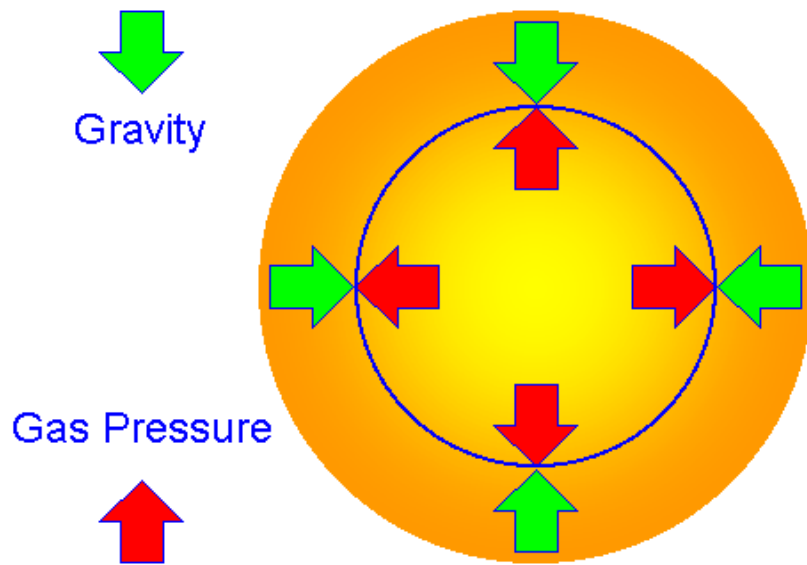




# **ЭВОЛЮЦИЯ ЗВЕЗД**

# УСТОЙЧИВОСТЬ ЗВЕЗДЫ

## Hydrostatic Equilibrium



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

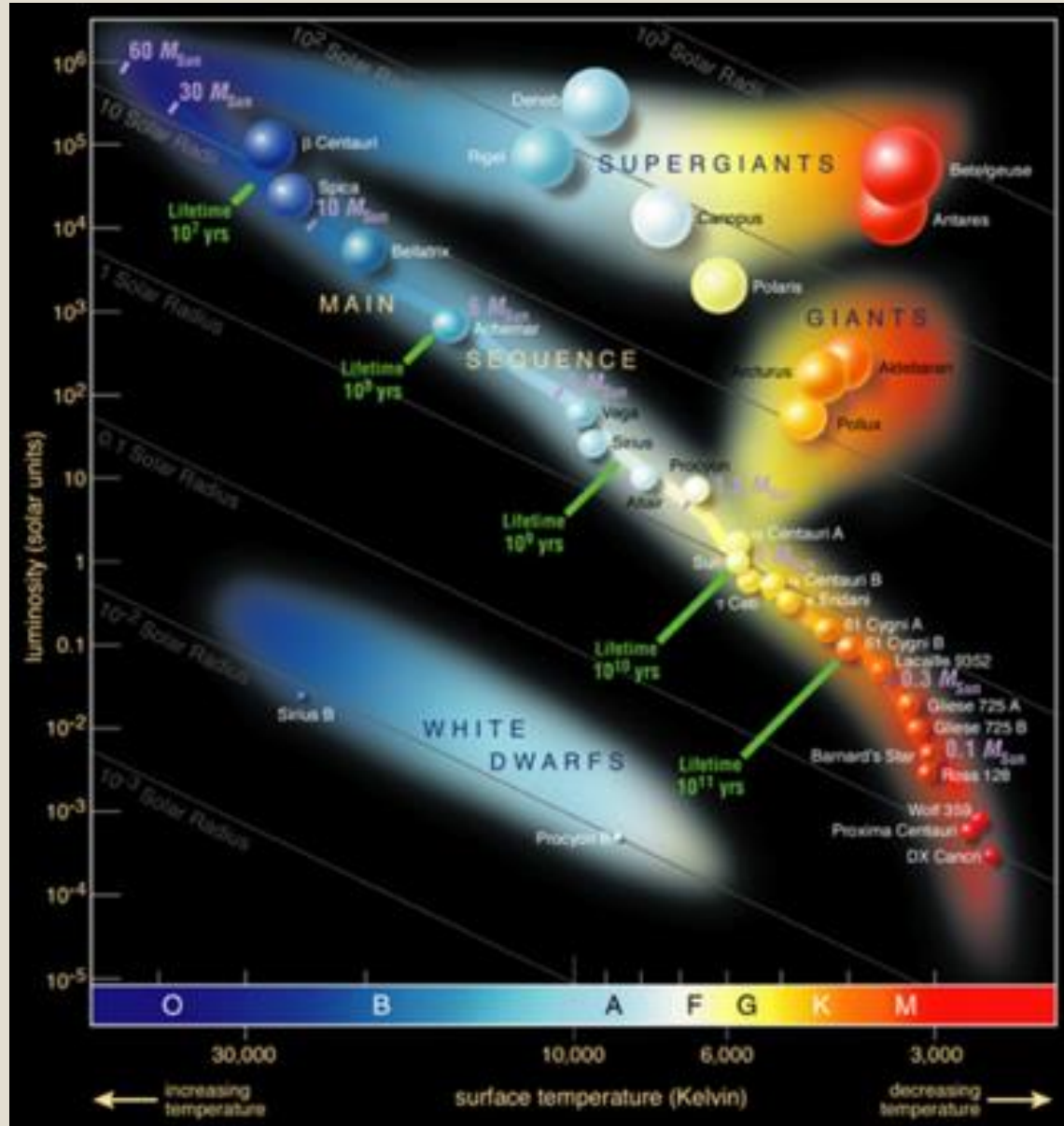
Сила тяжести уравновешена  
градиентом давления.

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

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

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

# ДИАГРАММА ГЕРЦШПРУНГА -РАССЕЛА



Самые легкие звезды имеют массу 0.08 солнечных.

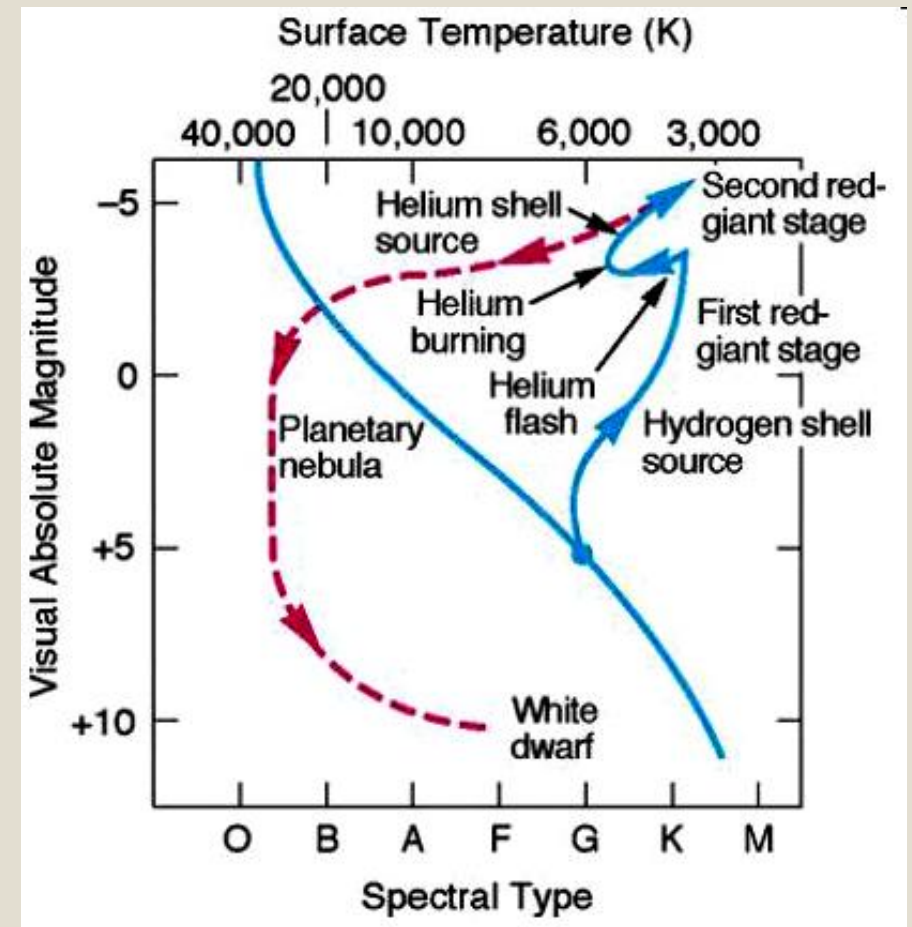
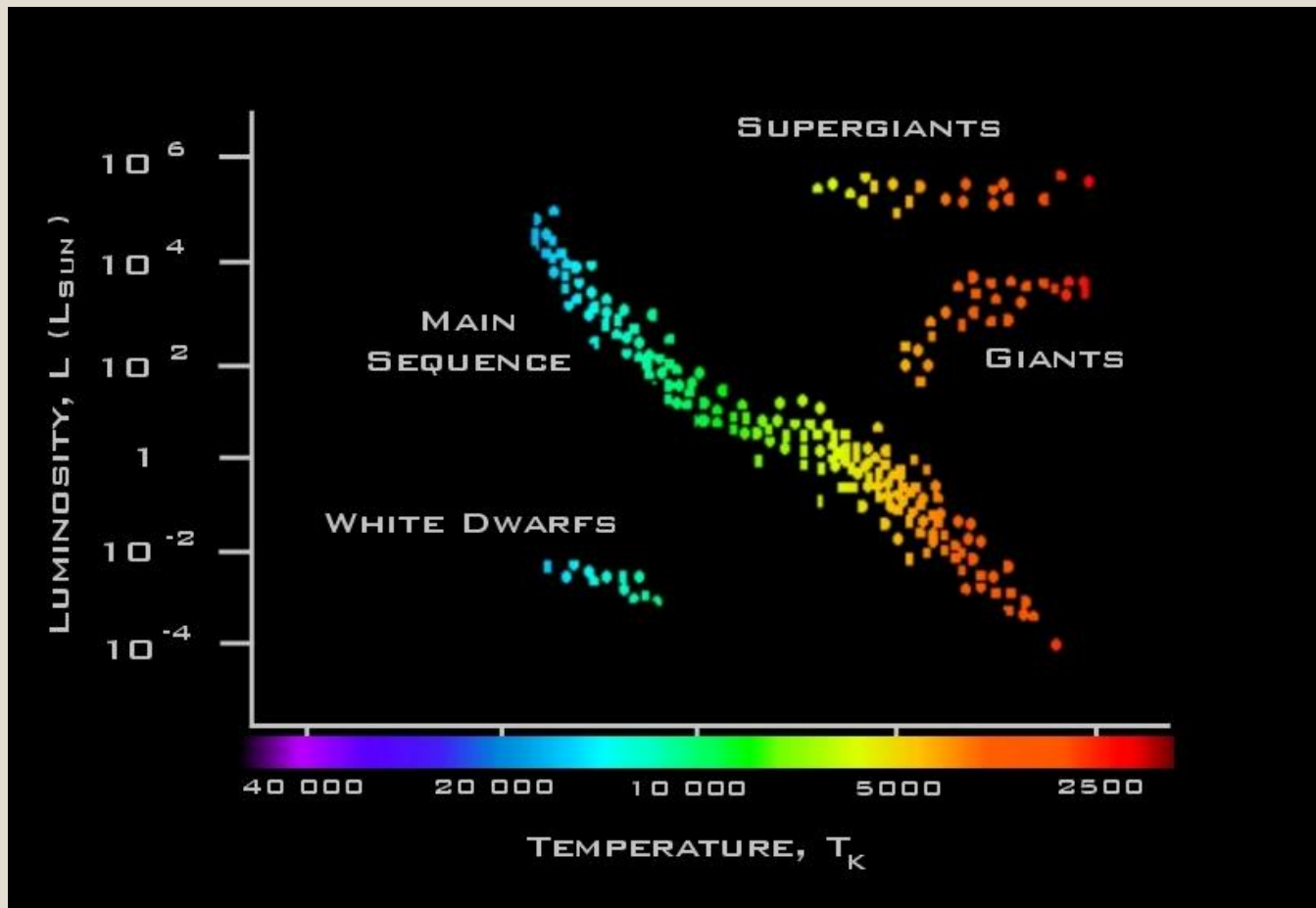
Самые тяжелые из образующихся сейчас около 100-200.

С ростом массы резко растет светимость.

Время жизни тем больше, чем меньше масса звезды.

# ЭВОЛЮЦИЯ ОДИНОЧНОЙ ЗВЕЗДЫ

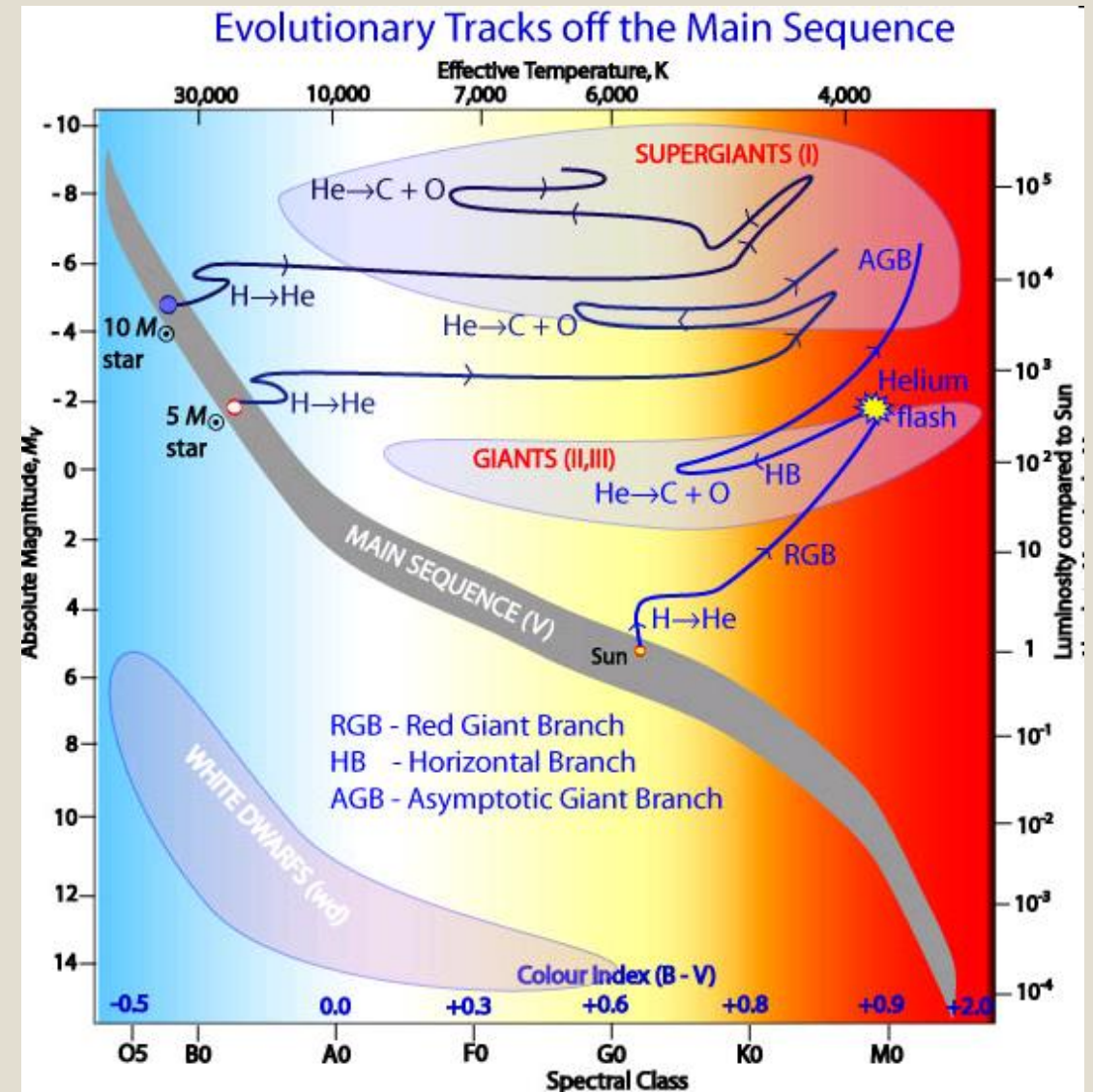
Эволюция звезды – это смена источников горения



