

# Эволюция звезд

Д.С. Насонов, 19.01.2019.

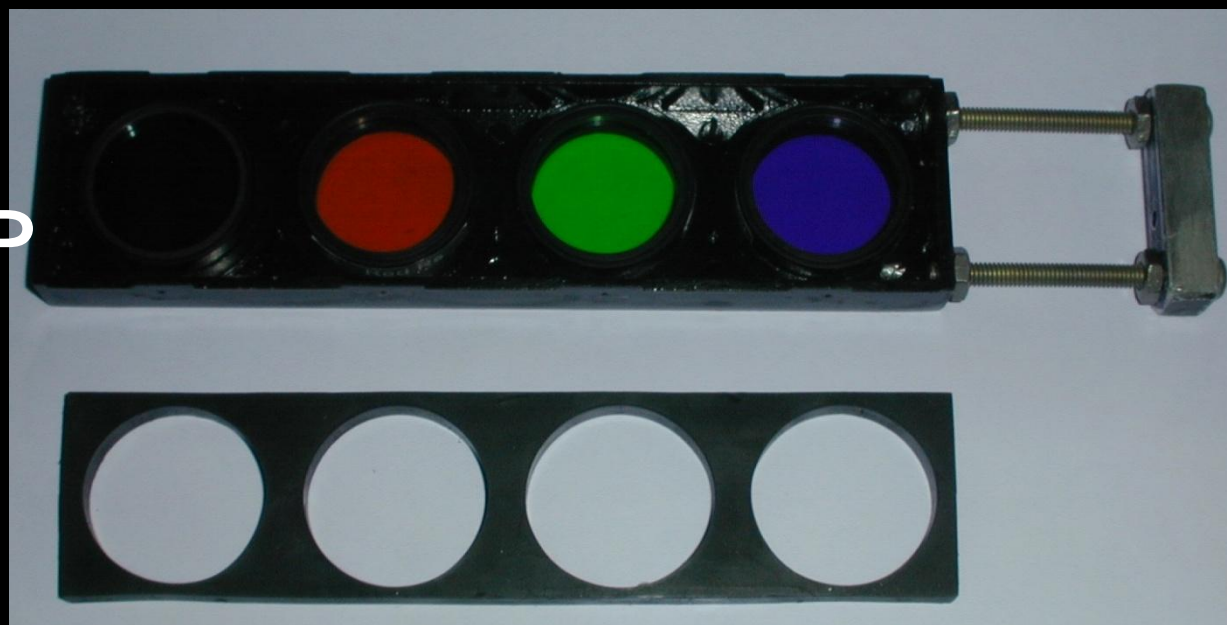
- Диаграмма ГР. Двумерная классификация звезд. Соотношения масса-светимость и радиус-светимость.
- Эволюция звезд. Характерные времена эволюции.
- Конечные стадии эволюции звезд: Белые карлики, черные дыры, нейтронные звезды. Пульсары.
- Гравитационный радиус.
- Эддингтоновская светимость.
- Эволюция шаровых и рассеянных звездных скоплений.

# Вступительные замечания

# Наблюдаемые параметры звезд

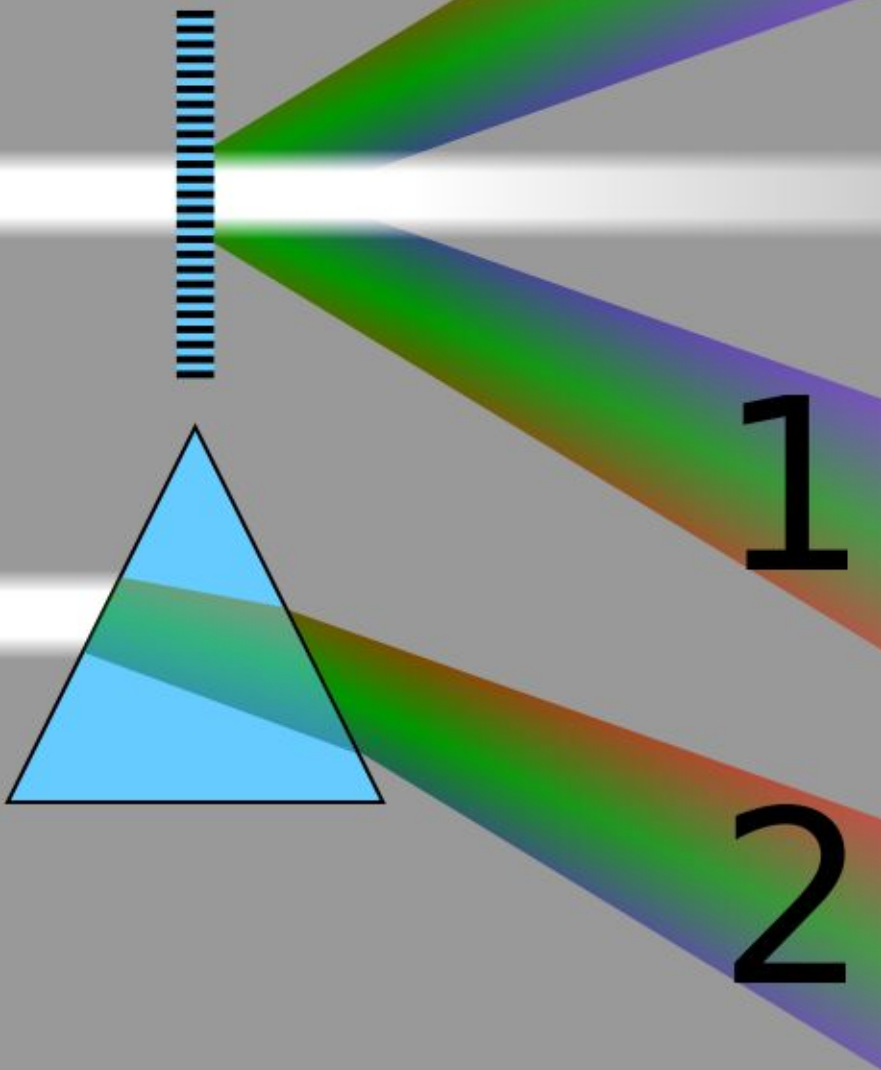
- **Блеск** (звездная величина и ее изменения):  
*Изменение блеска в 100 раз = изменение зв. вел. на  $5^m$ .*
- **Цвет** («количество света» на разных длинах волн)
- **Изменение положения со временем** (параллакс + собственное движение  $\rightarrow$  расстояние + скорость)
- **Спектр** (физические параметры, хим. состав, скорость вдоль луча зрения, ...)
- **Поляризация** света звезды (магнитное поле, отраженный свет)

Как измерить  
цвет?



# Призма и Дифракционная решетка

- Изобретение спектроскопа – 1814 год
- Создание дифракционной решетки – 1821 (1785)
- Объяснение природы темных линий в спектре Солнца – 1859 год



# Спектр лампы накаливания

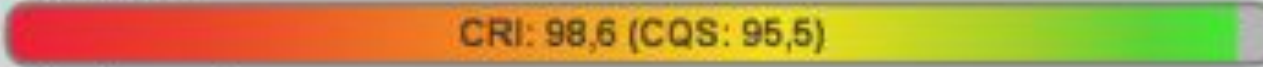
Measurement:

Light efficiency:



9 Lumen/Watt

Light quality:



CRI: 98,6 (CQS: 95,5)

Colour temperature:



2705 K

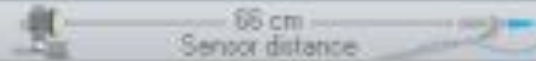
Output: 555 lm

Peak: 52,5 cd

Power: 56,2 W

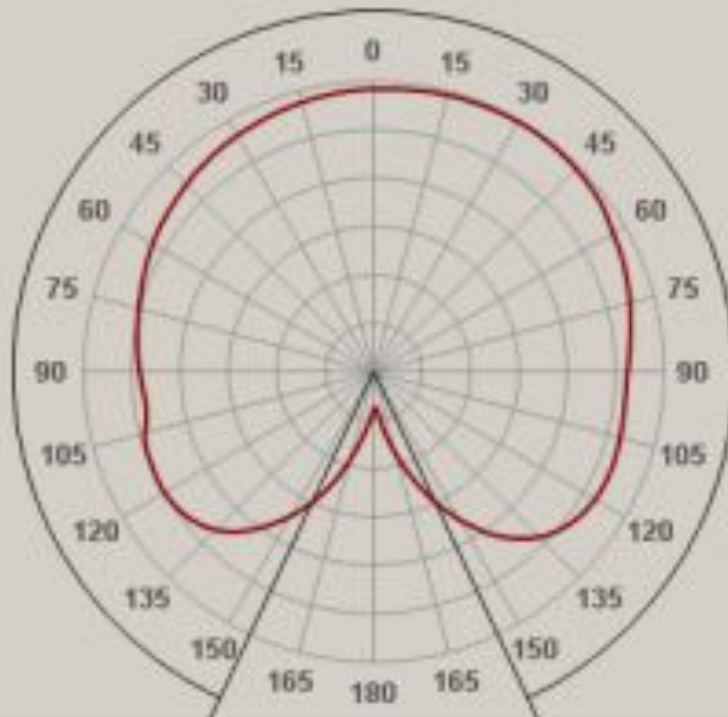
PF: 1,00

Photo metric:

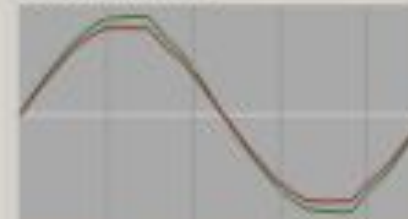


Beam angle:

309,5°



Power details:

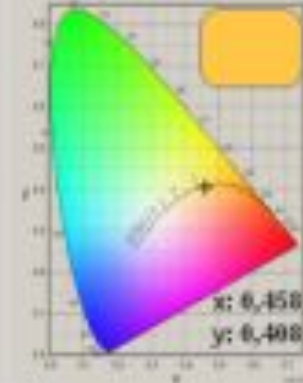


Voltage: 220,6 V

Current: 0,255 A

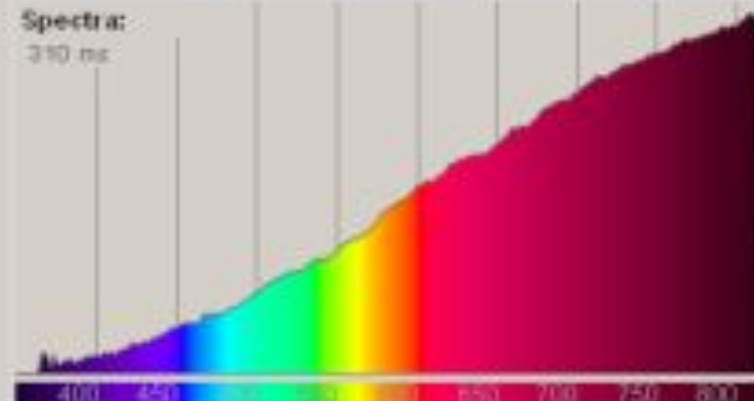
Frequency: 0,0 Hz

Update power



Spectra:

310 ms



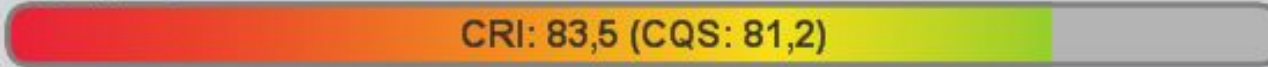
# Спектр светодиодной лампы

Measurement Unit:

Light efficiency:



Light quality:



Colour temperature:



Output: 1151 lm

Peak: 154 cd

Power: 13,0 W

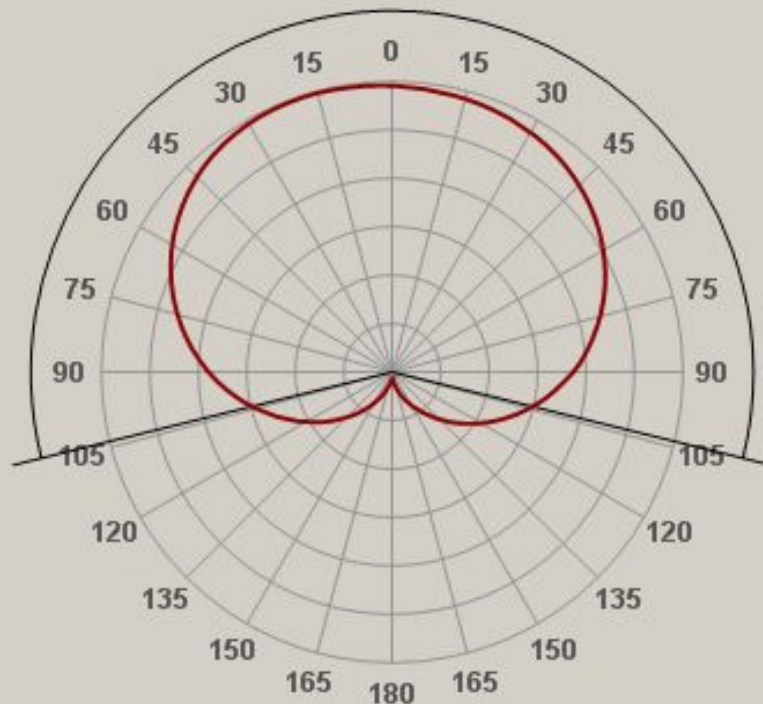
PF: 0,92

Photo metric:

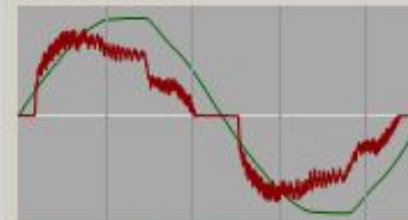


Beam angle:

207,6°



Power details:



Voltage: 231,4 V

Current: 0,061 A

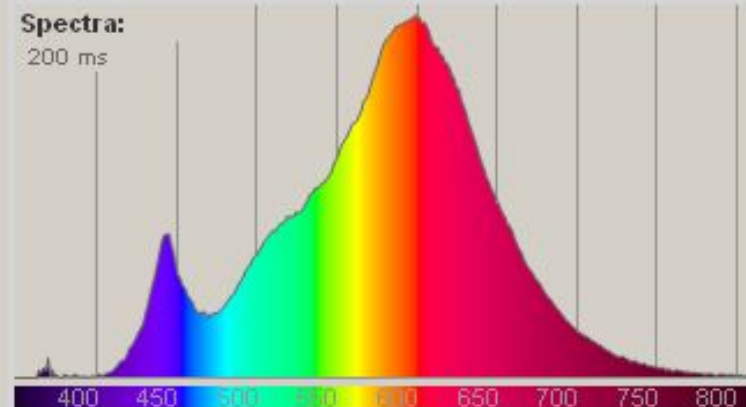
Frequency: 0,0 Hz

Update power



Spectra:

200 ms



thedwo.com - Newquay, Cornwall

# $\alpha$ Lyrae - Vega

Spectral Class: A0V

3rd May 2011

Taken with:

Spectra L200 Spectrograph

Artemis 285 Camera/Orion ED80

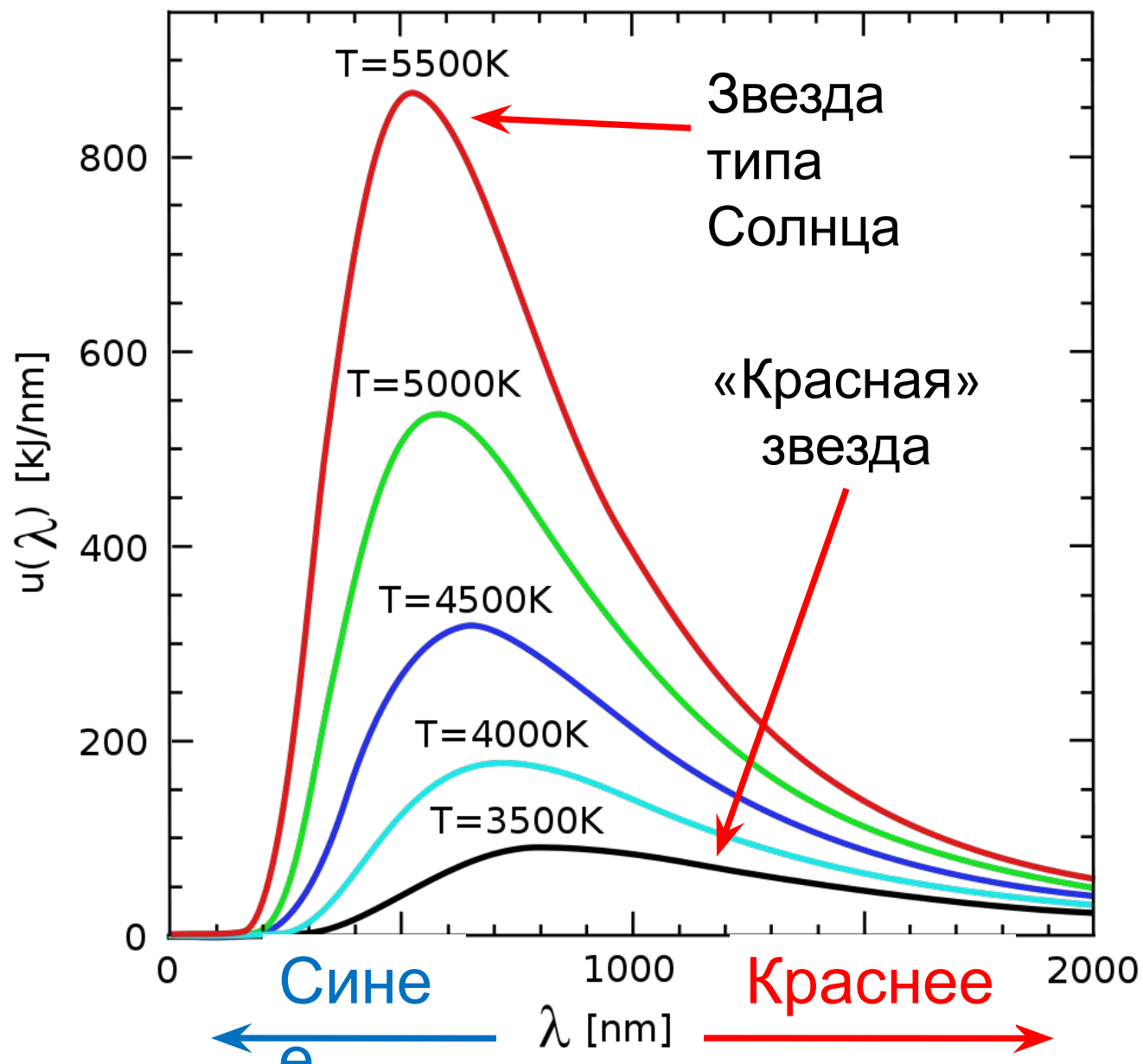
Guiding: QHY5 via beamsplitter

Dispersion: 0.51 Å/pixel

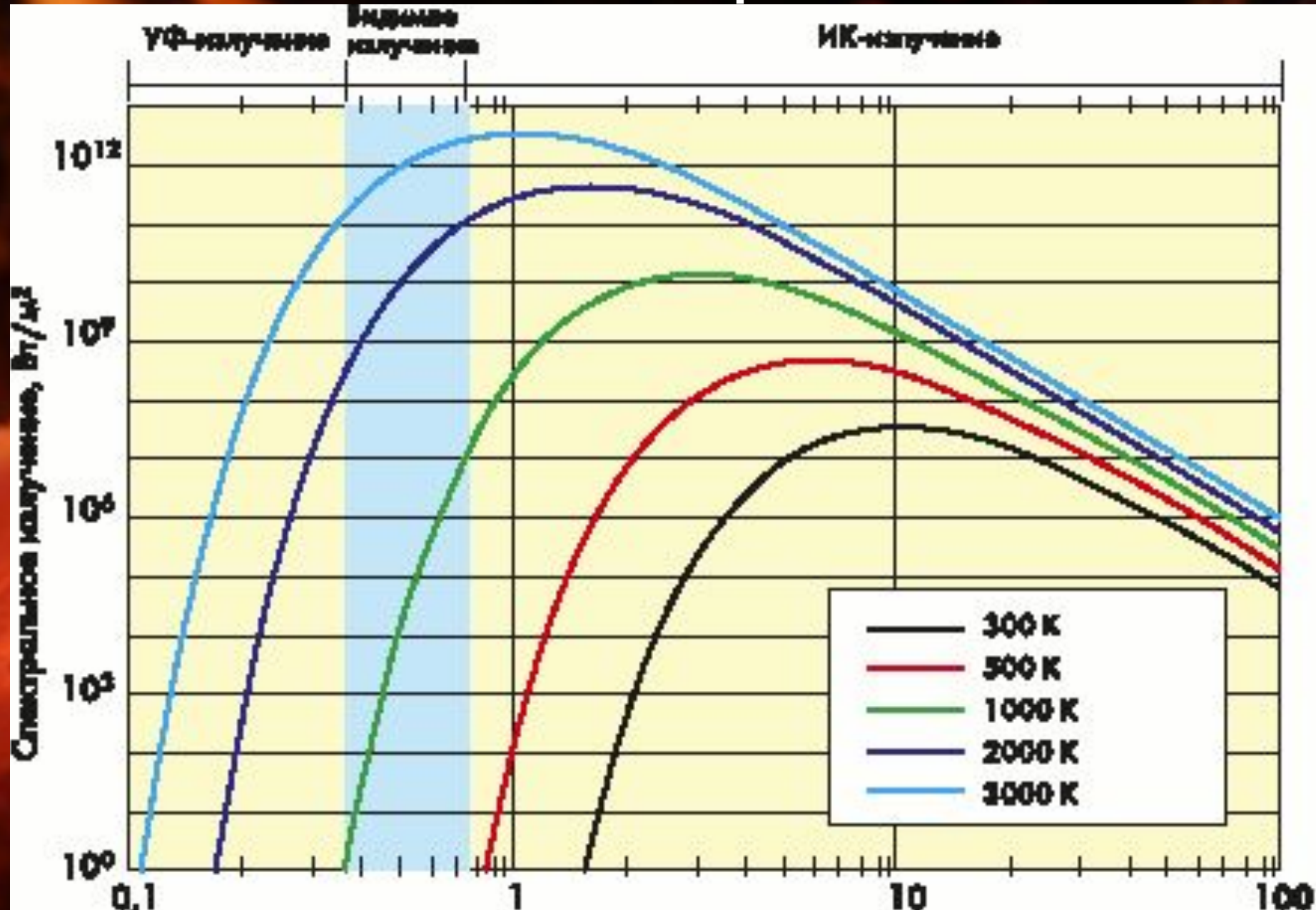




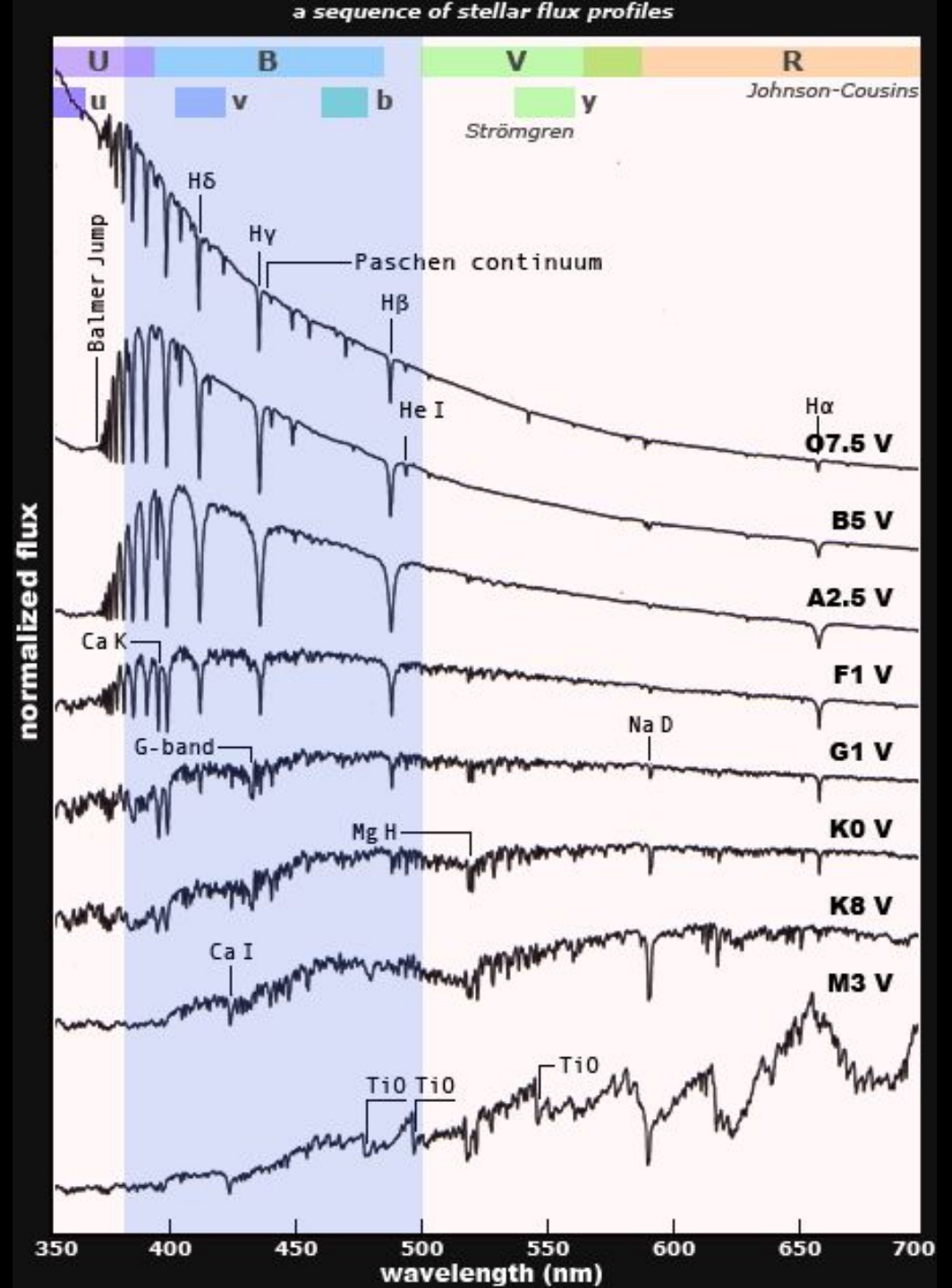
# Как светят нагретые тела



# Абсолютно черное тело



# Гарвардская спектральная классификация



# История

- Изначально в классификации буквы латинского алфавита располагались по порядку: от A до Q исключая J
- В 1897 году Антониа Мори из Гарвардской группы — «гарема Пикеринга» — поменяла местами классы V и A.
- Современный вид классификация приобрела благодаря **Энни Кэннон** из той же группы, расположившей спектры звезд южного неба по интенсивности *водородных линий серии Бальмера*.

# Диаграмма Герцшпрунга-

# Рессела

Э. Герцшпрунг



Г.Н. Расселл



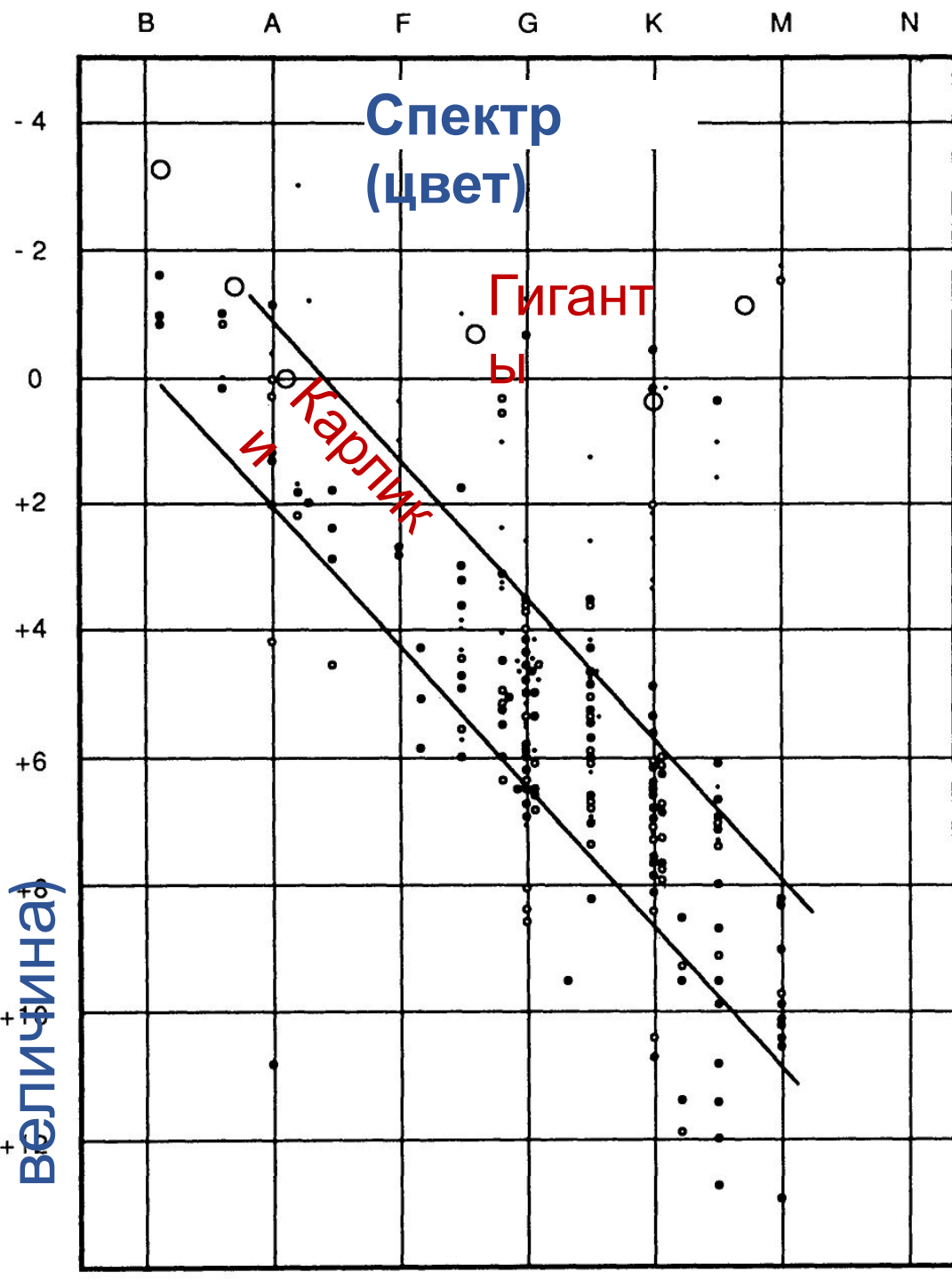
# Диаграмма Г-Р для ближайших звезд

- Эйна́р Герцшпру́нг в 1905 и 1907 годах опубликовал таблицы параметров звезд
- В 1912 году Генри Норрис Расселл, используя все известные ему параллаксы звезд, построил диаграмму и выделил на ней две закономерности:
- Два класса звезд, выделяющихся на диаграмме, Герцшпрунг назвал гигантами и карликами
- Диаграмма Г-Р впервые напечатана в 1914 году

# Расселл, 1912 (1914)

Светимость (абсолютная зв.

величина)



# Эффекты СВЕТИМОСТИ

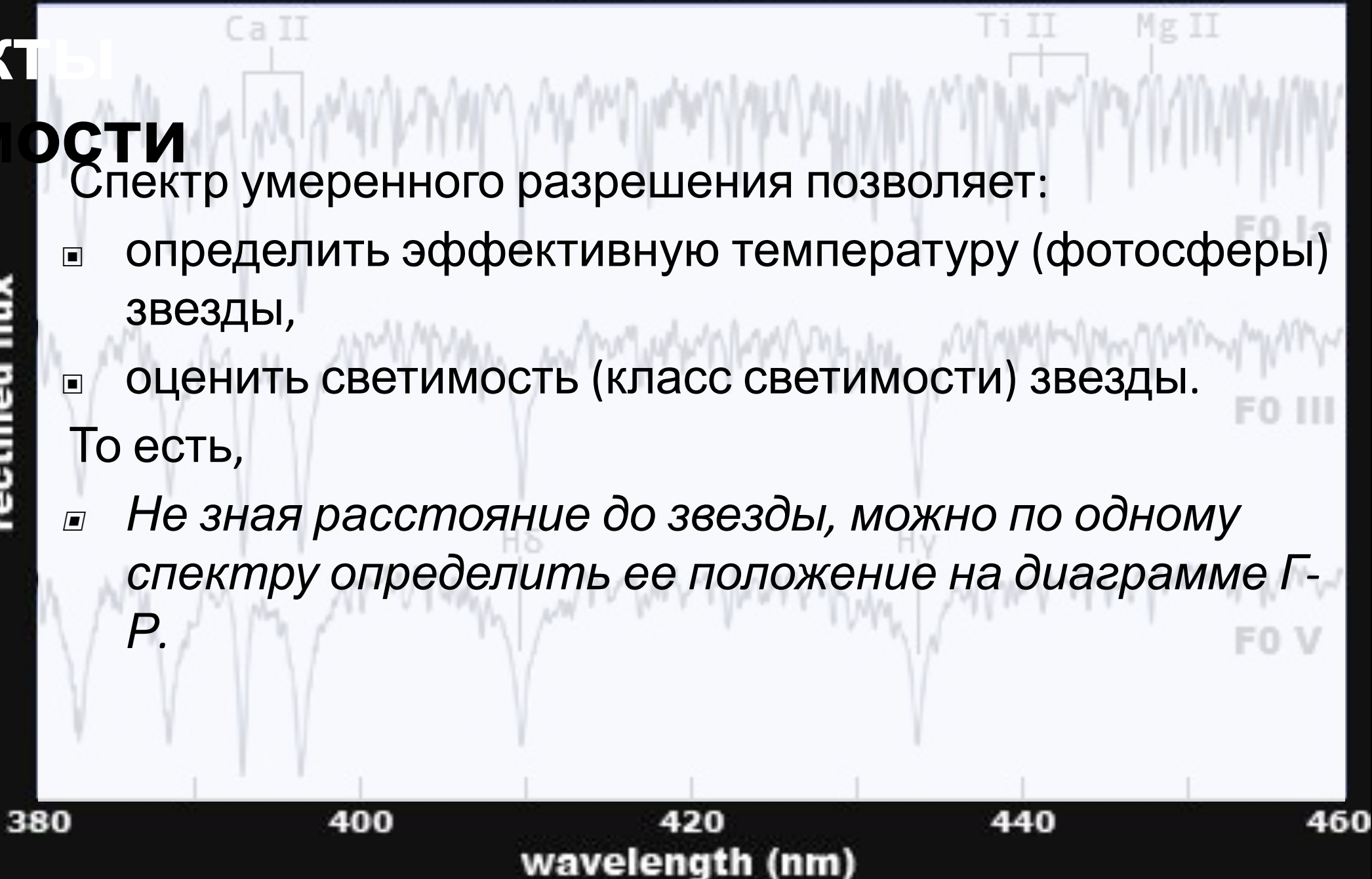
Спектр умеренного разрешения позволяет:

- ▣ определить эффективную температуру (фотосферы) звезды,
- ▣ оценить светимость (класс светимости) звезды.

То есть,

- ▣ *Не зная расстояние до звезды, можно по одному спектру определить ее положение на диаграмме Г-Р.*

rectified flux

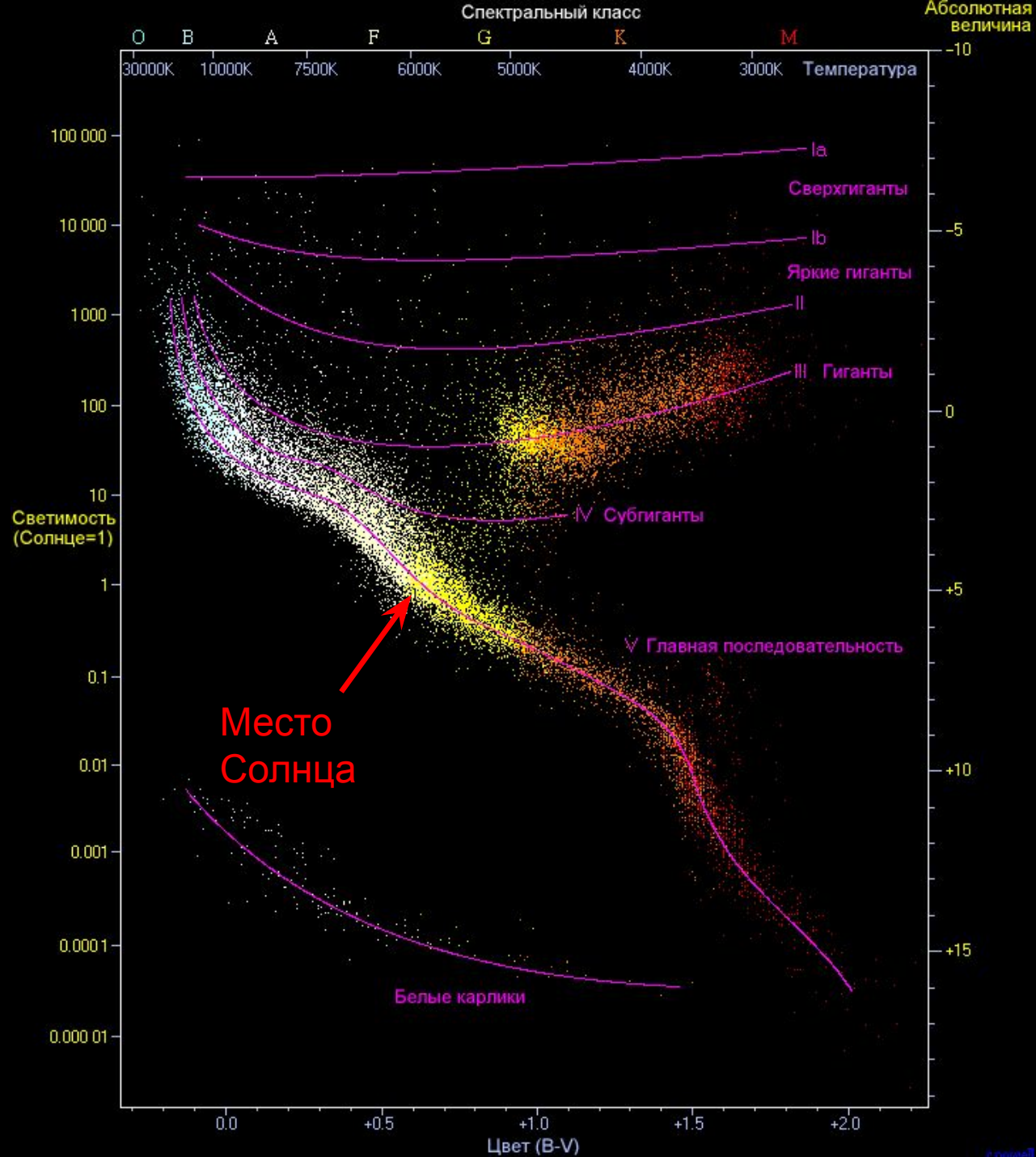


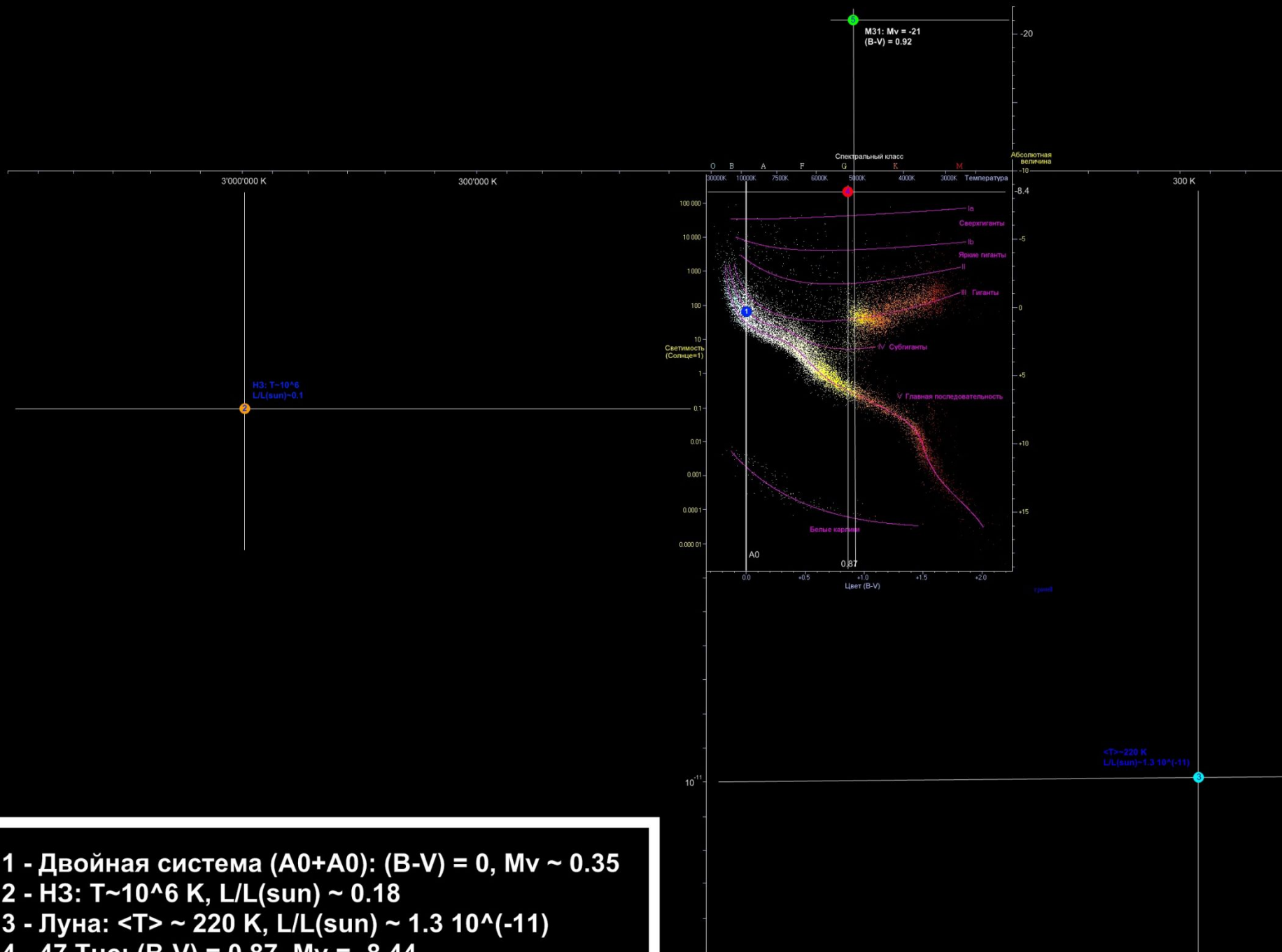


# Параметры звезд

- Для определения места звезды на диаграмме Г-Р **необходимо знать 3 наблюдательных величины**
- Это видимая звездная величина, параллакс и спектр (показатель цвета)
- Из-за сложности определения параллакса часто пользуются *косвенными (т.е. не прямыми)* методами оценки расстояния

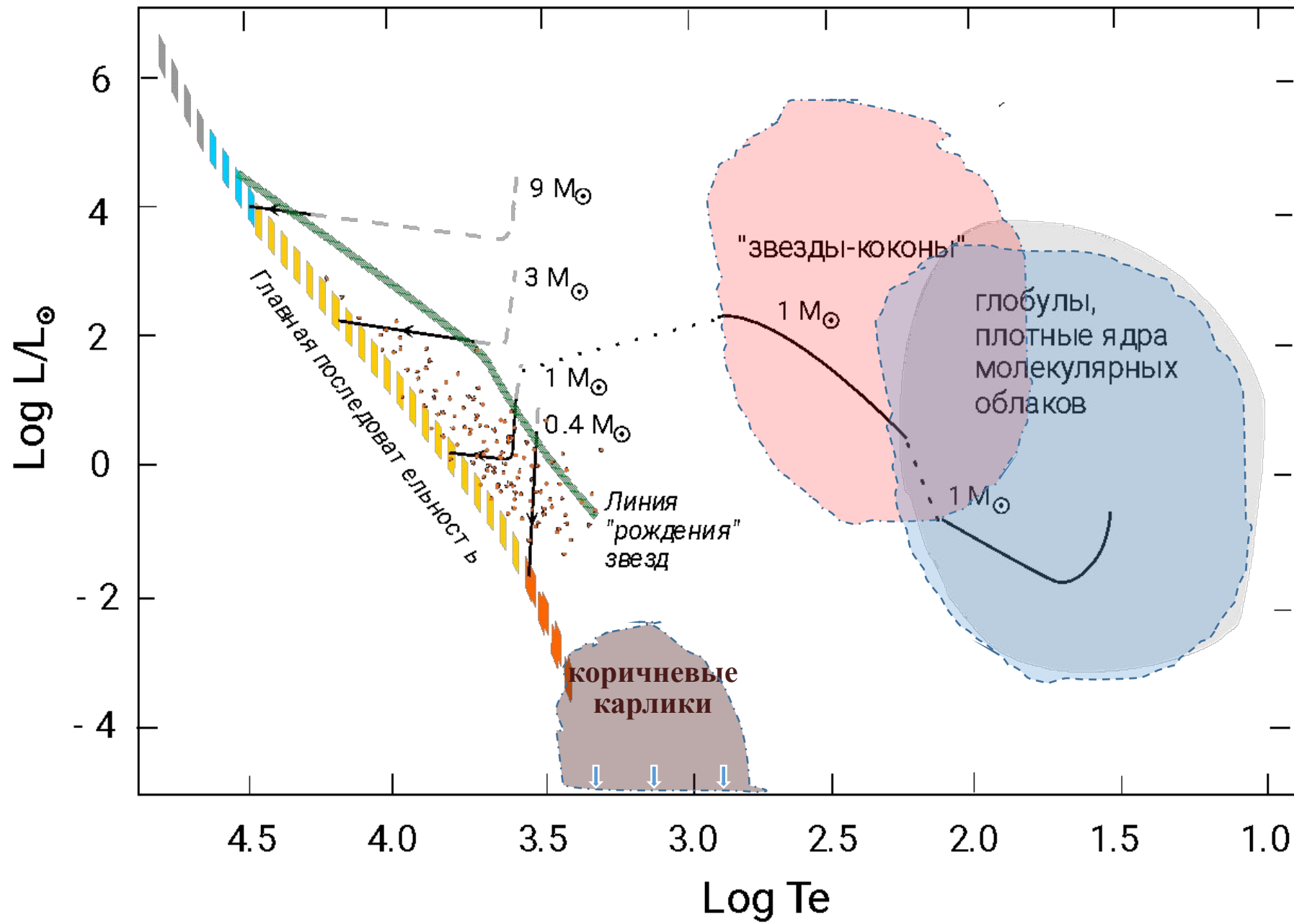
Диаграмма Г-  
Р:  
Спектр-  
Светимость  
или  
Цвет-  
Абсолютная  
Зв. Вел.





