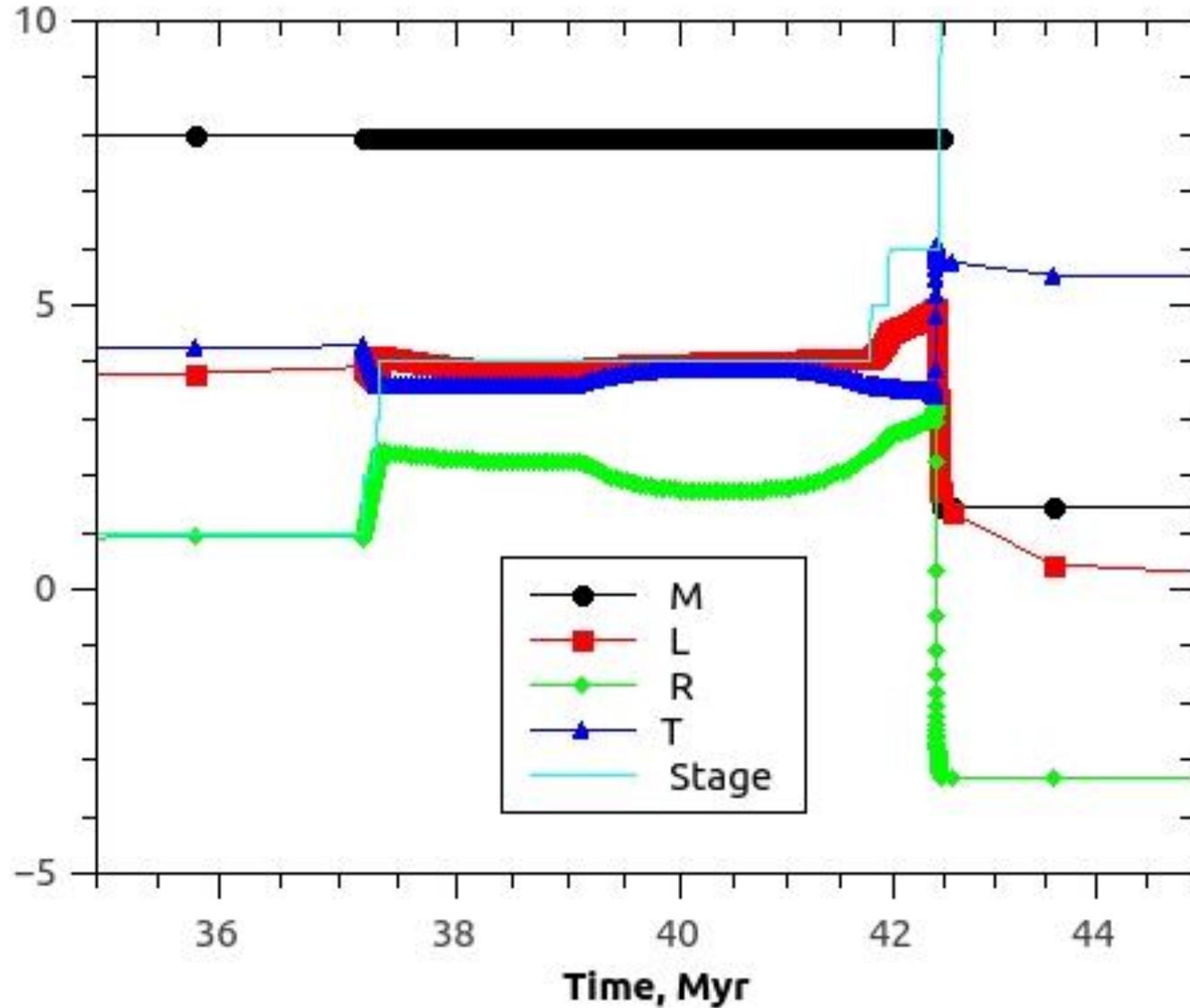


Расчеты проведены с помощью программы SSE.