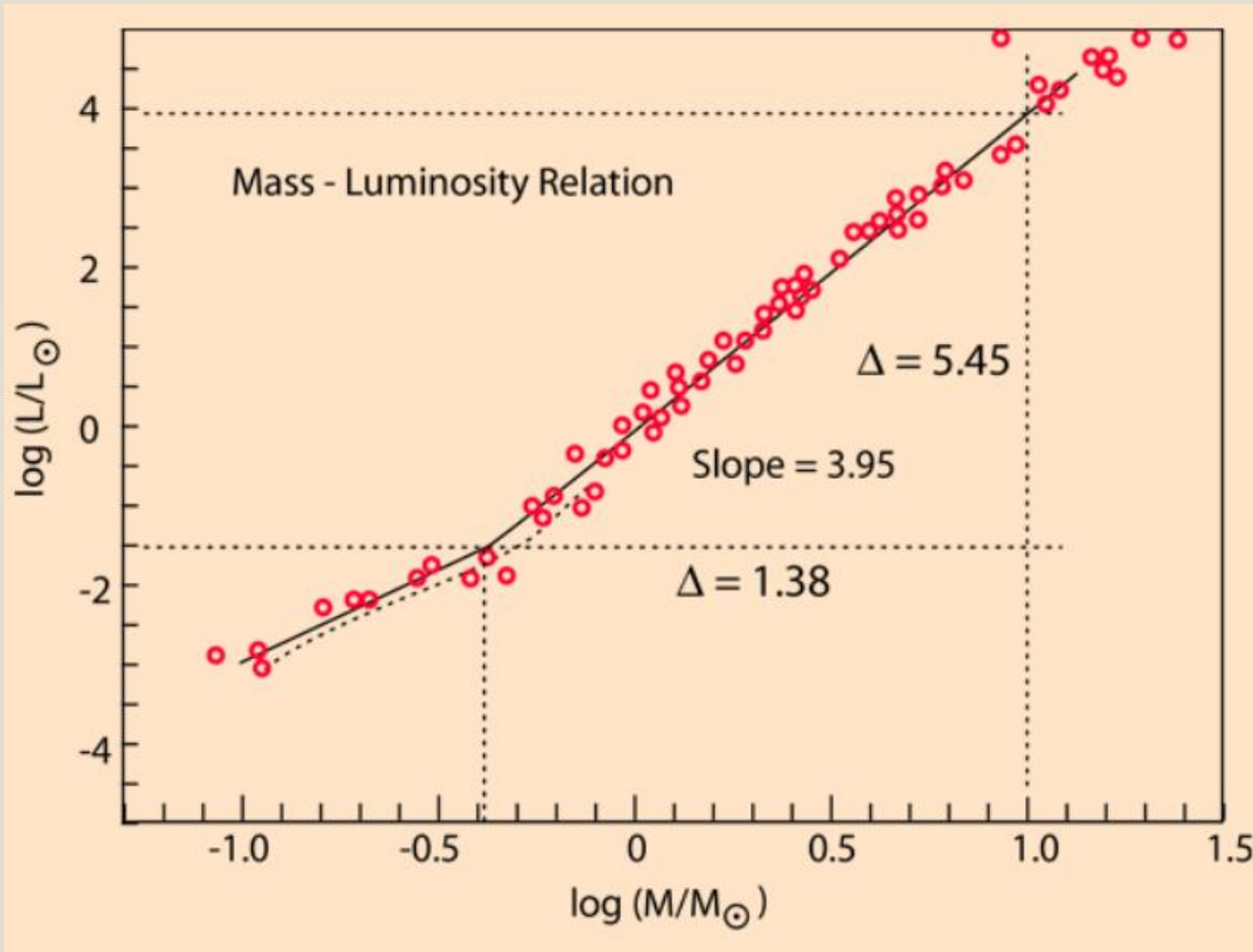
# МАССА – ГЛАВНЫЙ ПАРАМЕТР

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



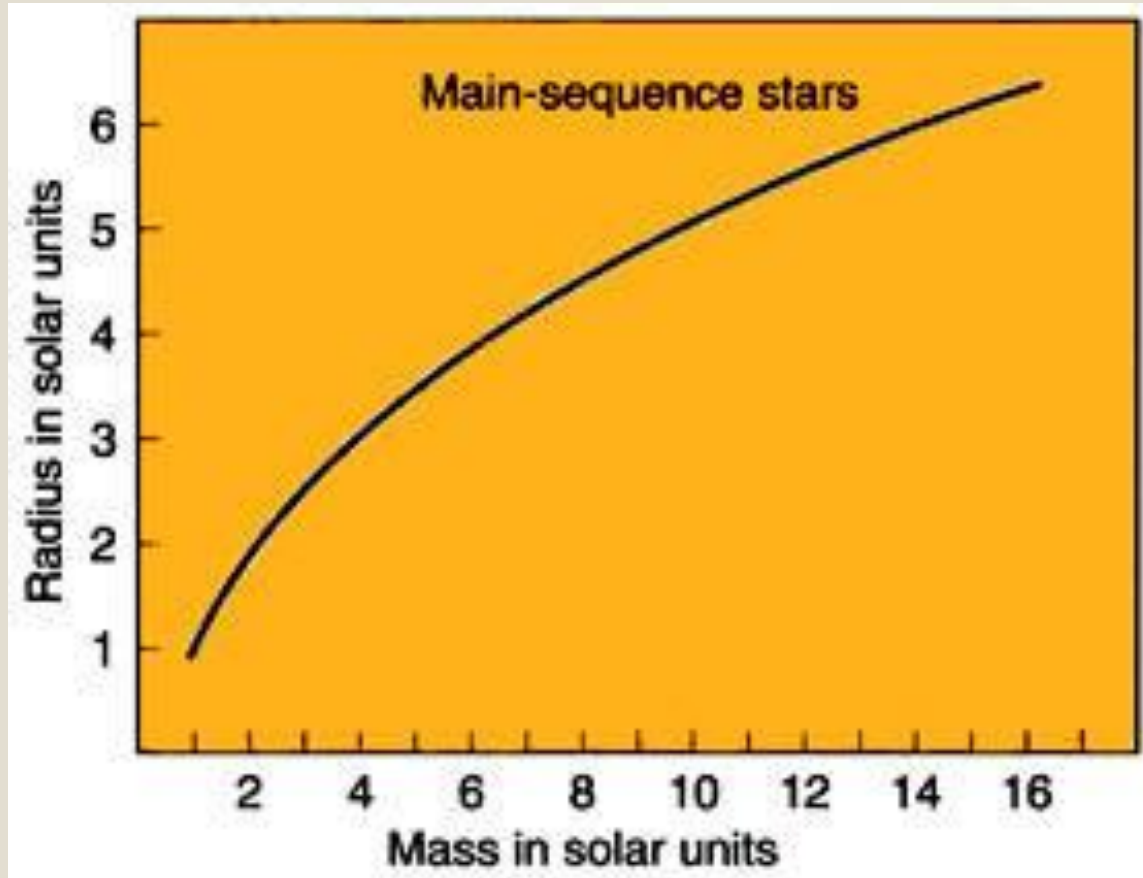
# СООТНОШЕНИЕ МАССА-СВЕТИМОСТЬ



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

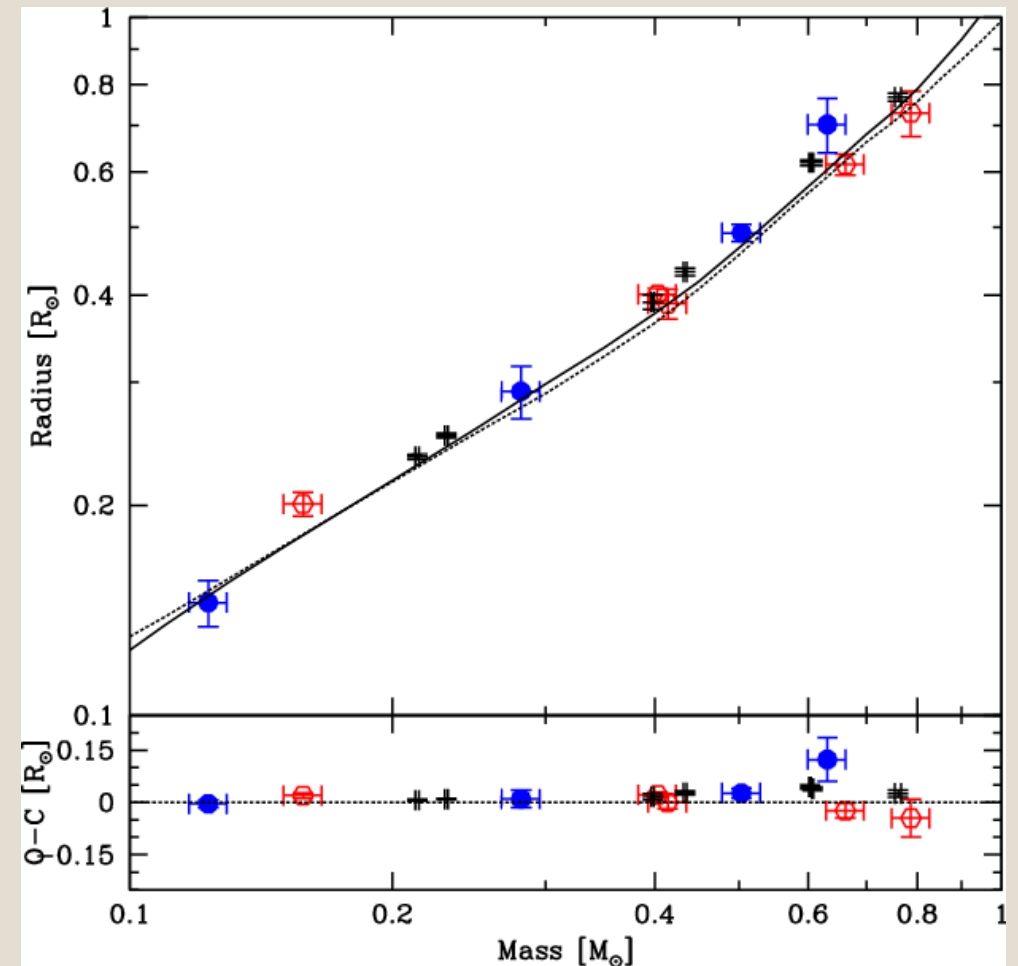
Для тяжелых звезд  
(когда давление излучения  
становится важнее)  
 $L \sim M$

# СООТНОШЕНИЕ МАССА-РАДИУС

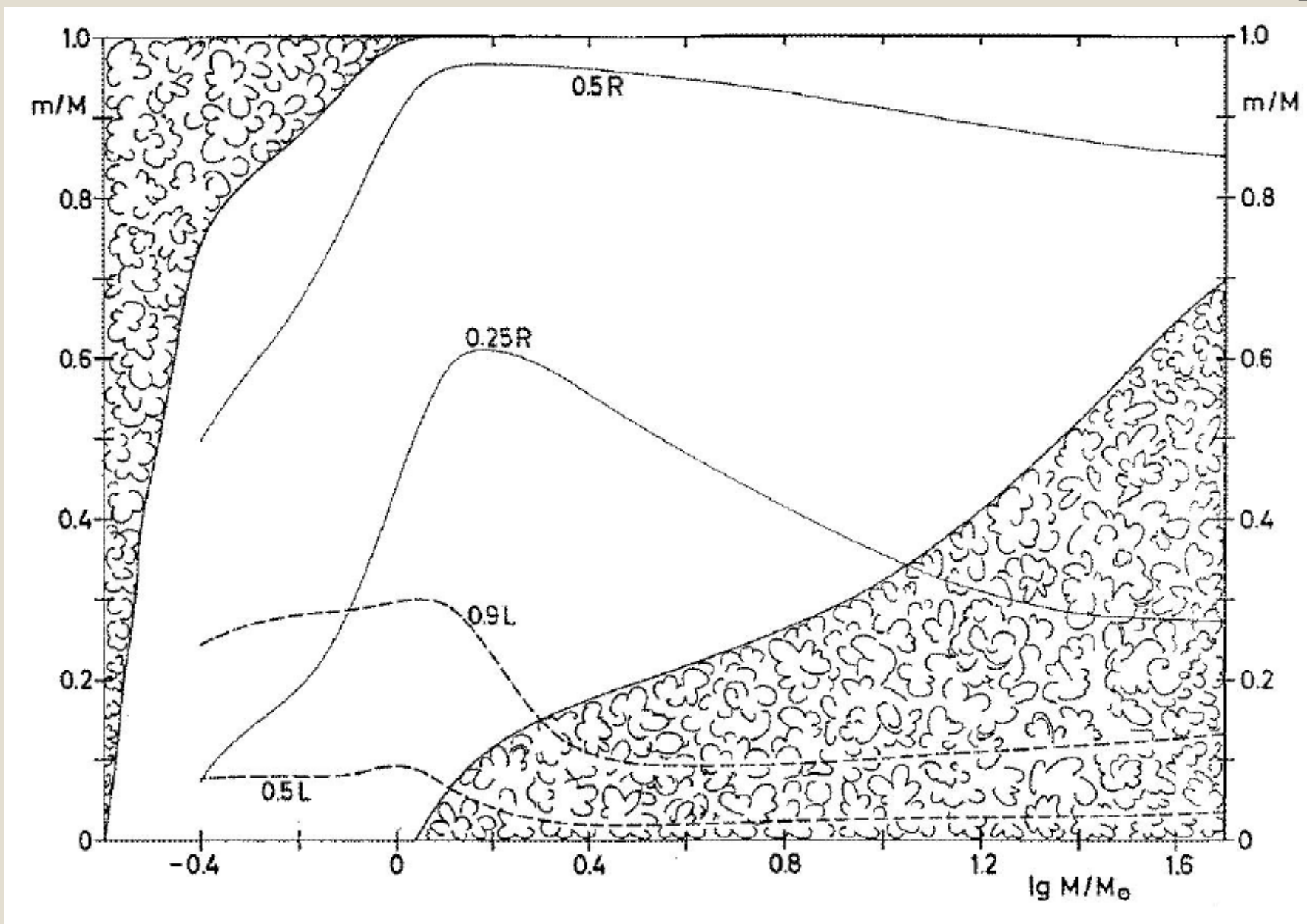


Для масс  $< 1$  солнечной  
показатель степени равен  
примерно 0.8-1.  
А для больших масс примерно – 0.6.

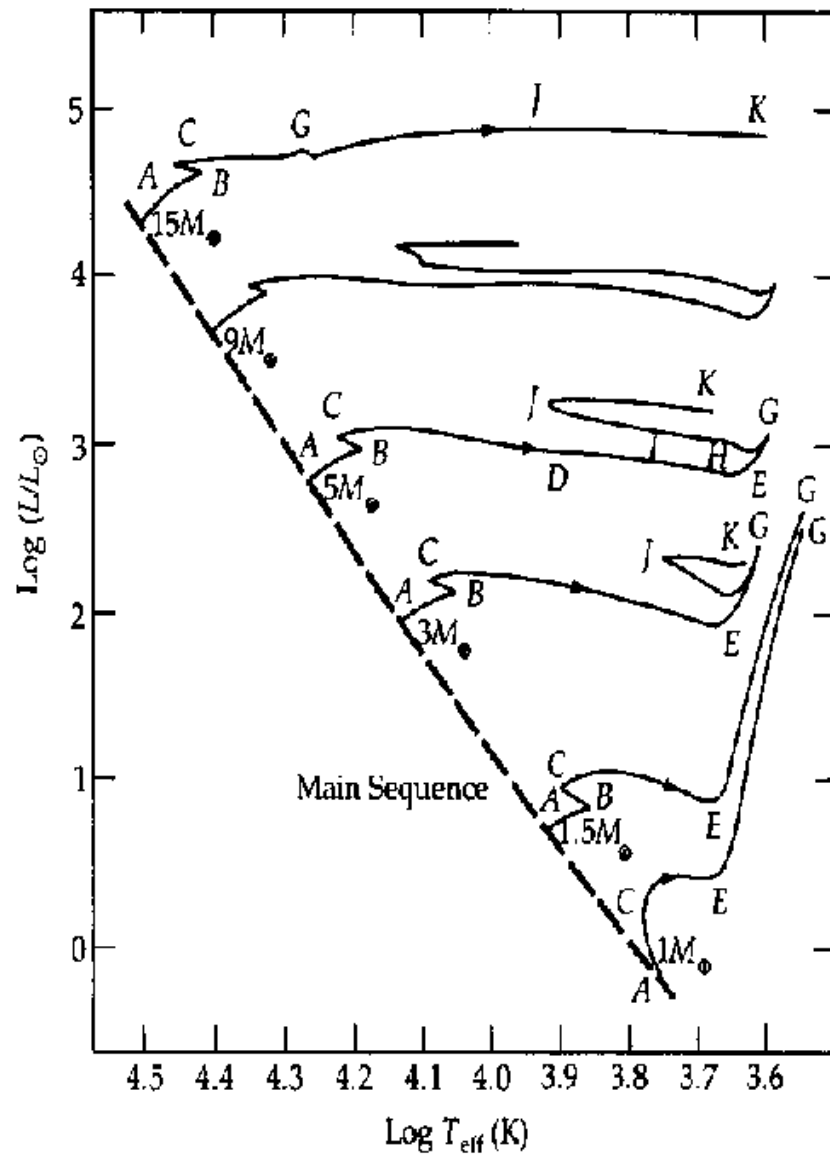
Соотношение зависит  
от параметров  
конвективной оболочки.



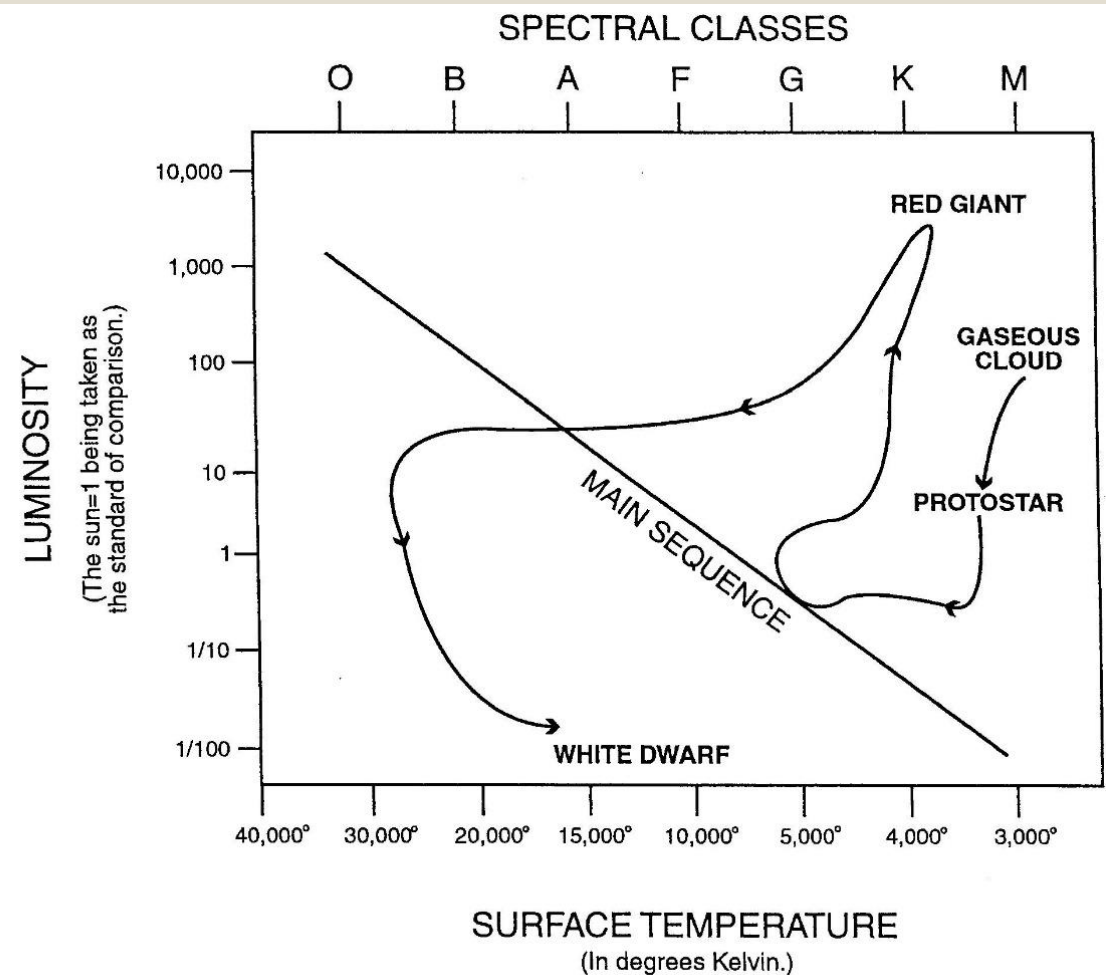
# ВНУТРЕННЯЯ СТРУКТУРА ЗВЕЗД



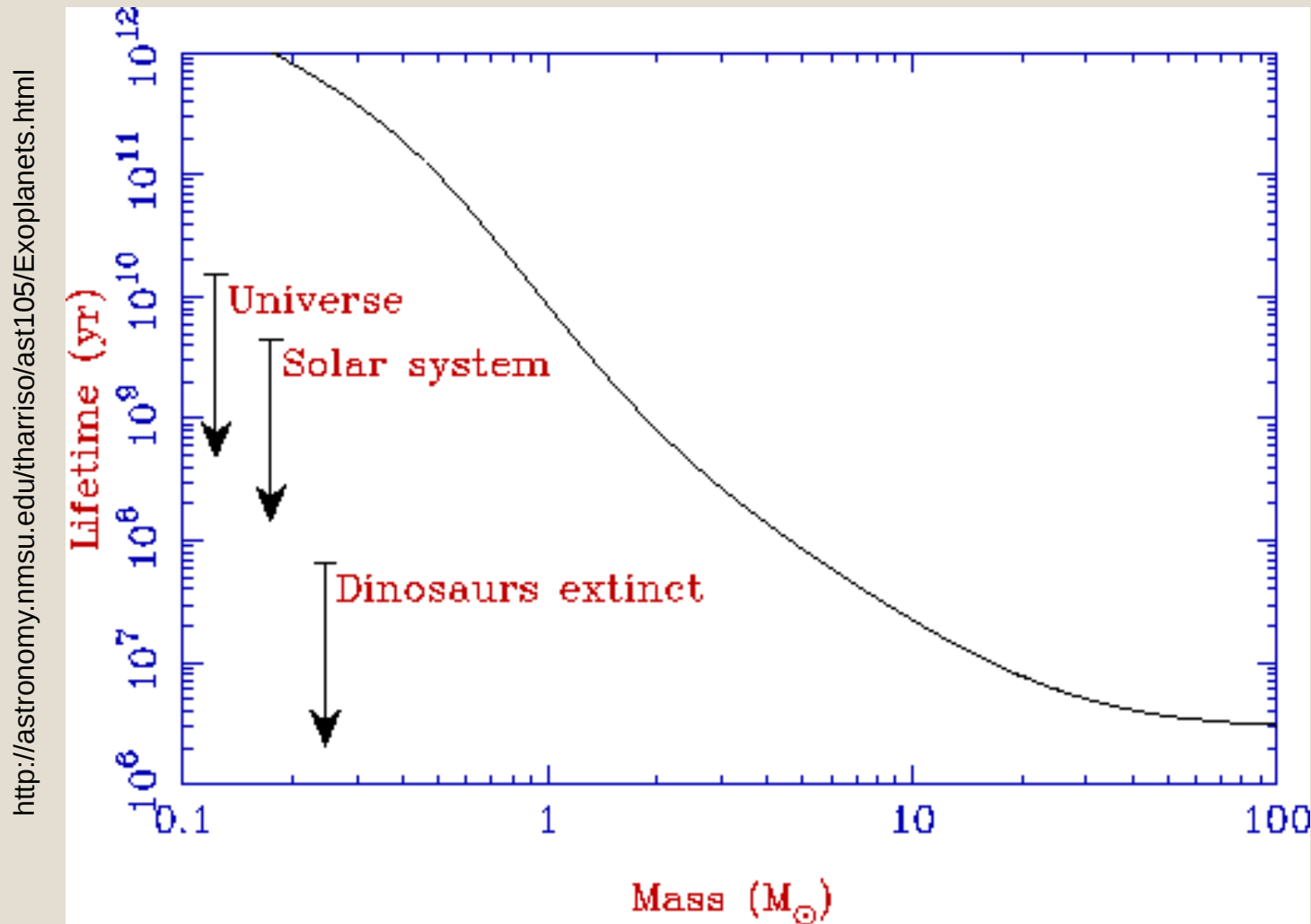
# ЭВОЛЮЦИЯ НА ДИАГРАММЕ Г-Р



Дольше всего звезды находятся на главной последовательности.