- 1 - Двойная система (A0+A0):  $(B-V) = 0$ ,  $M_v \sim 0.35$
- 2 - N3:  $T \sim 10^6 K$ ,  $L/L_{sun} \sim 0.18$
- 3 - Луна:  $\langle T \rangle \sim 220 K$ ,  $L/L_{sun} \sim 1.3 \cdot 10^{-11}$
- 4 - 47 Tuc:  $(B-V) = 0.87$ ,  $M_v = -8.44$
- 5 - M31:  $(B-V) = 0.92$ ,  $M_v = -21$

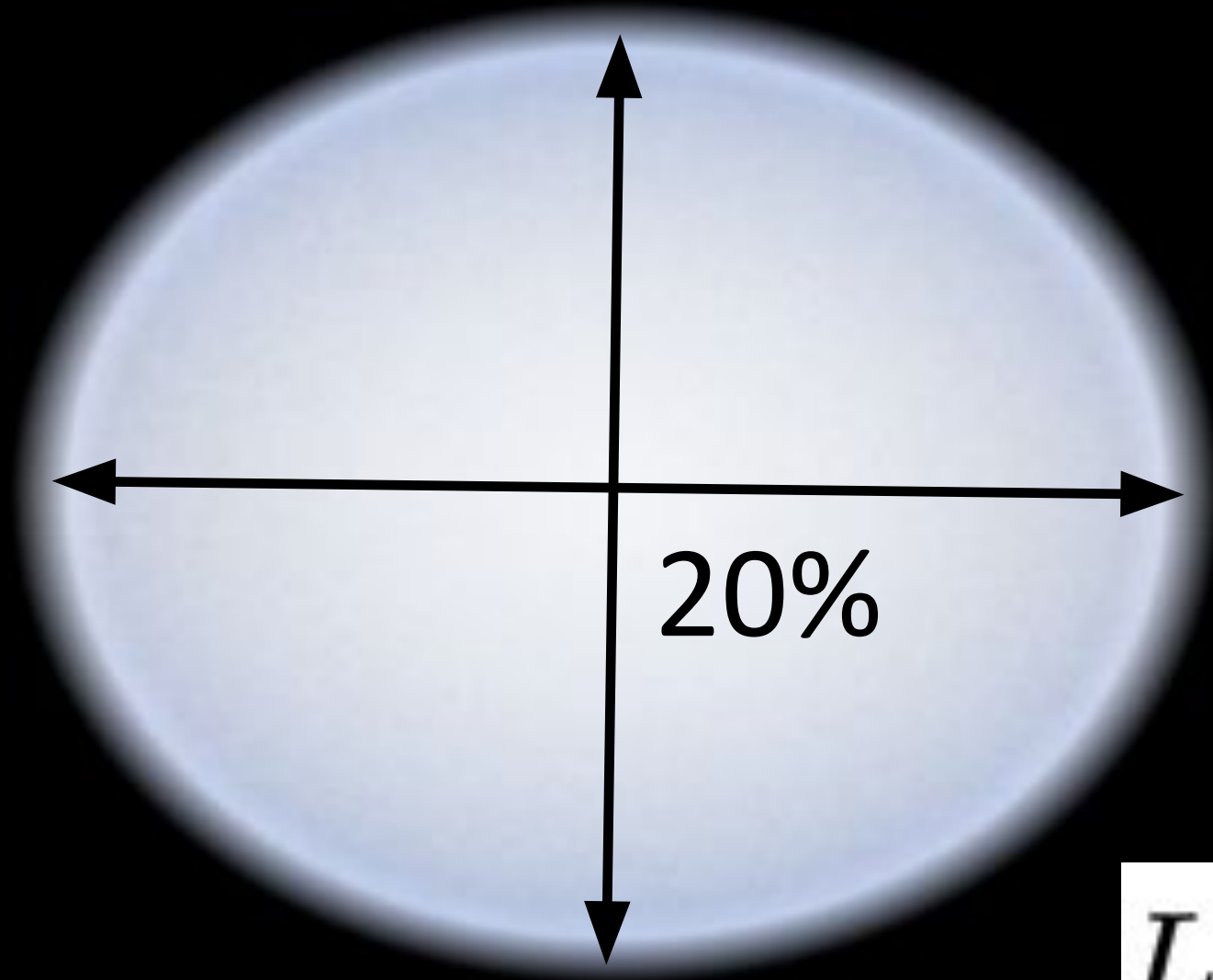
# От облака к звезде на ГП



# Главная последовательность

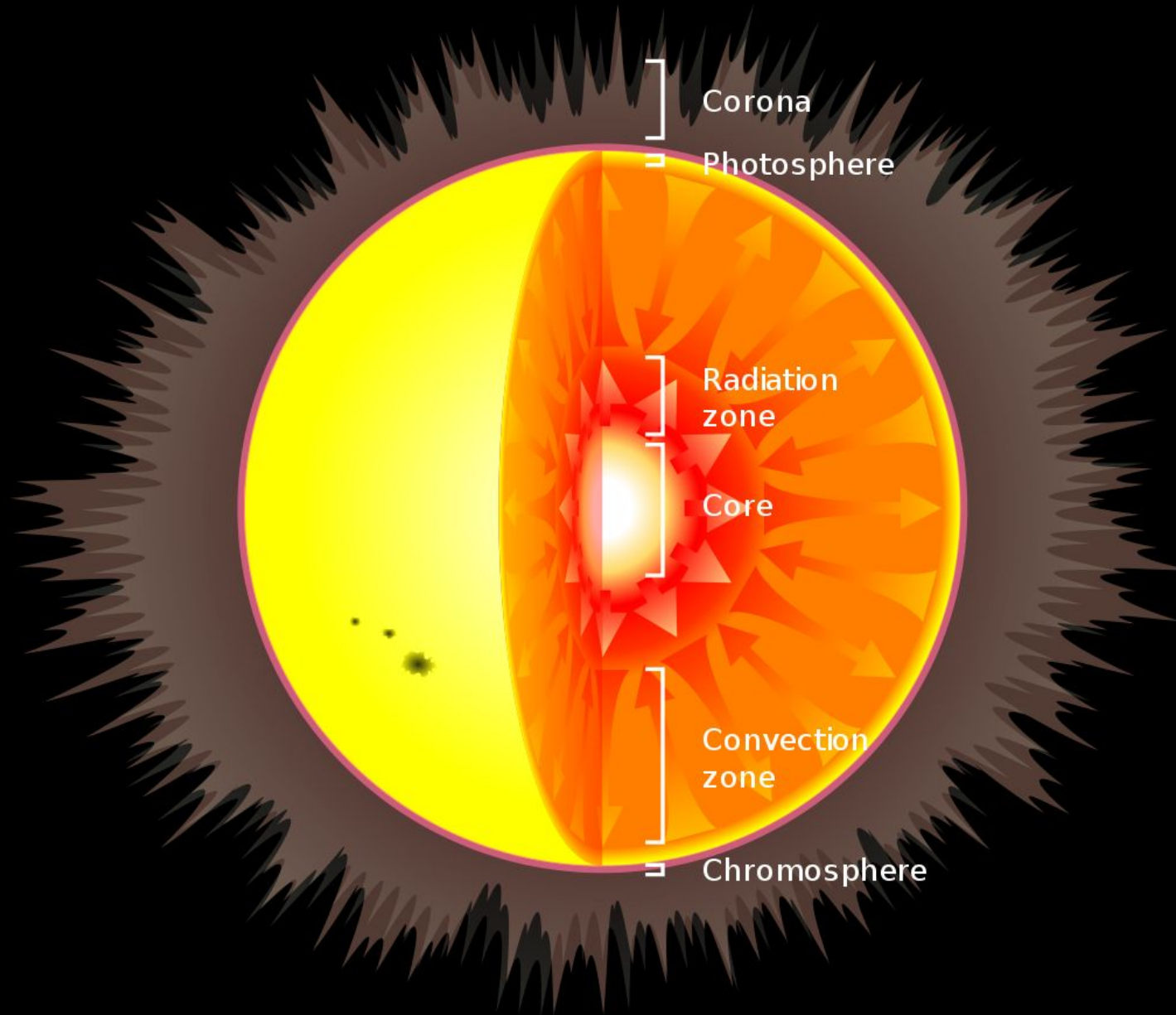
И ZAMS, Zero age main sequence, ГП нулевого возраста

Вега (12.5 часов) и Солнце (25-34 сут)



$$L = 4\pi R^2 \cdot \sigma T^4$$

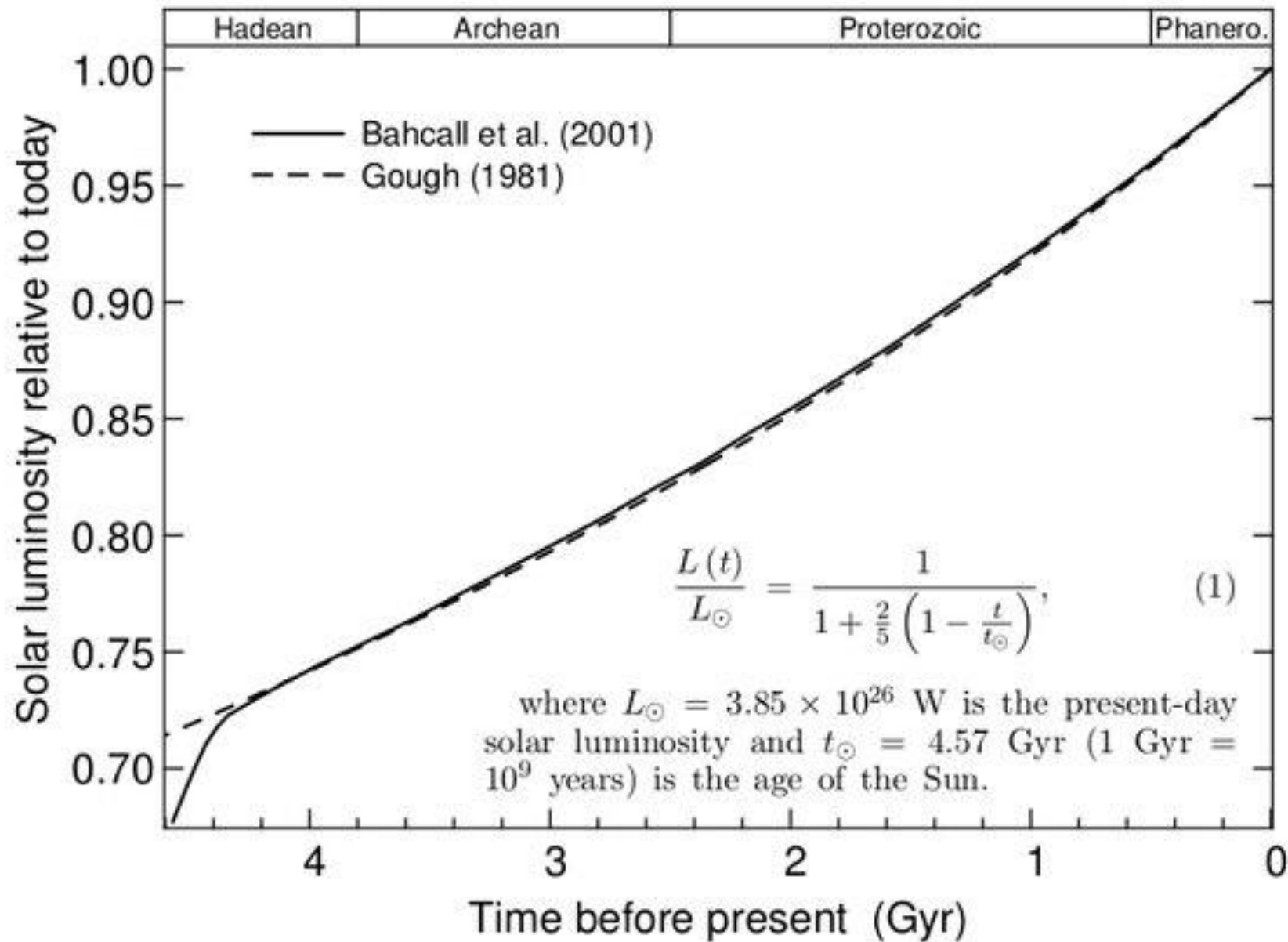
# Солнце



# Конвекция и лучистый перенос

- У звезд разных масс различная температура в ядре, а, значит, разное строение
- Определяется это интенсивностью термоядерных реакций в ядре, которая сильно зависит от температуры
- Энергия переносится излучением при больших плотностях, когда кванты света многократно поглощаются и переизлучаются
- Энергия переносится конвекцией при перемешивании вещества – поднятии более горячих и опускании более холодных ячеек





**Figure 1.** Evolution of solar luminosity over the four geologic eons for the standard solar model described in *Bahcall et al.* [2001, *solid line*] and according to the approximation formula [*Gough*, 1981, *dashed line*] given in equation (1).

## **2015 год, Очный тур, 10-11 класс**

**Солнце еще на протяжении 5 миллиардов лет будет светить как звезда главной последовательности, постепенно увеличивая свою светимость на 10% каждый миллиард лет.**

- 1. Определите светимость Солнца перед превращением его в красный гигант (в единицах современной светимости  $L_0$ ).**
- 2. Как далеко сдвинется зона жизни (зона обитаемости) в Солнечной системе к концу жизни Солнца? Принять текущие границы зоны жизни 0.8 — 1.1 а.е.**

**Текущая потеря массы Солнцем примерно  $5 \cdot 10^{-12}$  масс Солнца в год. Если предположить, что рост темпа потери массы будет таким же как и рост светимости, какую часть массы Солнце потеряет до превращения в красный гигант?**

10.38.3 Темп потери массы также возрастает в геометрической прогрессии.

$$\dot{M}(t) = 1,1^{t/t_0} \cdot \dot{M}_0$$

В общем виде задача оказывается довольно сложной и требует интегрирования. Те, кто владеют таким математическим аппаратом, должны получить формулу для потери массы в виде

$$M(t) = \frac{\dot{M}_0 t_0}{\ln 1,1} (1,1^{t/t_0} - 1)$$

За 5 млрд. лет солнце потеряет всего лишь около  $0,032 M_0$ .

Можно найти решение приближенно. Например, вычислить средние значения  $\dot{M}$  для каждого прошедшего миллиарда лет и считать, что каждый миллиард лет потеря массы проходила с одинаковым (средним) темпом.

Еще один вариант решения, заметить, что

$$1,1^{t/t_0} = (1 + 0,1)^{t/t_0} \approx 1 + 0,1 t/t_0$$

Тогда можно считать, что Солнце теряет массу равноускоренно и

$$M(t) \approx \dot{M}_0 t + \frac{0,1 \dot{M}_0}{t_0} \cdot \frac{t^2}{2} \approx 0,032 M_0$$

# Становление теории внутреннего строения звезд

- «При температурах порядка 40 млн градусов в звездах должны идти ядерные реакции! Если вы считаете, что это слишком низкая температура – поищите место горячее!»
- Туннельный эффект объяснил правоту Эддингтона. Полное объяснение механизма «горения» звезд было опубликовано в 1929 г Р. *Аткинсоном* и *Ф.Хоутермансом*



**Сэр Артур  
Эддингтон  
(1882–1944)**

Предел Эддингтона –

Максимальная теоретическая  
светимость источника в  
гидростатическом равновесии.

Превышение  $L_{\text{edd}}$  приводит к  
возникновению звездного  
ветра

$$L_{\text{Edd}} = \frac{4\pi GMm_p c}{\sigma_T}$$

$$\cong 1.26 \times 10^{31} \left( \frac{M}{M_{\odot}} \right) \text{ W} = 1.26 \times 10^{38} \left( \frac{M}{M_{\odot}} \right) \text{ erg/s} = 3.2 \times 10^4 \left( \frac{M}{M_{\odot}} \right) L_{\odot}$$



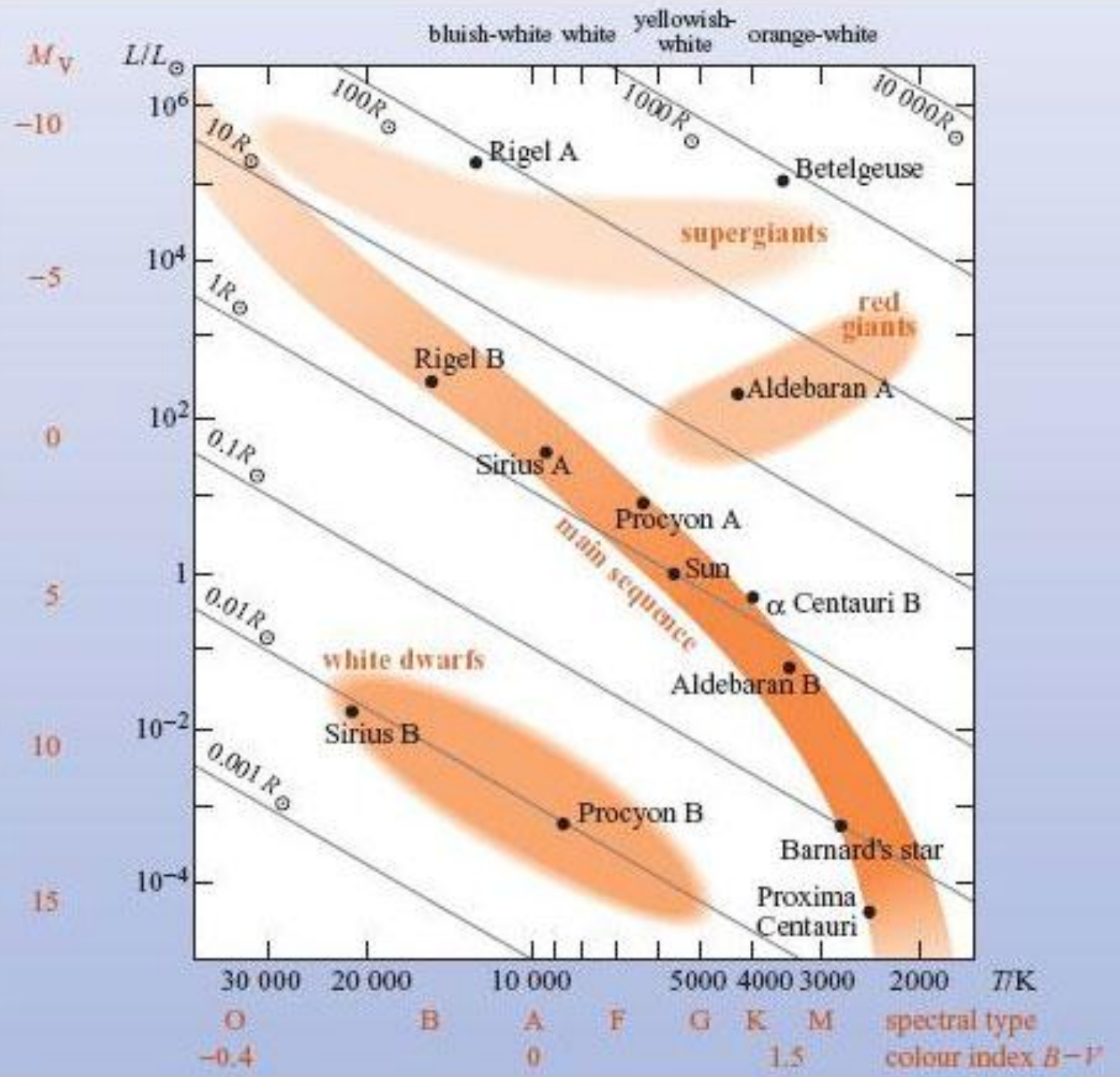
Сэр Артур  
Эддингтон  
(1882–1944)