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

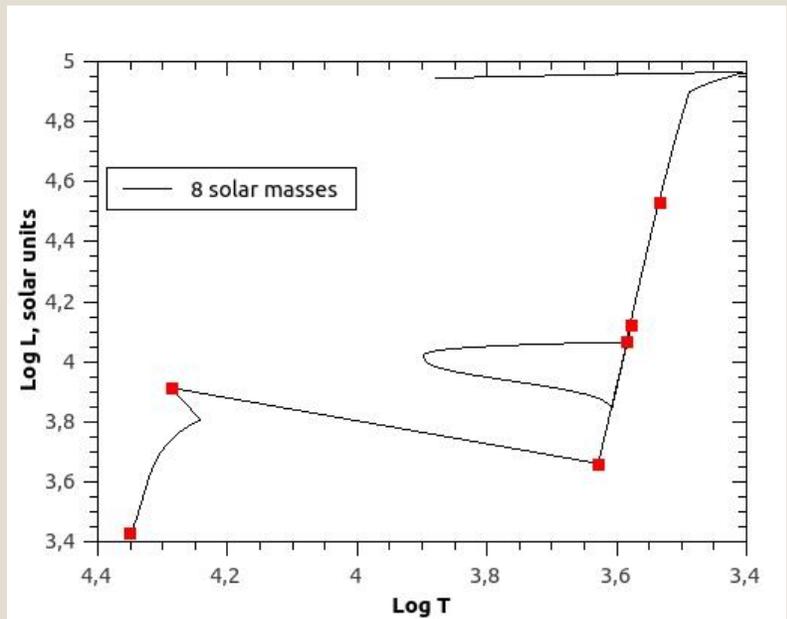


ЭВОЛЮЦИЯ ЗВЕЗДЫ МАССОЙ $8M_{\text{SUN}}$

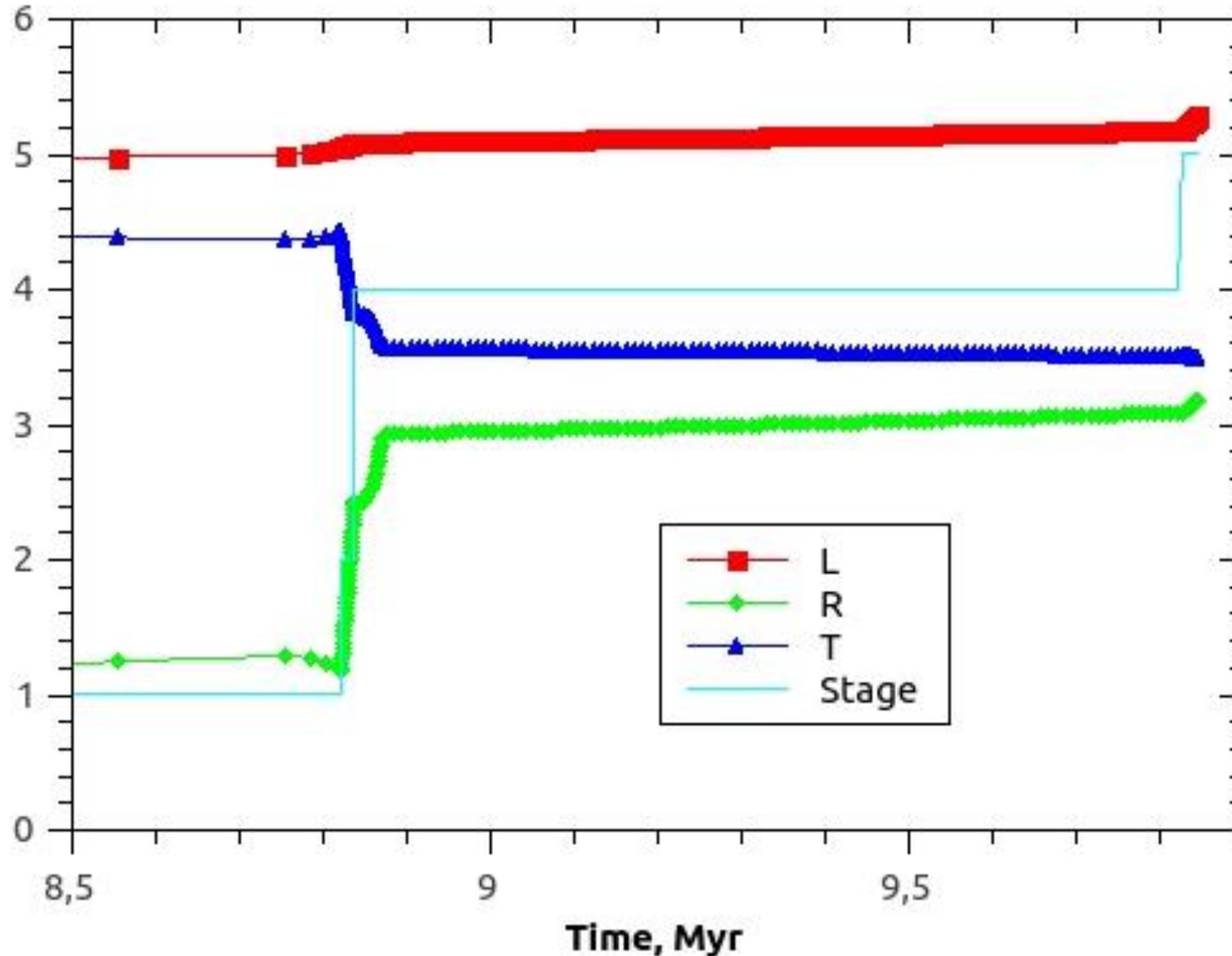


Расчеты проведены с помощью программы SSE.

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



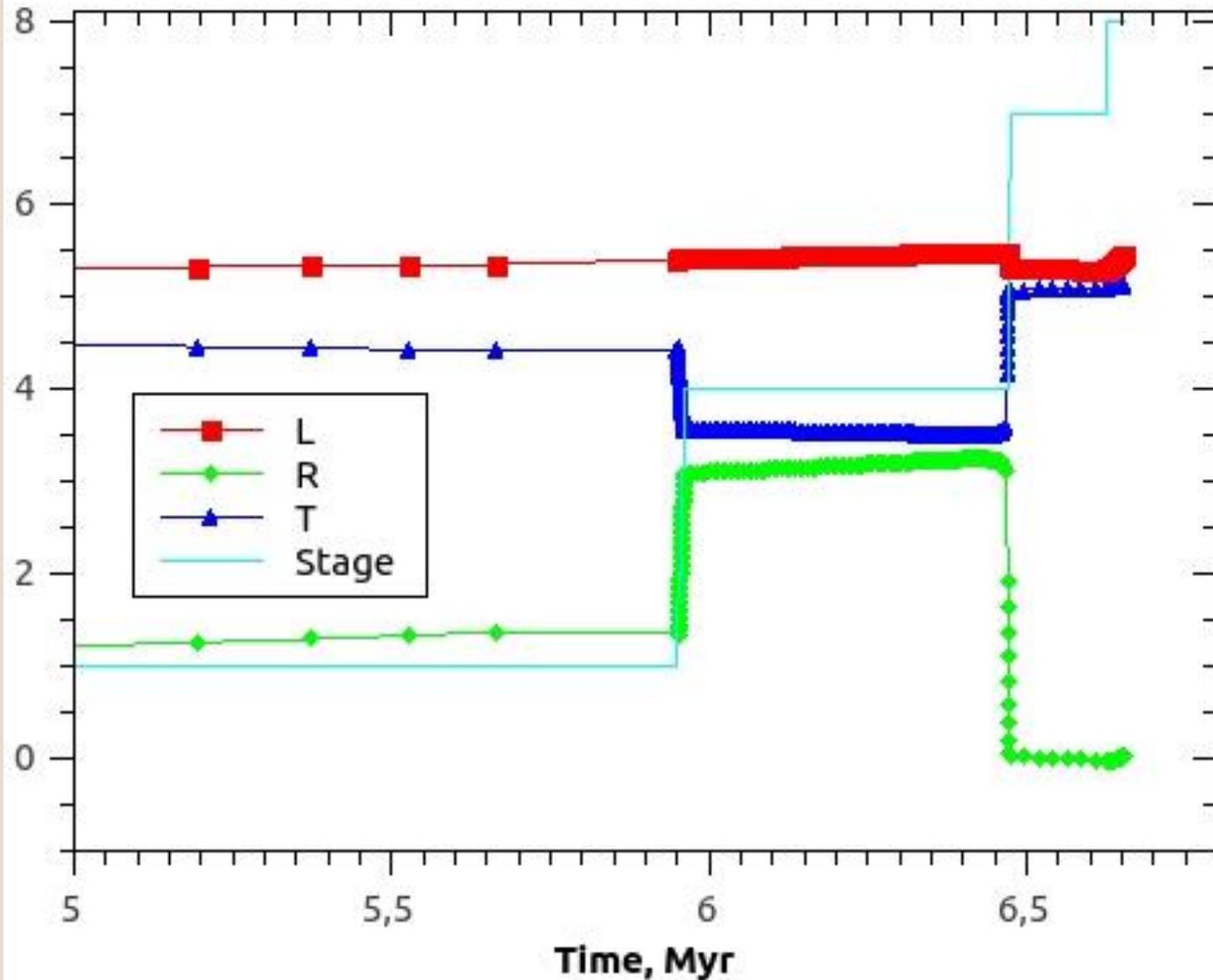
ЭВОЛЮЦИЯ ЗВЕЗДЫ МАССОЙ $20M_{\text{SUN}}$