# ВРЕМЯ ЖИЗНИ ЗВЕЗДЫ

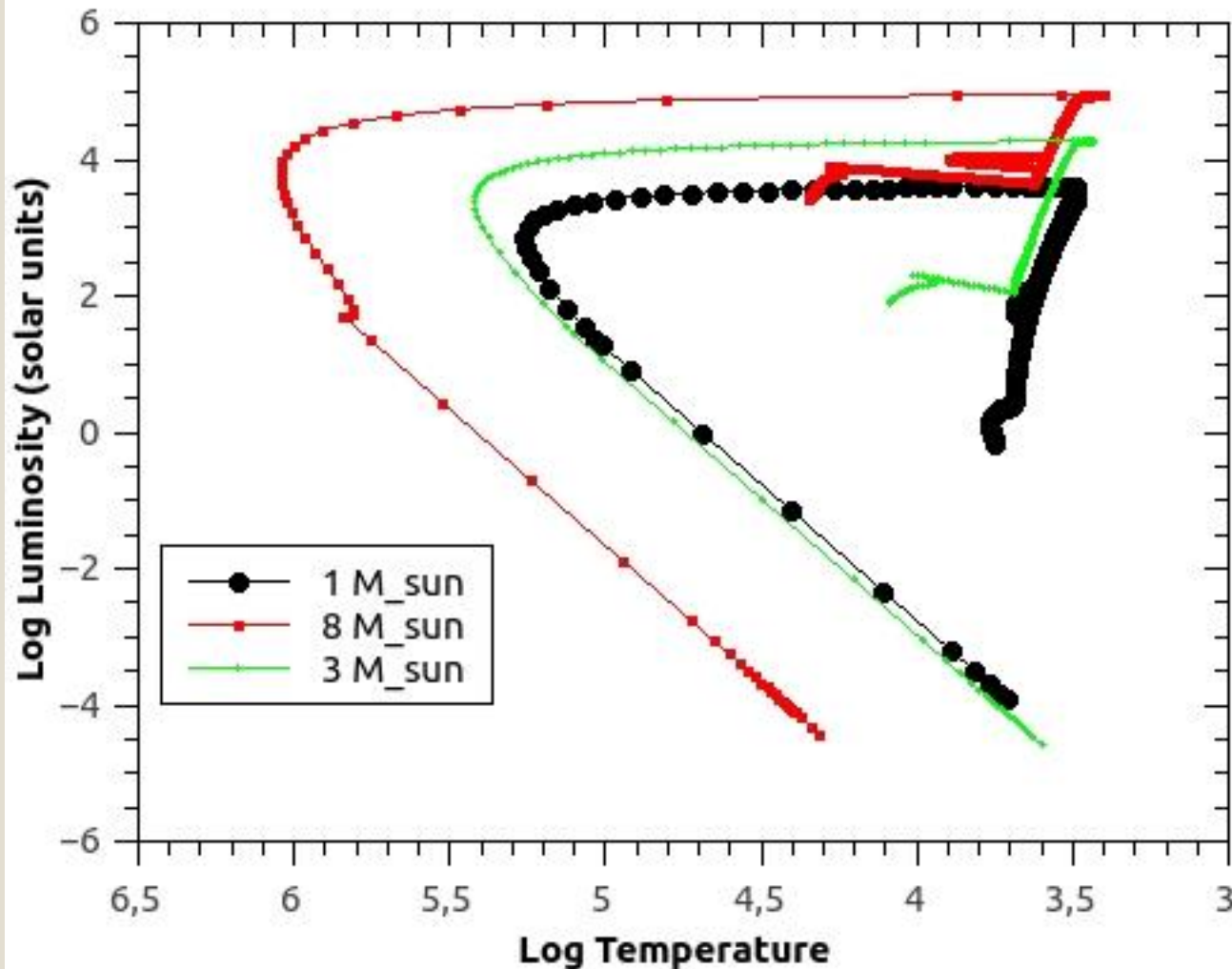


$T \sim M/L$

Для маломассивных  $T \sim M^{-2}$ ,

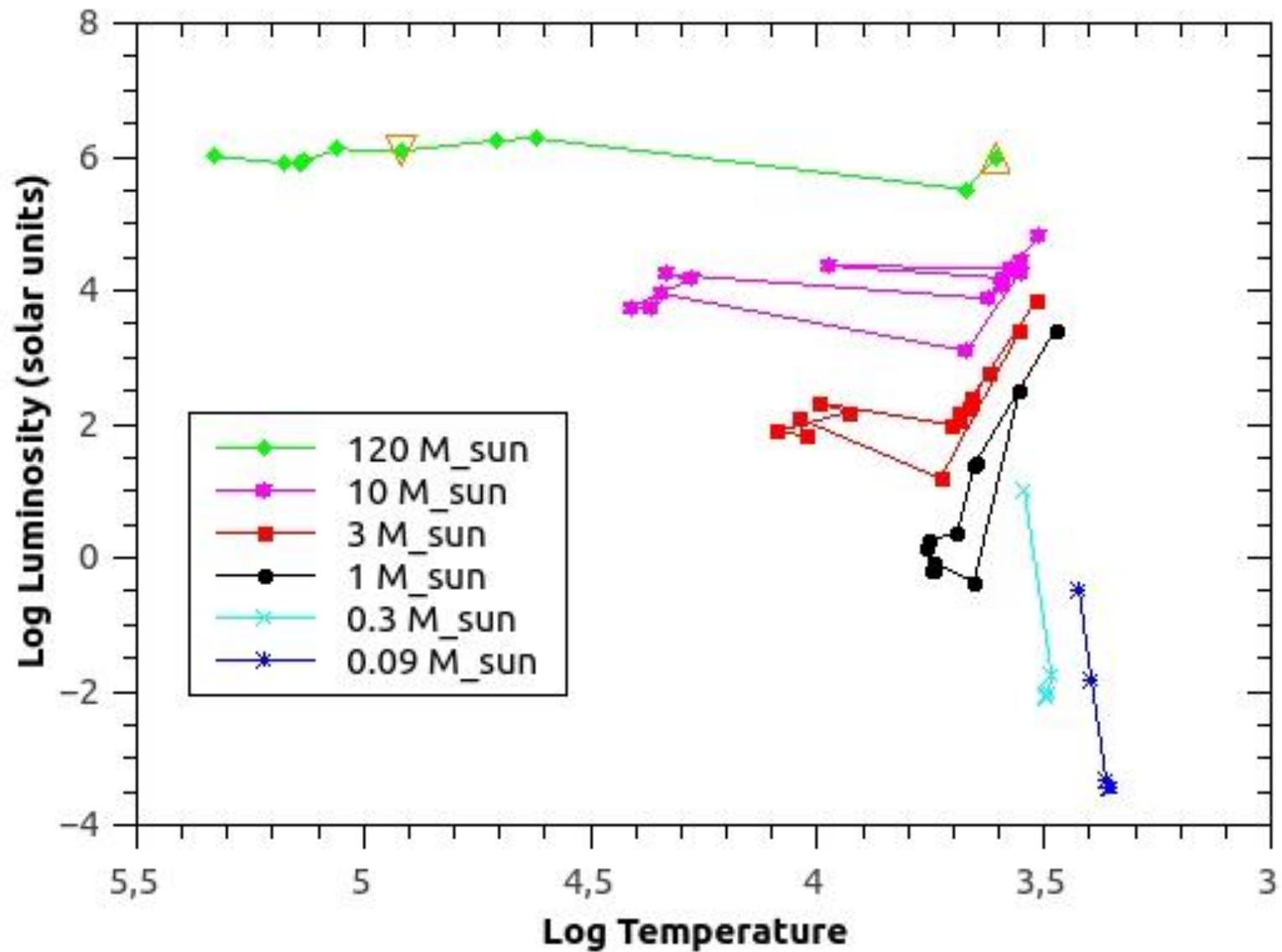
для массивных выходит на константу.

# ОТ ГЛАВНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ДО БЕЛЫХ КАРЛИКОВ



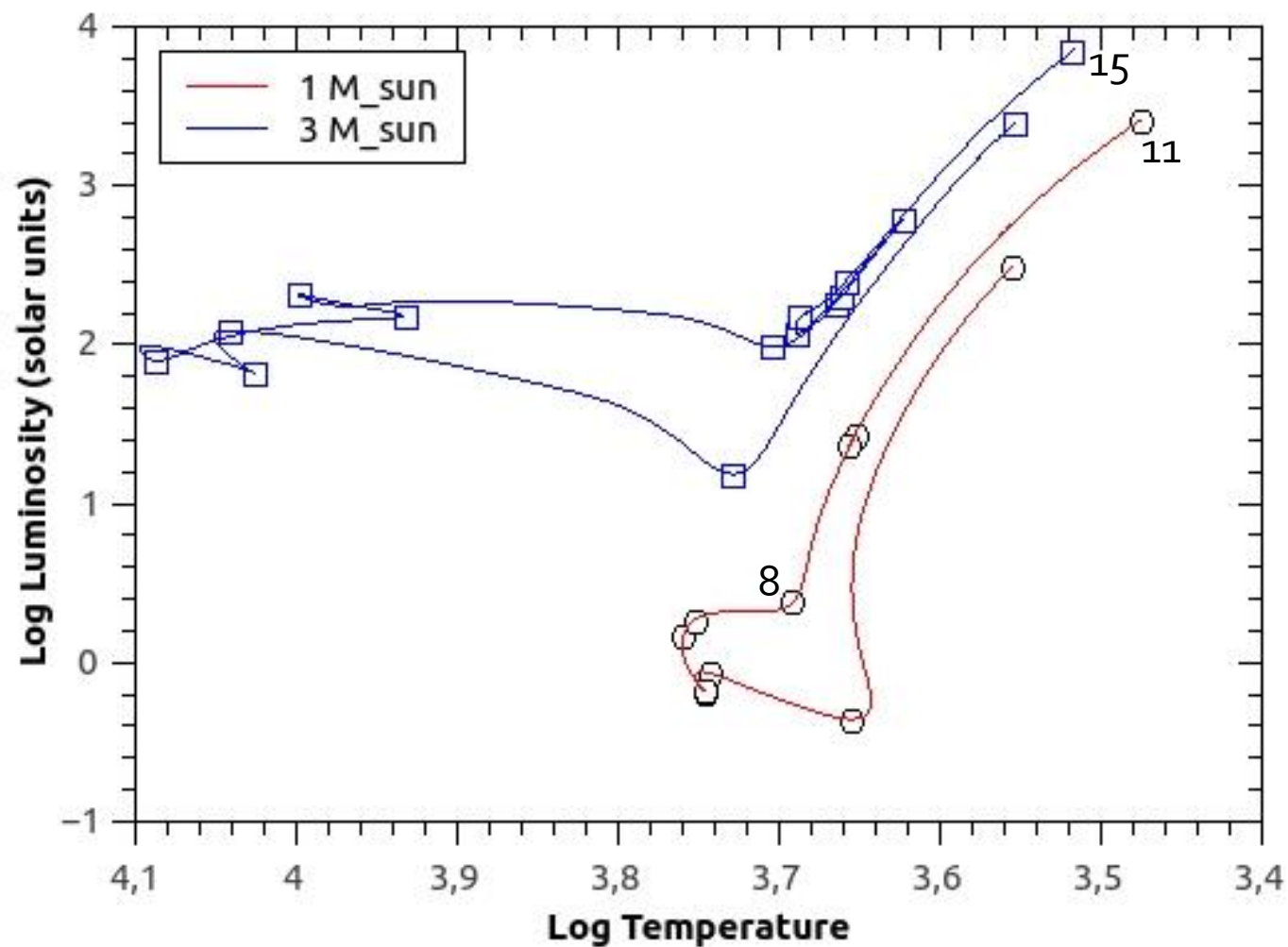
Расчеты проведены  
с помощью программы SSE.

# ДО И ПОСЛЕ ГП



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

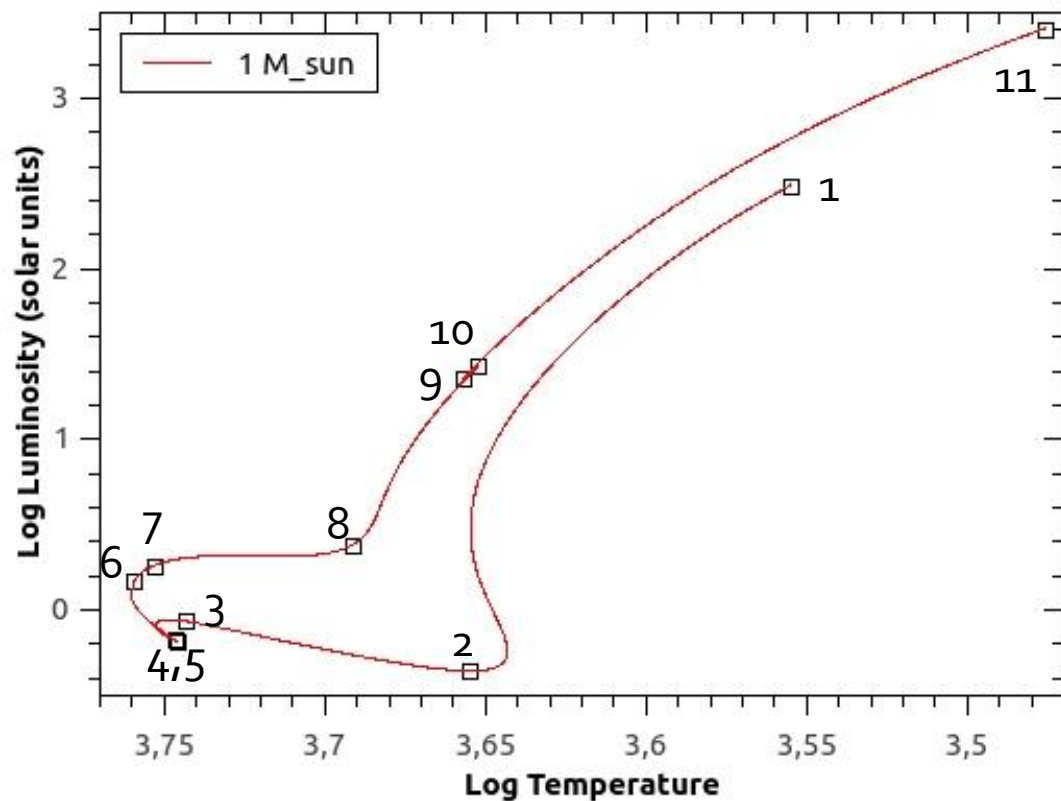
# В ДЕТАЛЯХ.....



- 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

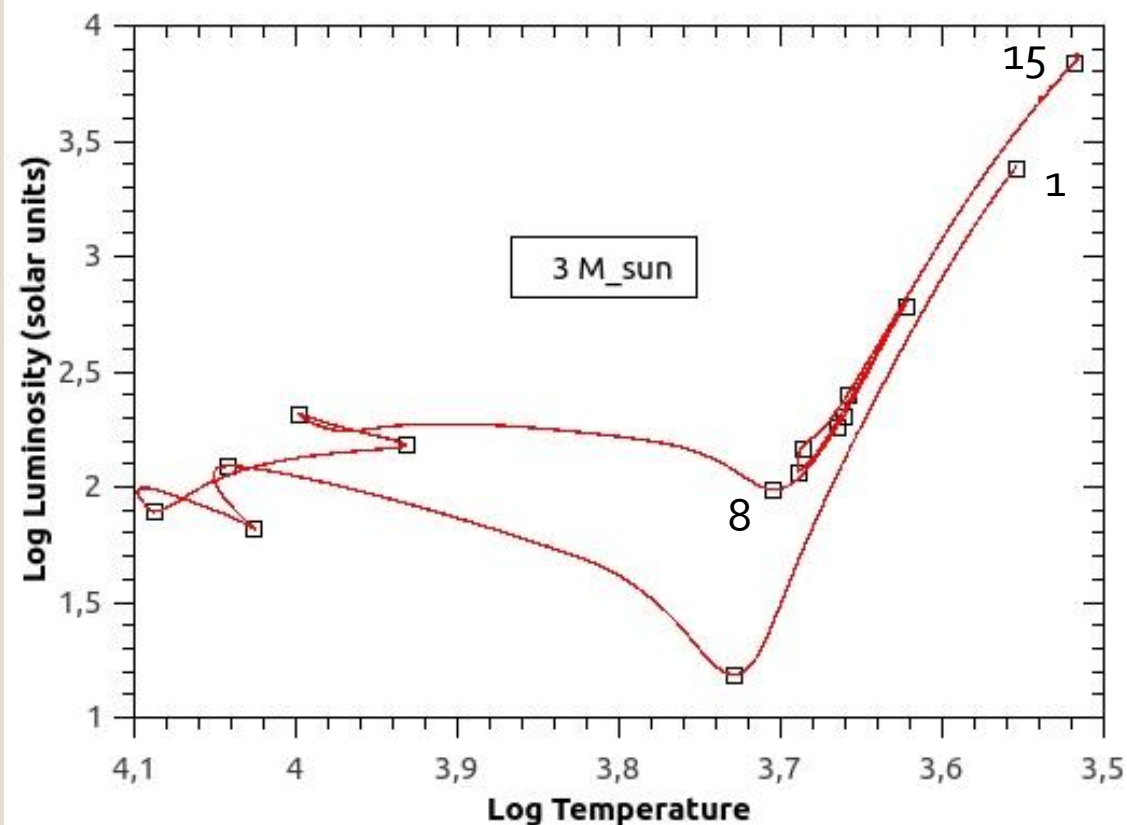
Использованы треки падуанской группы Bressan et al. (2012).

# ЧУТЬ ПОДРОБНЕЕ

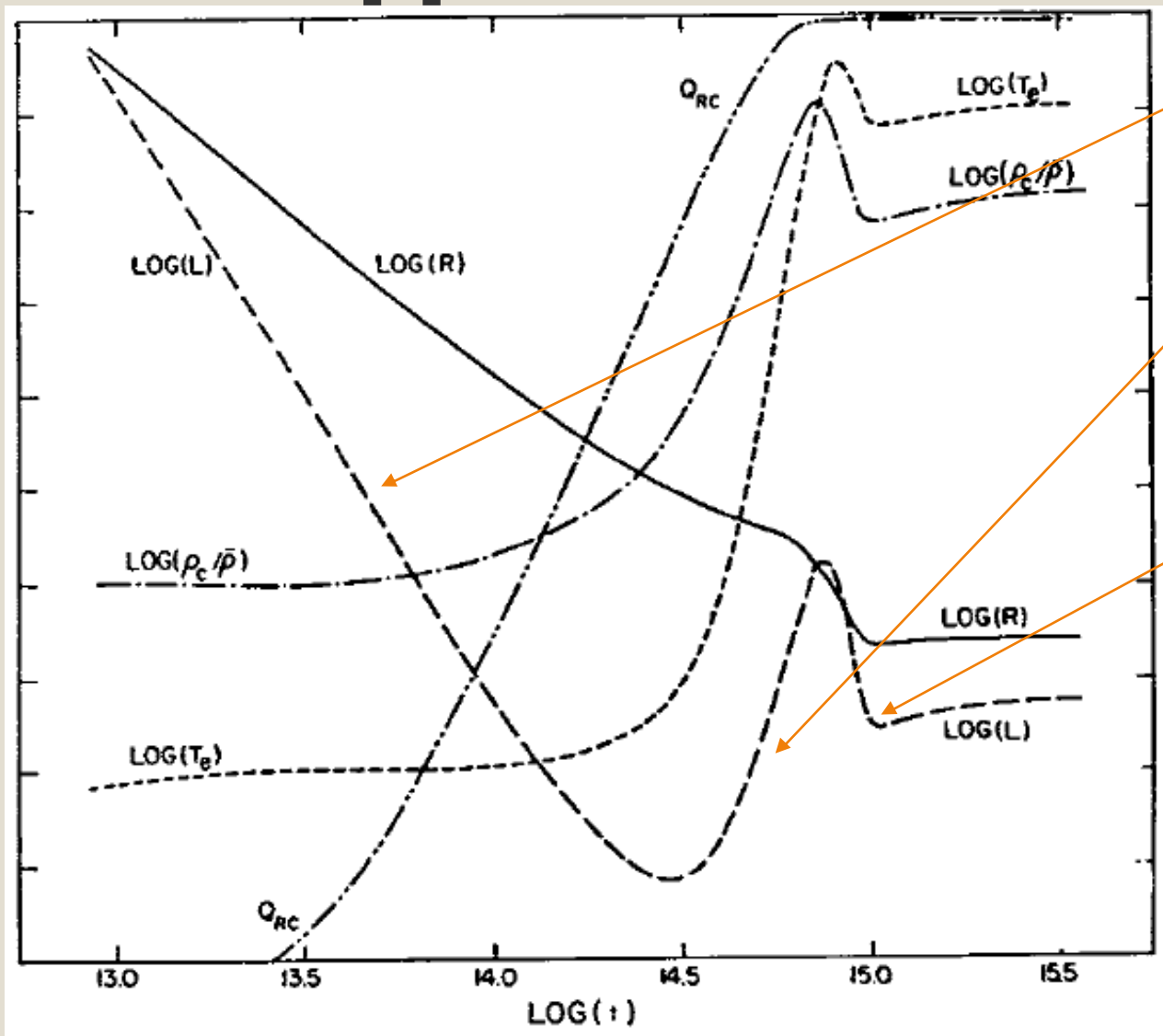


- 1 Начало
- 2 До-ГП
- 3 До-ГП
- 4 Вблизи начала ГП
- 5 Началось активное горение Н
- 6 Конец горения водорода. Сжатие
- 7 Сжатие заканчивается. Выход на КГ

- 8 Основание ветви КГ
- 9 Red bump
- 10 Red bump end
- 11 Гелиевая вспышка или начало горения He (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  $^{14}\text{N}$  из  $^{12}\text{C}$

# ПОЧЕМУ РАСТЕТ СВЕТИМОСТЬ НА ГЛАВНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ

Водород превращается в гелий



Растет молекулярный вес

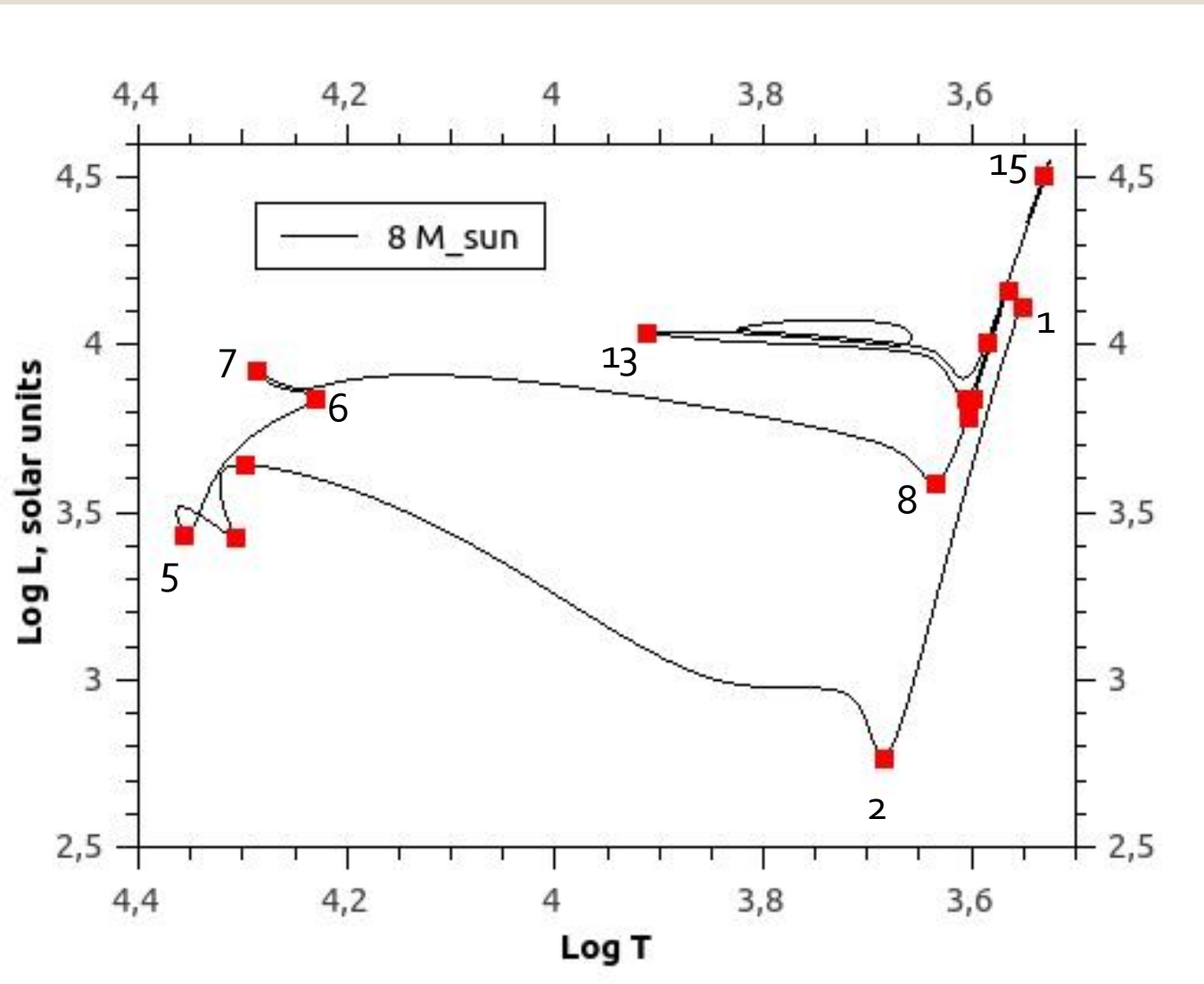
$$\frac{kT\rho}{\mu m_u} = \frac{GM\rho}{R}$$

Рост молекулярного веса компенсируется ростом  $\rho T$ .