# Наблюдаемый предел Хэмпфри-Дэвидсона (1979)



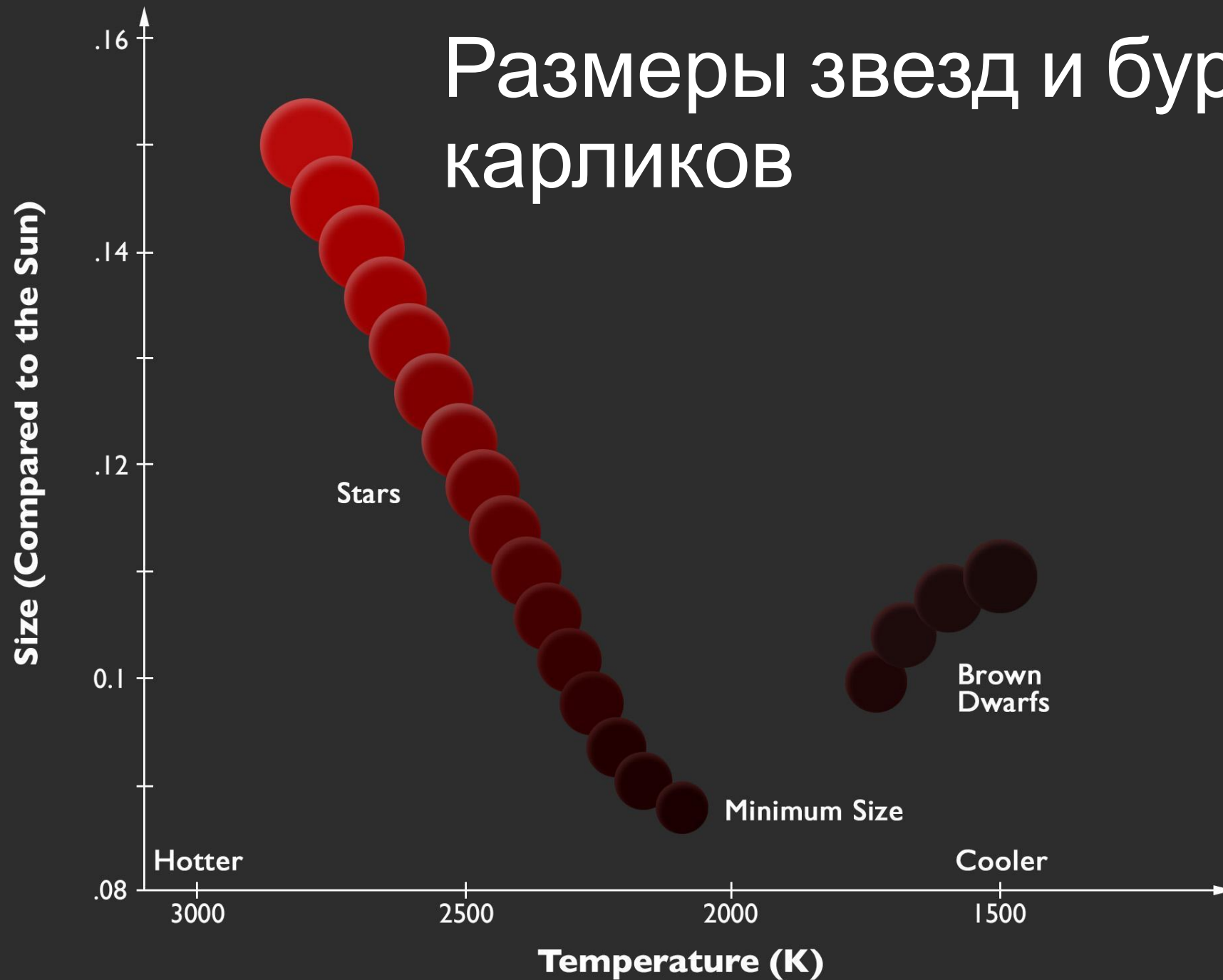
## Желтые гипергиганты

# Диаграмма ГР для близких звезд: линии равных радиусов





# Размеры звезд и бурных карликов



# Звезды, планеты и бурые карлики (пределы снизу)



Зависимость

$L - M$

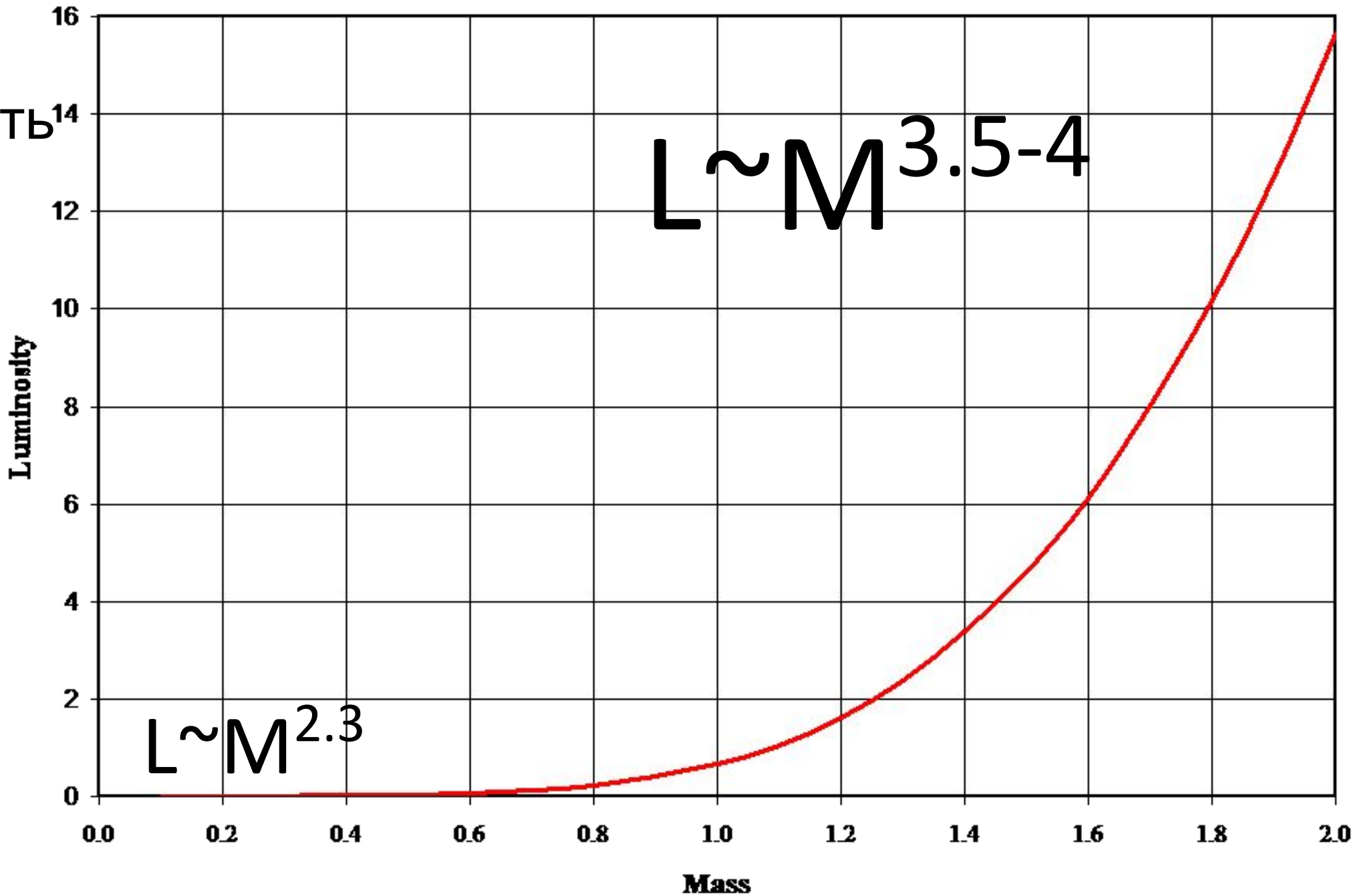
для

ZAMS

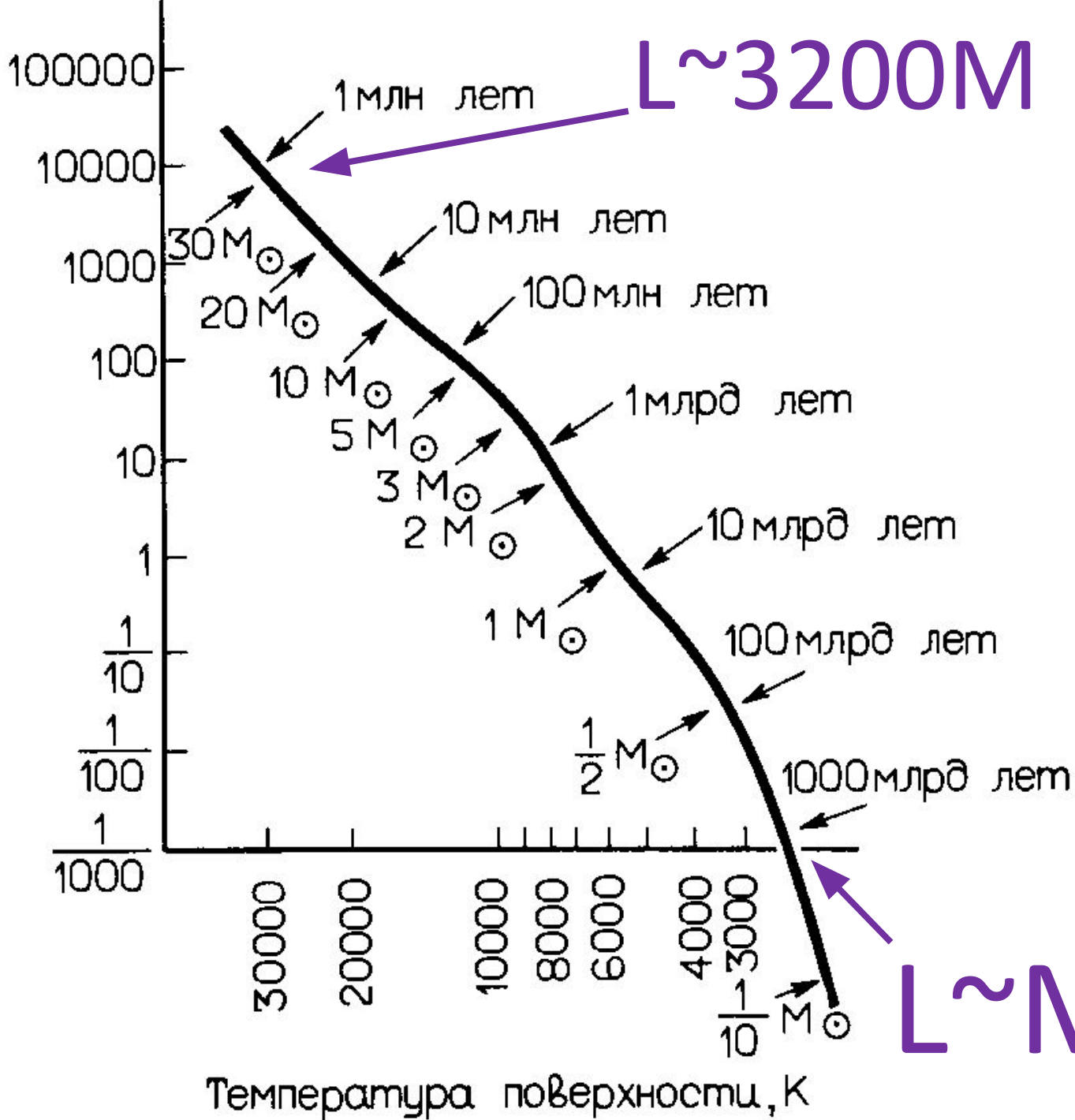
(в

единицах

Солнца



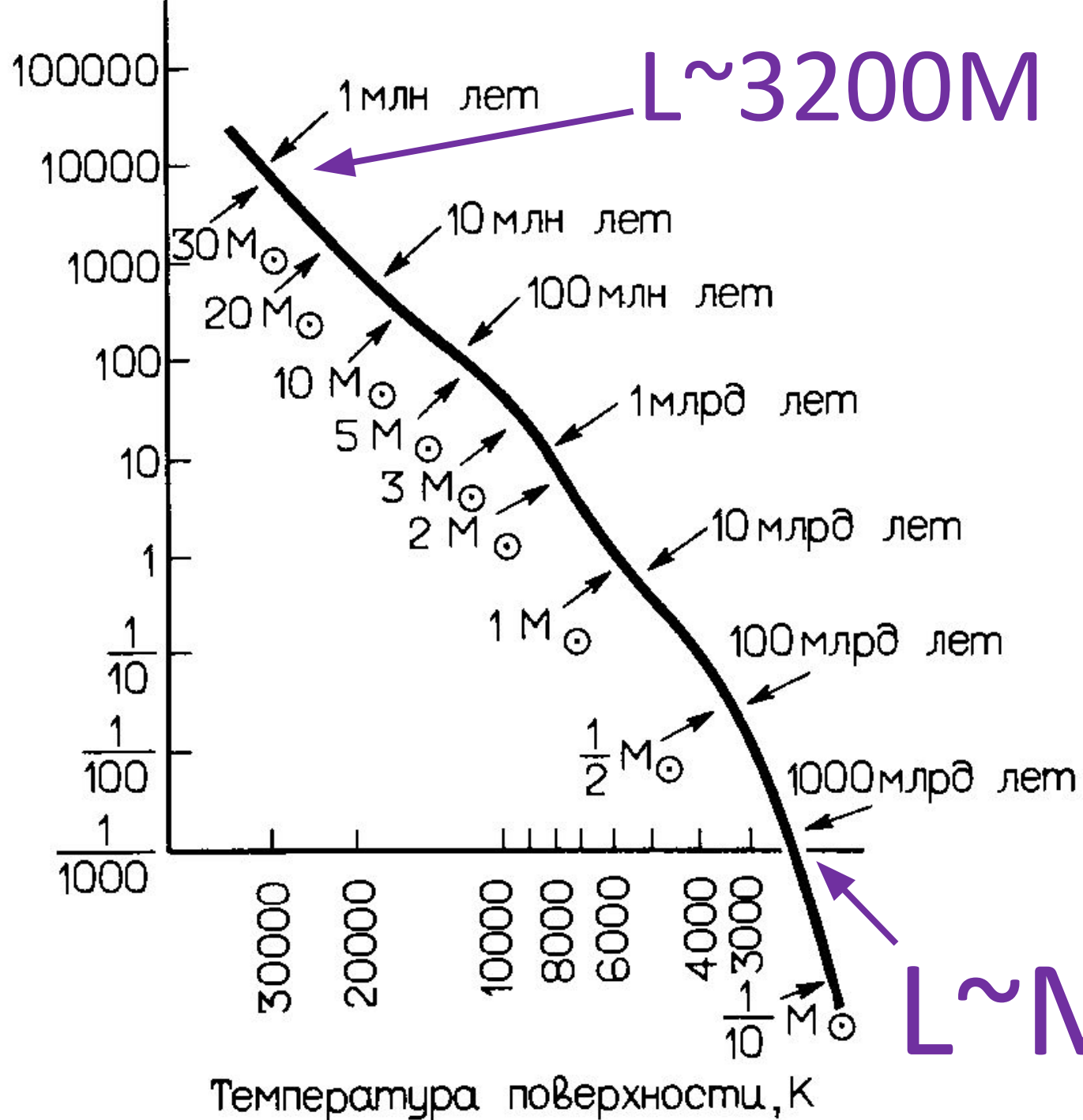
Светимость в Видимой области в единицах светимости Солнца



Время жизни на ГП звезд различных масс

$M > 0.23 M_{\odot}$  –  
Горение слоевого источника ->  
ВЕТВЬ  
субгигантов

Светимость в Видимой области в  
единицах светимости Солнца

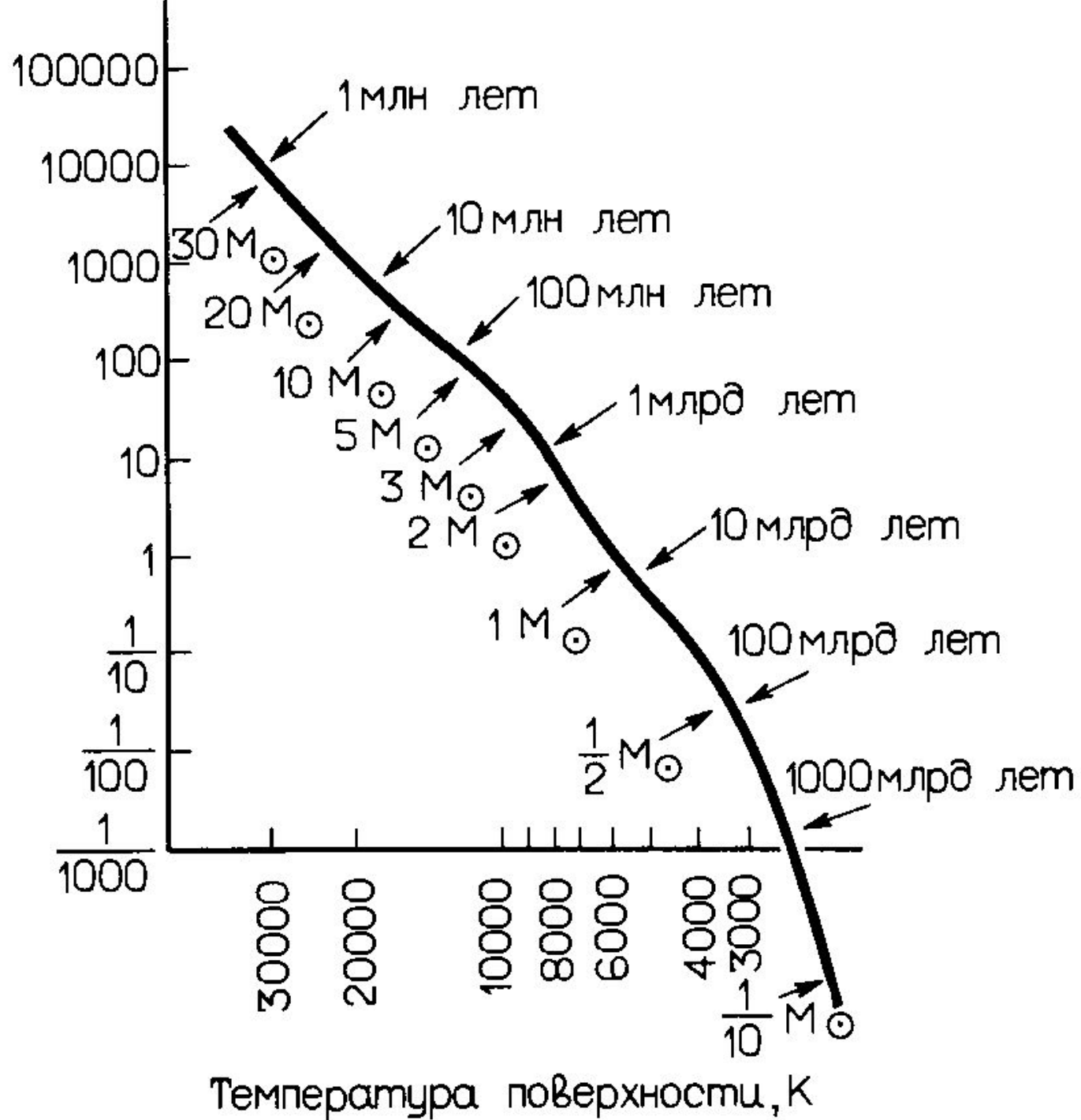


Время жизни  
на ГП звезд  
различных  
масс

$$E = Lt$$

$$L \sim M^{2.3}$$

Светимость в Видимой области Солнца  
единицах светимости Солнца

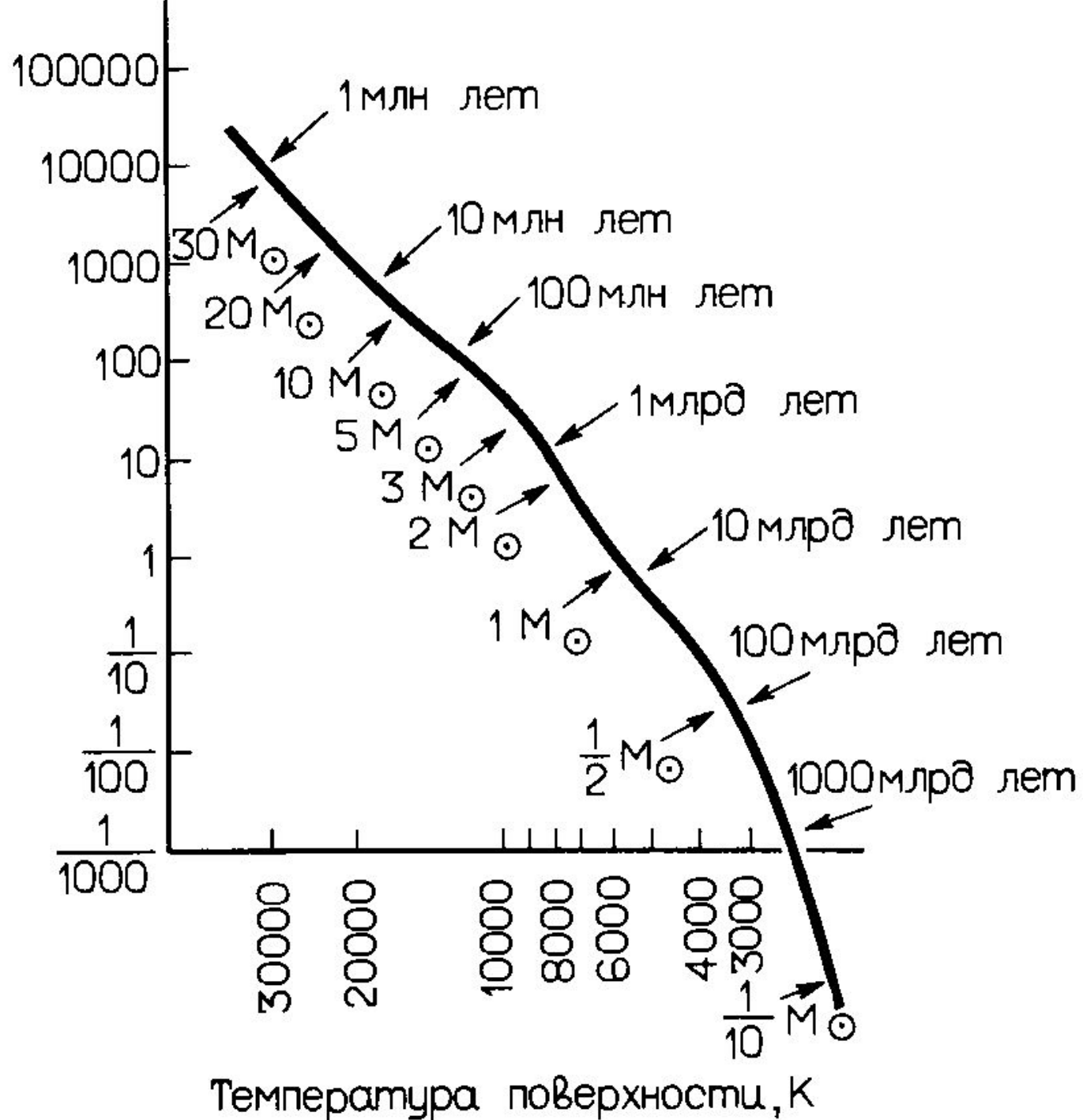


Время жизни  
на ГП звезд  
различных  
масс

$$E = Lt$$

$$E = Mc^2$$

Светимость в Видимой области в  
единицах светимости Солнца



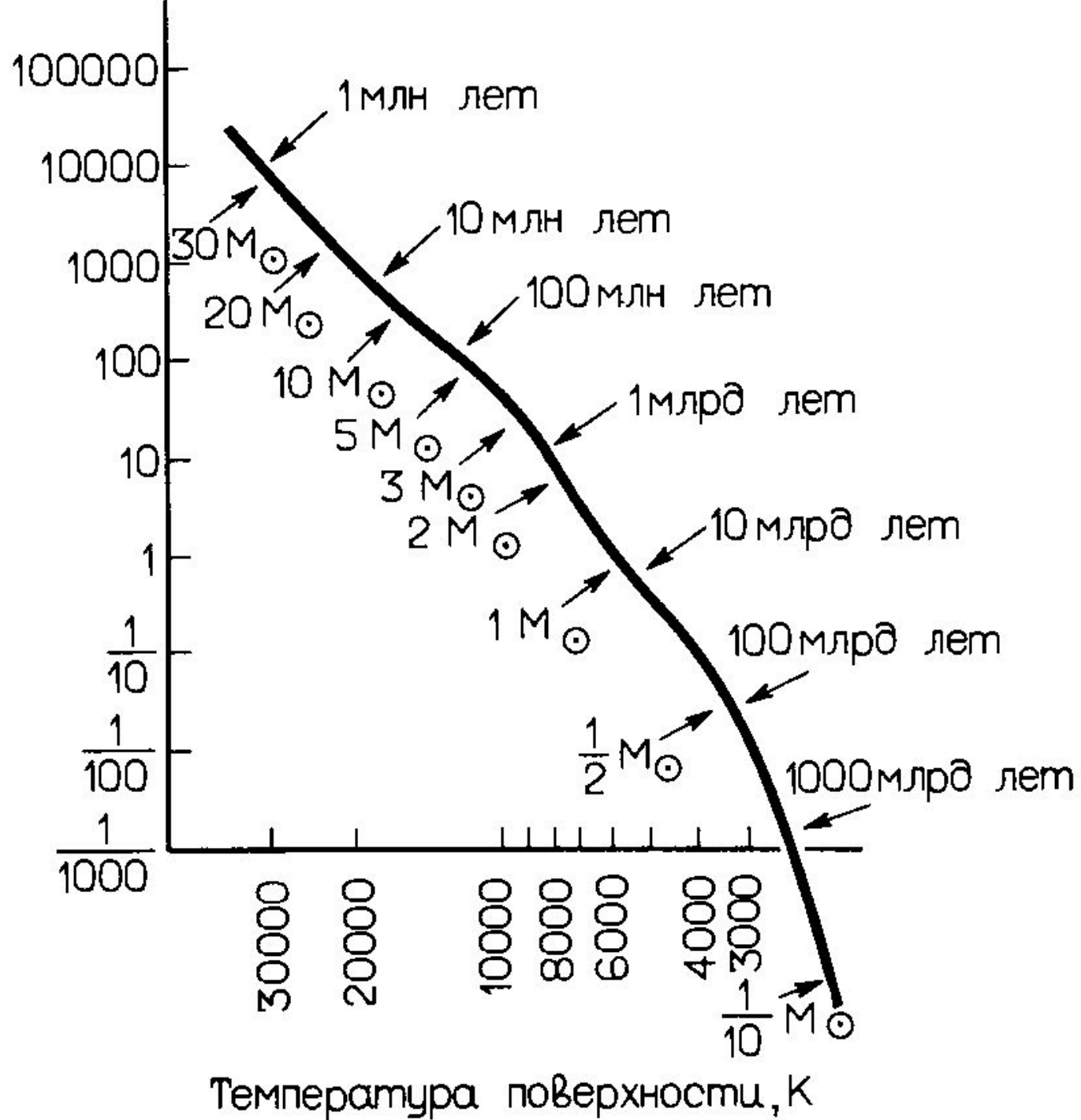
Время жизни  
на ГП звезд  
различных  
масс