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

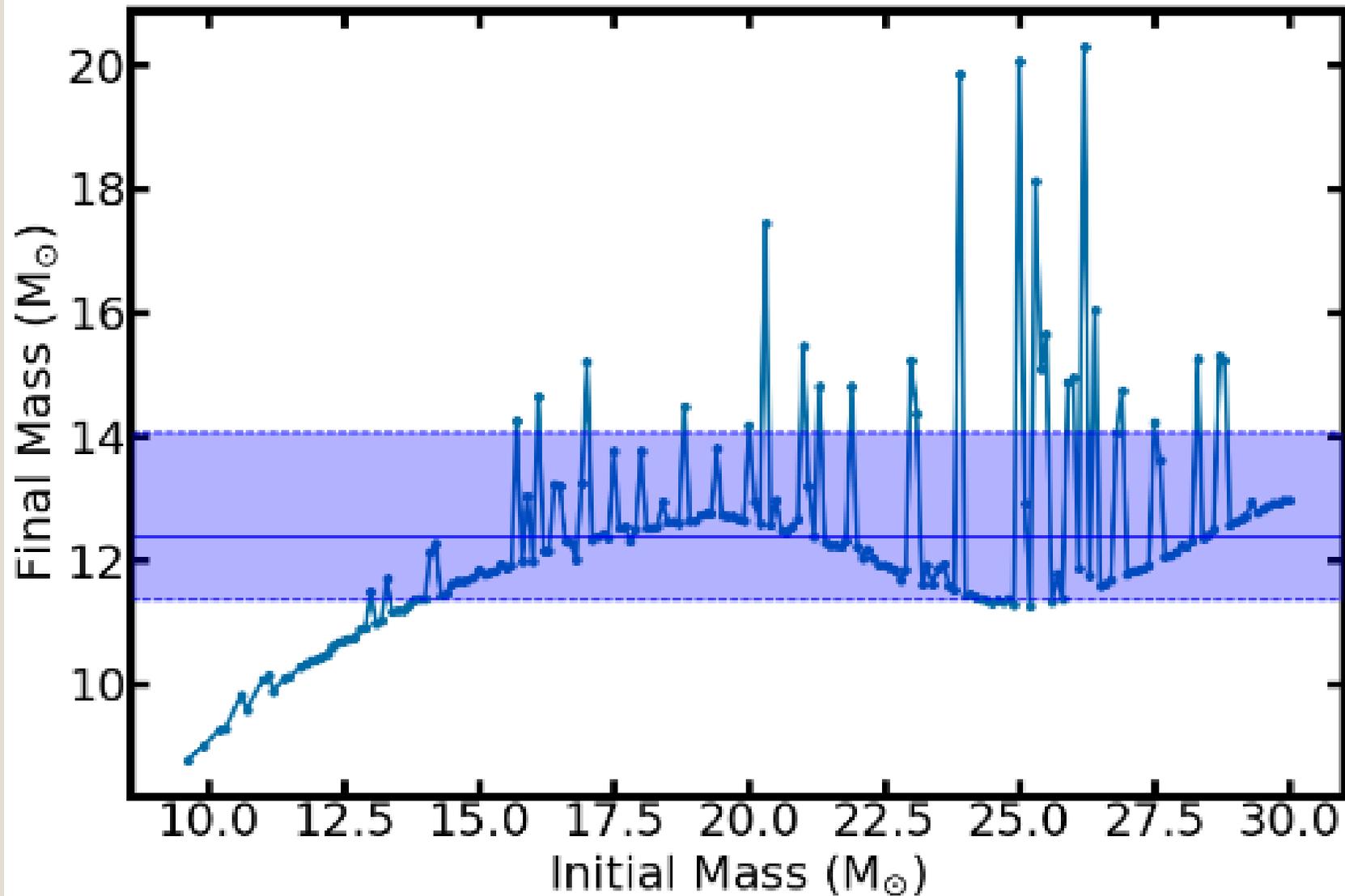
ЭВОЛЮЦИЯ ЗВЕЗДЫ МАССОЙ $30M_{\text{SUN}}$



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 – TRAGB
- 7 – Гелиевое ядро (гелиевая ГП)
- 8 – Провал Герцшпрунга для гелиевых звезд

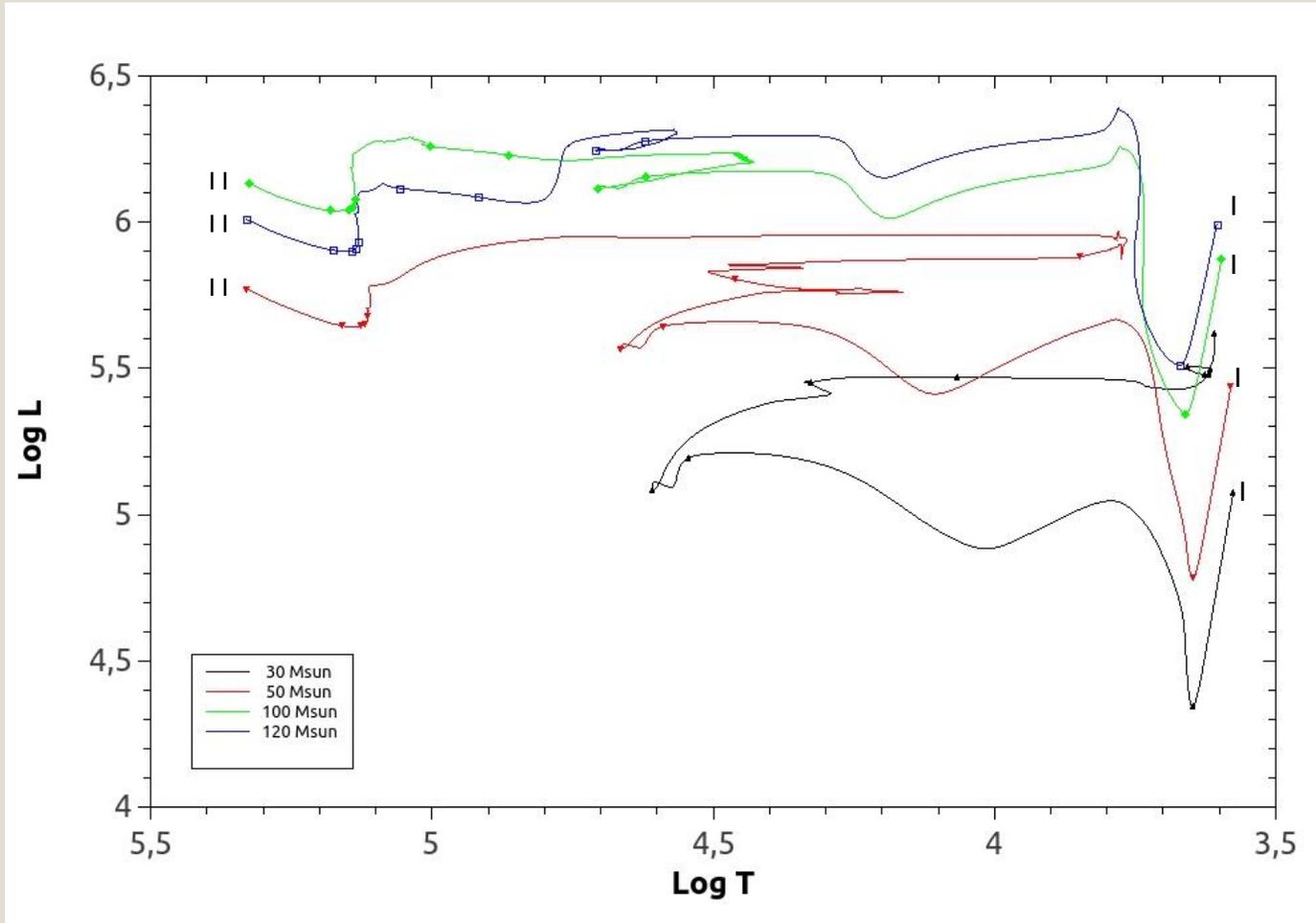
ПОТЕРЯ МАССЫ



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.