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

В итоге растет светимость.

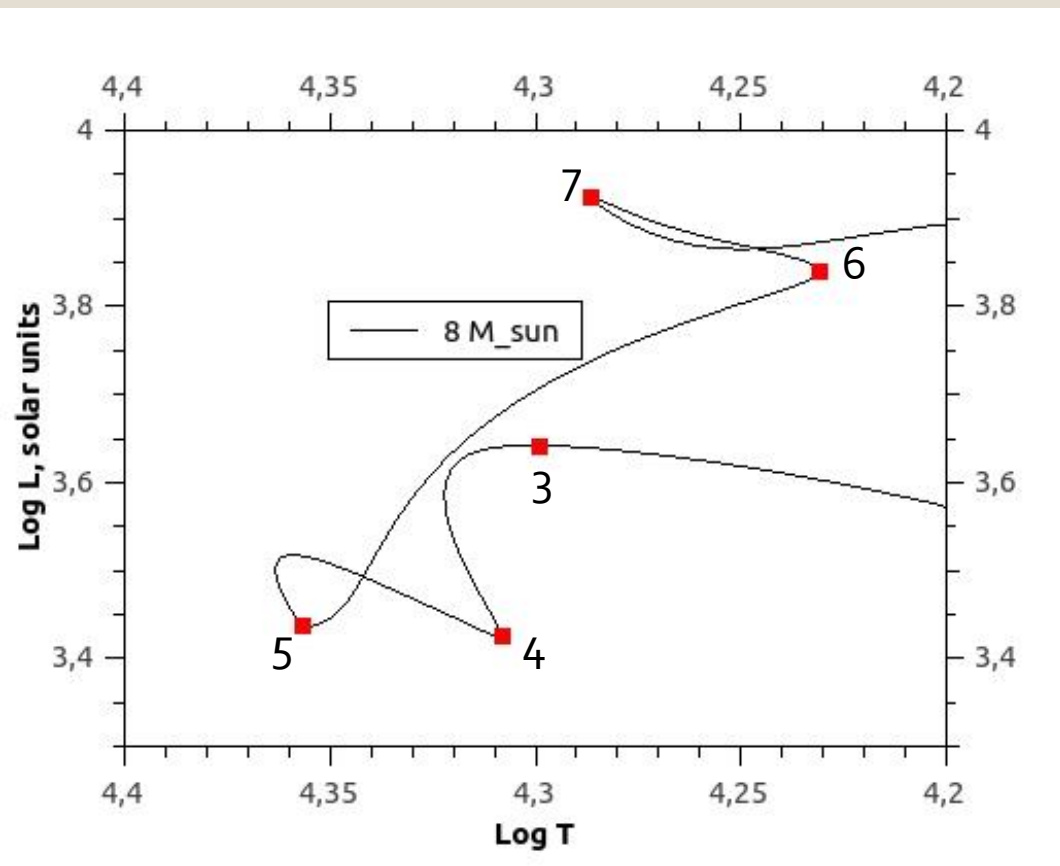
# В ДЕТАЛЯХ.....



- 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

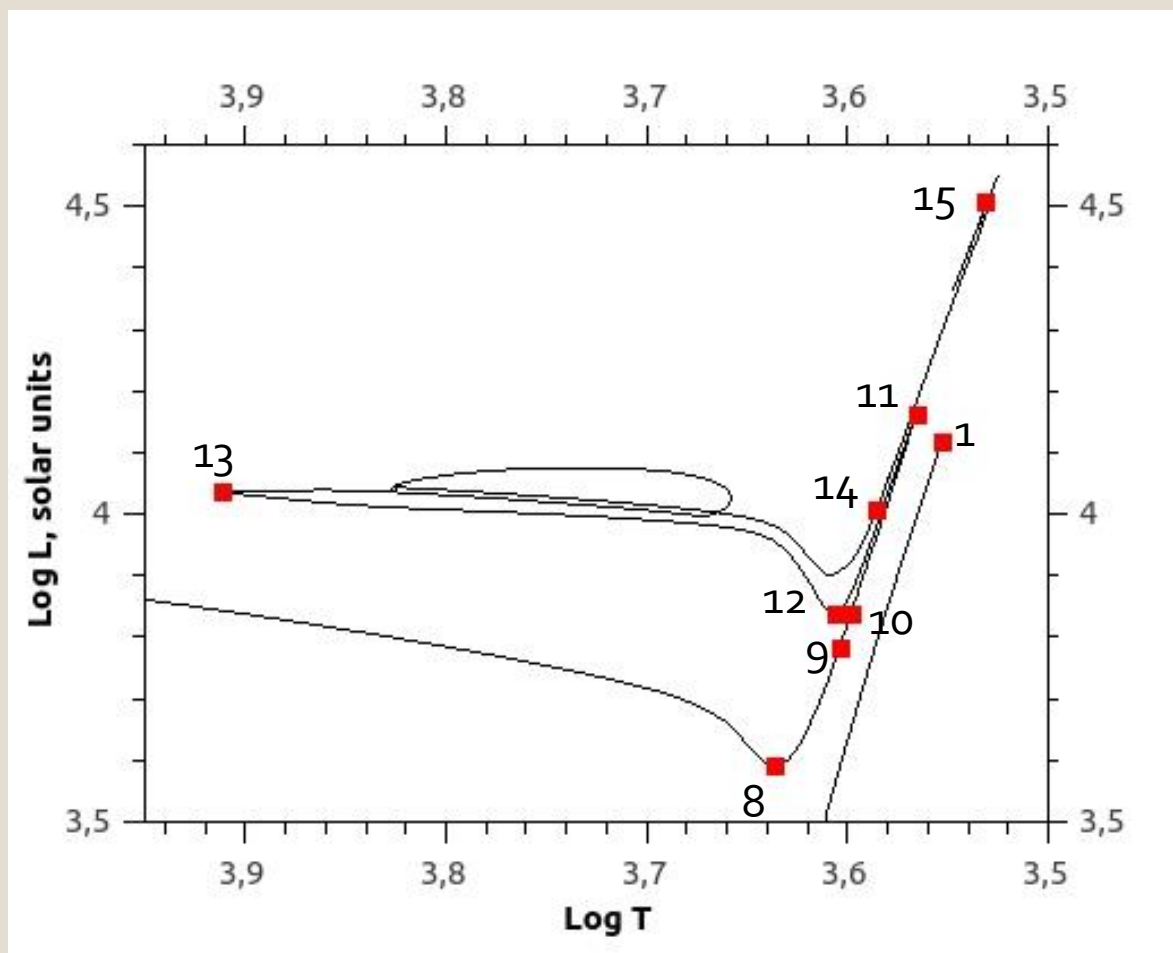
Использованы треки падуанской группы Bressan et al. (2012).

# В МЕЛКИХ ДЕТАЛЯХ

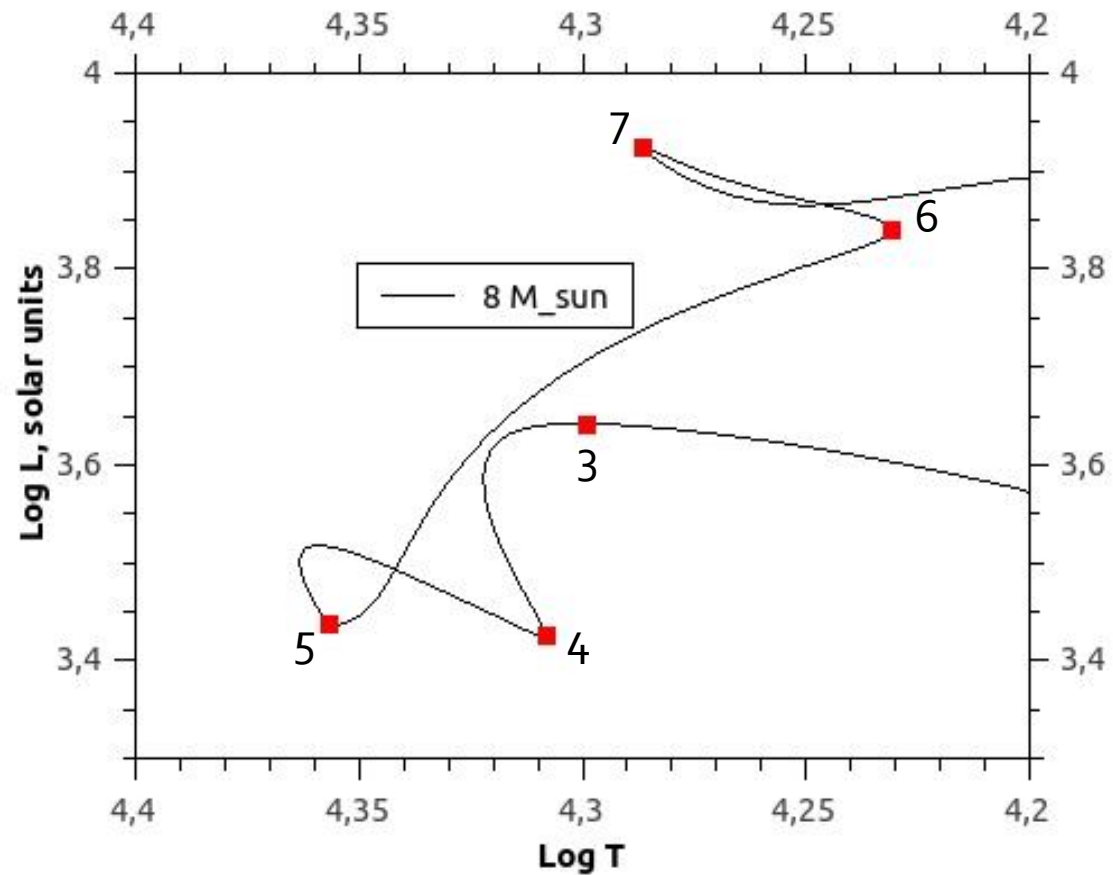


- 1 Начало
- 2 До-ГП
- 3 До-ГП
- 4 Вблизи начала ГП
- 5 Началось активное горение H
- 6 Конец горения водорода. Сжатие
- 7 Сжатие заканчивается. Выход на КГ

- 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 эфф. 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, пока не наступает вырождение.

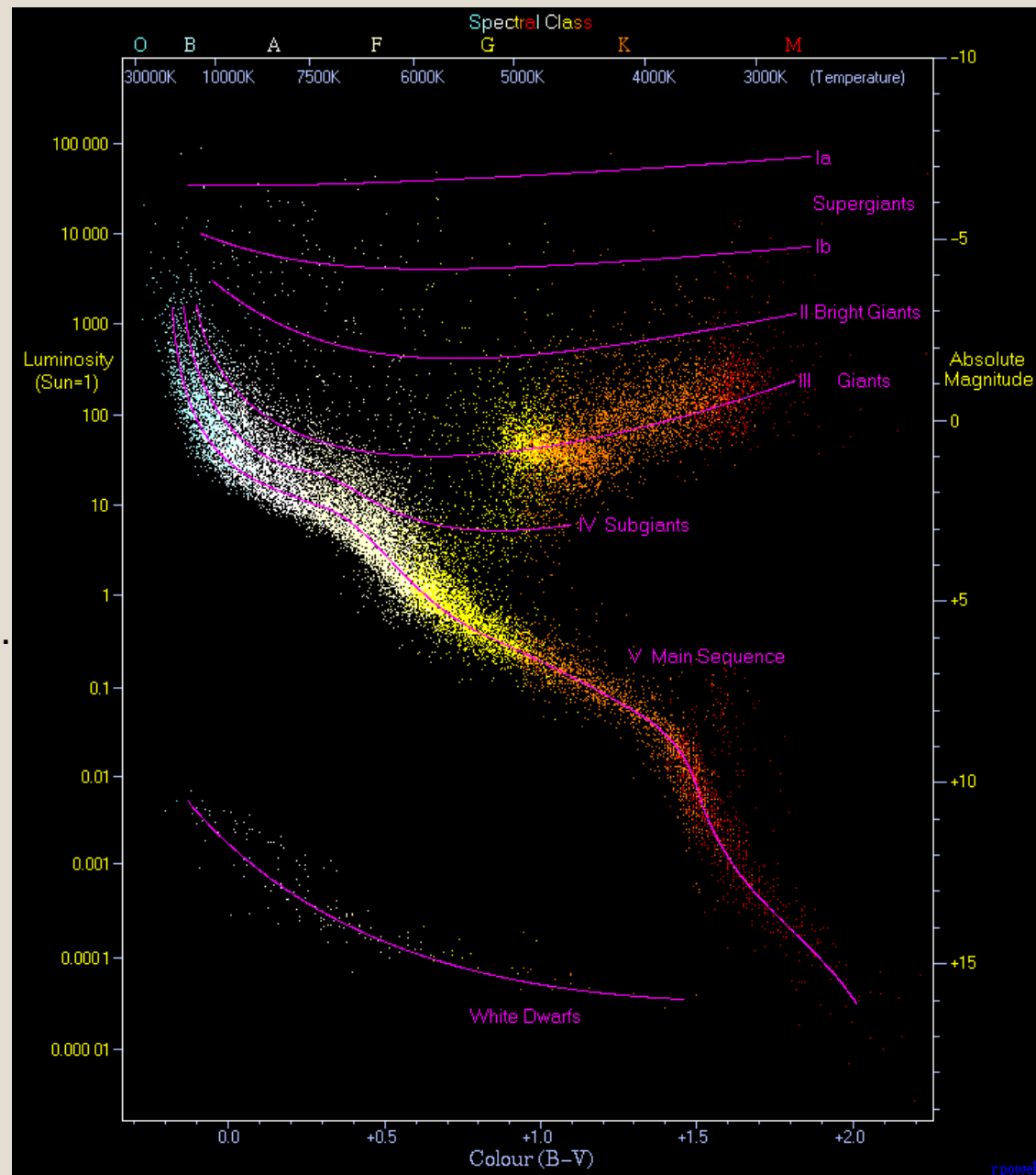
Это приводит к резкому сжатию – начинается RGB.

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.



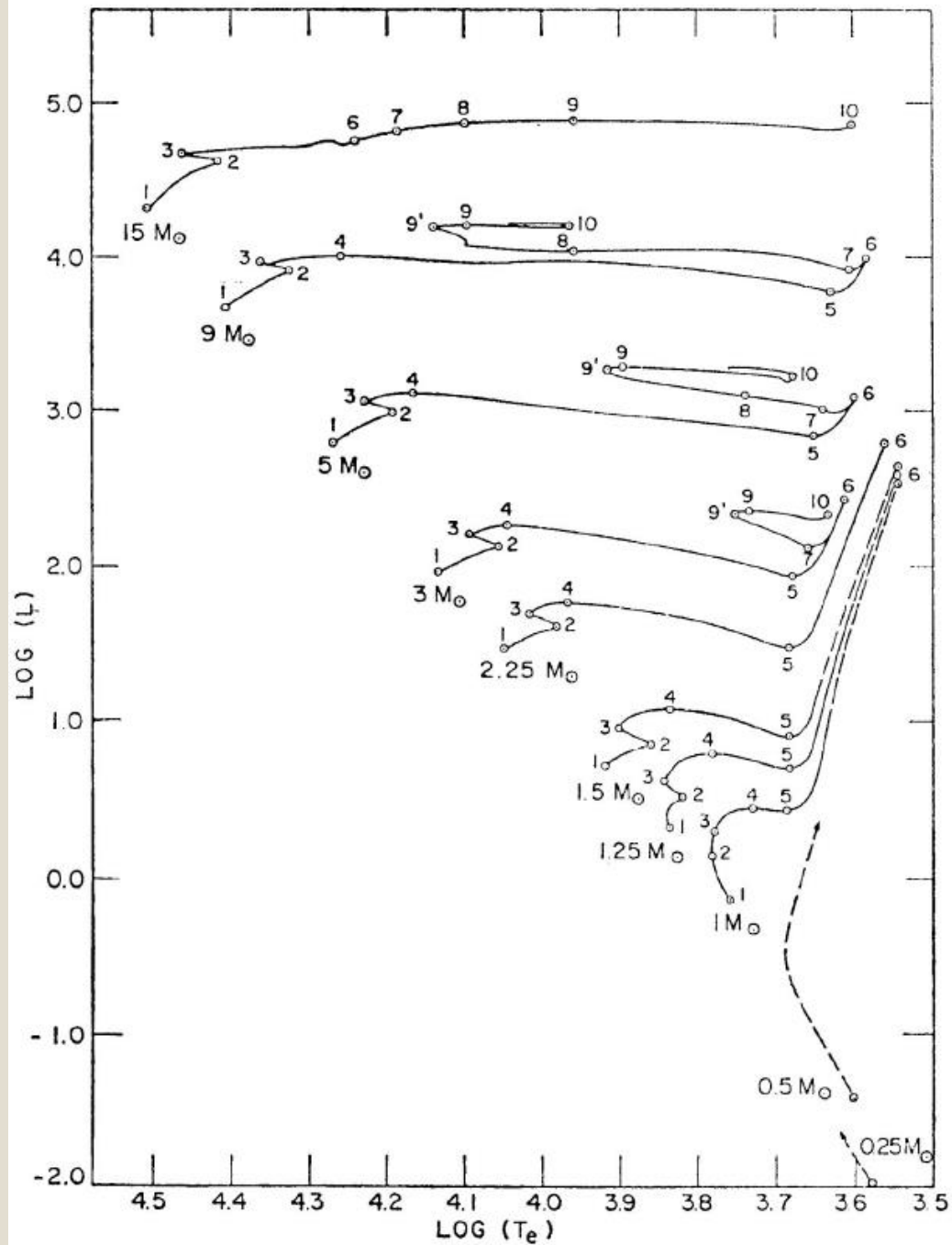
# ХАРАКТЕРНЫЕ ВРЕМЕНА

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 продолжаются все меньшее и меньшее время.

| Mass ( $M_{\odot}$ ) | MS (GYrs) | SB (MYrs) | RGB (MYrs) | RGB <sub>foot</sub>       |                      |                        |                            | RGB <sub>end</sub>        |                      |                        |                            |
|----------------------|-----------|-----------|------------|---------------------------|----------------------|------------------------|----------------------------|---------------------------|----------------------|------------------------|----------------------------|
|                      |           |           |            | Core mass ( $M_{\odot}$ ) | T <sub>eff</sub> (K) | Radius ( $R_{\odot}$ ) | Luminosity ( $L_{\odot}$ ) | Core mass ( $M_{\odot}$ ) | T <sub>eff</sub> (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                      |