$$E = Lt$$

$$E = Mc^2$$

$$t = c^2 / M^3$$

Светимость в Видимой области в  
единицах светимости Солнца

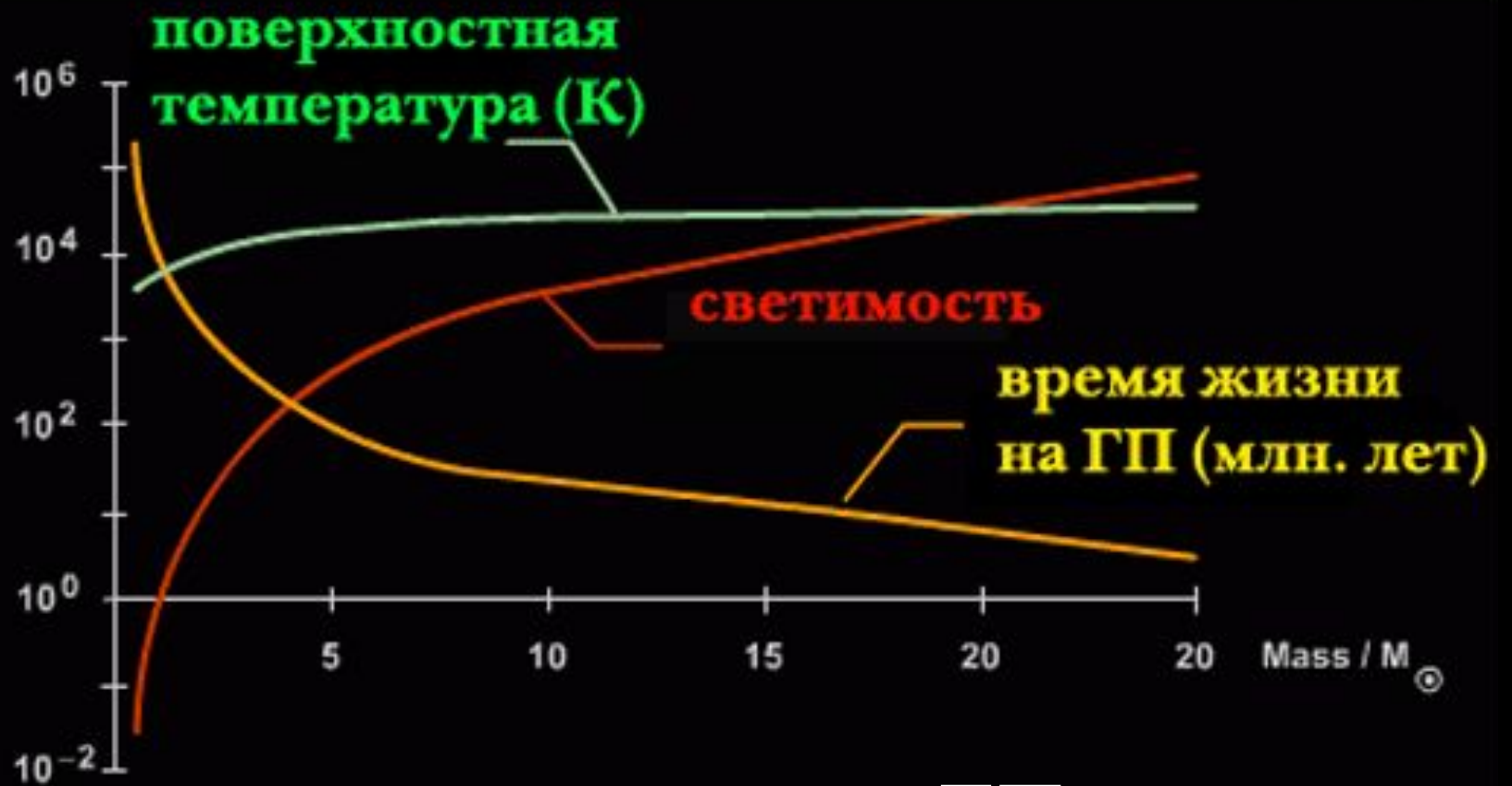


Время жизни  
на ГП звезд  
различных  
масс

$$t_{\text{ГП}} \sim 10^{10} / M^{-2.5}$$

(в годах и  
массах  
Солнца)

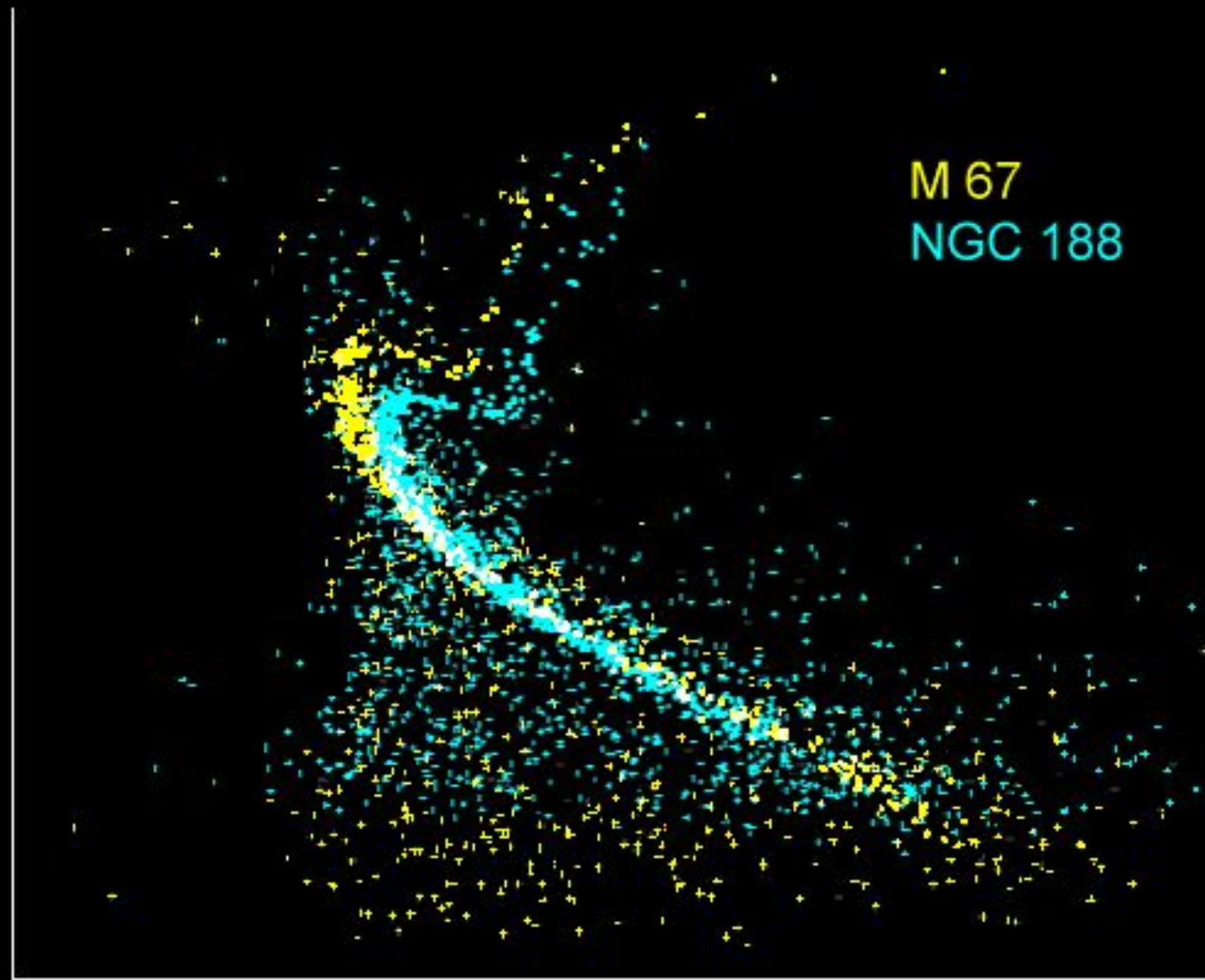




- С увеличением массы звезды на ГП:
- Растет светимость,
  - Растет эффективная температура,
  - Падает время жизни на ГП.

# Эволюция звезд

← Absolute magnitude

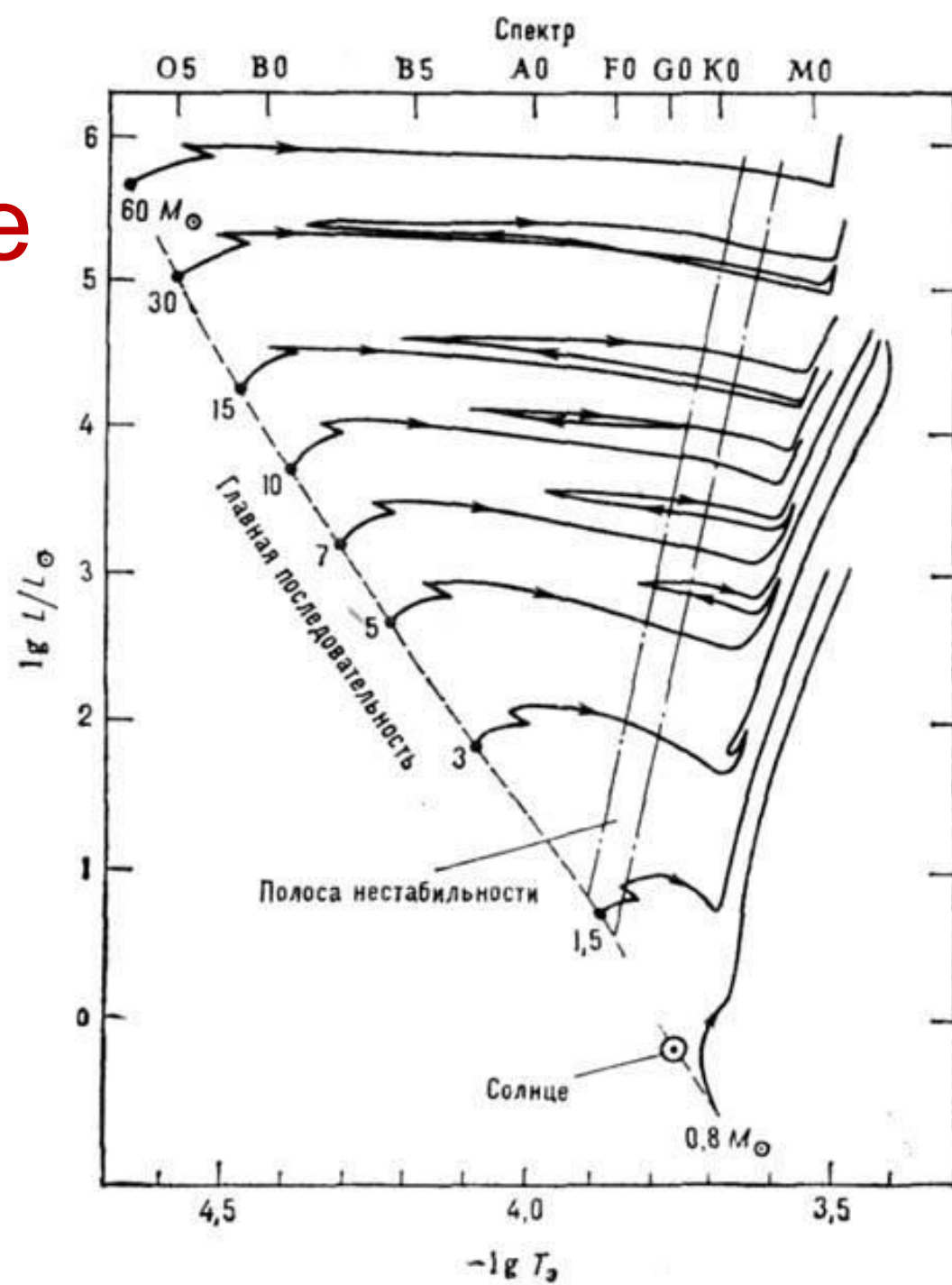


M 67

NGC 188

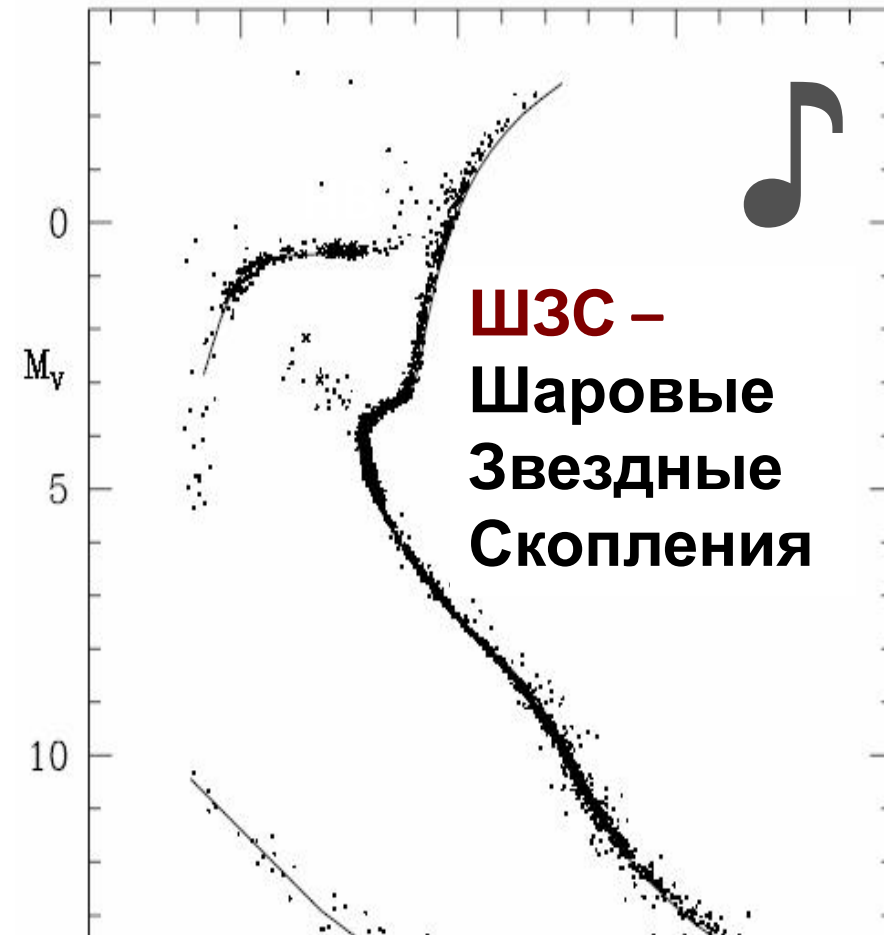
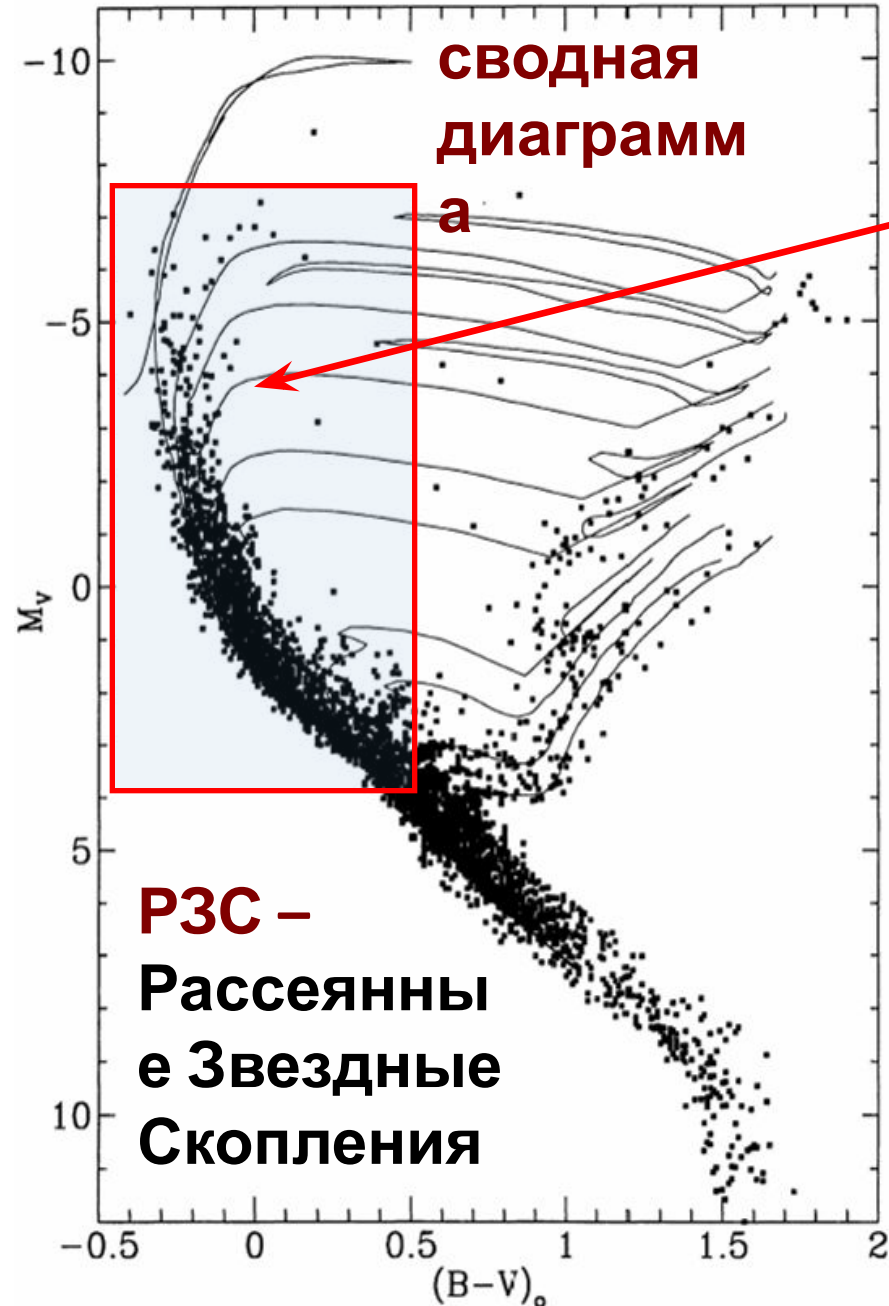
← Temperature

# Эволюционные треки

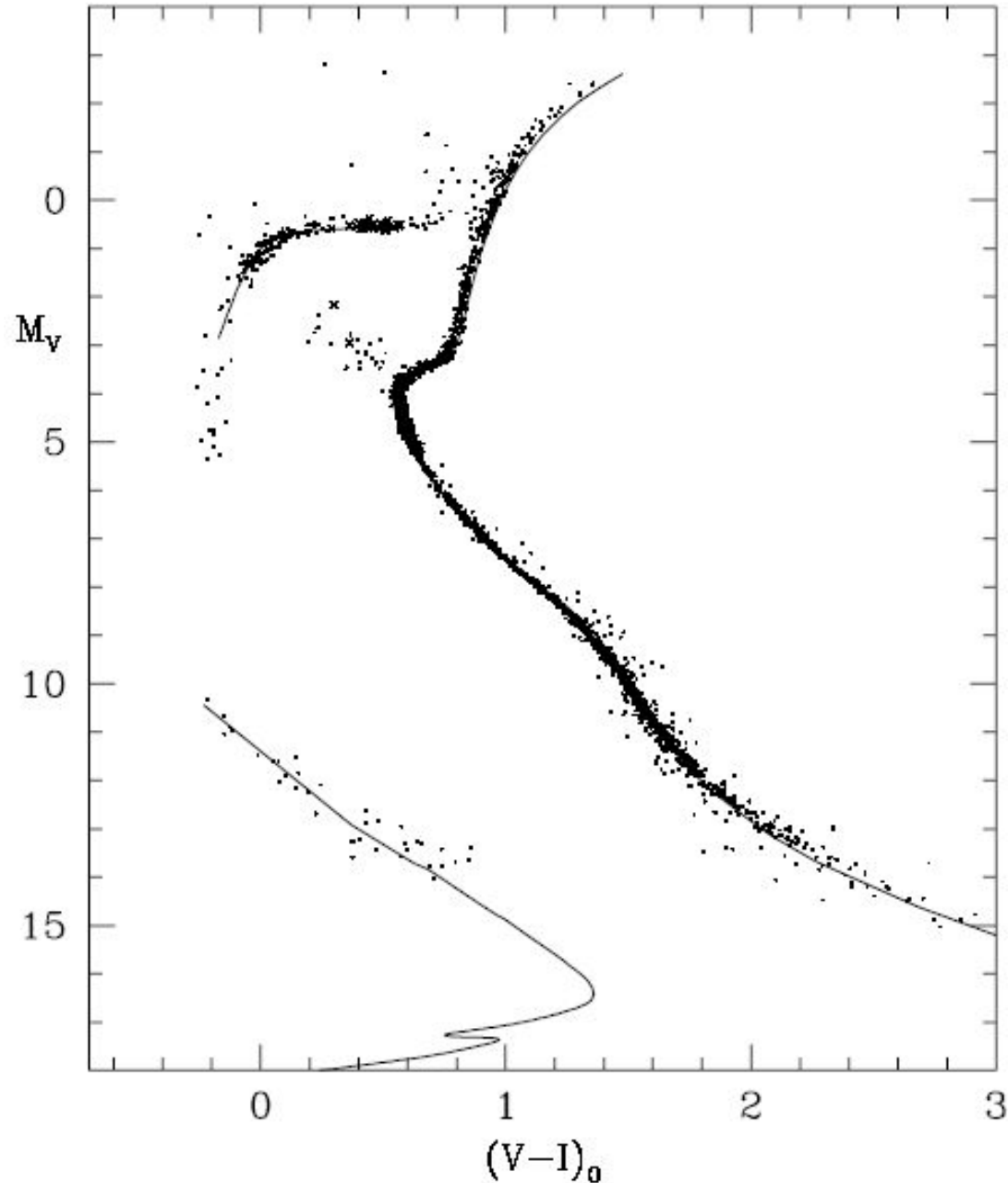


# Различия возрастов звездных скоплений

в ШЗС на ГП нет голубых звезд  
высокой светимости



Шаровое  
звездное  
скопление  
возрастом **14**  
млрд. лет!  
Больше  
возраста  
Вселенной?..