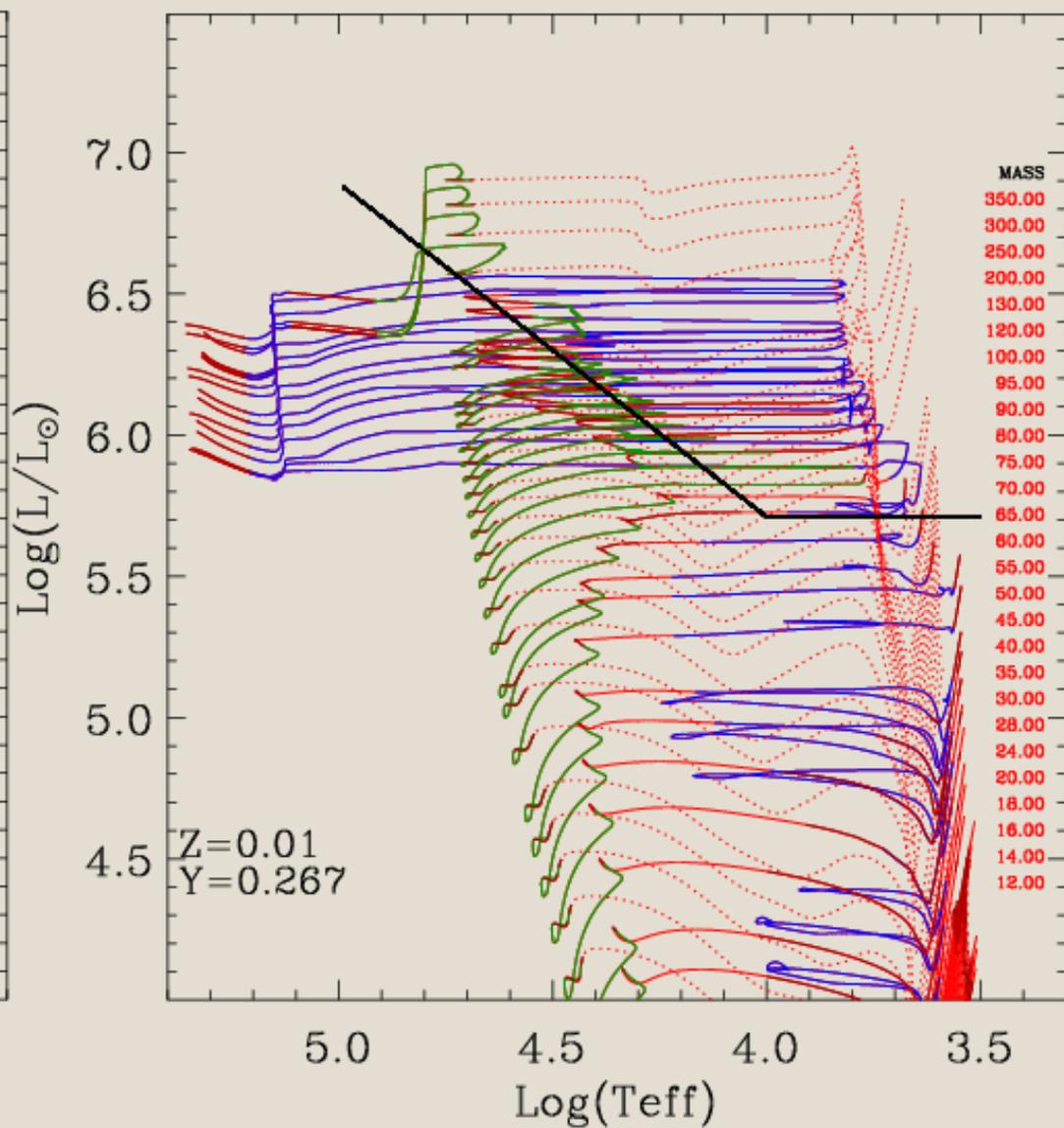
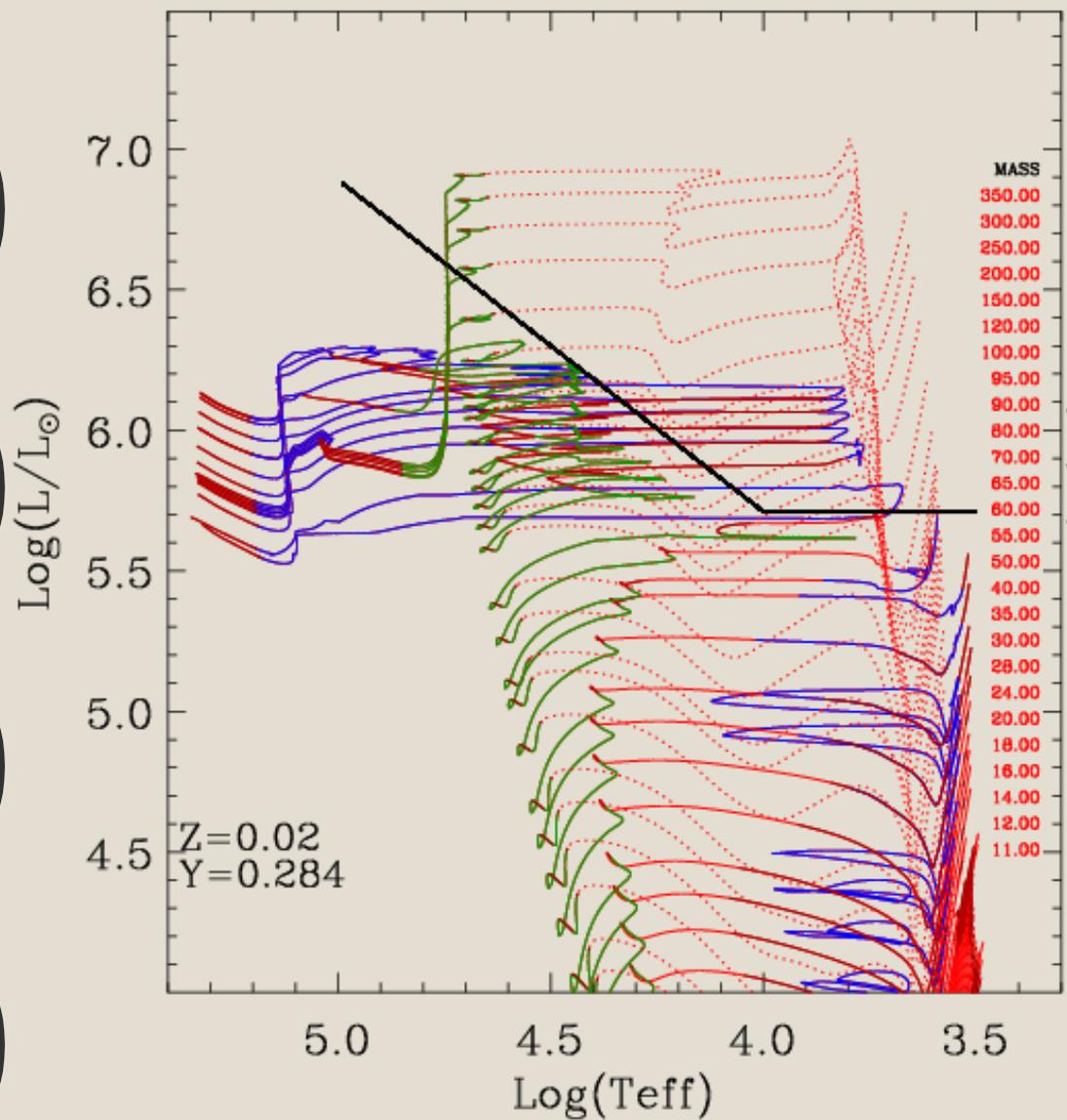
ЭВОЛЮЦИЯ МАССИВНЫХ ЗВЕЗД



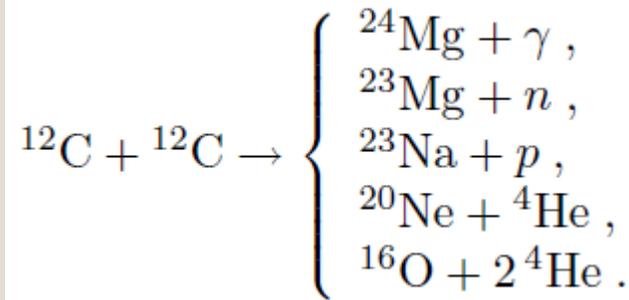
- 1 Начало
- 2 До-ГП
- 3 До-ГП
- 4 Вблизи начала ГП
- 5 Началось активное горение H
- 6 Конец горения водорода. Сжатие
- 7 Сжатие заканчивается. Выход на КГ
- 8 Основание ветви КГ
- 9 Red bump
- 10 Red bump end
- 11 Начало горения He (у массивных)