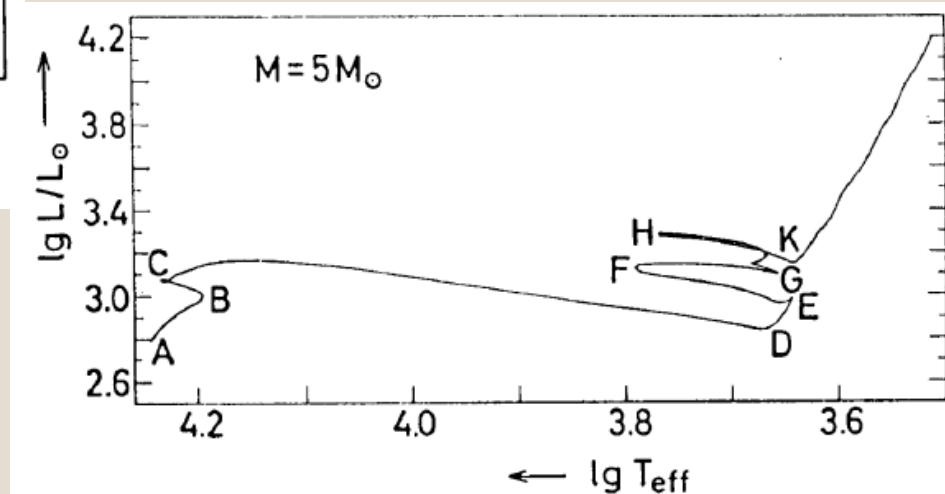
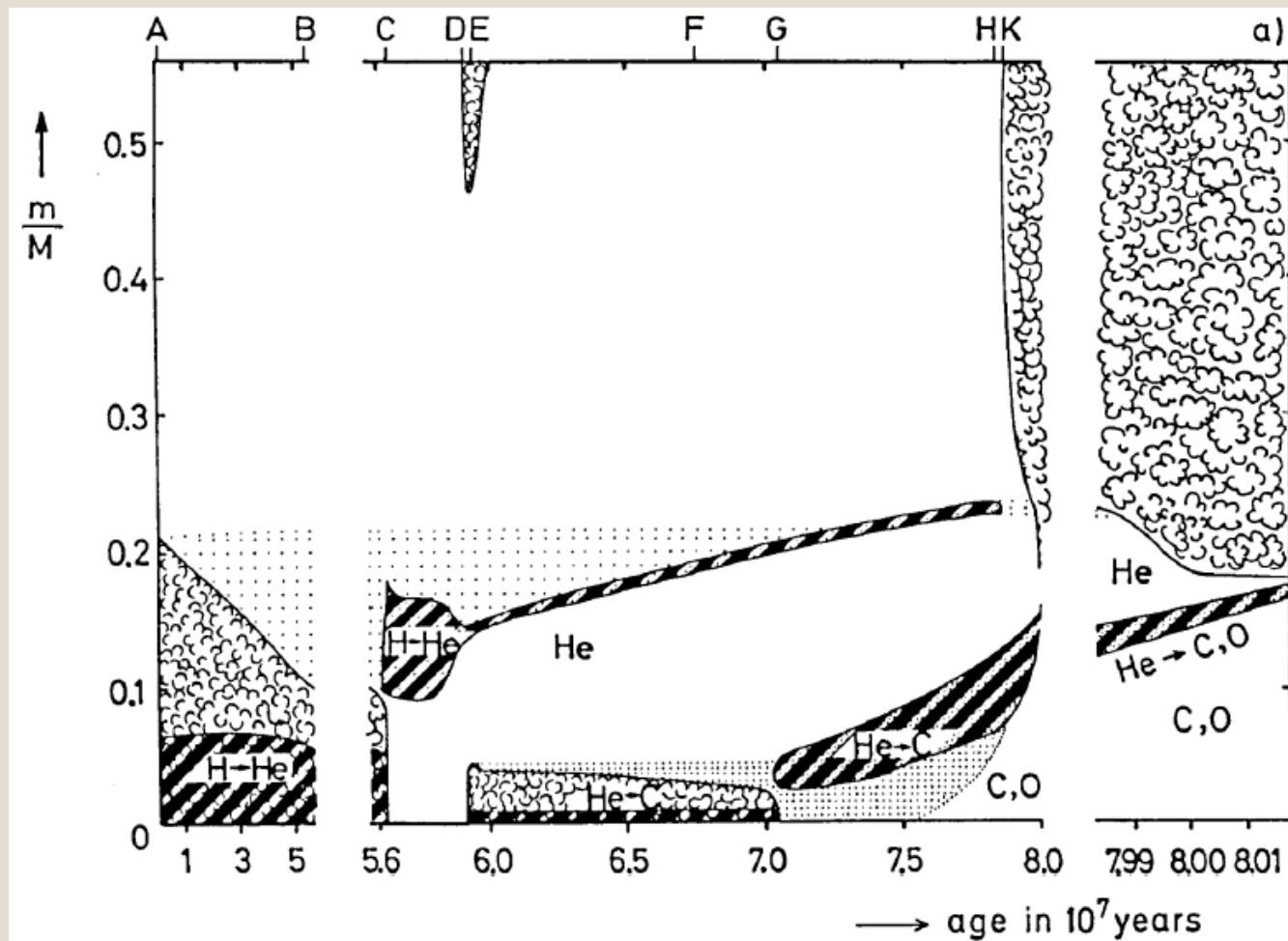


| Interval (i-j)       |           |           |           |           |              |
|----------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------------|
|                      | (1-2)     | (2-3)     | (3-4)     | (4-5)     | (5-6)        |
| Mass ( $M_{\odot}$ ) |           |           |           |           |              |
| 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) | $\geq 2$ (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) |

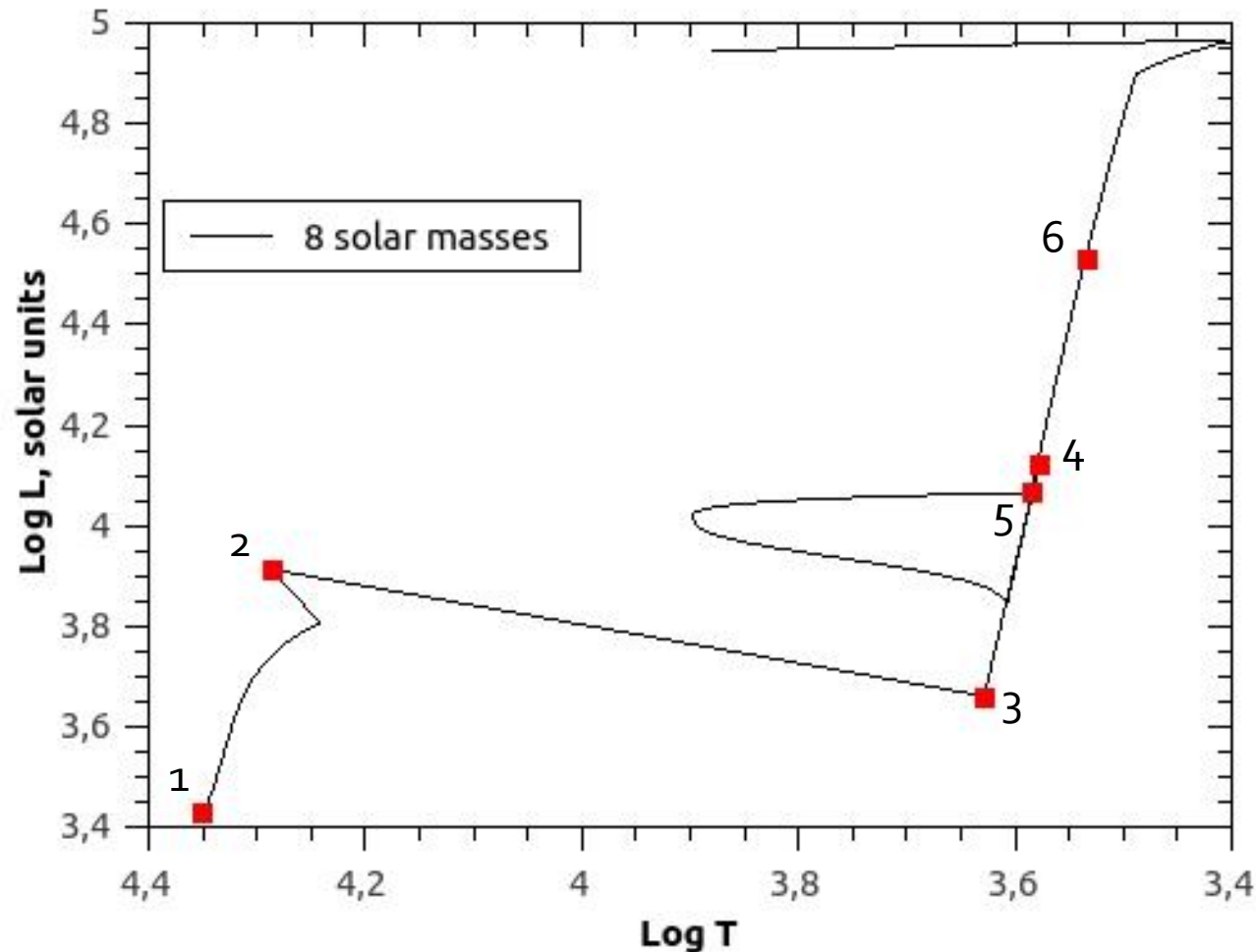
| Interval (i-j)       |          |          |          |          |
|----------------------|----------|----------|----------|----------|
|                      | (6-7)    | (7-8)    | (8-9)    | (9-10)   |
| Mass ( $M_{\odot}$ ) |          |          |          |          |
| 15                   | 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/>

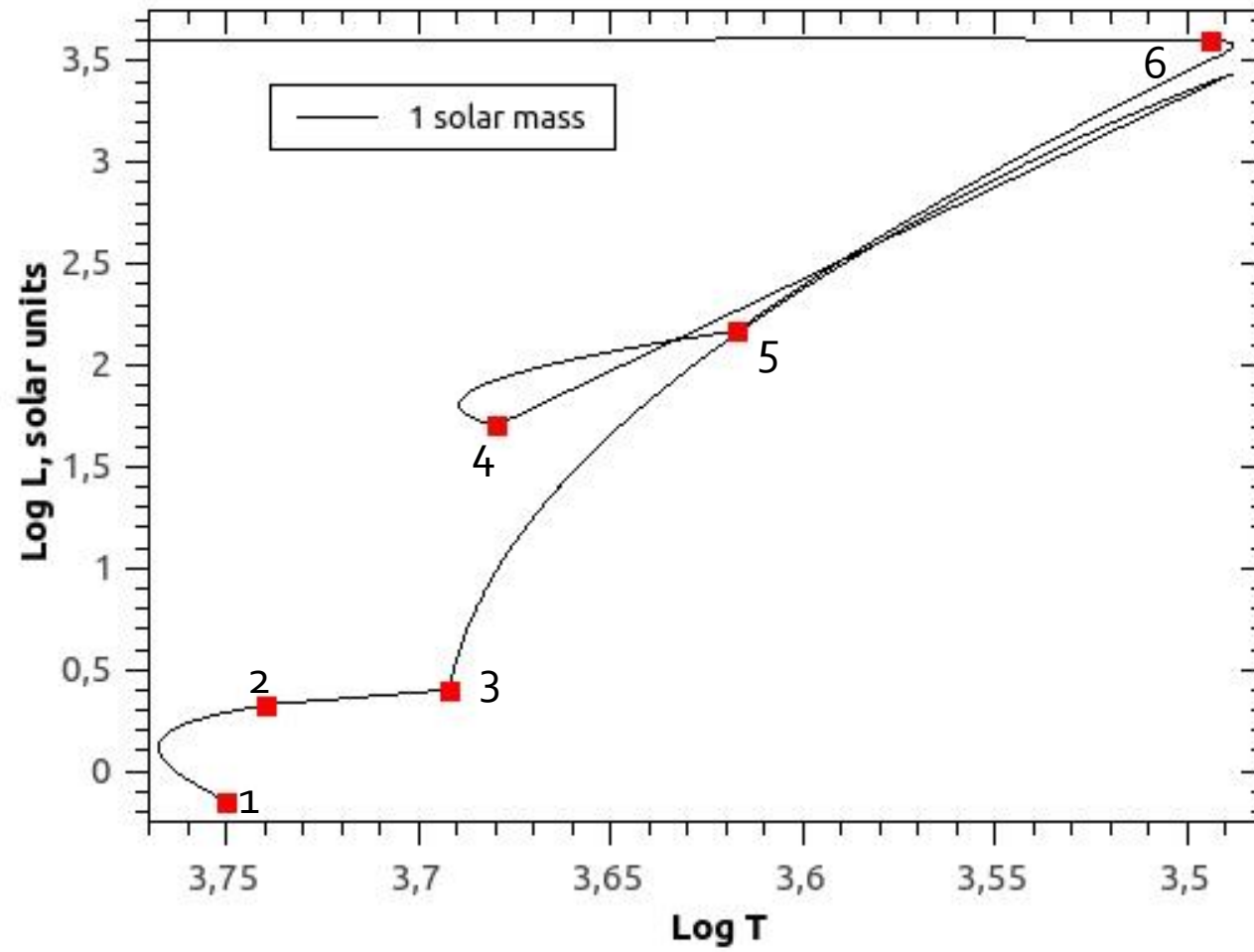


# СТАДИИ SSE



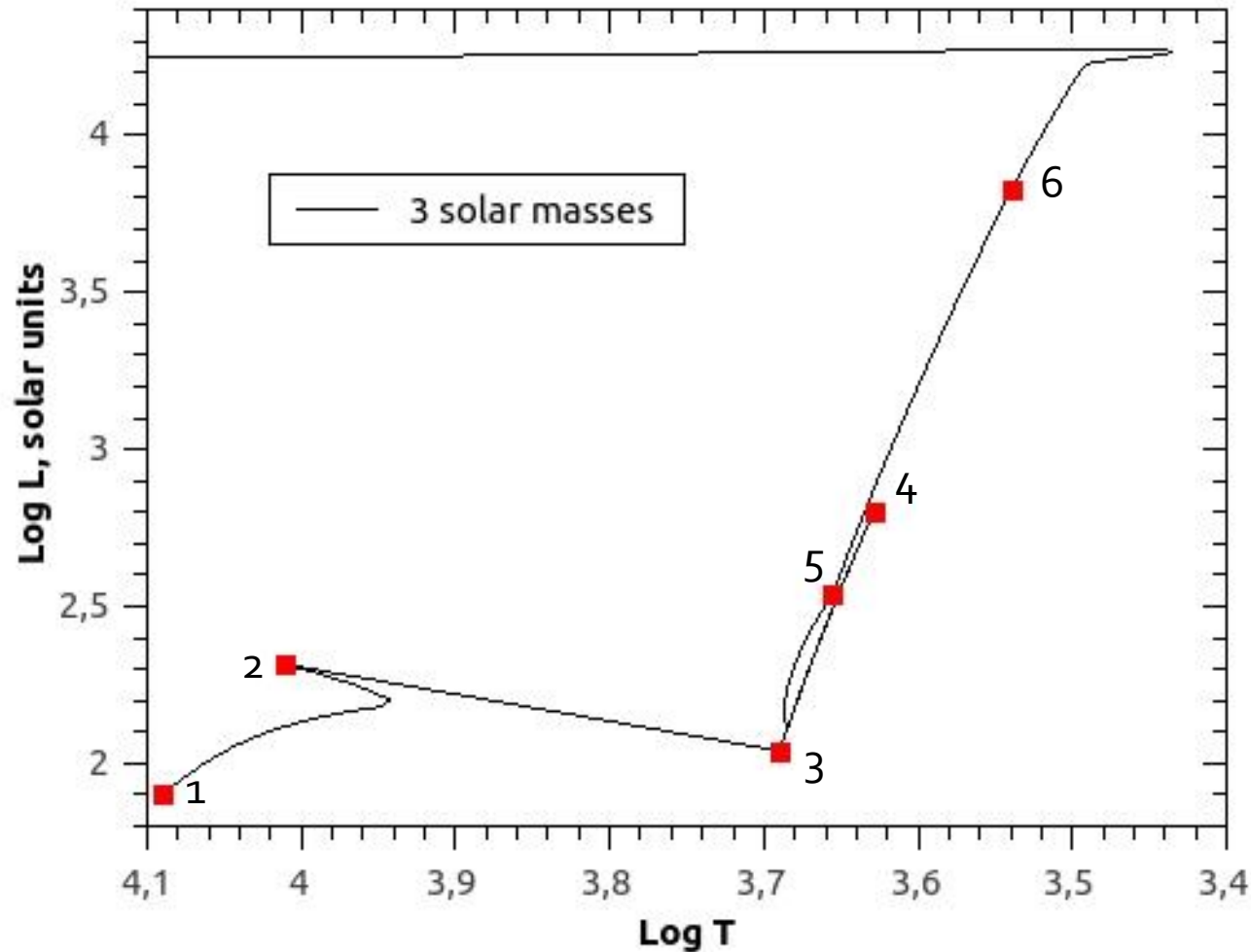
- 0 – ГП,  $M < 0.7$
- 1 – ГП,  $M > 0.7$
- 2 – Провал Герцшпрунга
- 3 – Первая ветвь гигантов
- 4 – Горение гелия в ядре
- 5 – EAGB
- 6 – TPAGB
- 7 – Гелиевое ядро (гелиевая ГП)
- 8 – Провал Герцшпрунга для гелиевых звезд
- 9 – Ветвь гигантов для гелиевых звезд
- 10 – Гелиевый БК
- 11 – СО белый карлик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

# СТАДИИ SSE

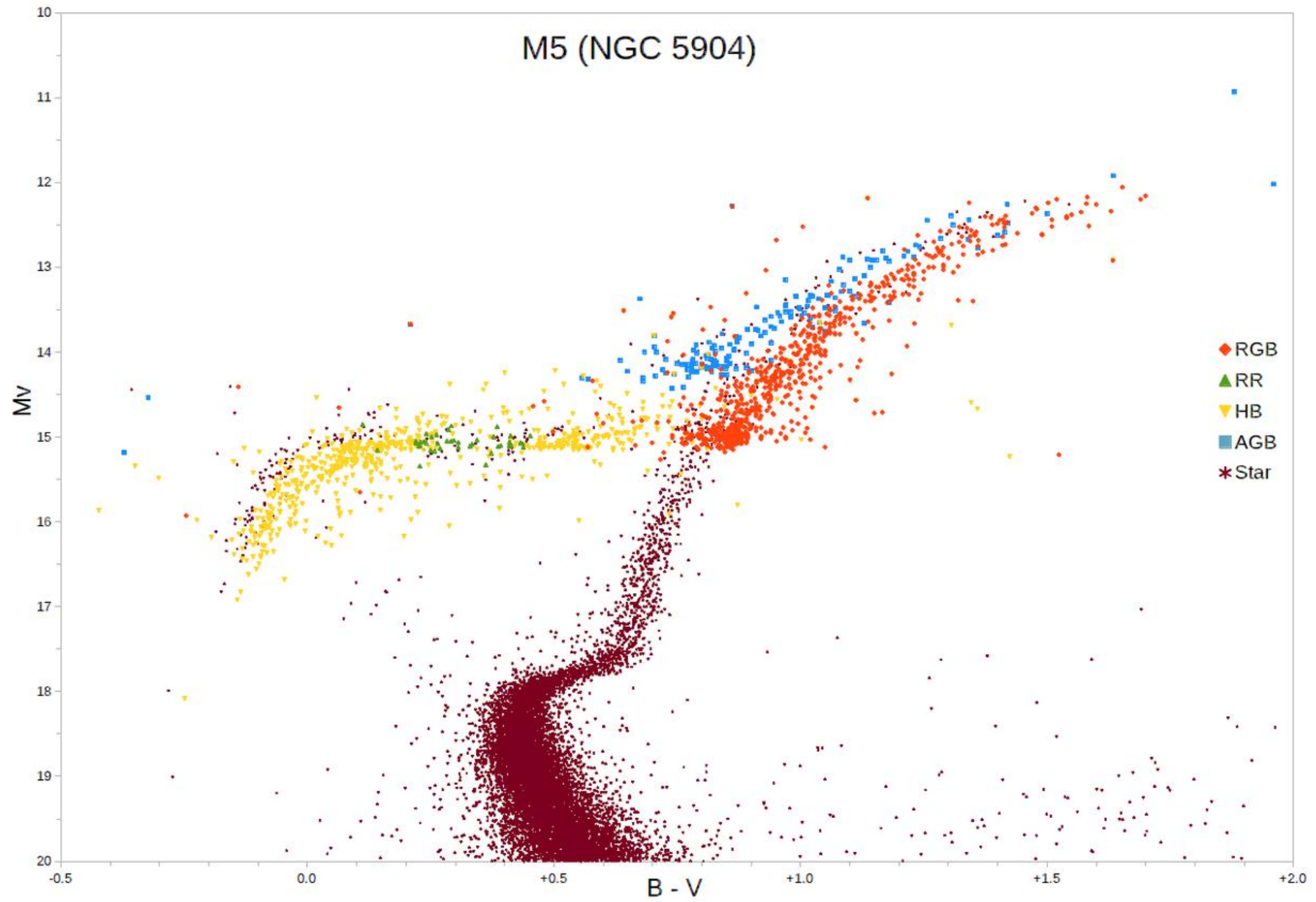


- 0 – ГП,  $M < 0.7$
- 1 – ГП,  $M > 0.7$
- 2 – Провал Герцшпрунга
- 3 – Первая ветвь гигантов
- 4 – Горение гелия в ядре
- 5 – EAGB
- 6 – TRAGB
- 7 – Гелиевое ядро (гелиевая ГП)
- 8 – Провал Герцшпрунга для гелиевых звезд
- 9 – Ветвь гигантов для гелиевых звезд
- 10 – Гелиевый БК
- 11 – СО белый карлик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