# Эволюция звезд умеренных масс

- Звезд, образующих после себя БК – 97%
- Это звезды с **массой от ~1–3 и до 8-ми солнечных** (их примерно 90% от общего количества звезд массивнее Солнца)
- Самые маломассивные образуют **гелиевые БК**
- Звезда после исчерпания гелия в ядре (реакция  $\text{He} \rightarrow \text{C}, \text{O}$ ) не всегда способна к продолжению ядерных реакций: требуется температура в 1 миллиард градусов
- Некоторые «доживают» до реакций  $\text{C} \rightarrow \text{Ne}$

# Протопланетарные туманности

- Звезда уже почти сбросила оболочку
- Но оставшееся ядро (рождающийся белый карлик), сбрасывающее остатки оболочки, не успело разогреться и ионизовать туманность
- Короткая (~1000 лет) стадия после сброса оболочки, но перед ее **ионизацией**, называется **протопланетарной (препланетарной) туманностью**
- Ионизация начинается при температуре БК ~30000 К
- Известно **несколько сотен** ППТ



# Планетарные туманности

- Представляют собой сброшенные оболочки проэволюционировавших звезд, светящиеся в отдельных спектральных линиях
- В отличие от ППТ, центральную звезду удастся найти не всегда
- Но для ионизации туманности обязательно нужен центральный источник!
- Только у  $1/4$  ПТ найдены центральные источники

# Планетарные туманности

- За сравнительно небольшое время (примерно **10000** лет) планетарная туманность, став эффектным завершением жизненного цикла звезды, перестает быть видимой.
- Известно порядка  $3-4 \cdot 10^3$  планетарных туманностей в Галактике
- Их число должно быть между 6600 и 46000. Если ориентироваться на плотность распределения уже найденных объектов в окрестностях Солнца, получится **13000-25000**

# Планетарные туманности

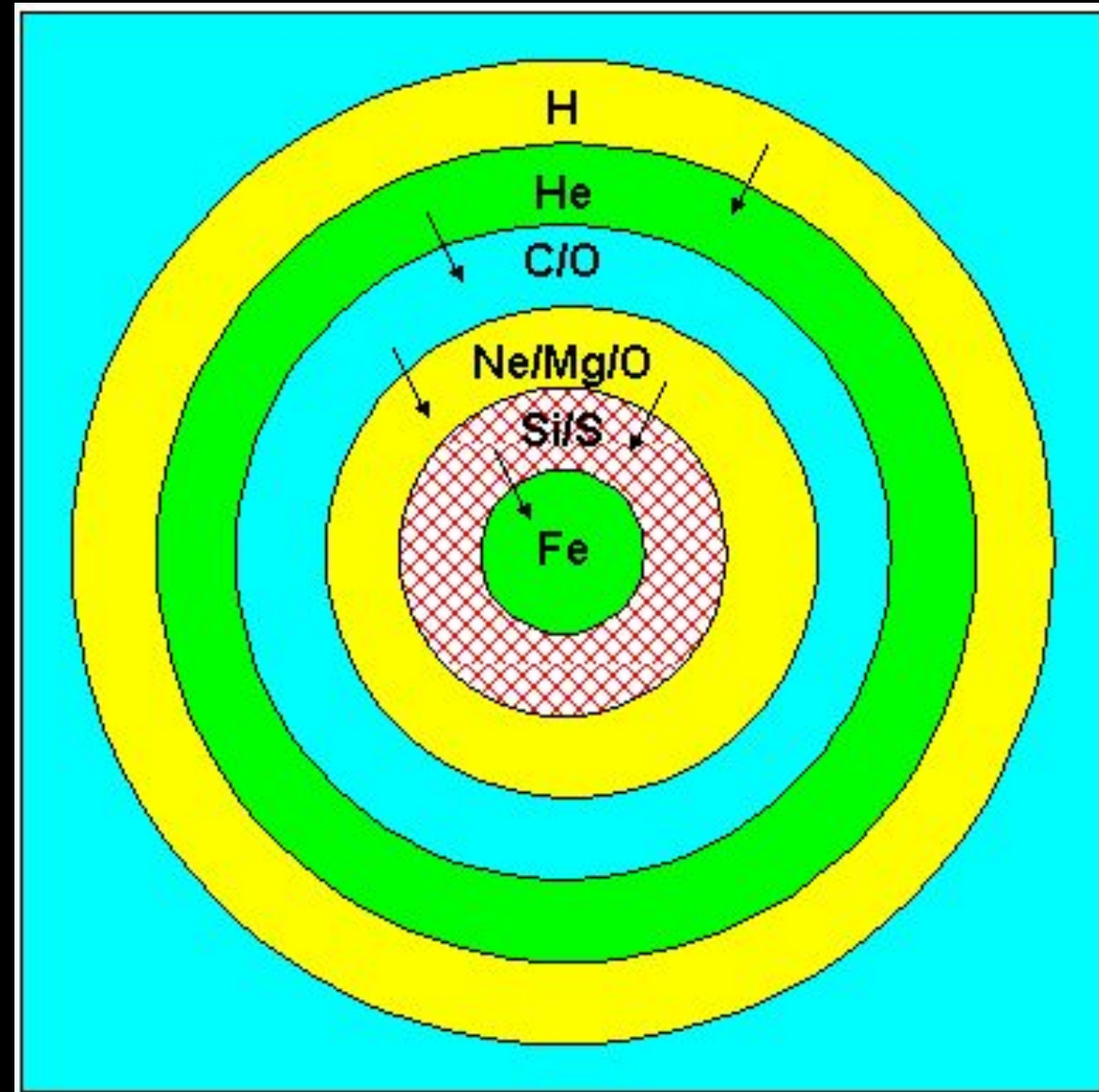
- Ионизованный газ разлетается со скоростью несколько км/с, становясь все менее плотным
- Остаток звезды постепенно остывает
- В результате, свет центрального источника не в силах более ионизовать туманность
- **Останется ли после Солнца планетарная туманность?**



# Процессы в массивных

## звездах

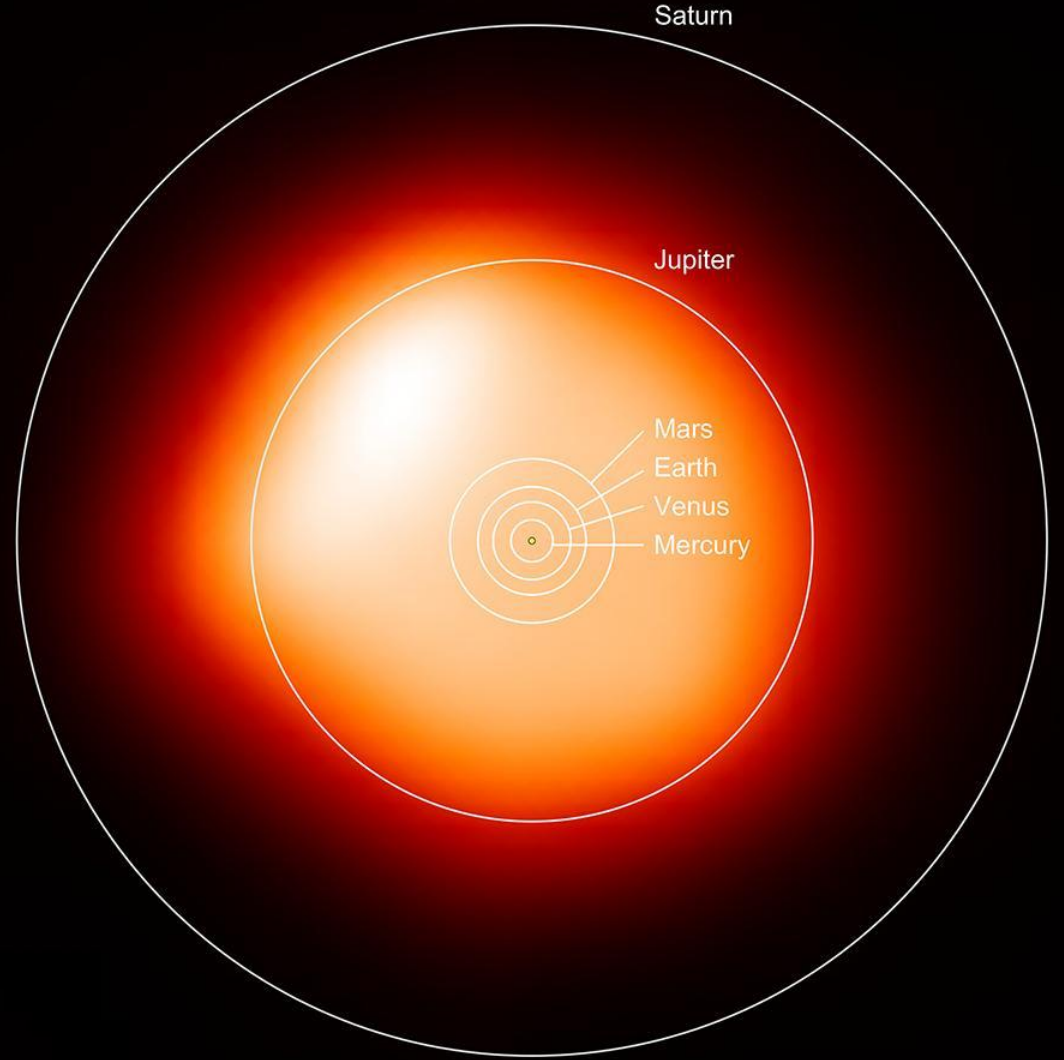
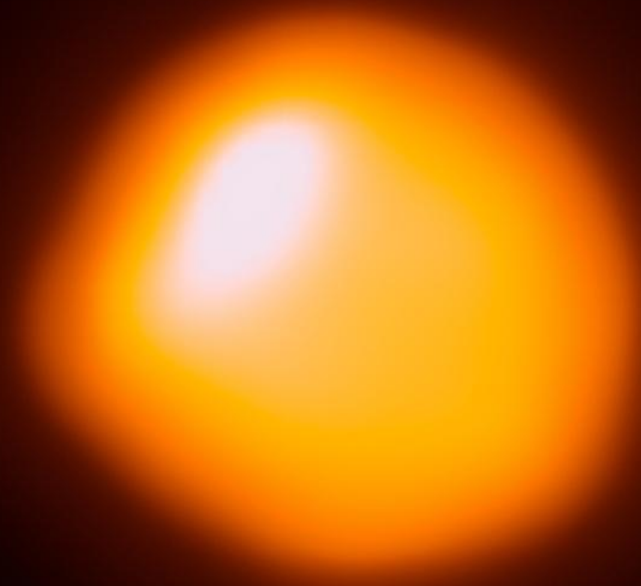
- Ядерные реакции в массивных звездах могут идти до образования «ядерной золы» - железа
- Уже на этом этапе появляется «звездный ветер»
- Дальше – неминуемая остановка и **коллапс**,
- наблюдаемый как **взрыв сверхновой II типа**



- За какими типами звезд нам нужно следить, если мы желаем увидеть развитие взрыва сверхновой с самого начала?

# Бетельгейз

e



0.015"

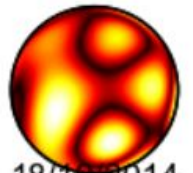
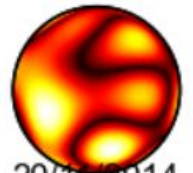
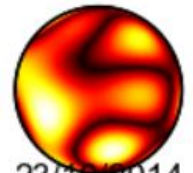
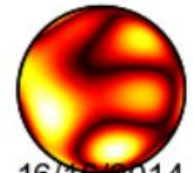
27/11/2013

11/12/2013

20/12/2013

09/01/2014

08/04/2014



12/09/2014

16/10/2014

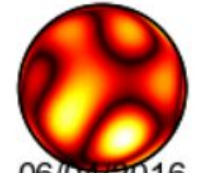
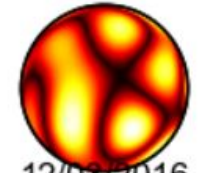
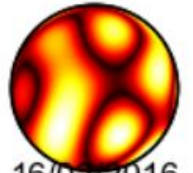
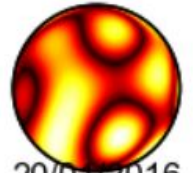
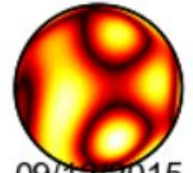
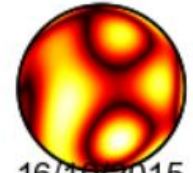
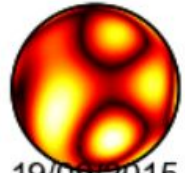
23/10/2014

20/11/2014

18/12/2014

03/03/2015

13/04/2015



19/09/2015

16/10/2015

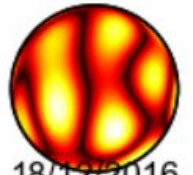
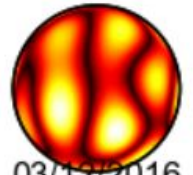
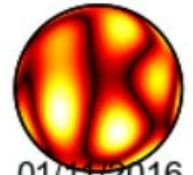
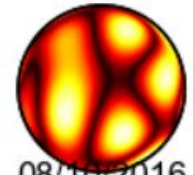
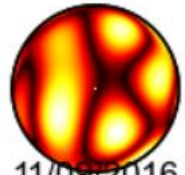
09/12/2015

20/01/2016

16/02/2016

12/03/2016

06/04/2016



11/09/2016

08/10/2016

01/11/2016

03/12/2016

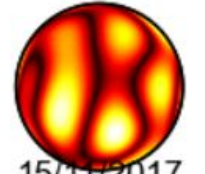
18/12/2016

17/02/2017

03/04/2017

11/04/2017

17/04/2017



06/09/2017

13/09/2017

26/09/2017

02/10/2017

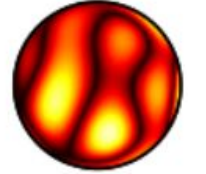
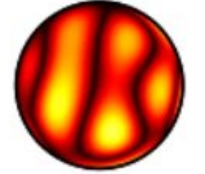
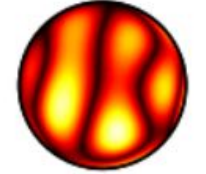
07/10/2017

12/10/2017

30/10/2017

15/11/2017

20/11/2017



27/11/2017

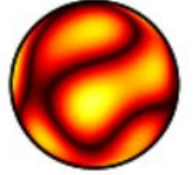
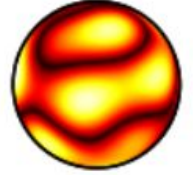
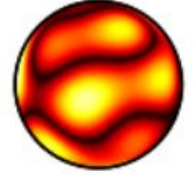
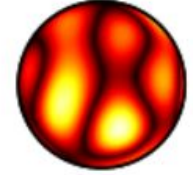
04/12/2017

23/01/2018

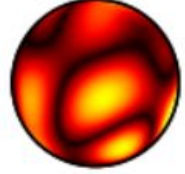
28/01/2018

12/04/2018

18/04/2018



18/08/2018



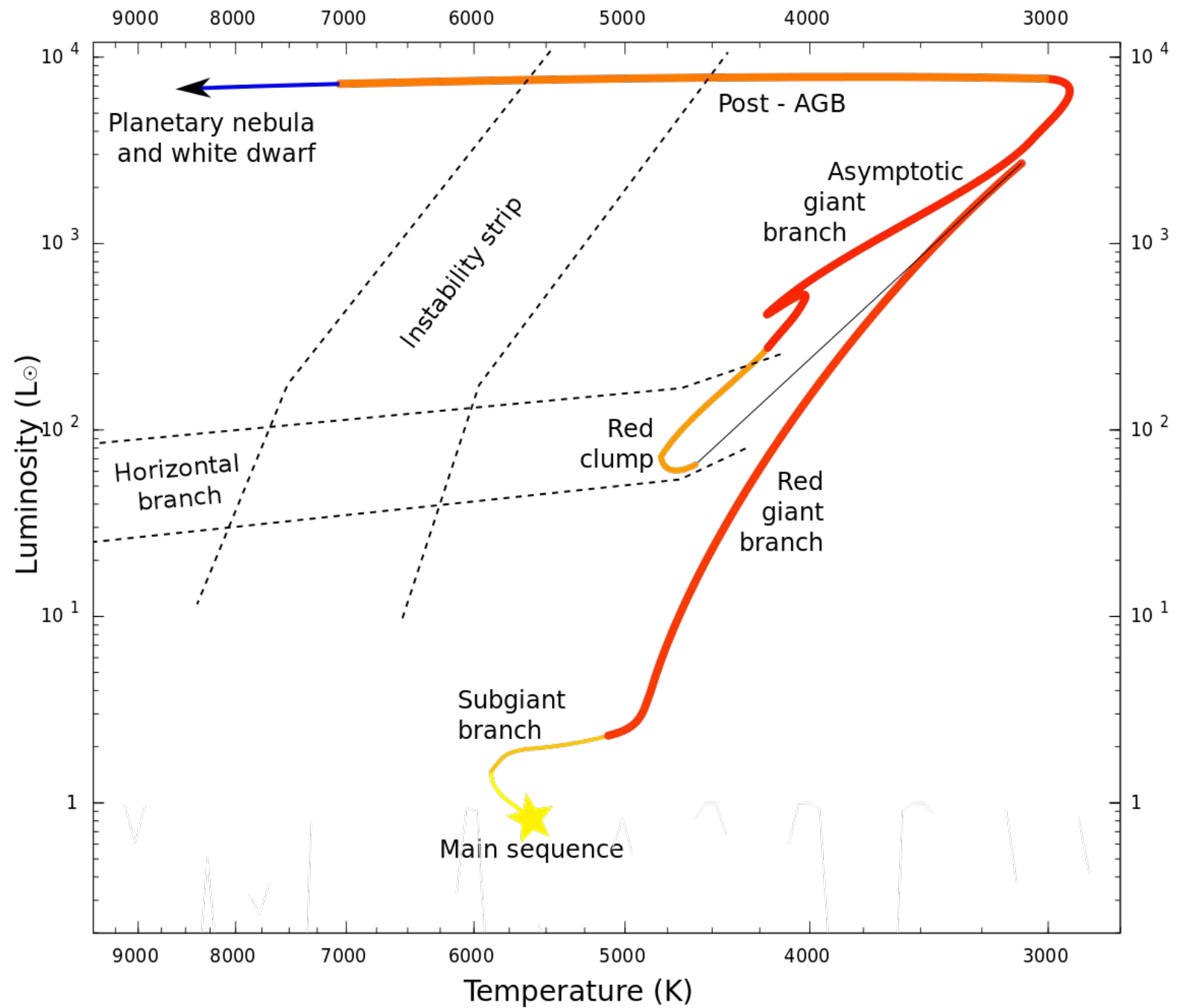
Бетельгейз

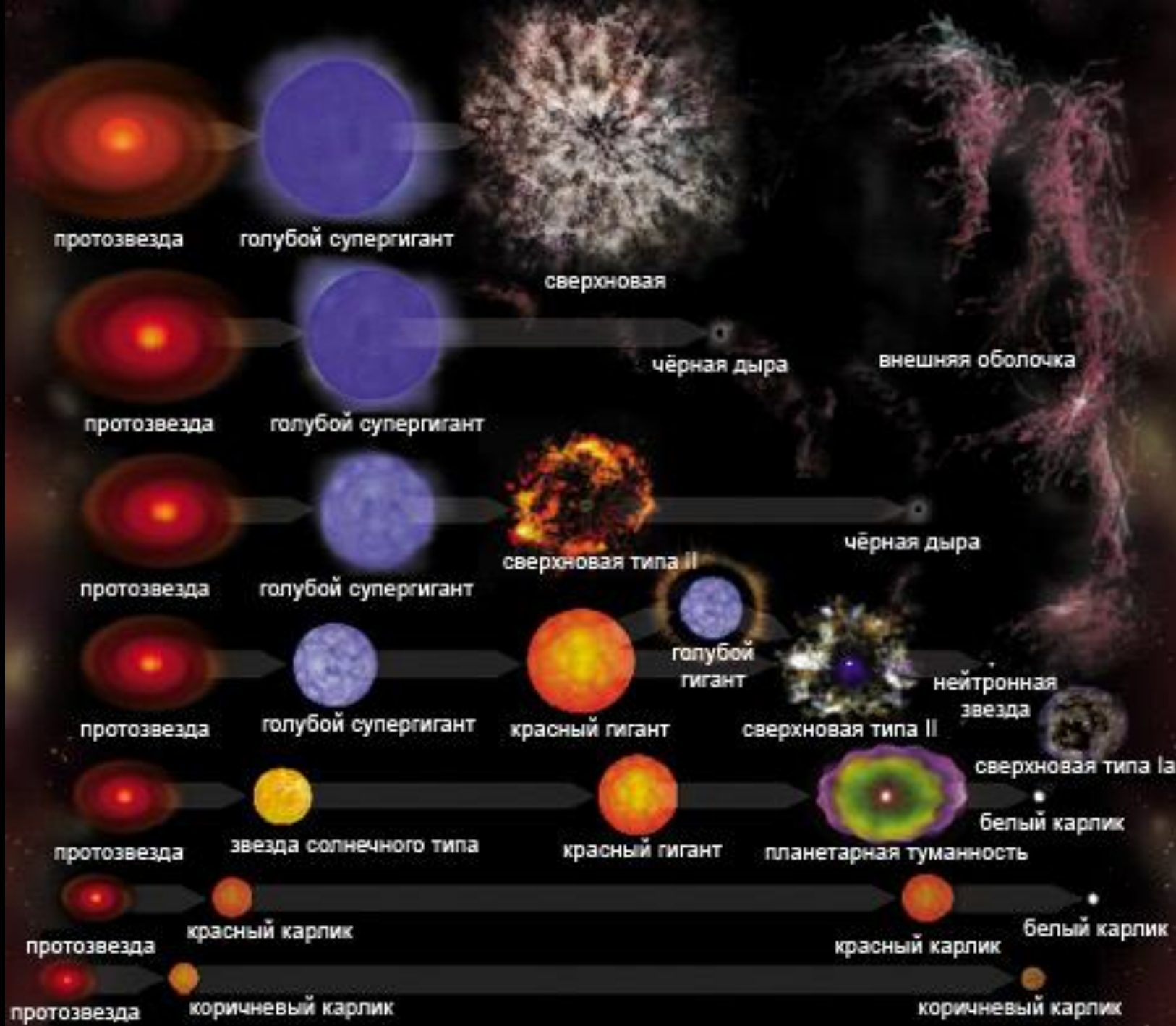
# Типичный эволюционный трек





# Evolution of a $1 M_{\odot}$ star

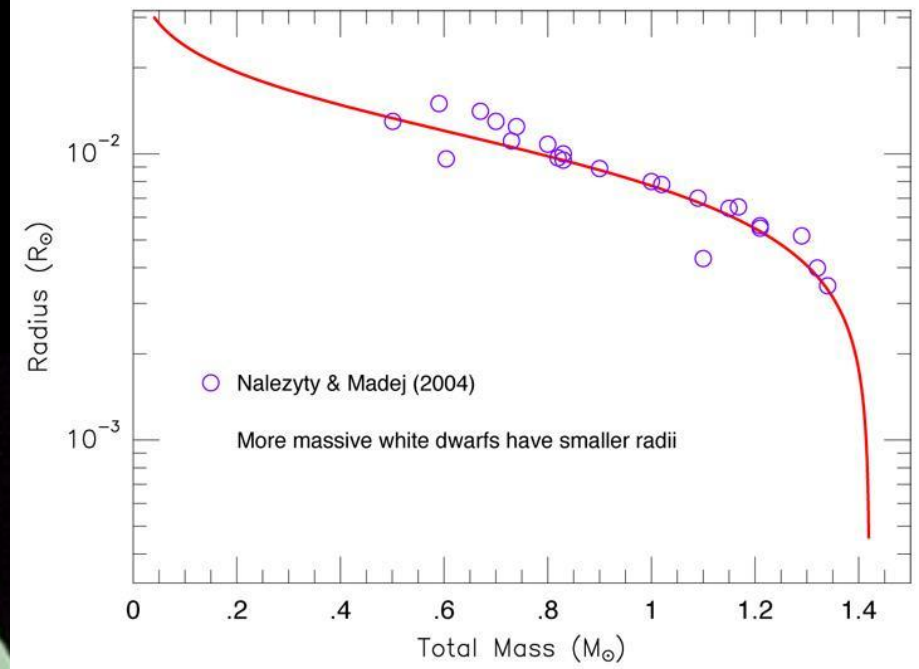




# Суперсверхгига

НТ

# Сравнительные размеры



Белый карлик имеет массу 0.6 масс Солнца, светимость 0.001 светимости Солнца и температуру, вдвое большую температуры Солнца. Во сколько раз его средняя плотность выше солнечной?