Использованы треки падуанской группы Bressan et al. (2012).
https://people.sissa.it/~sbressan/CAF09_V1.2S_M36_LT/

МАССИВНЫЕ ЗВЕЗДЫ

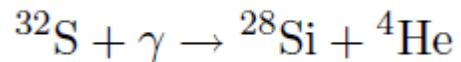
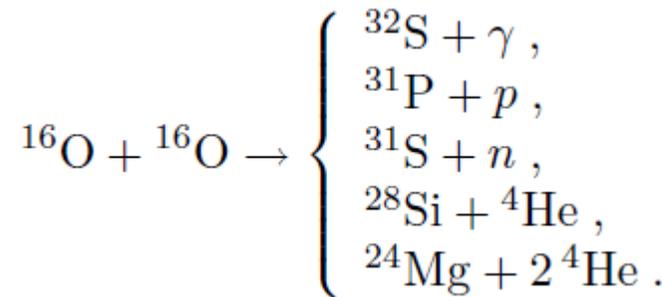


РЕАКЦИИ В МАССИВНЫХ ЗВЕЗДАХ

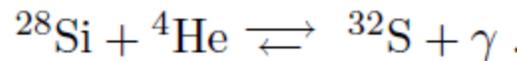


Первая стадия – горение углерода. Углеродное ядро при $M > 10 M_{\text{Solar}}$ невырожденное.

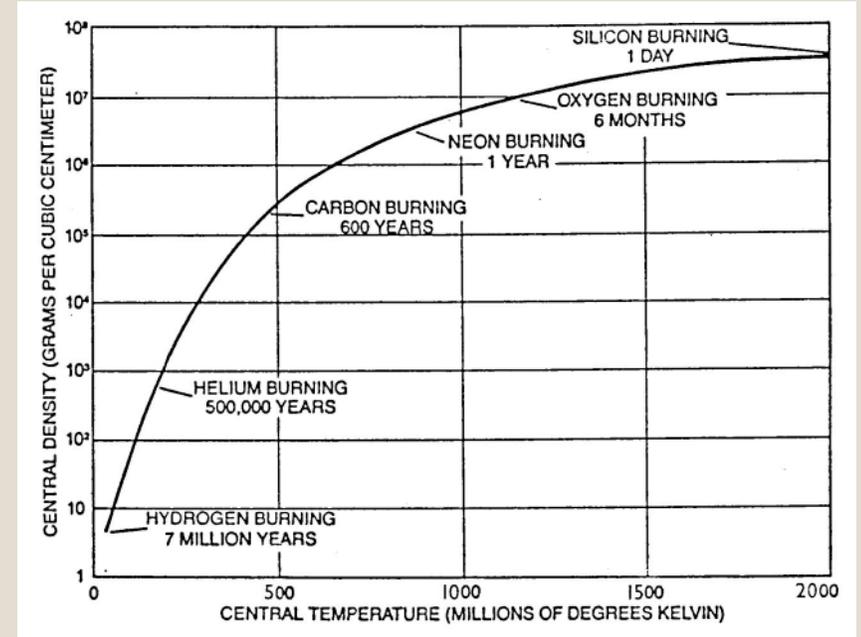
При миллиарде градусов начинается горение кислорода.



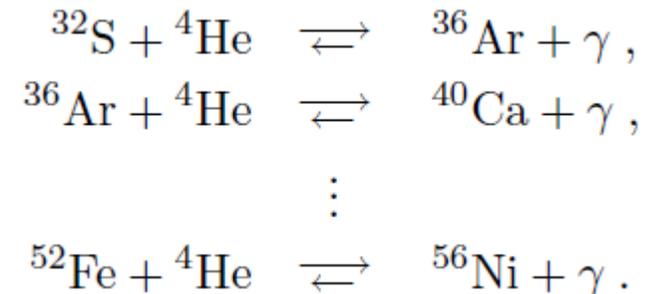
Фотодиссоциация приводит к появлению альфа-частиц.



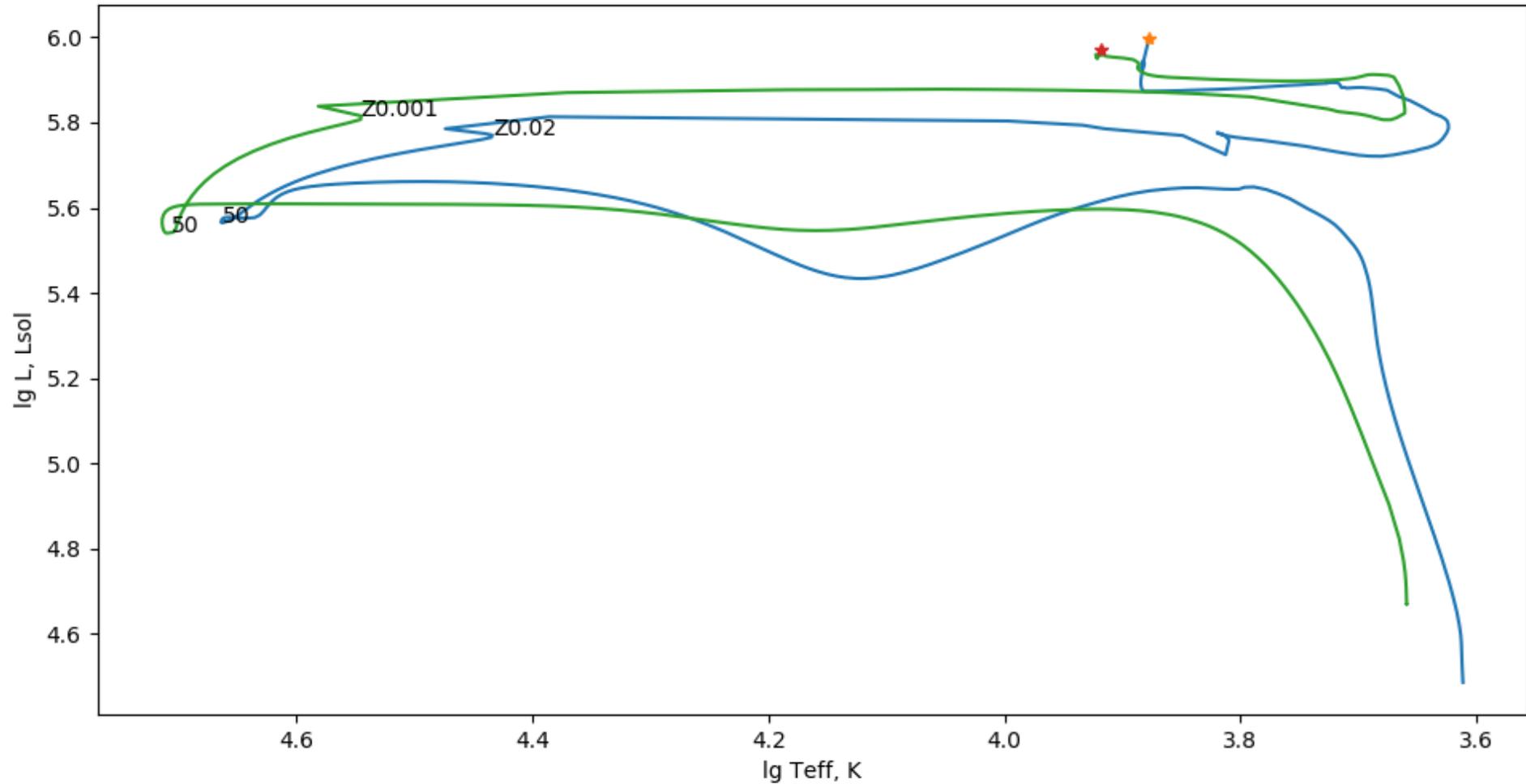
Наконец, начинаются реакции, доходящие до элементов группы железа.



