

Эволюция звезд

Д.С. Насонов, 19.01.2019.

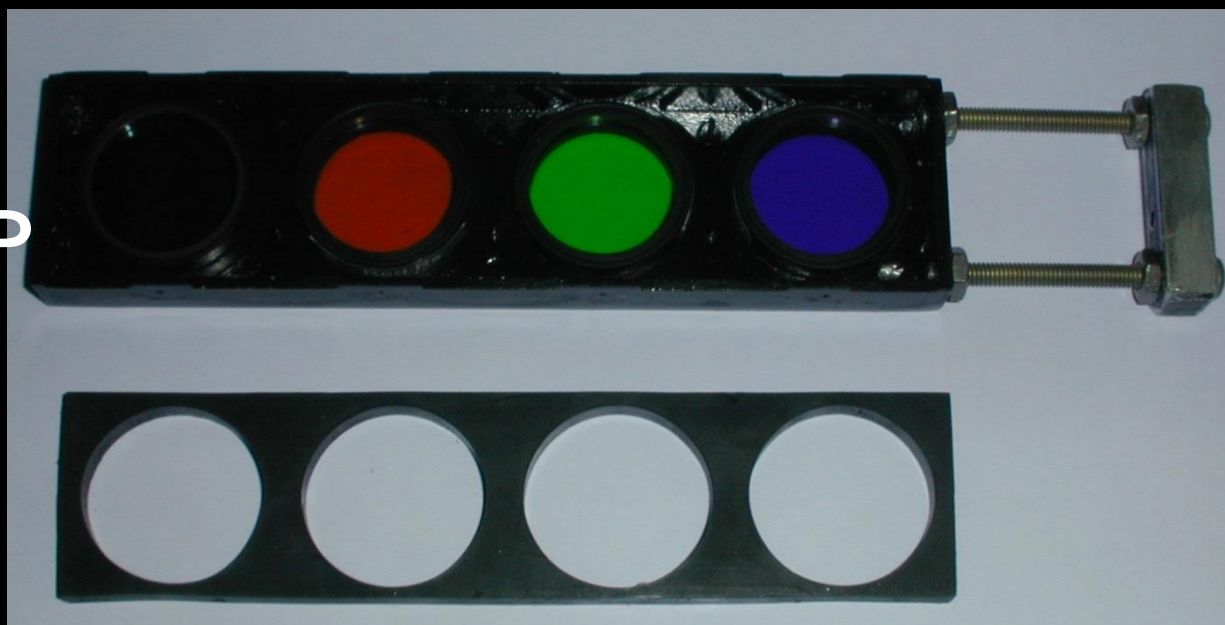
- Диаграмма ГР. Двумерная классификация звезд. Соотношения масса-светимость и радиус-светимость.
- Эволюция звезд. Характерные времена эволюции.
- Конечные стадии эволюции звезд: Белые карлики, черные дыры, нейтронные звезды. Пульсары.
- Гравитационный радиус.
- Эддингтоновская светимость.
- Эволюция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