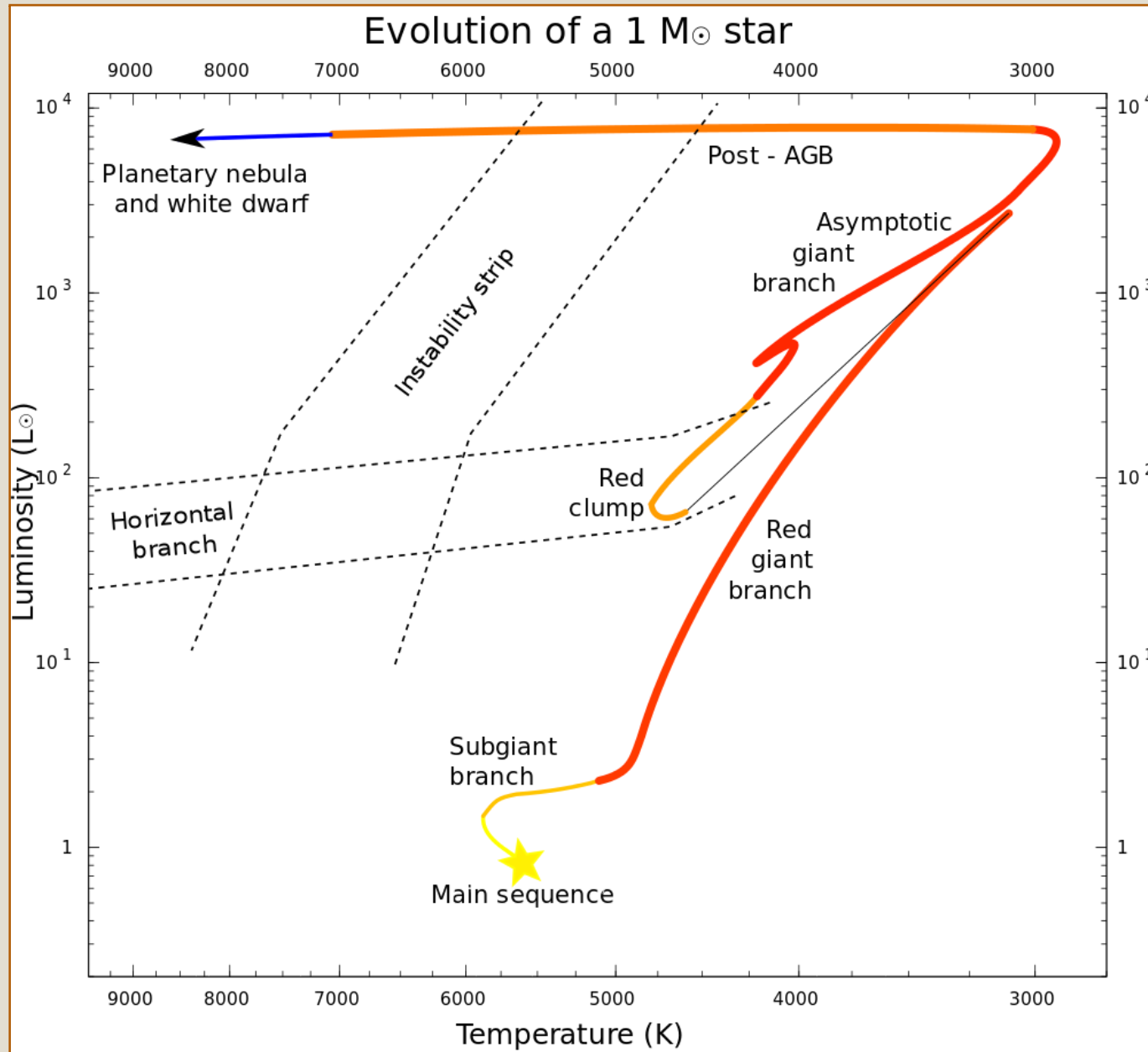
# СТАДИИ SSE



- 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



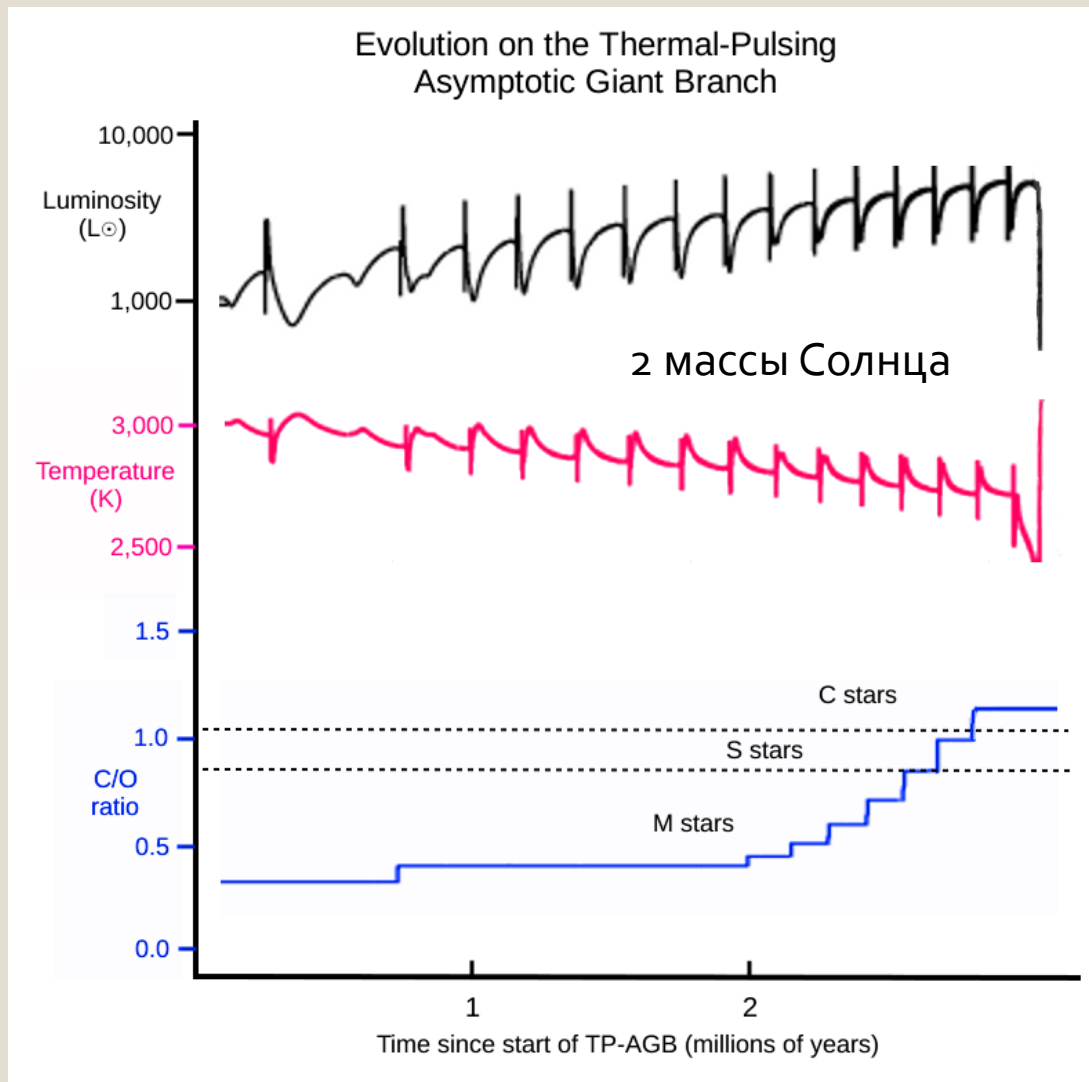
# ГОРИЗОНТАЛЬНАЯ ВЕТВЬ



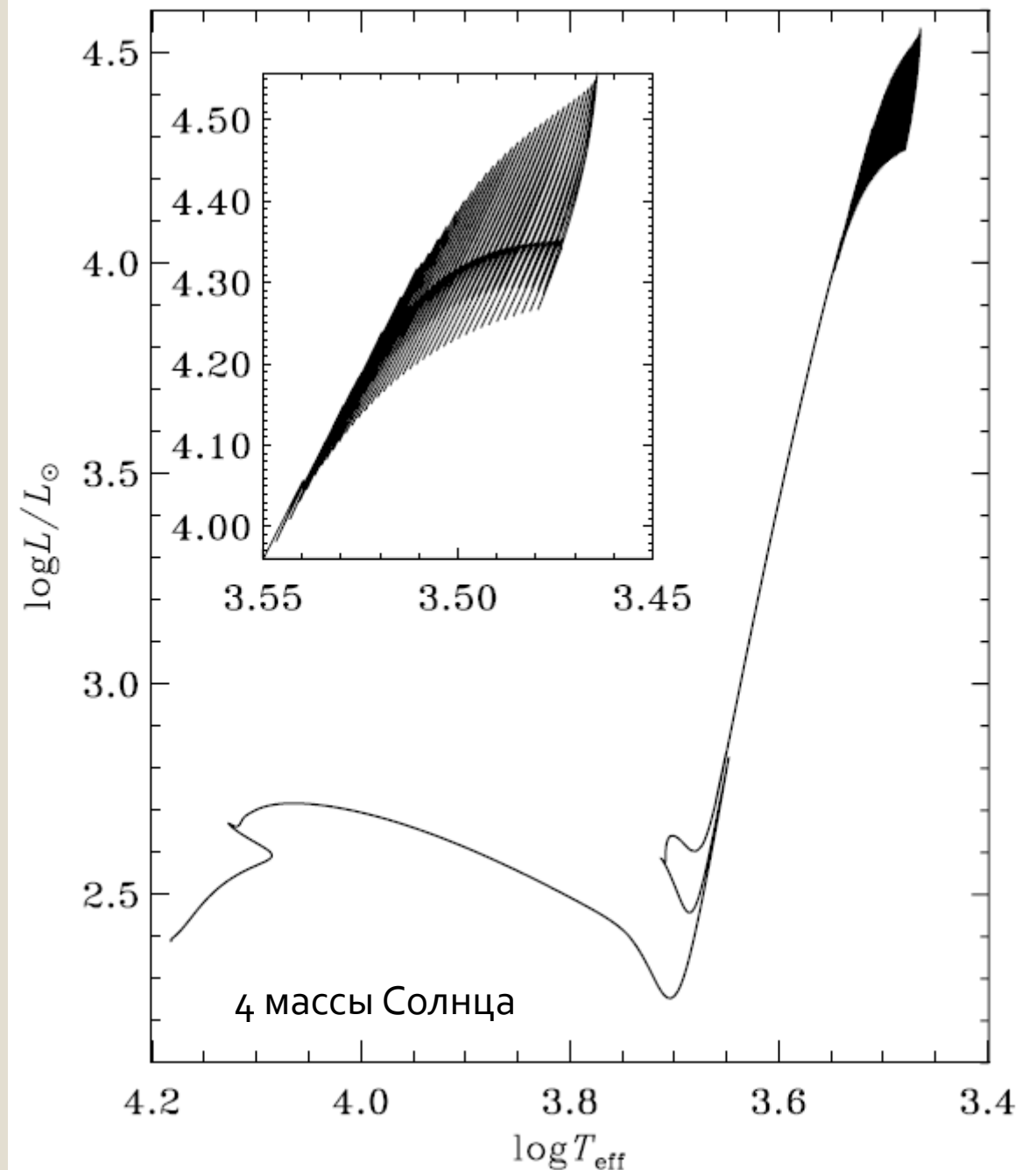
На горизонтальной ветви идет горение гелия в ядре звезды. Массы ядер у разных звезд примерно одинаковы. Поэтому светимость отличается слабо. А вот температура зависит от массы водородной оболочки. И этот параметр отличается сильно.

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

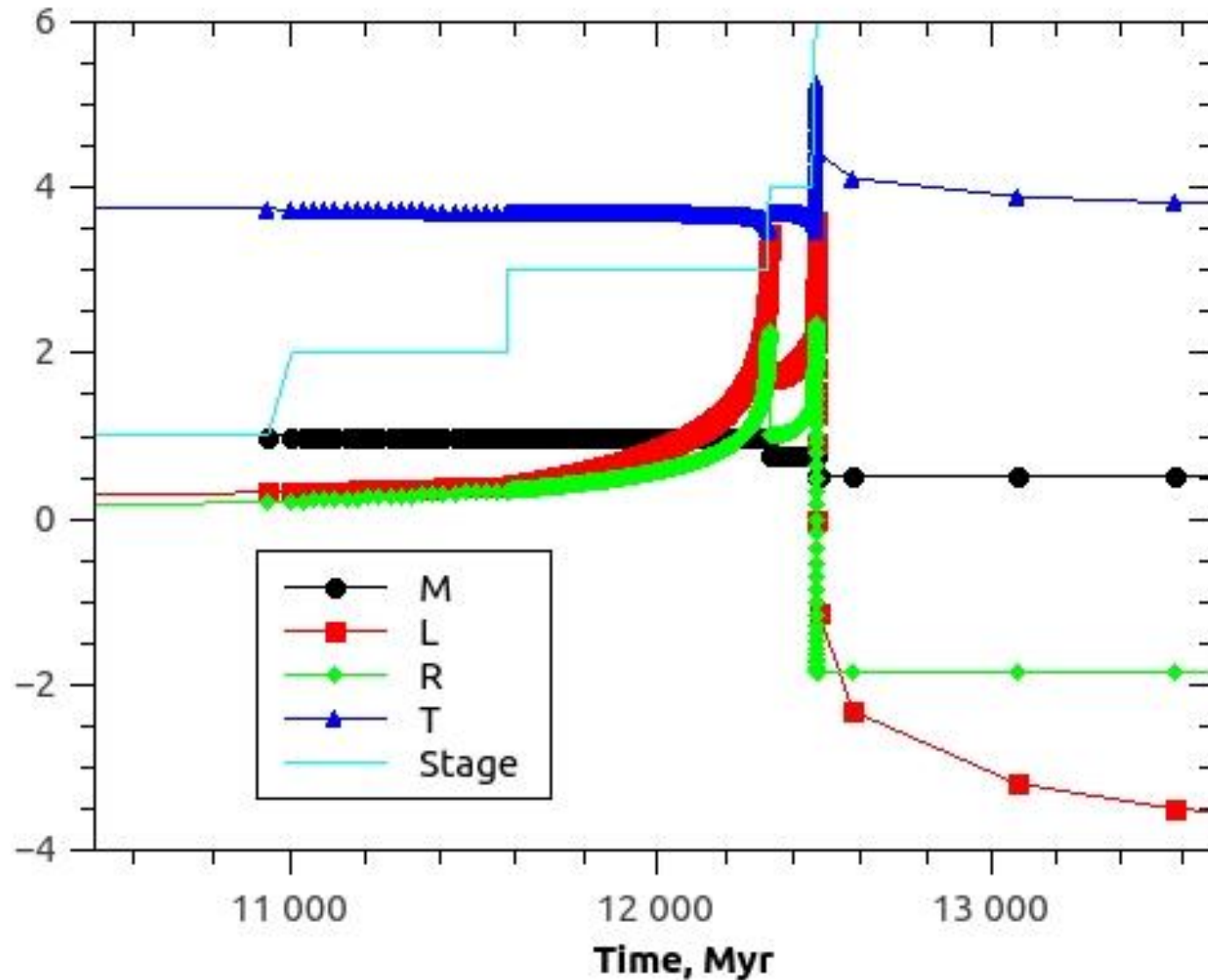
# TP-AGB



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

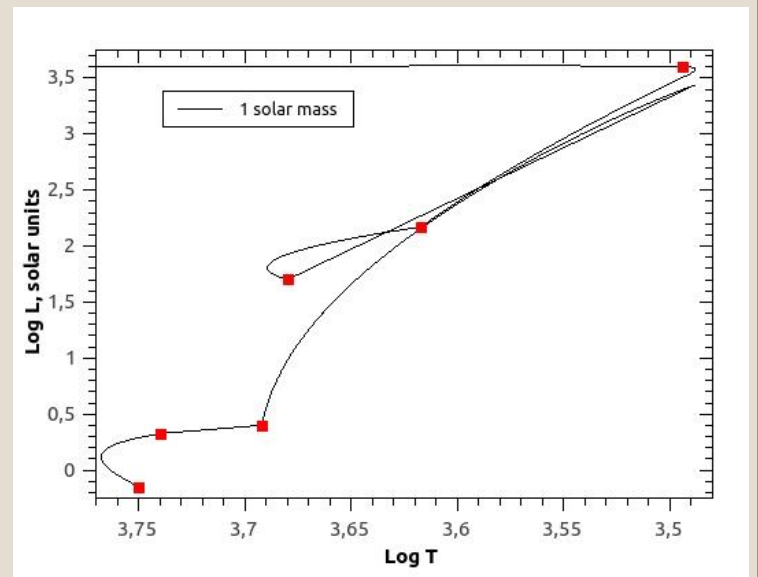


# ЭВОЛЮЦИЯ ЗВЕЗДЫ МАССОЙ $1M_{\text{SUN}}$

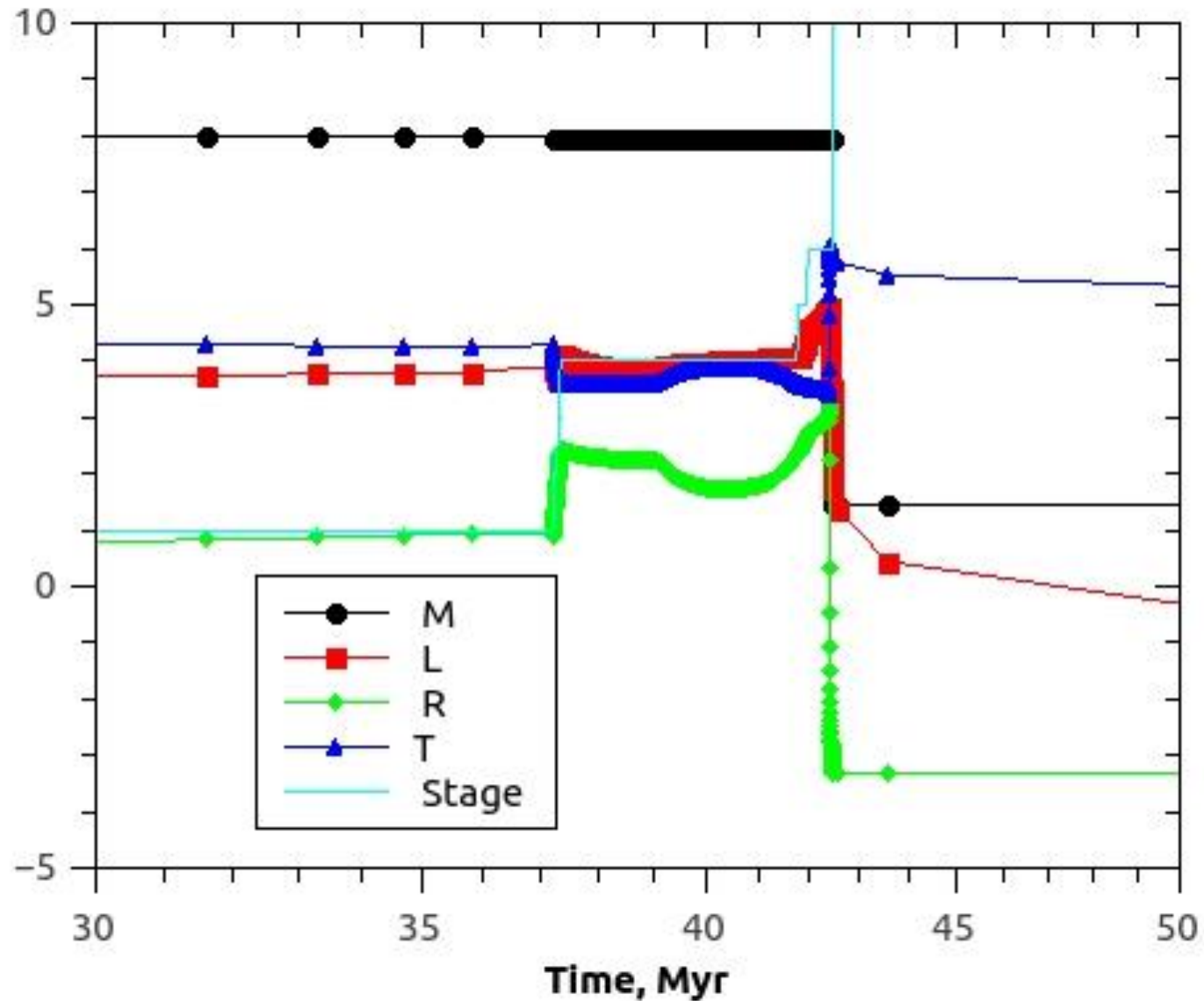


Расчеты проведены  
с помощью программы SSE.