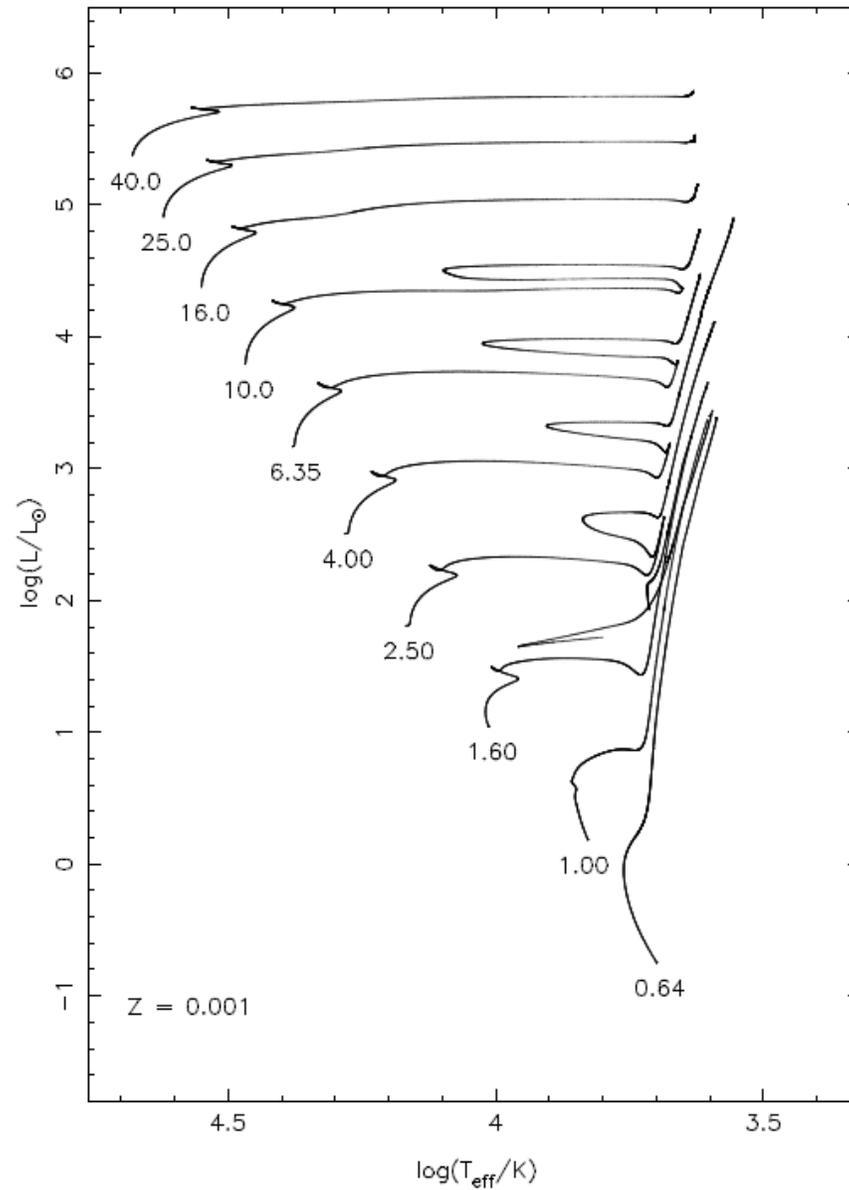
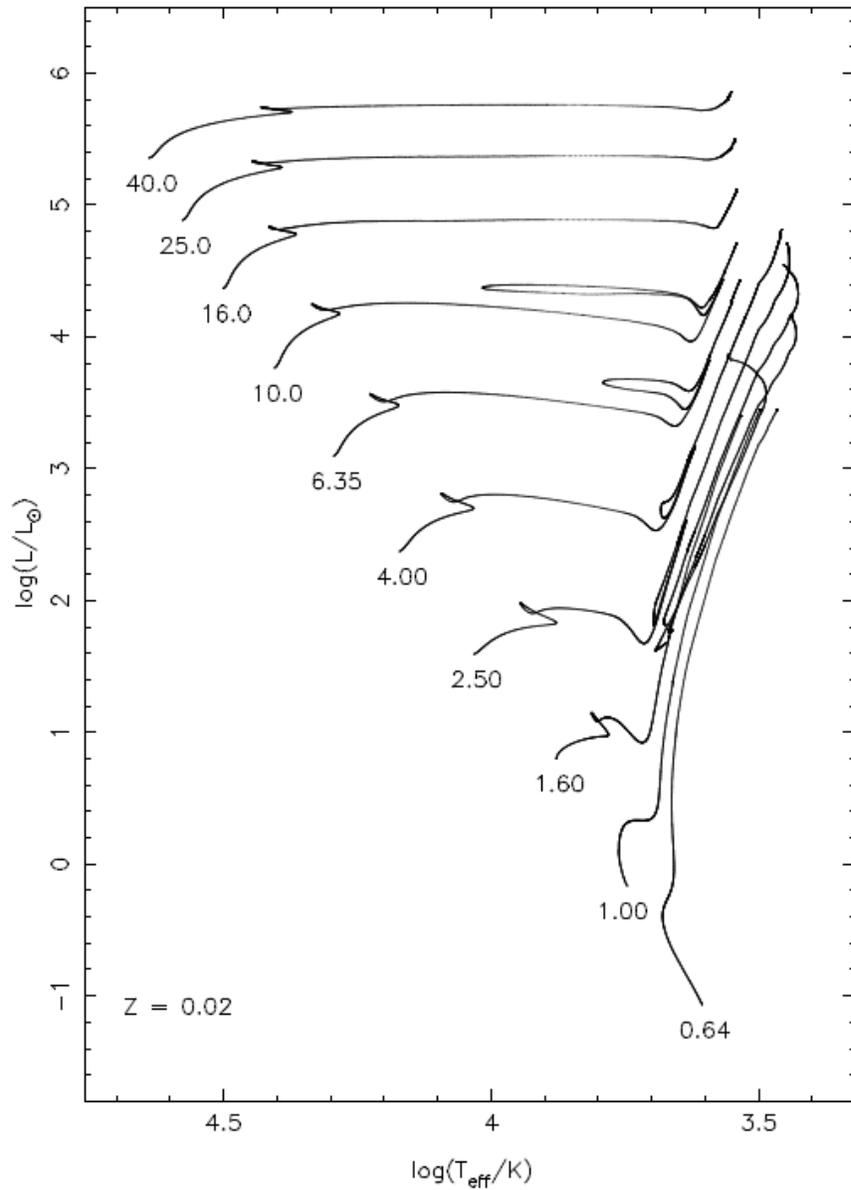
25 масс Солнца