# Вырожденный газ

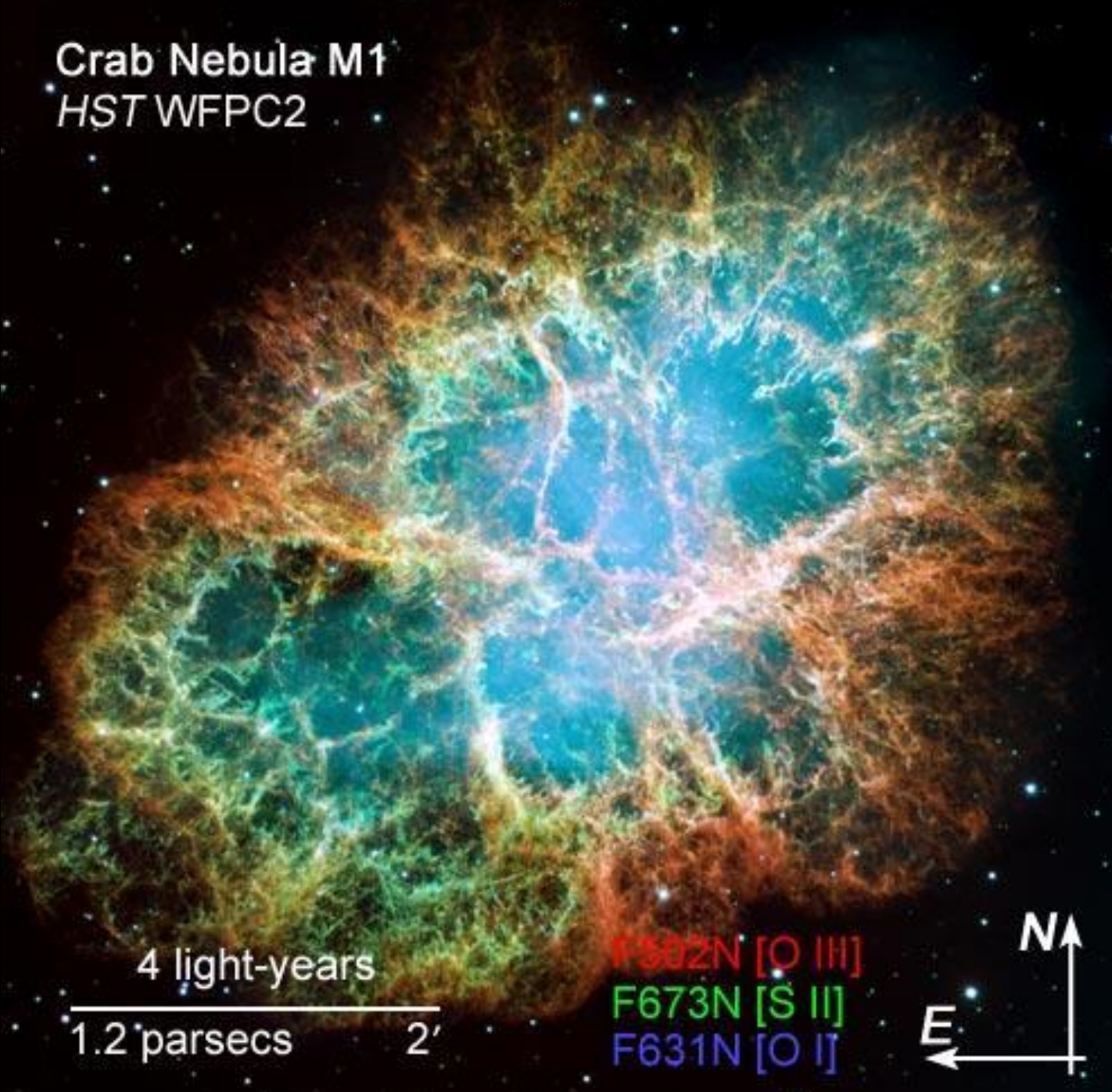
- Белый карлик – фактически, обнажившееся ядро звезды, в котором прекратились ядерные реакции
- Если масса БК превысит предел Чандрасекара в  $\sim 1.4$  массы Солнца, в процессе коллапса (и нейтронизации вещества) рождается нейтронная звезда (самое плотное вещество во Вселенной) или черная дыра
- В НЗ ядра атомов «вплотную» (насколько позволяет квантовая физика) прилегают друг к другу
- **Есть ли протоны в нейтронной звезде?**



# «Краб»

- Сверхновая **1054** года - прародитель **Крабовидной туманности** (Китай, Япония)
- **M1** известна с 18 века
- Отождествлена в 20-х годах 20-го века
- 1963 – радиоизлучение, 1964 – рентген
- **1968** – открытие пульсара в Крабе

Crab Nebula M1  
HST WFPC2



4 light-years  
1.2 parsecs 2'

F502N [O III]  
F673N [S II]  
F631N [O II]



# Скорость расширения Крабовидной туманности

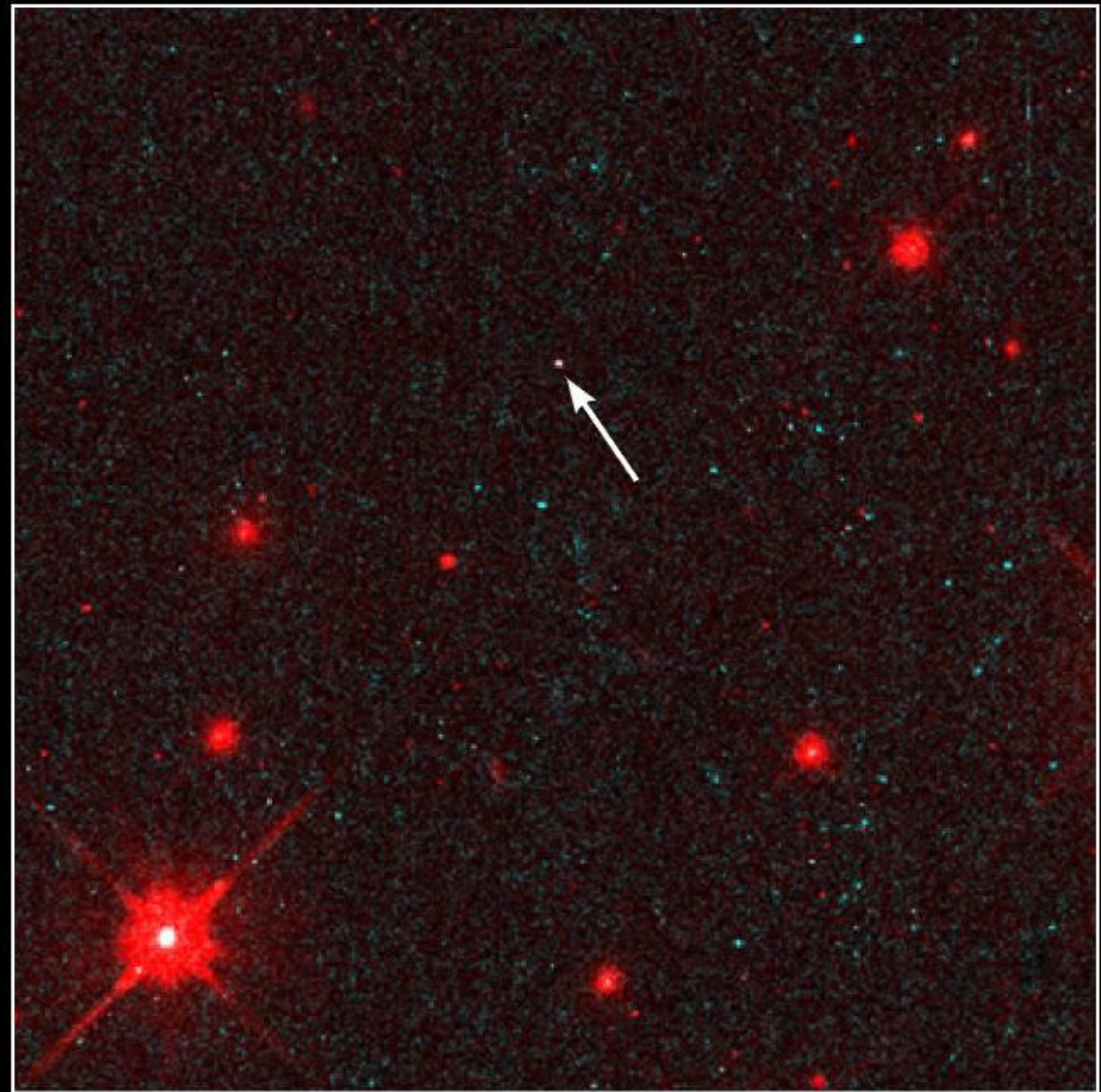
- Размер (радиус) «Краба»: 2.5 угл минут = 5 св. лет
- Время расширения туманности:  
 $2006 - 1054 = 952 \approx 10^3$  лет
- 1 год =  $365 * 24 * 3600 = 31536000 \approx 3 * 10^7$  с
- Скорость света:  $C = 3 * 10^5$  км/с
- *Вопрос*: Какова скорость расширения?
- *Решение*:

$v =$



# Нейтронные звезды

- Предсказание – Л.Ландау, 1931
- Обоснование существования – Бааде, Цвикки, 1934
- Наблюдения появились в радиодиапазоне (1965-1967)
- Наблюдения в оптике – последние десятилетия



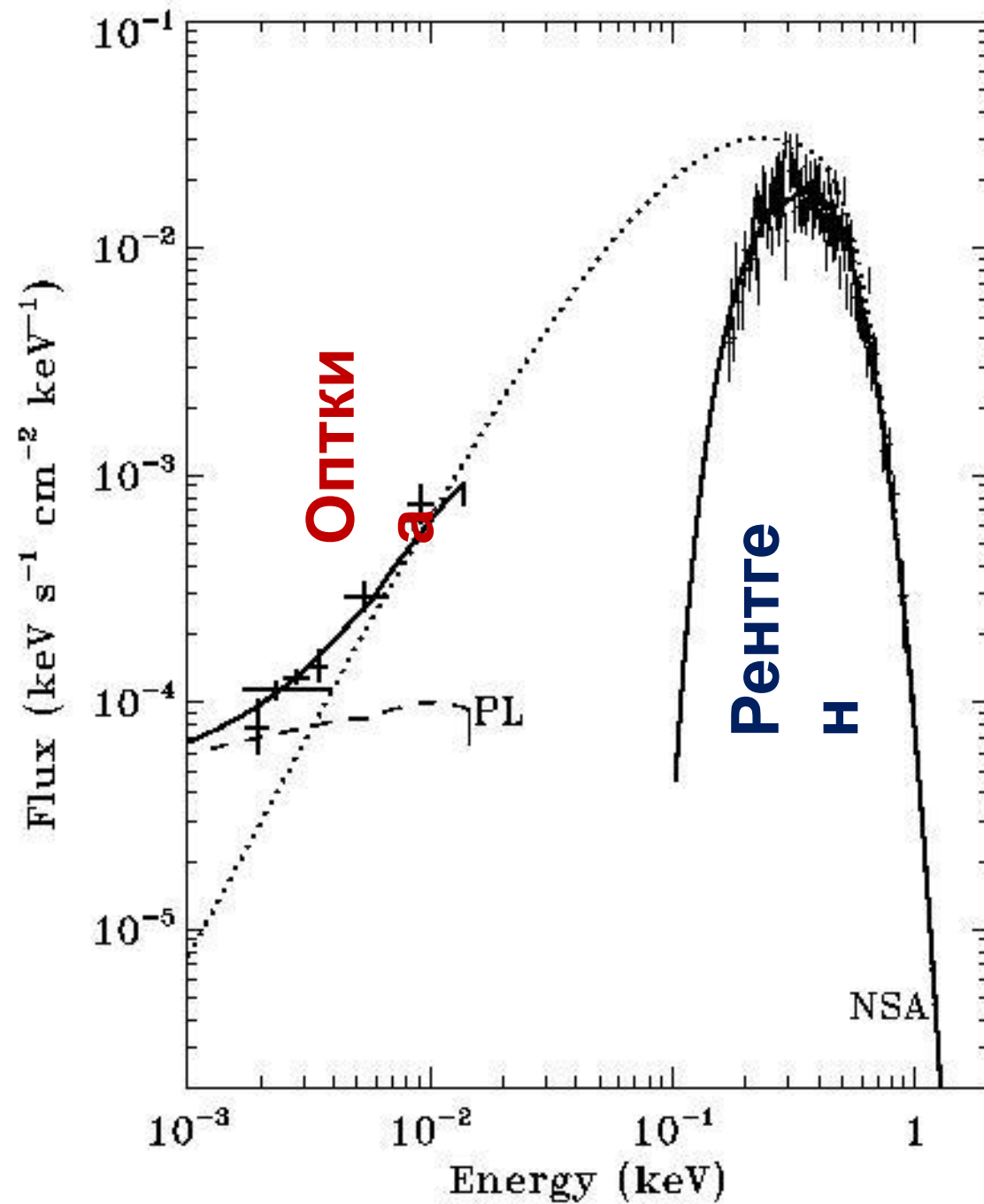
**Isolated Neutron Star RX J185635-3754**

HST • WFPC2

PRC97-32 • ST ScI OPO • September 25, 1997

F. Walter (State University of New York at Stony Brook) and NASA

# Спектр нейтронной звезды

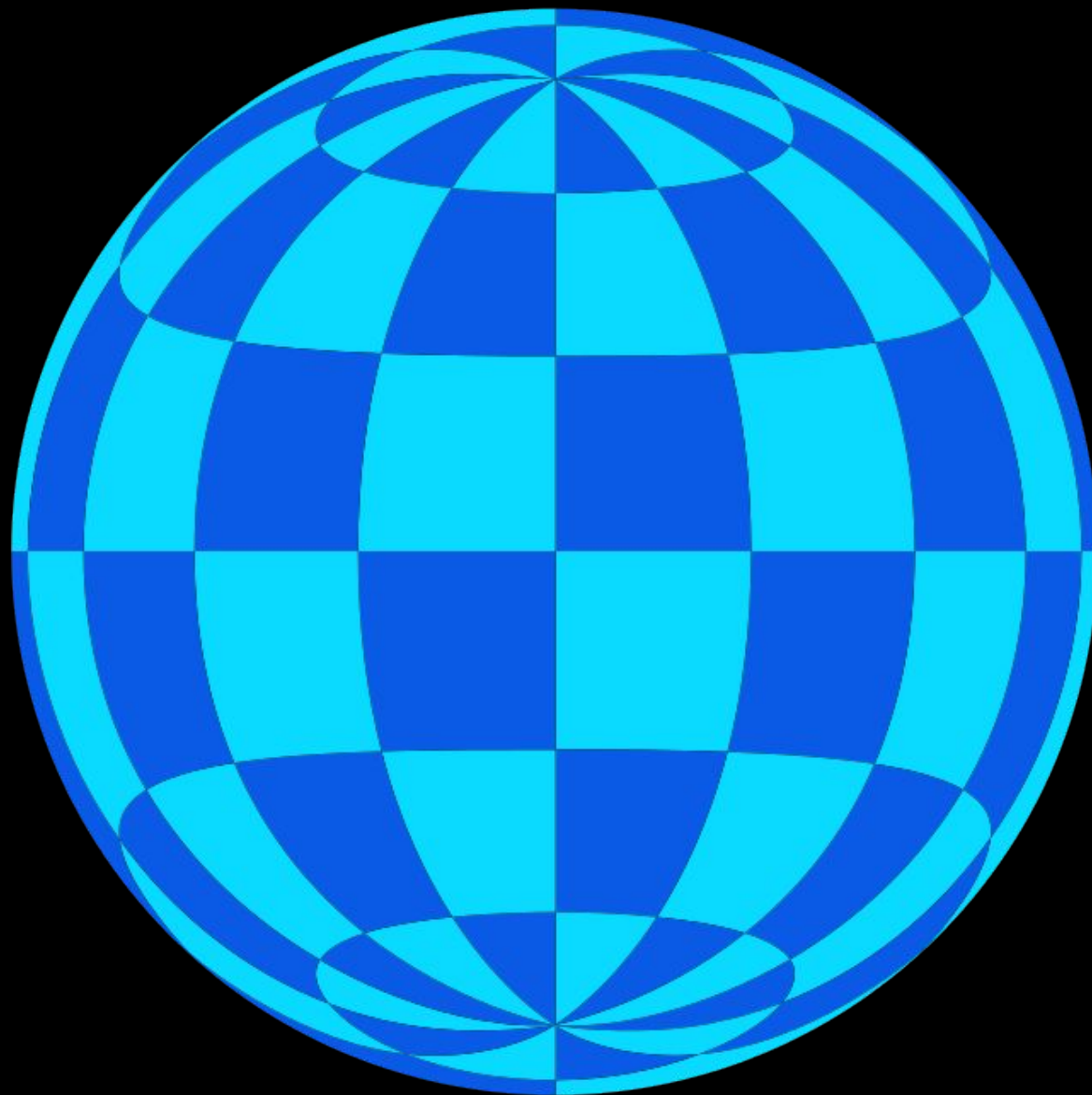


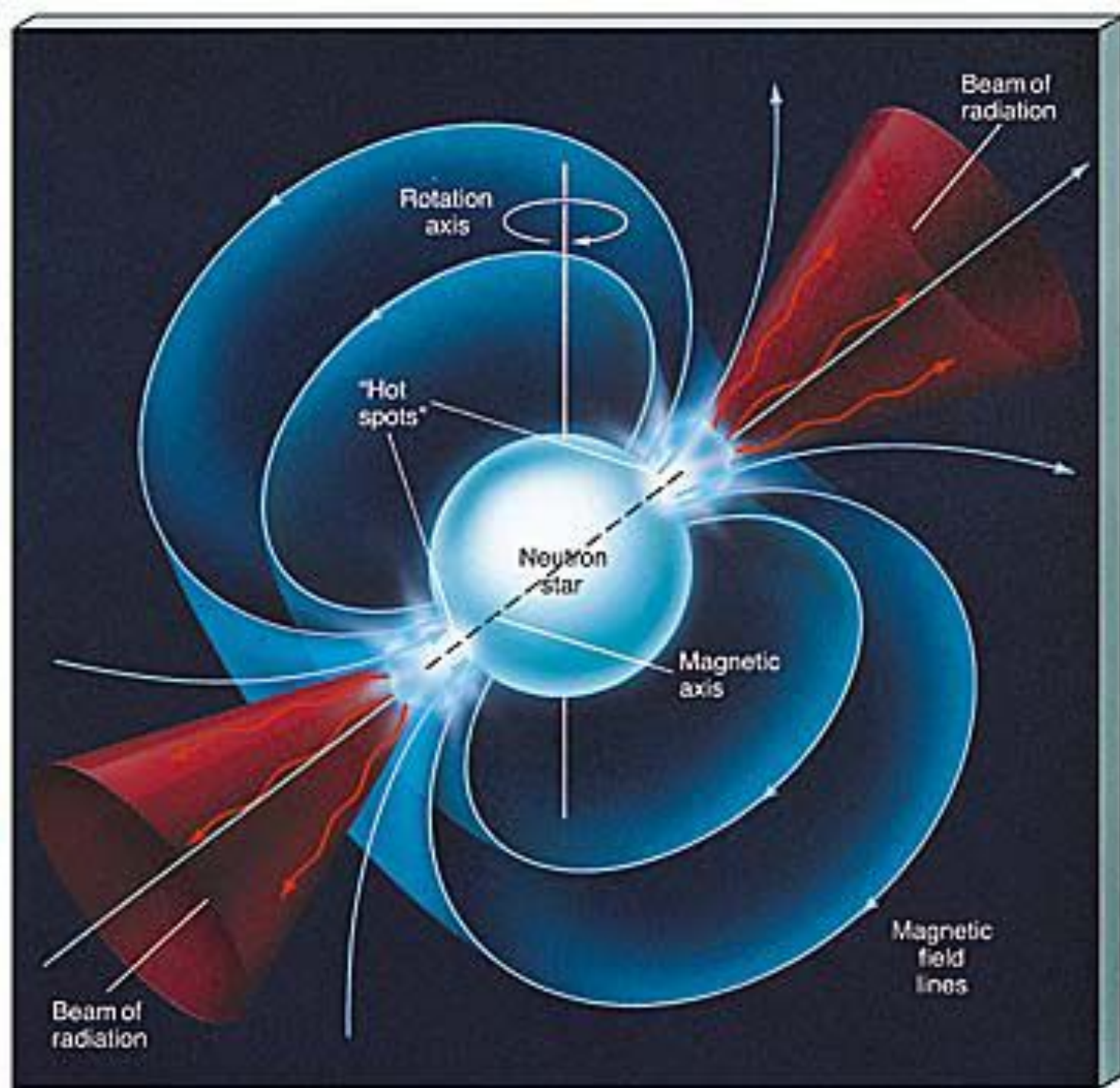
# Может ли нейтронная звезда считаться переменной?