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

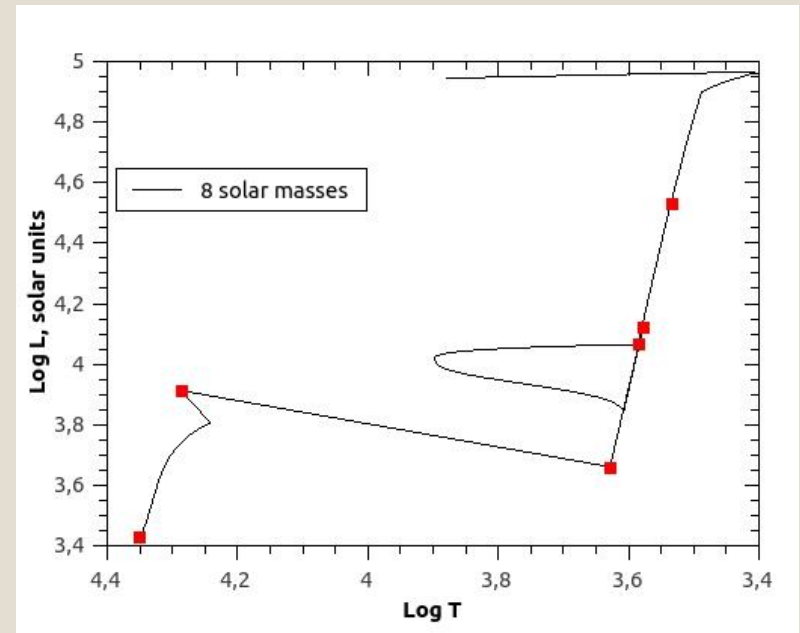


# ЭВОЛЮЦИЯ ЗВЕЗДЫ МАССОЙ $8M_{\text{SUN}}$

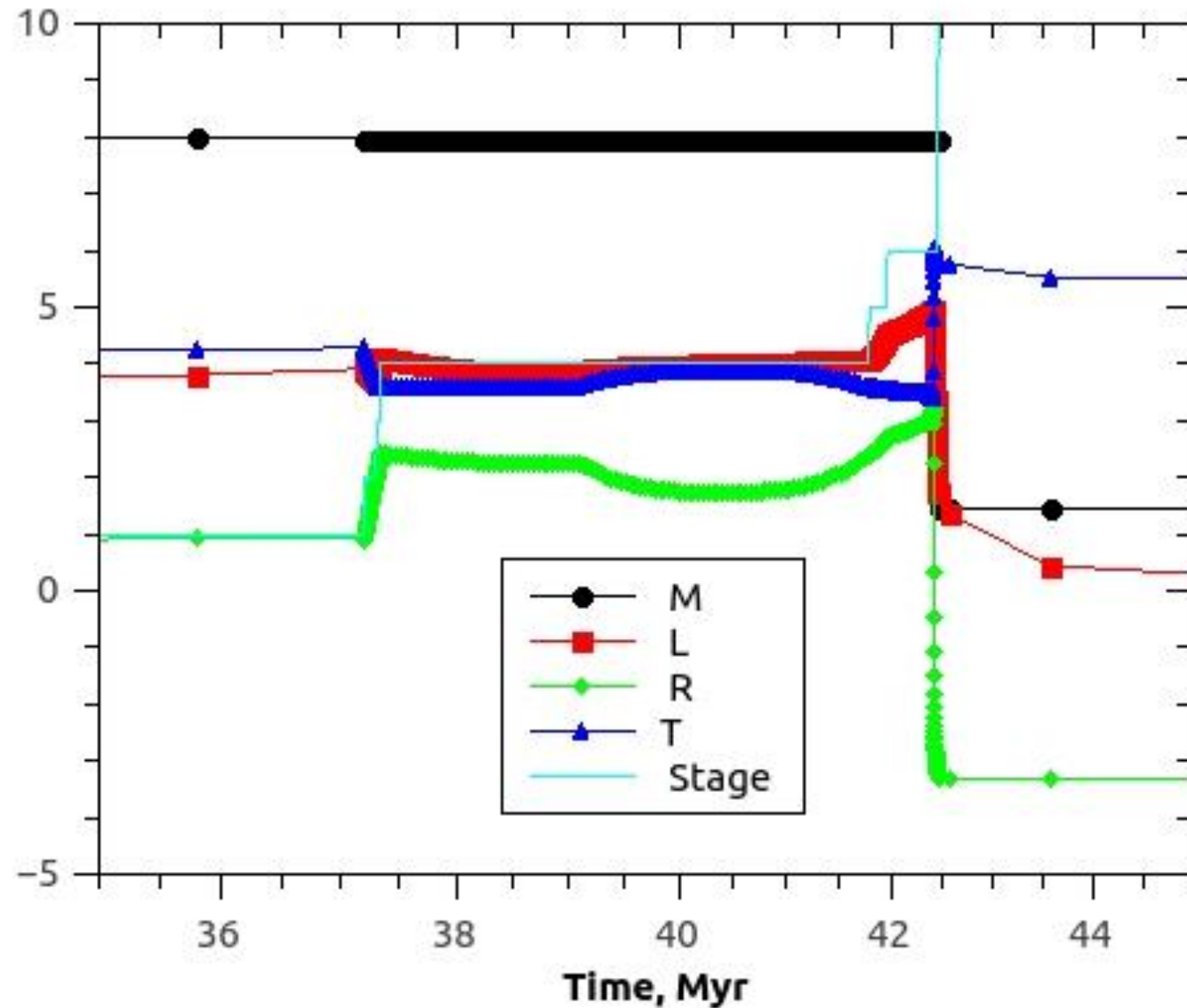


Расчеты проведены  
с помощью программы SSE.

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

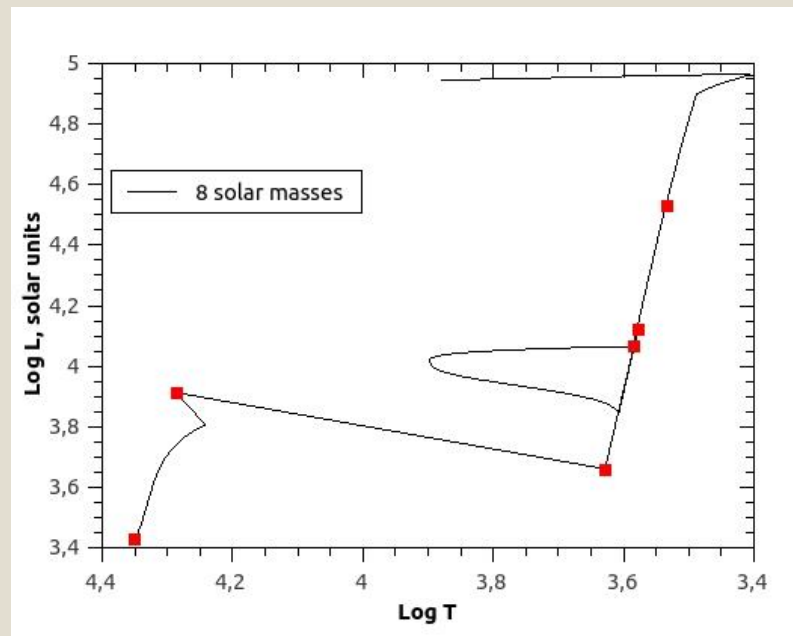


# ЭВОЛЮЦИЯ ЗВЕЗДЫ МАССОЙ $8M_{\text{SUN}}$

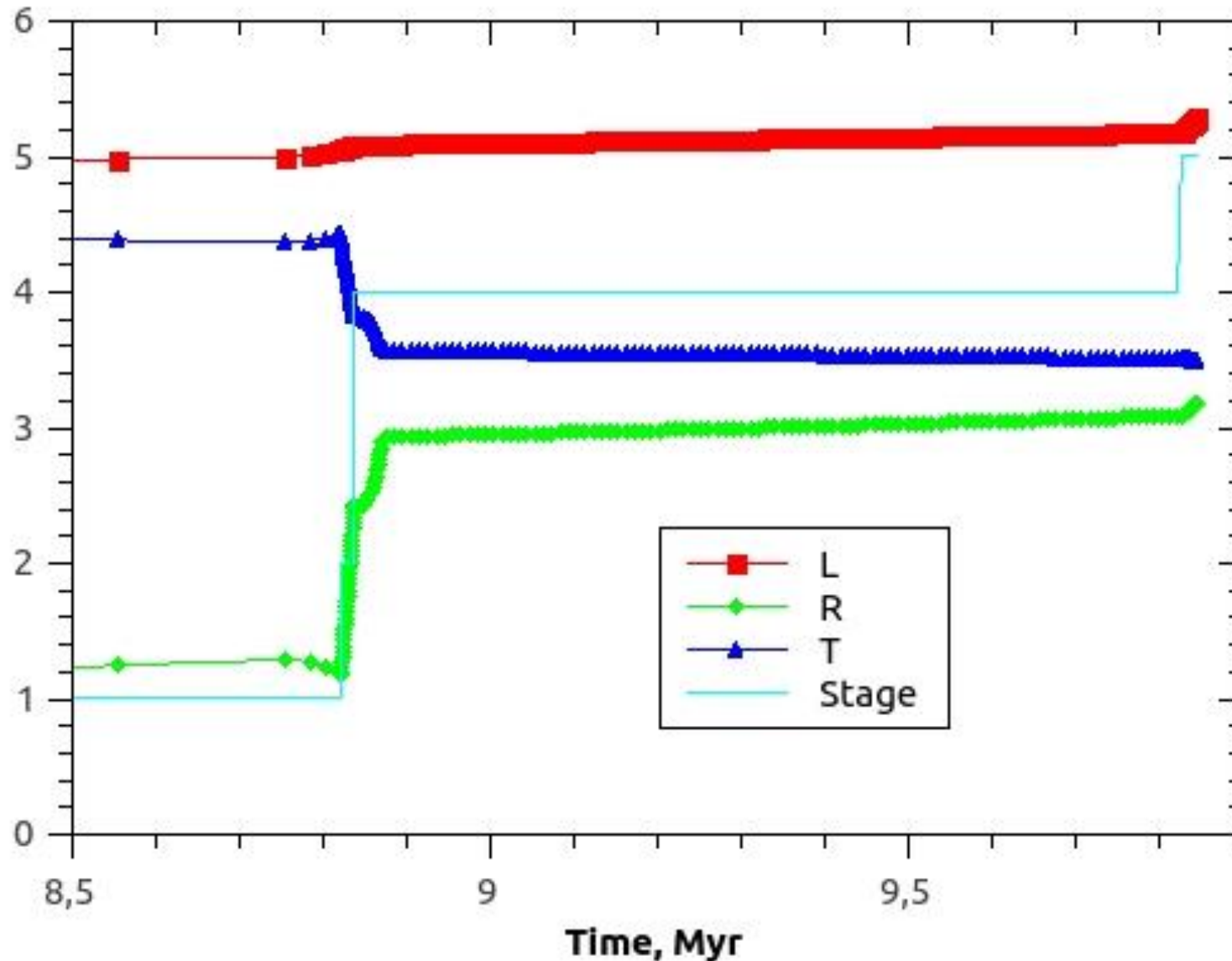


Расчеты проведены с помощью программы SSE.

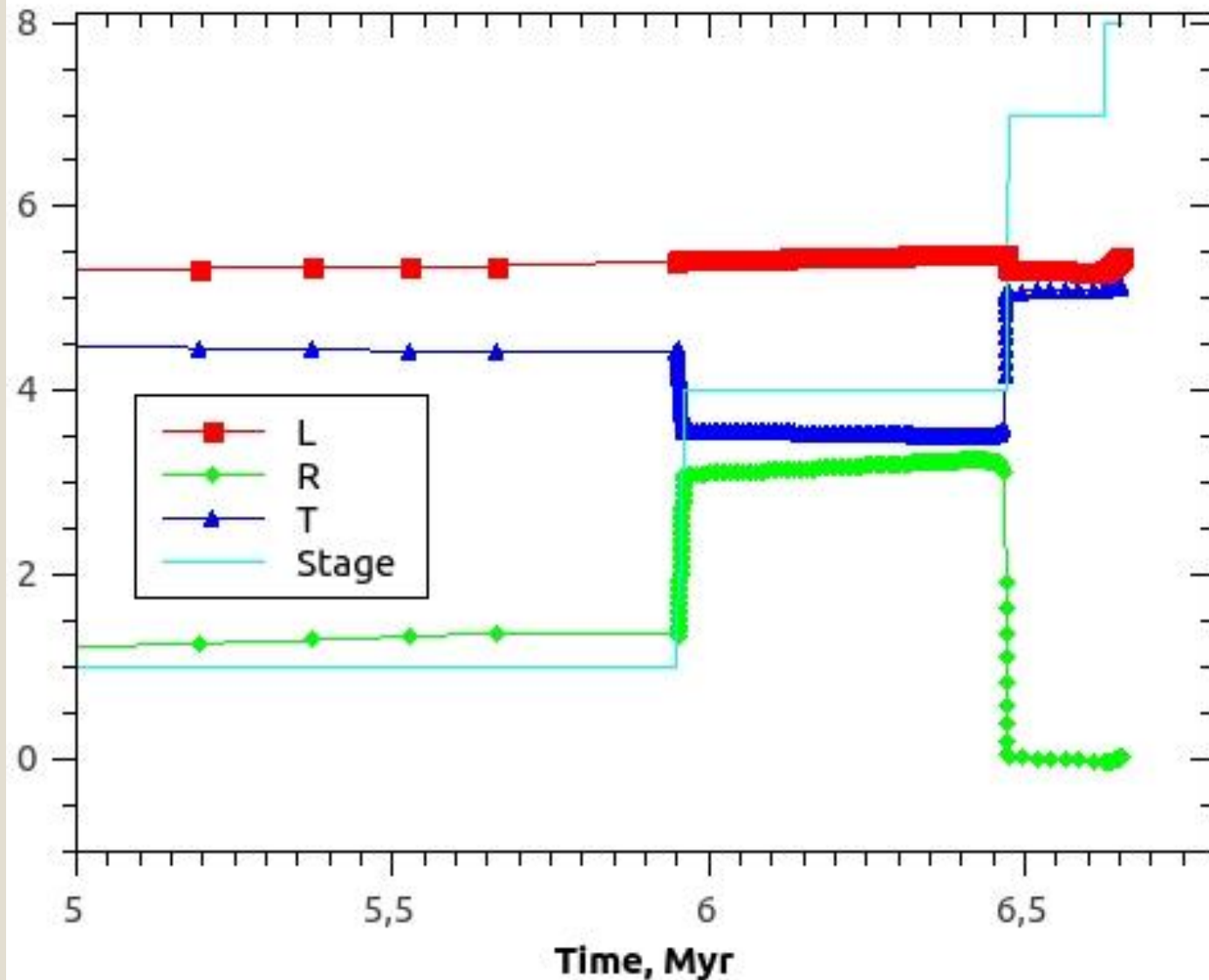
- 1 – ГП,  $M > 0.7$
- 2 – Провал Герцшпрунга
- 3 – Первая ветвь гигантов
- 4 – Горение гелия в ядре
- 5 – EAGB
- 6 – TPAGB



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



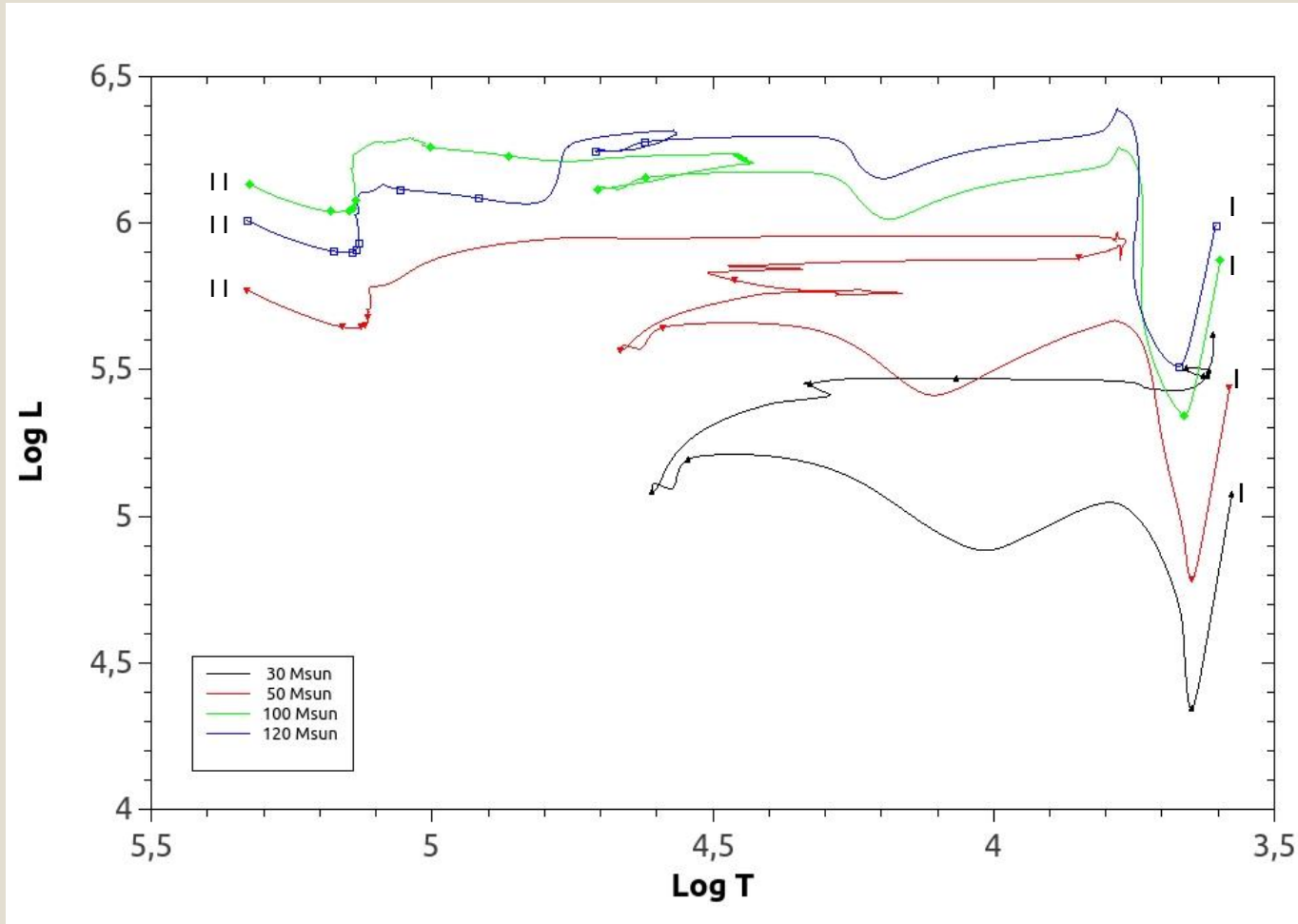
# ЭВОЛЮЦИЯ ЗВЕЗДЫ МАССОЙ $30M_{\text{SUN}}$