Вступительные замечания

Наблюдаемые параметры звезд

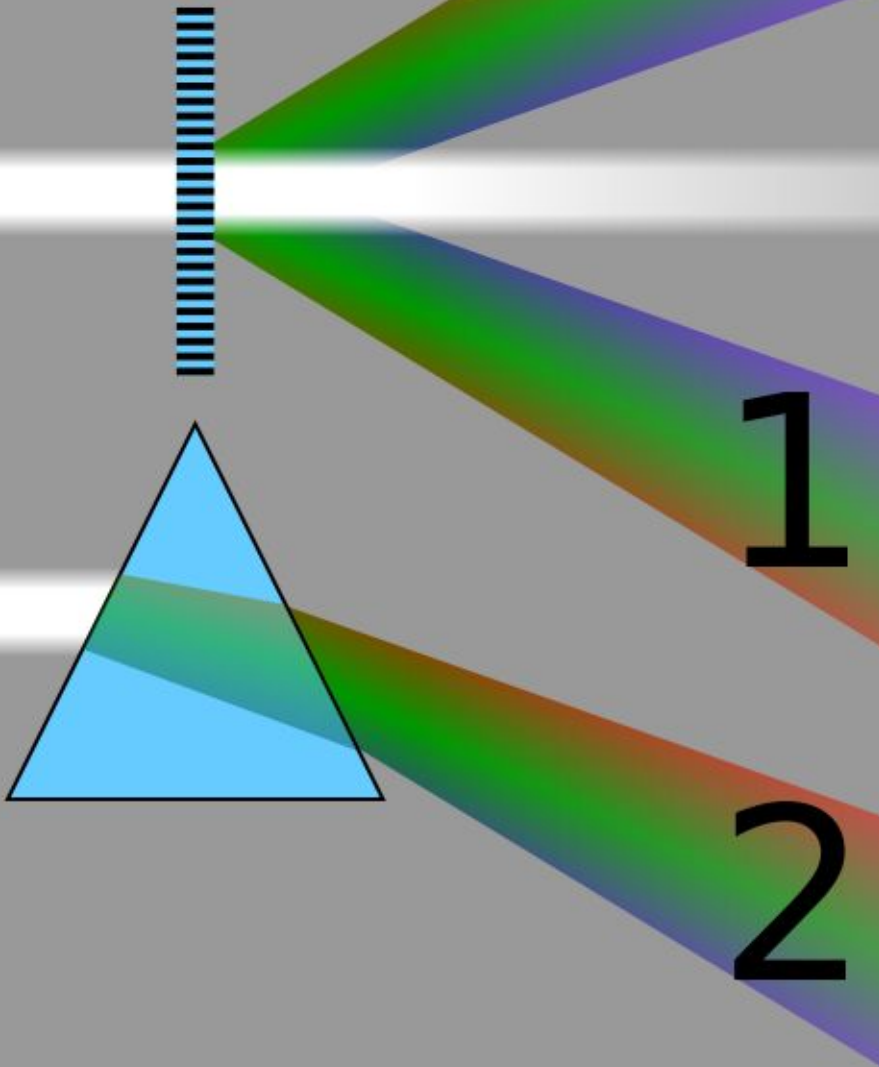
- **Блеск** (звездная величина и ее изменения):
Изменение блеска в 100 раз = изменение зв. вел. на 5^m.
- **Цвет** («количество света» на разных длинах волн)
- **Изменение положения со временем** (параллакс + собственное движение -> расстояние + скорость)
- **Спектр** (физические параметры, хим. состав,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

Как измерить
цвет?



Призма и Дифракционная решетка

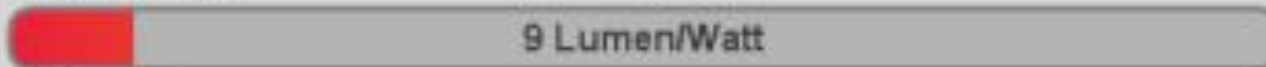
- Изобретение спектроскопа – 1814 год
- Создание дифракционной решетки – 1821 (1785)
- Объяснение природы темных линий в спектре Солнца – 1859 год



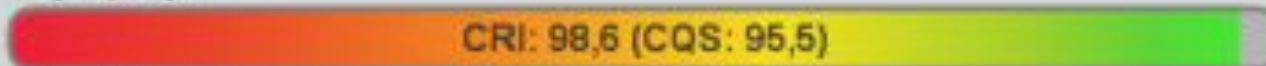
Спектр лампы накаливания

Measurement data:

Light efficiency:



Light quality:



Colour temperature:



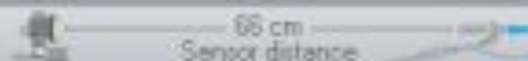
Output: 555 lm

Peak: 52,5 cd

Power: 56,2 W

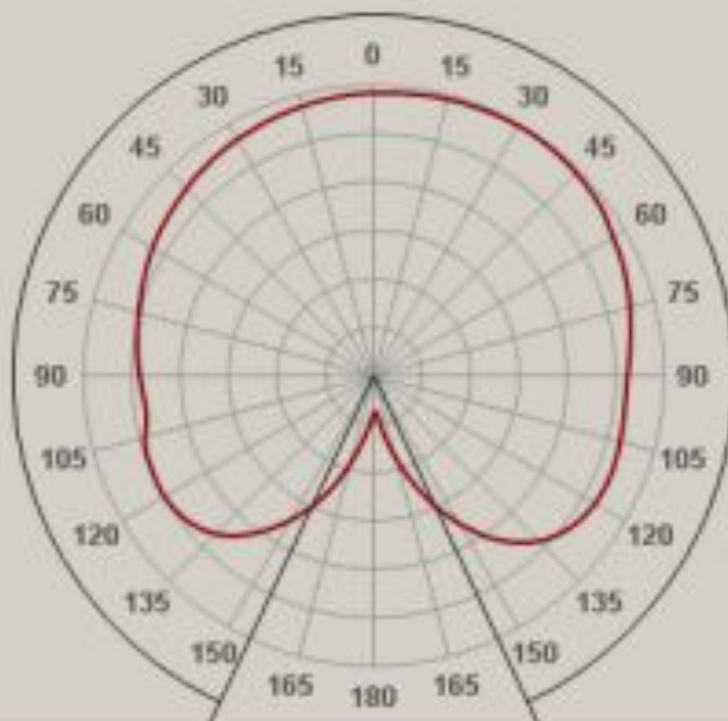
PF: 1,00

Photo metric:

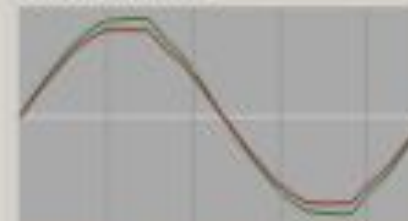


Beam angle:

309,5°



Power details:

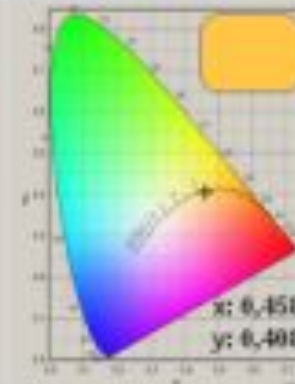


Voltage: 220,6 V

Current: 0,255 A

Frequency: 0,0 Hz

Update power



Spectra:

310 ms



Спектр светодиодной лампы

Measurement data:

Light efficiency:

88 Lumen/Watt

Light quality:

CRI: 83,5 (CQS: 81,2)

Colour temperature:

2742 K

Output: 1151 lm

Peak: 154 cd

Power: 13,0 W

PF: 0,92

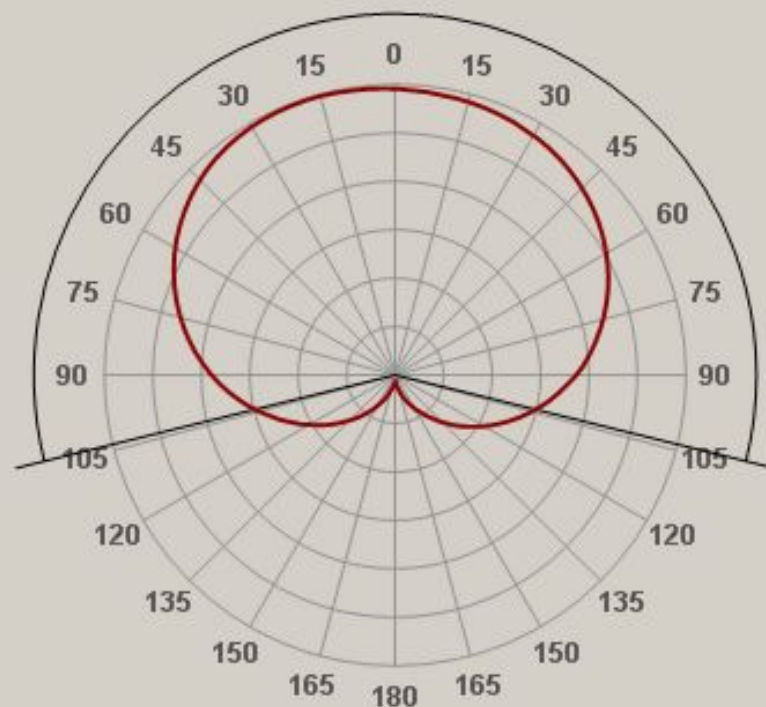
Photo metric:



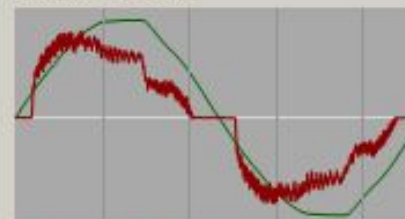
66 cm
Sensor distance

Beam angle:

207,6°



Power details:



Voltage: 231,4 V

Current: 0,061 A

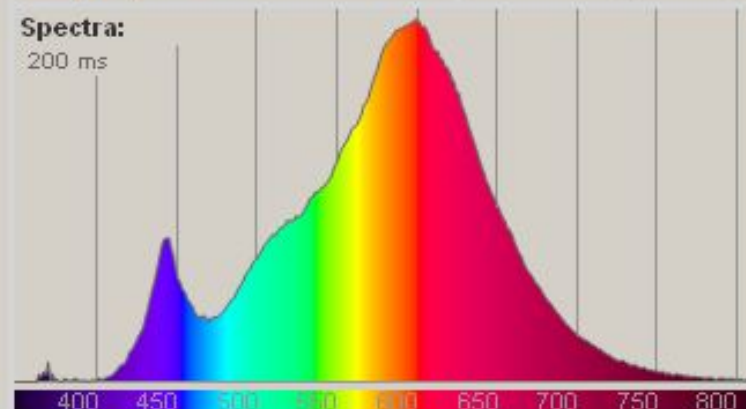
Frequency: 0,0 Hz

Update
power



Spectra:

200 ms



α Lyrae - Vega

Spectral Class: A0V

3rd May 2011

thedwo.com - Newquay, Cornwall

Taken with:

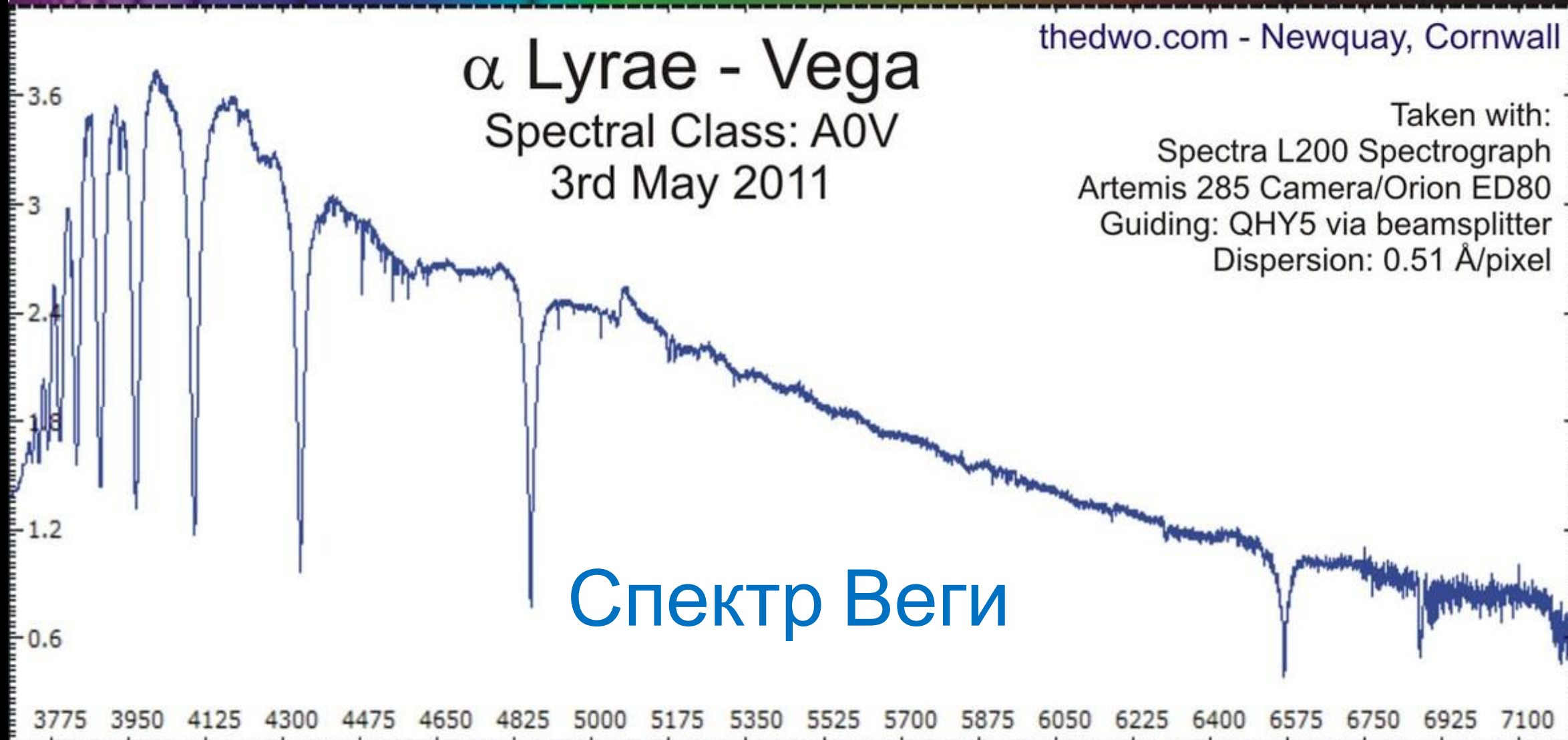
Spectra L200 Spectrograph

Artemis 285 Camera/Orion ED80

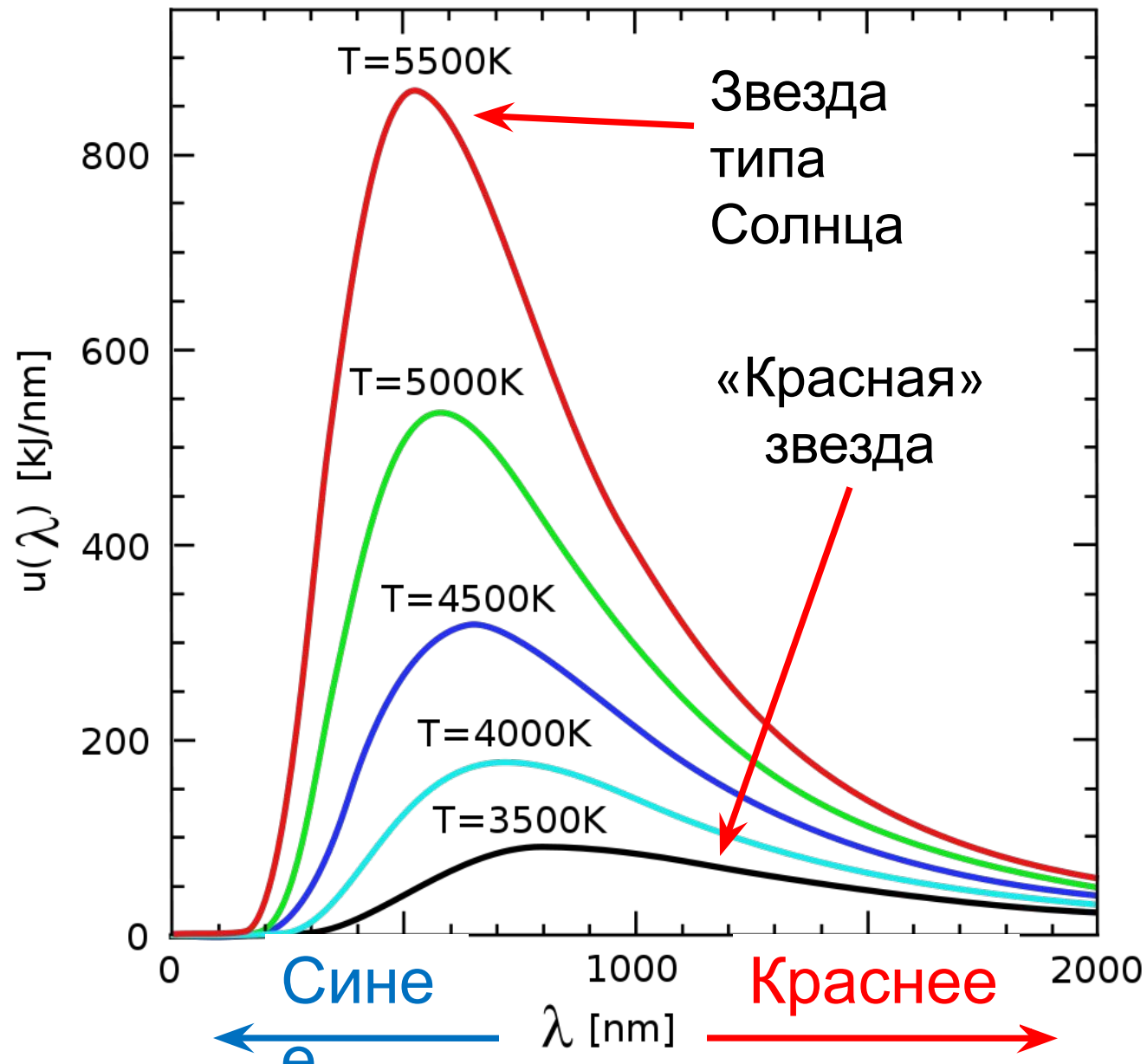