Пульсар в «Крабе», 800 нм (ИК), «замедленная съемка»



Эффекты  
ОТО: мы  
видим более  
половины  
поверхности  
НЗ!





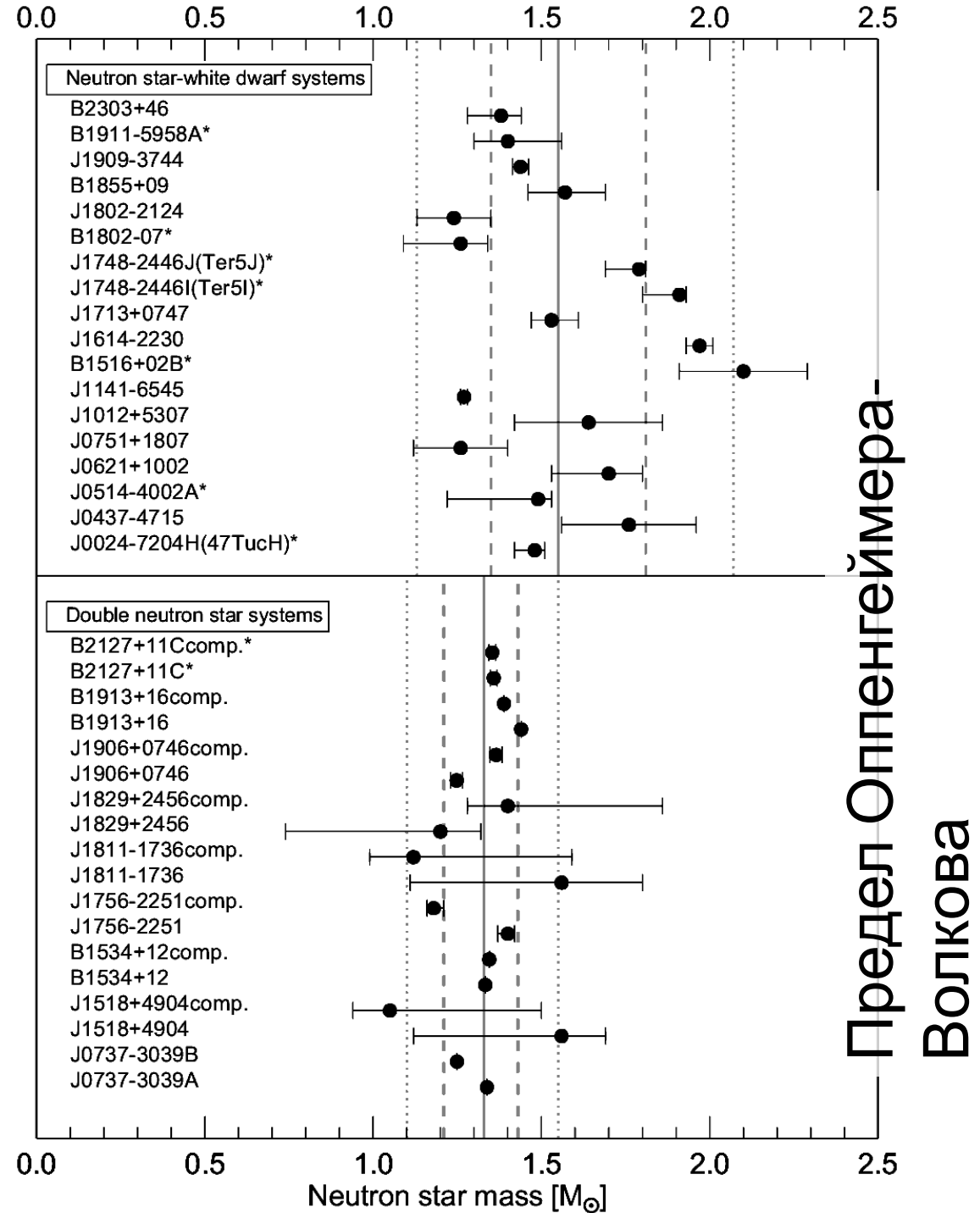
# Рентгеновские пульсары

Тесная  
двойная  
система:  
нейтронная  
звезда и  
нормальная  
звезда.



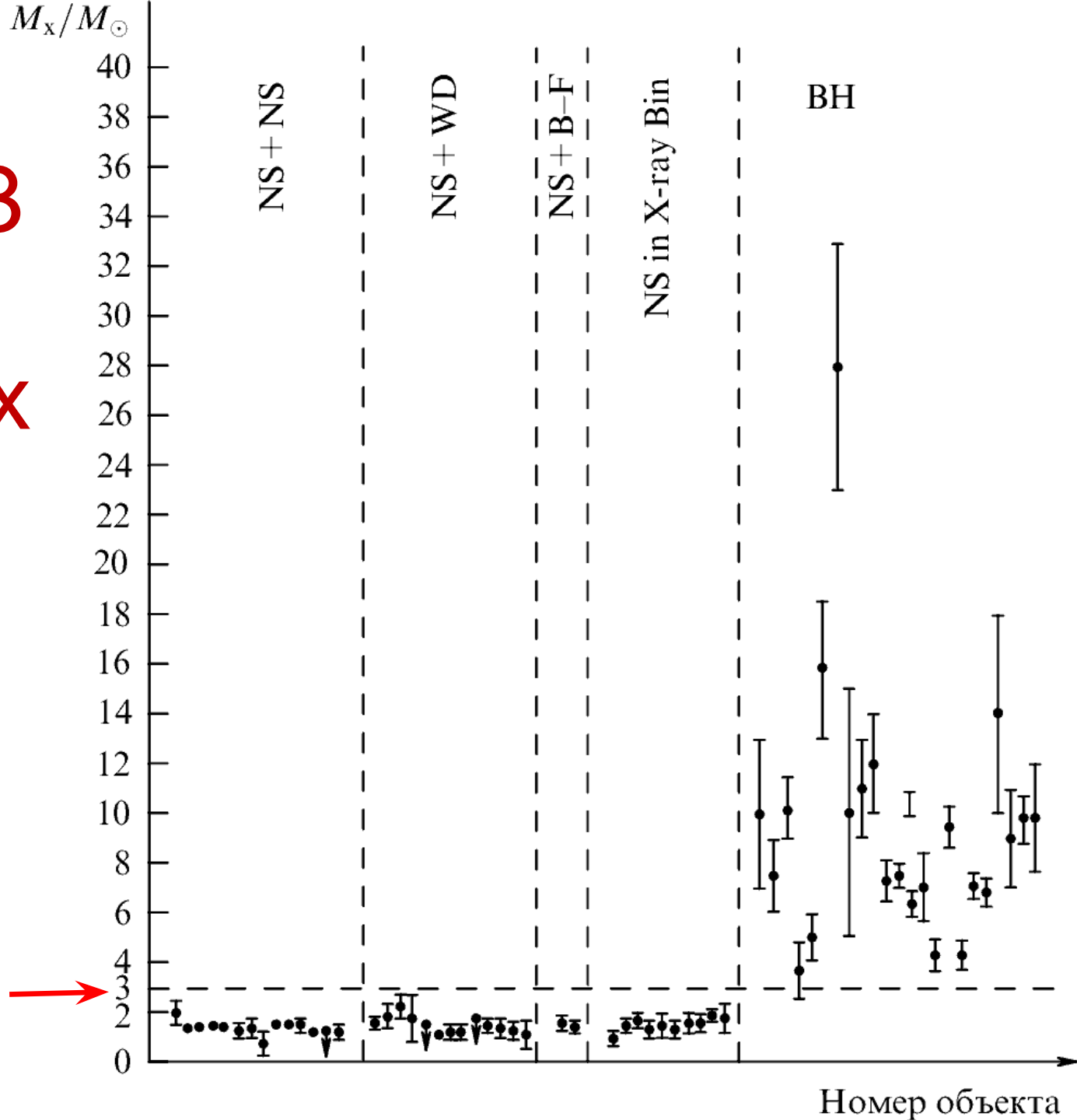
# Массы нейтронных звезд в двойных системах

- Это (почти) все известные нам НЗ в релятивистских двойных



# Массы НЗ и ЧД в двойных системах

Предел О-  
В

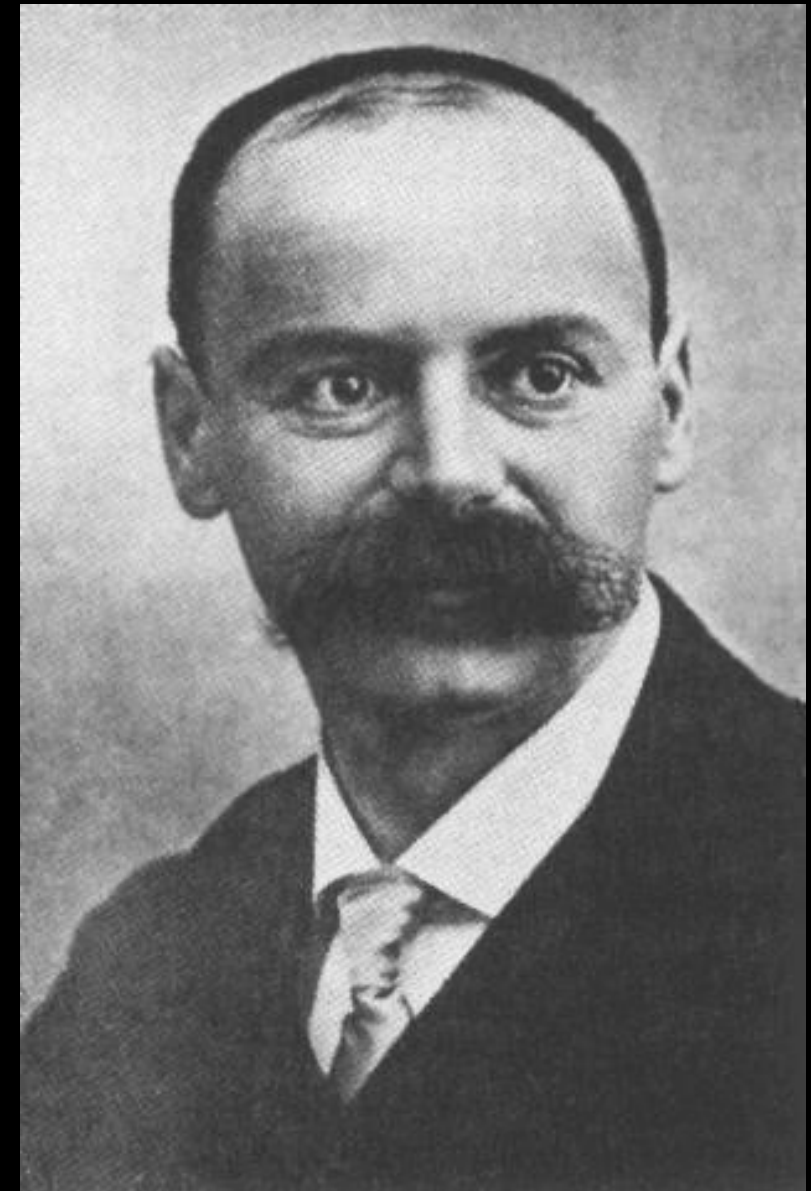




# Радиус Шварцшильда и горизонт событий

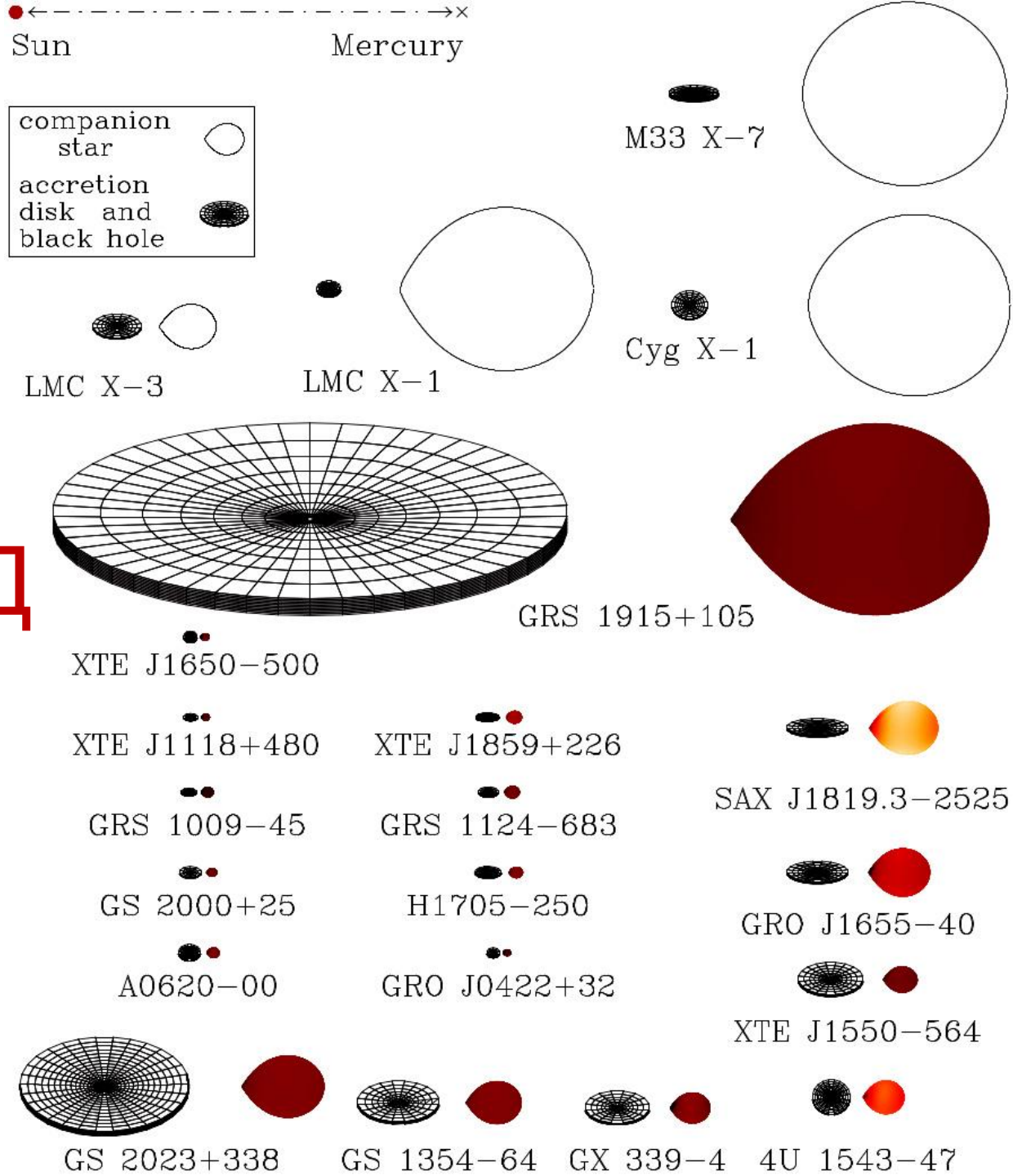
1915 – первое точное решение уравнений Эйнштейна: гравитационное поле не вращающегося, сферически симметричного тела.

$$R_S = \frac{2GM}{c^2}$$



Карл Шварцшильд  
(1873 – 1916)

# Почти все системы с ЧД



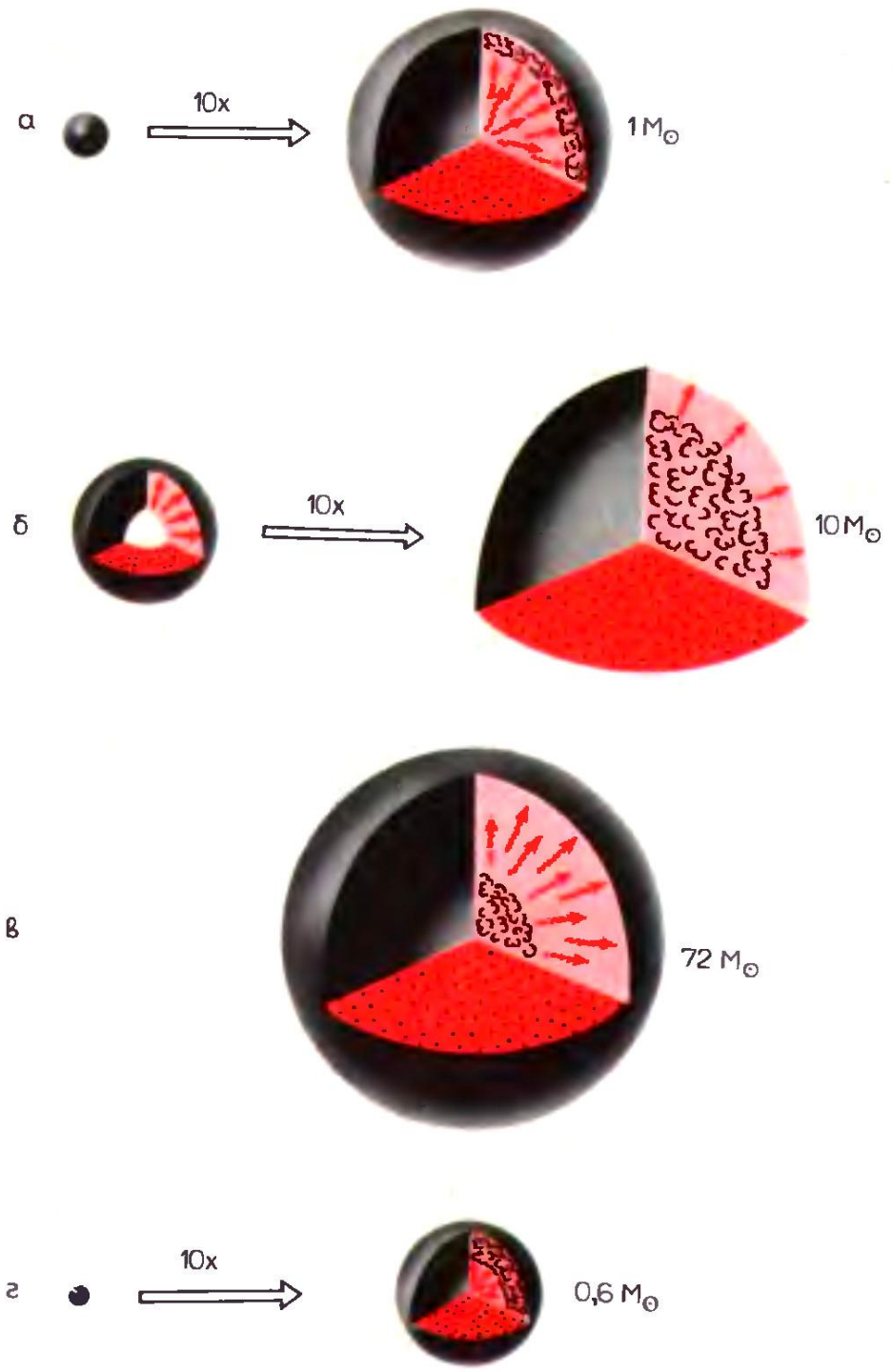


# Строение звезд разной массы

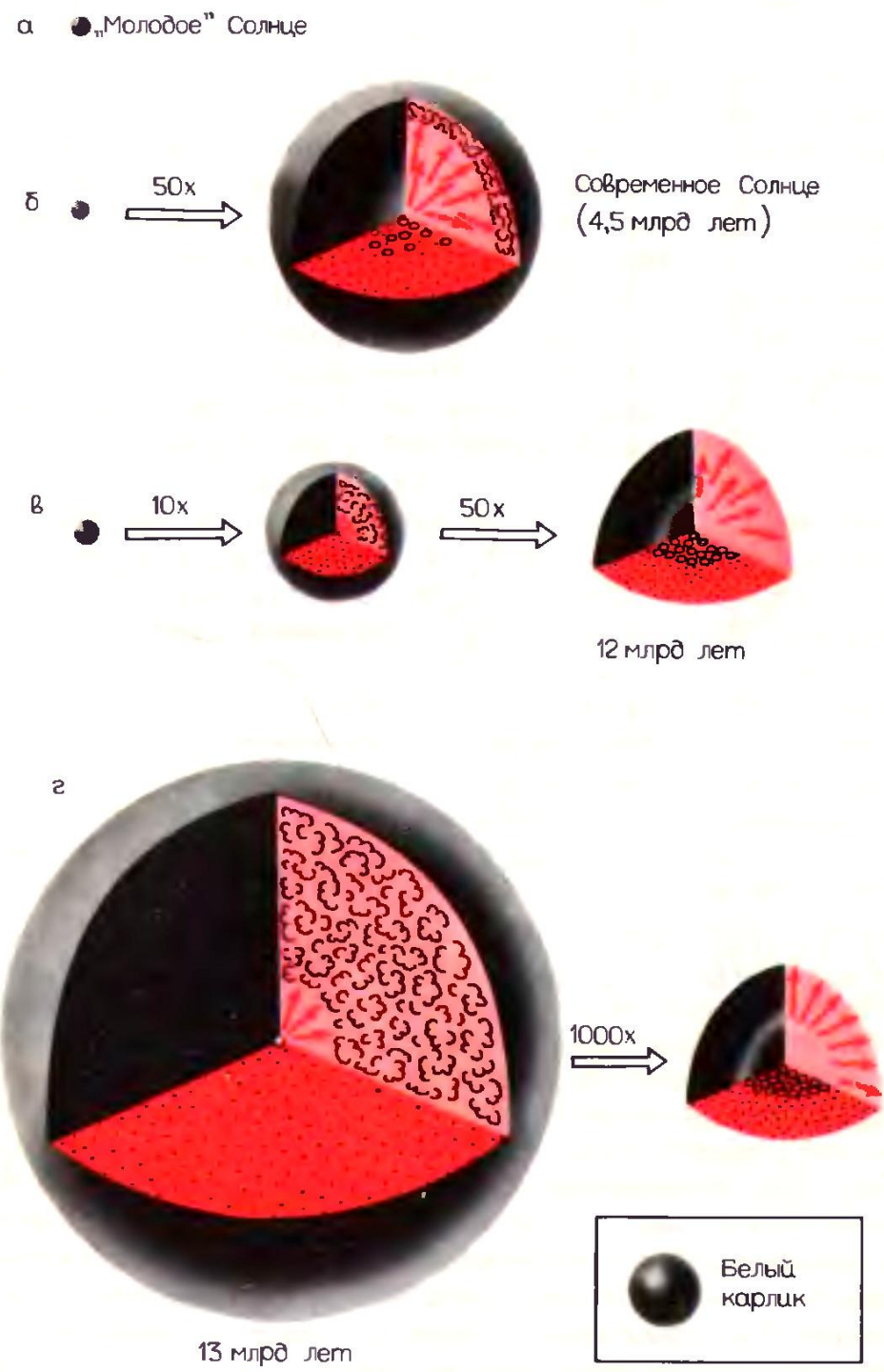
Плотность в центре – 100  
г в 1 см<sup>3</sup>: в 13 раз больше  
плотности железа!

Давление –  $1.3 * 10^{11}$   
(130 млрд) атмосфер!

**Но это газ!**



# Эволюция Солнца



# Звезда с $M = 7 M_{\odot}$