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

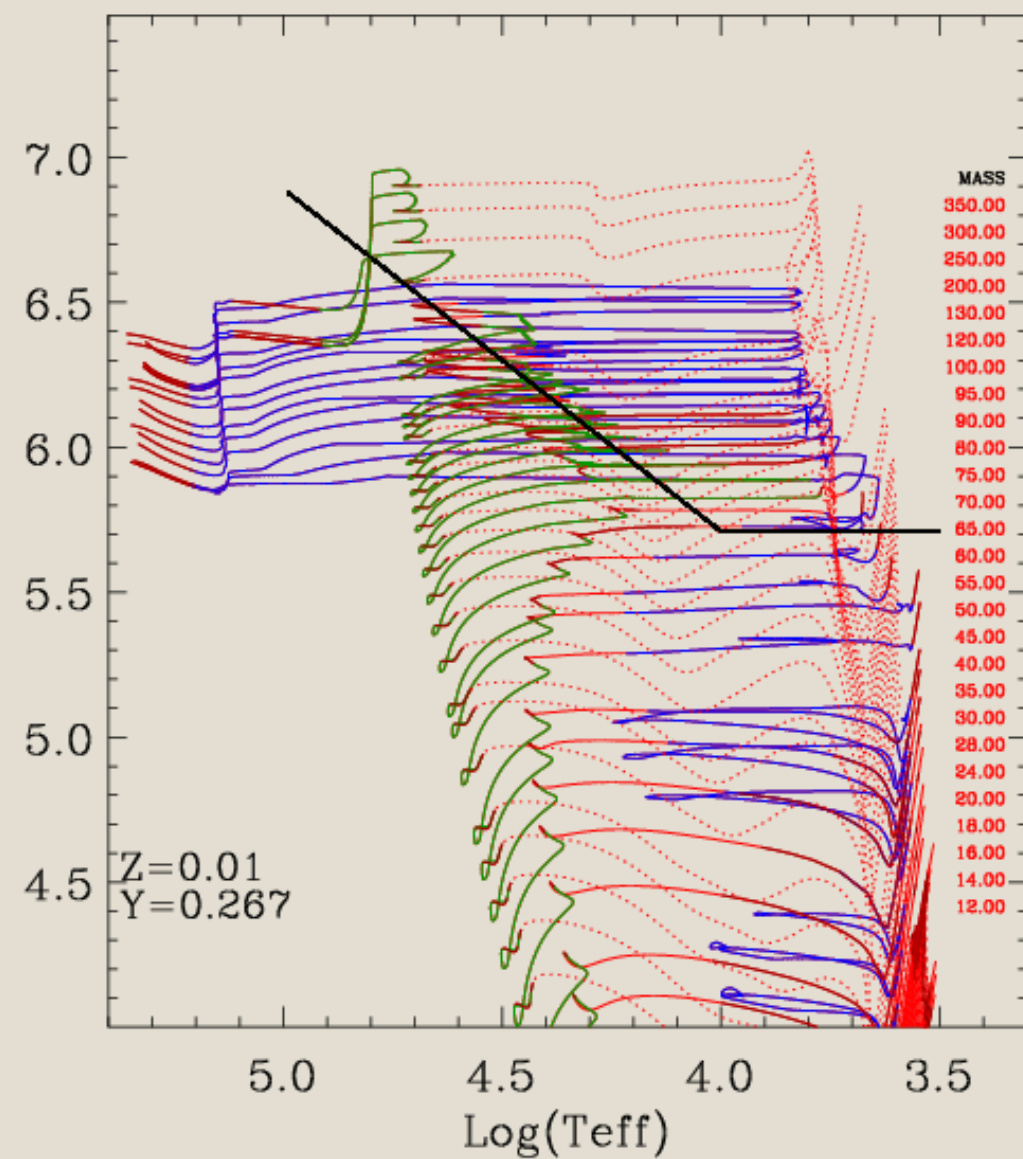
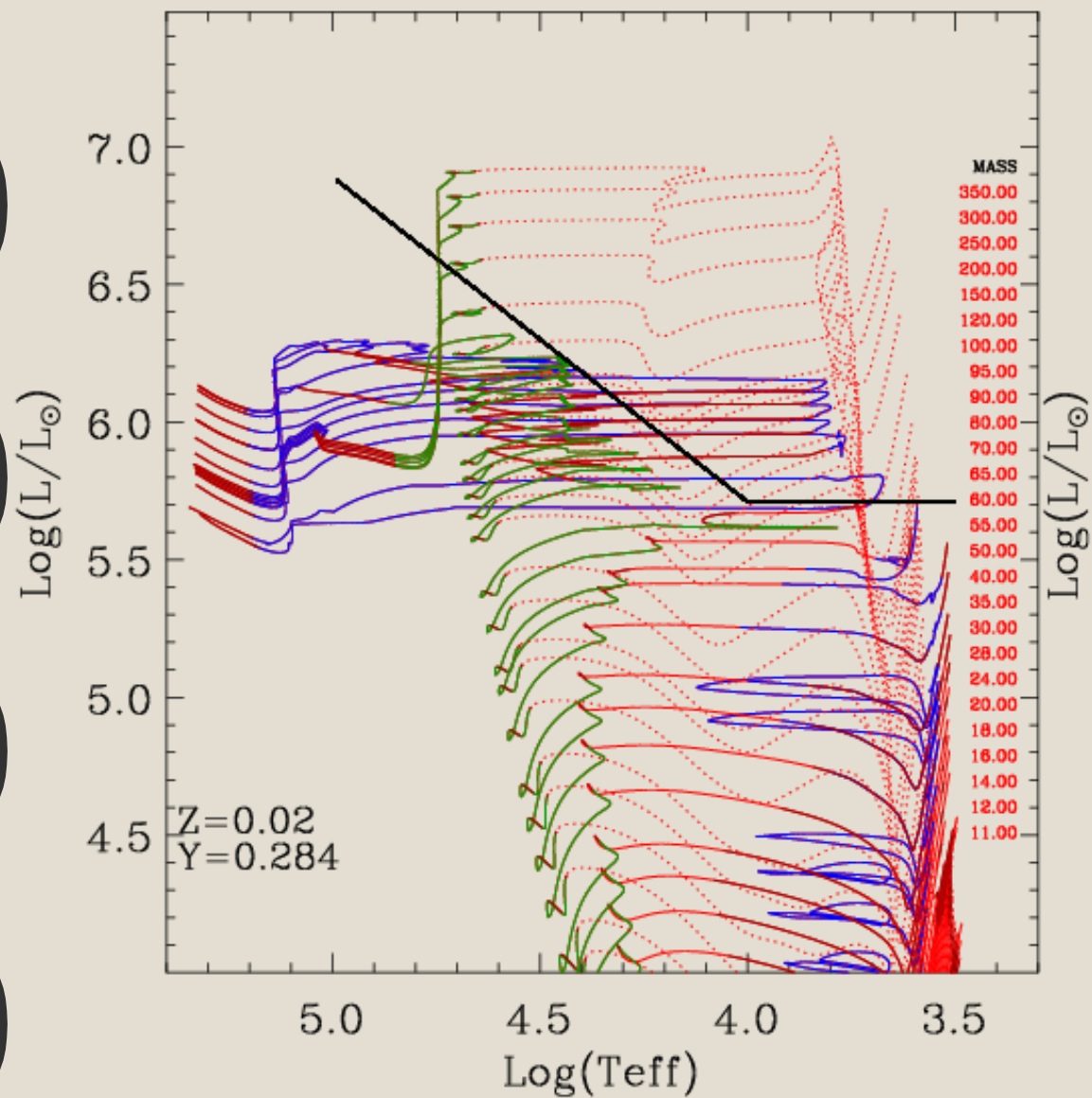
# ЭВОЛЮЦИЯ МАССИВНЫХ ЗВЕЗД



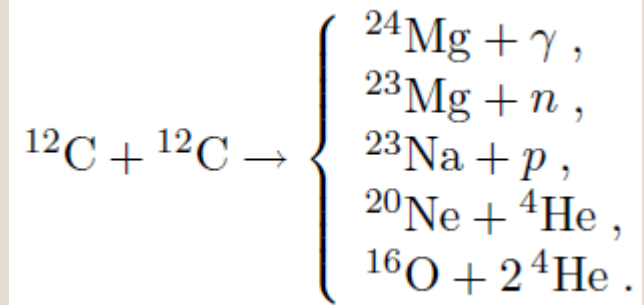
- 1 Начало
- 2 До-ГП
- 3 До-ГП
- 4 Вблизи начала ГП
- 5 Началось активное горение H
- 6 Конец горения водорода. Сжатие
- 7 Сжатие заканчивается. Выход на КГ
- 8 Основание ветви КГ
- 9 Red bump
- 10 Red bump end
- 11 Начало горения He (у массивных)

Использованы треки падуанской группы Bressan et al. (2012).  
[https://people.sissa.it/~sbressan/CAFo9\\_V1.2S\\_M36\\_LT/](https://people.sissa.it/~sbressan/CAFo9_V1.2S_M36_LT/)

# МАССИВНЫЕ ЗВЕЗДЫ

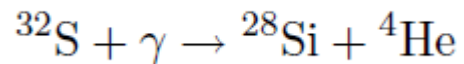
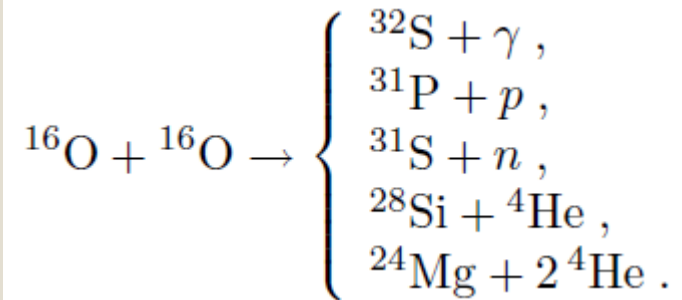


# РЕАКЦИИ В МАССИВНЫХ ЗВЕЗДАХ

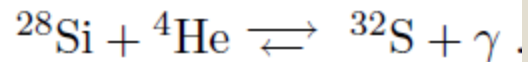


Первая стадия – горение углерода. Углеродное ядро при  $M > 10 M_{\text{Solar}}$  невырожденное.

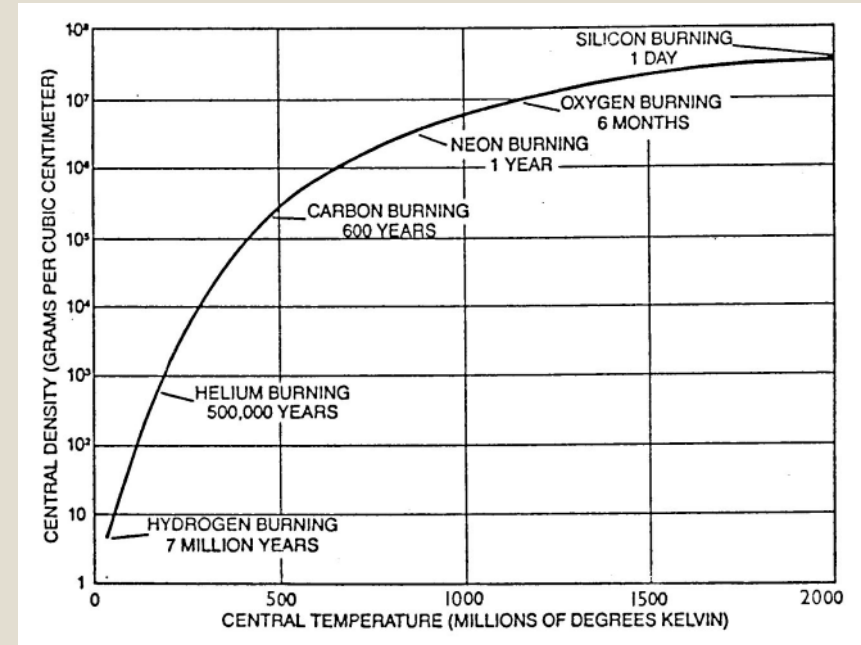
При миллиарде градусов начинается горение кислорода.



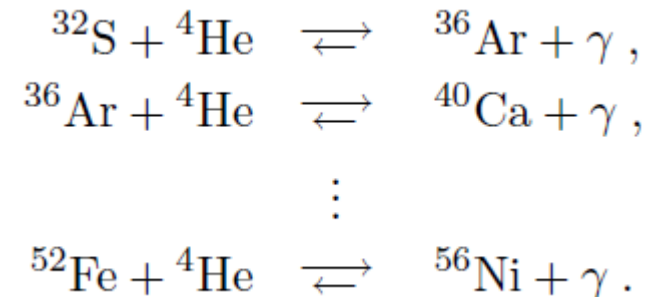
Фотодиссоциация приводит к появлению альфа-частиц.



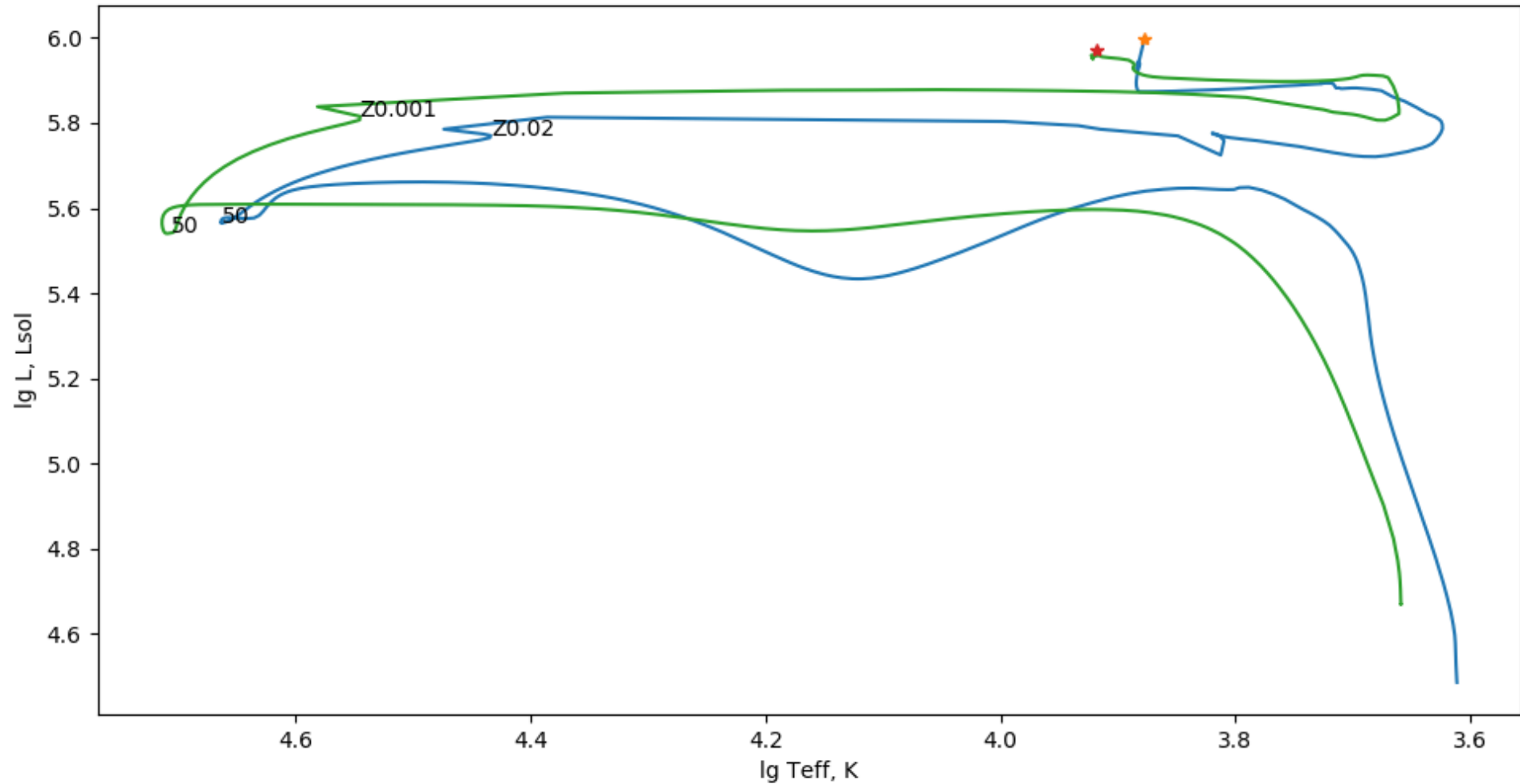
Наконец, начинаются реакции, доходящие до элементов группы железа.



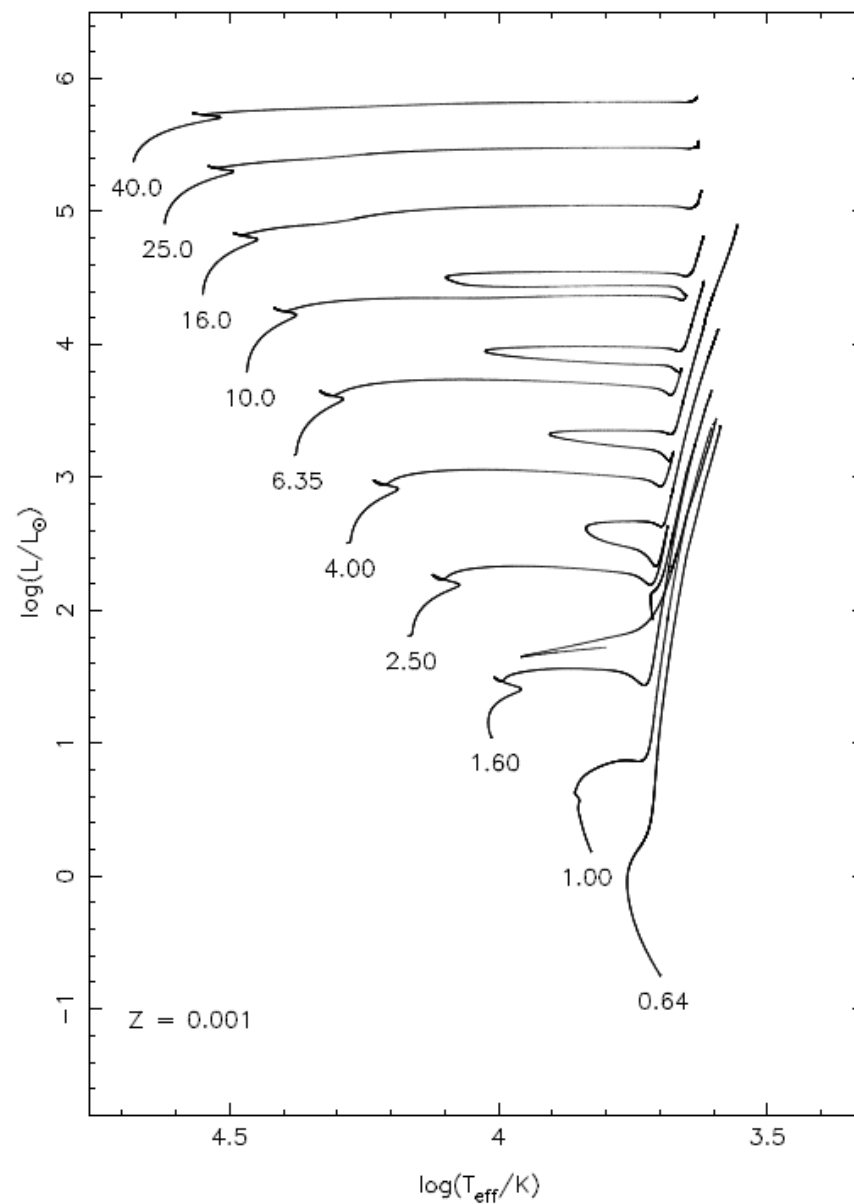
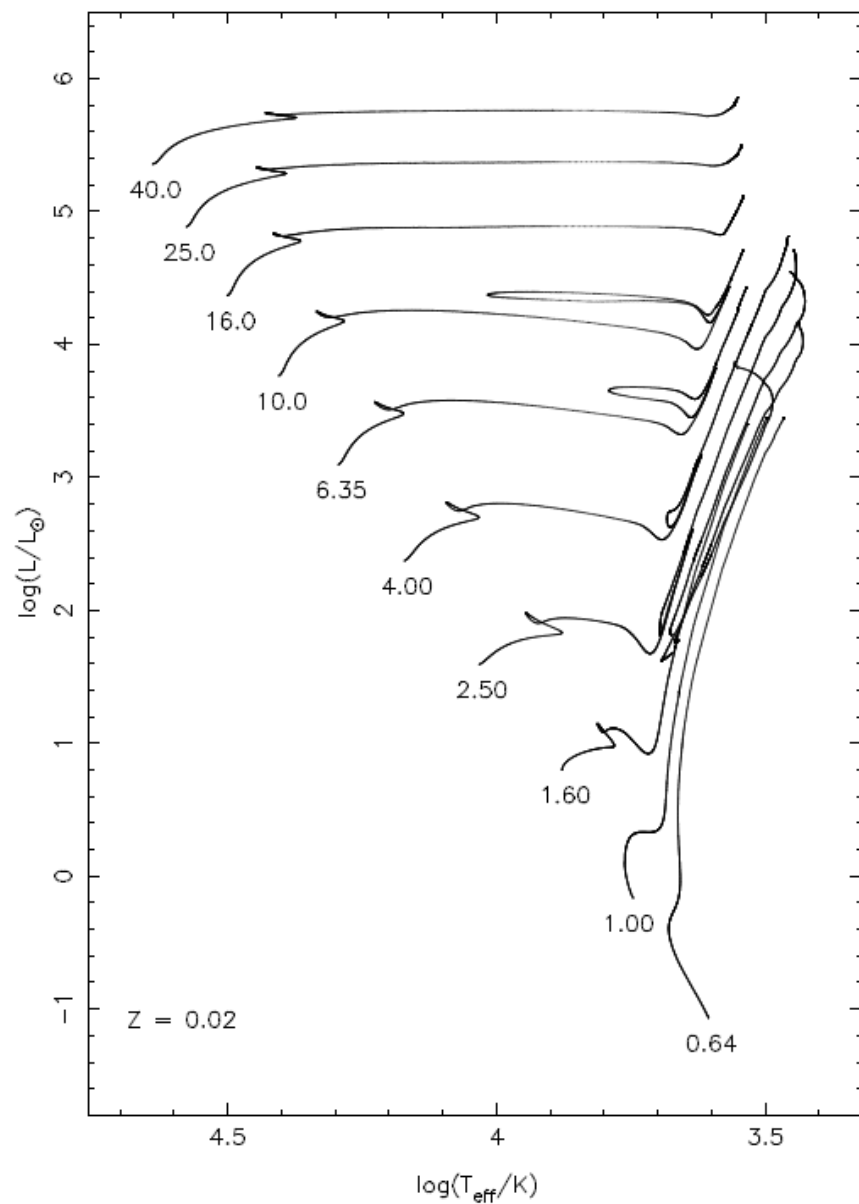
25 масс Солнца



# ТРЕКИ МЕСА: 50 МАСС СОЛНЦА



# РОЛЬ МЕТАЛЛИЧНОСТИ



# МЕТАЛЛИЧНОСТЬ