Guiding: QHY5 via beamsplitter

Dispersion: 0.51 Å/pixel

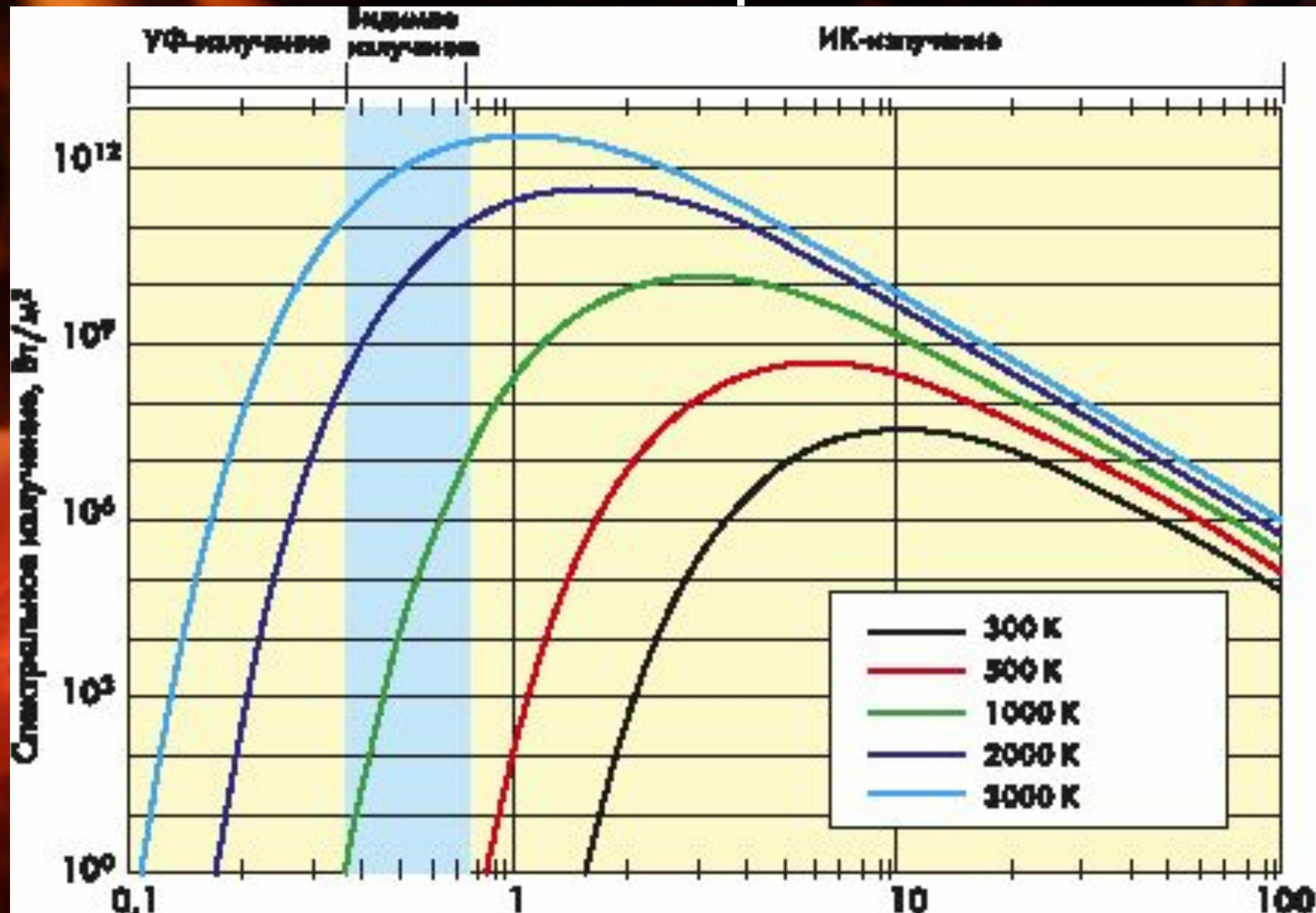
Спектр Веги