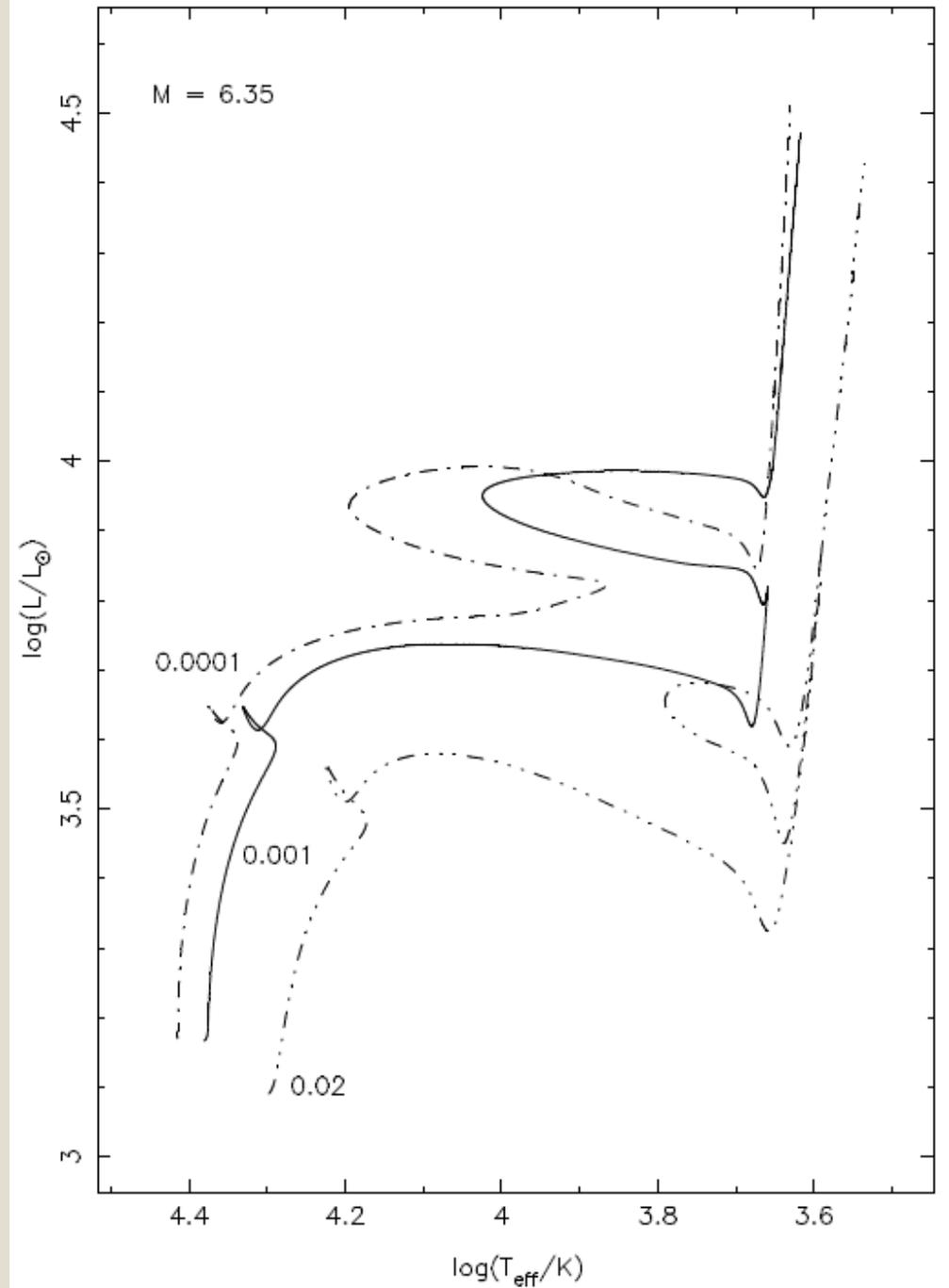
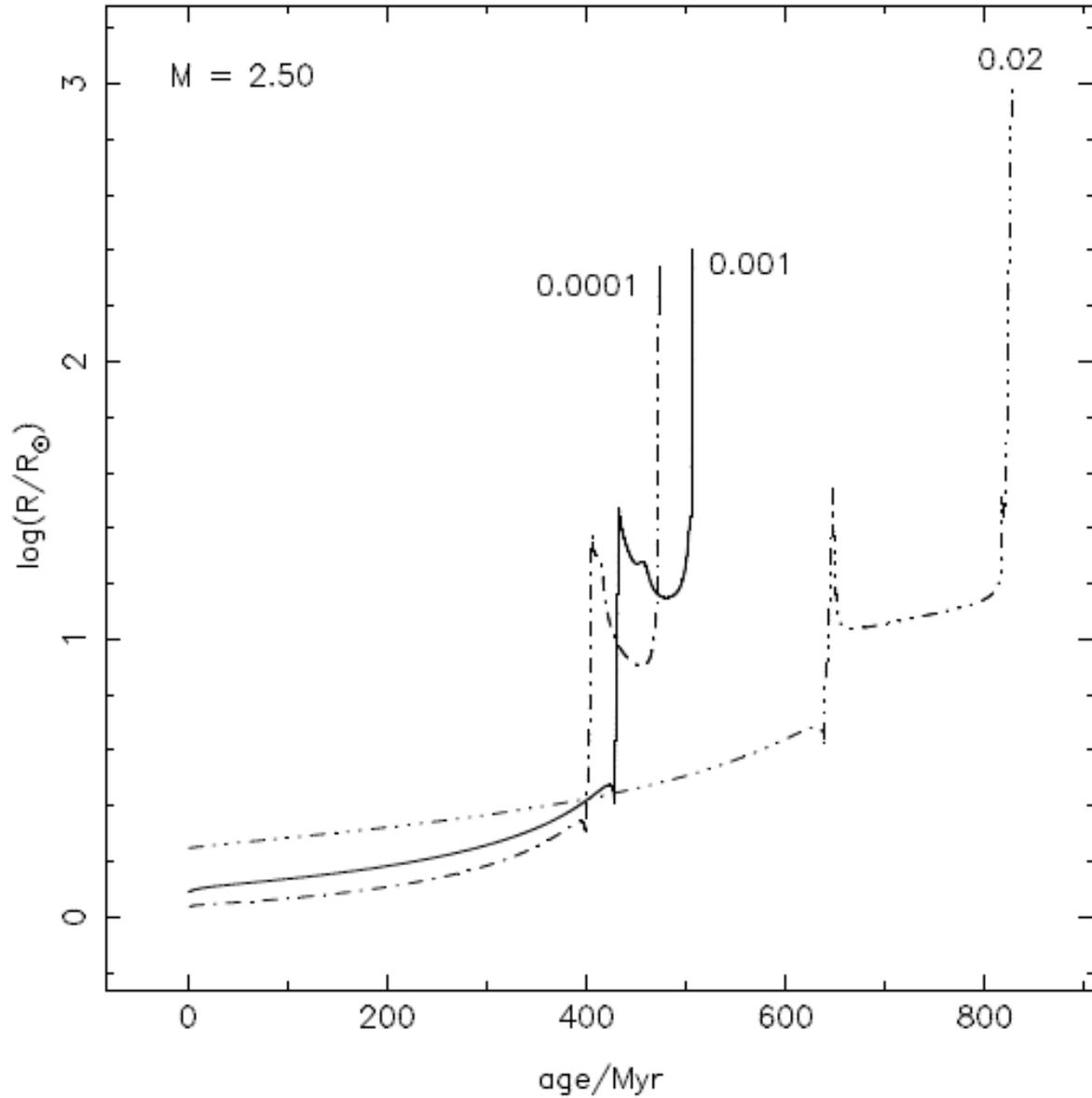
ТРЕКИ МЕСА: 50 МАСС СОЛНЦА



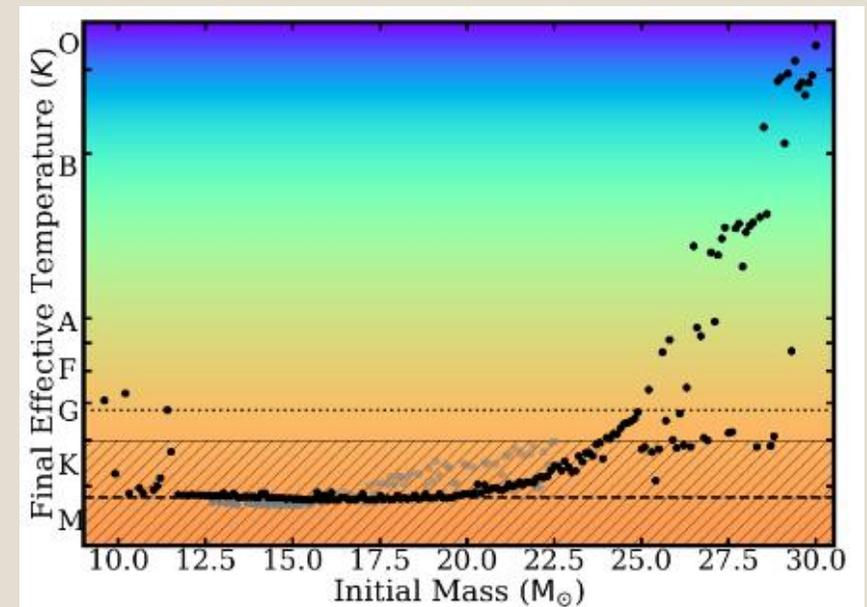
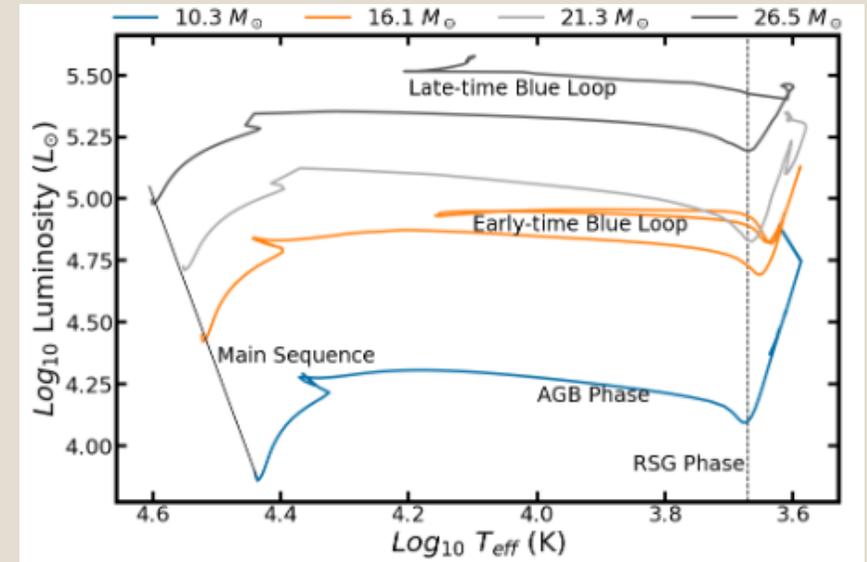
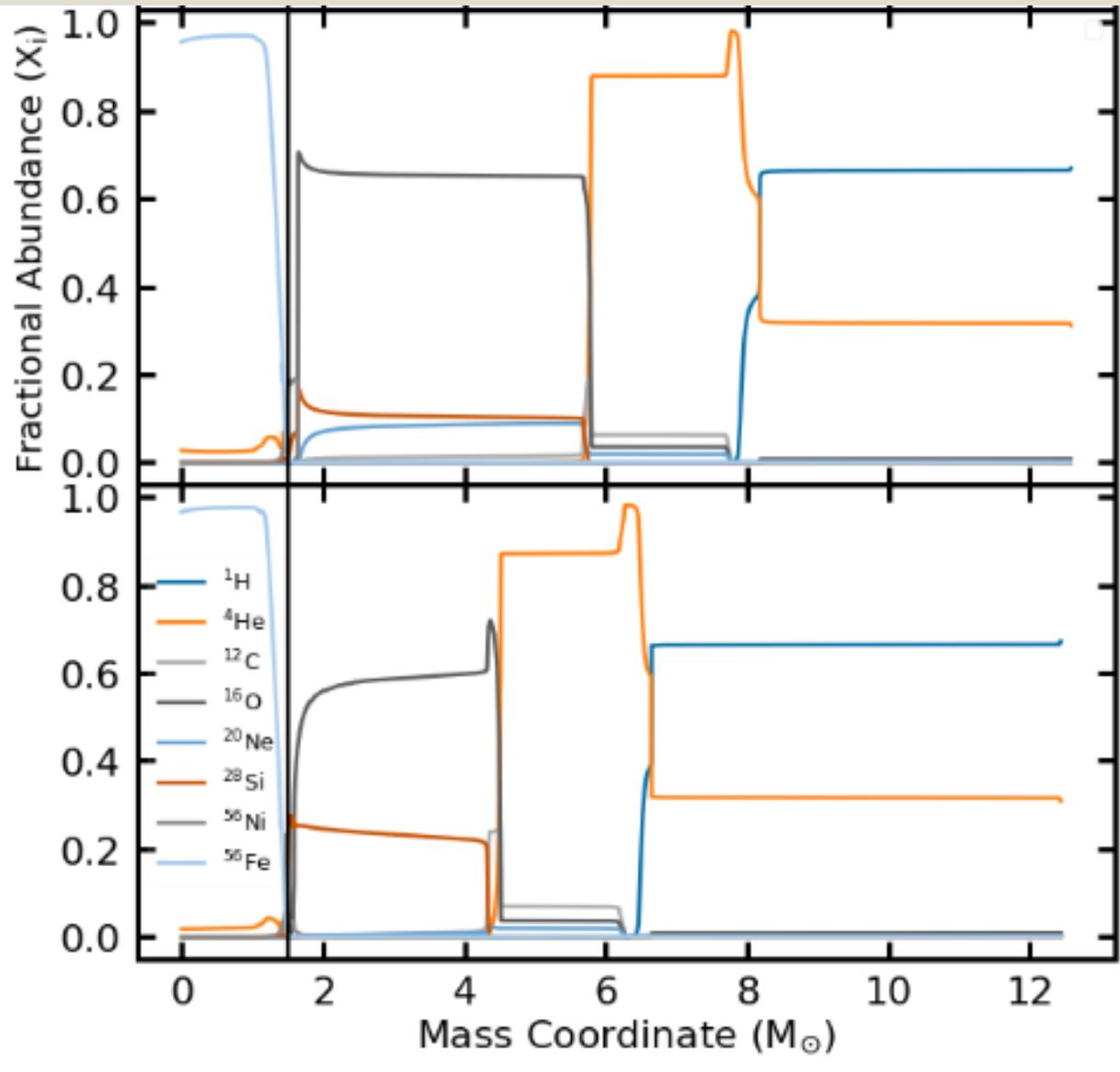
РОЛЬ МЕТАЛЛИЧНОСТИ



МЕТАЛЛИЧНОСТЬ



СТРУКТУРА ПРЕДСВЕРХНОВОЙ



<https://arxiv.org/pdf/2103.07980.pdf>