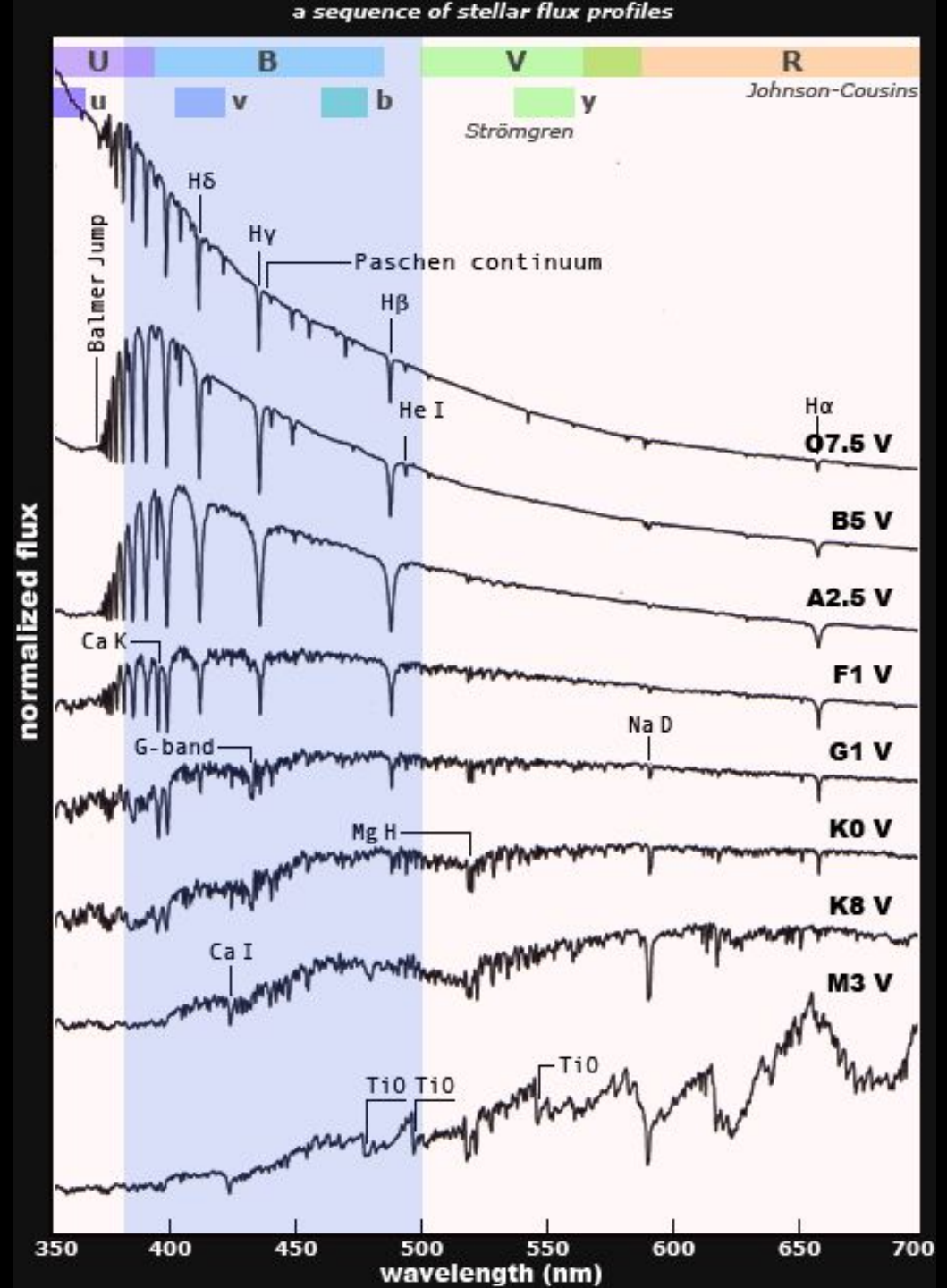
Как светят нагретые тела



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



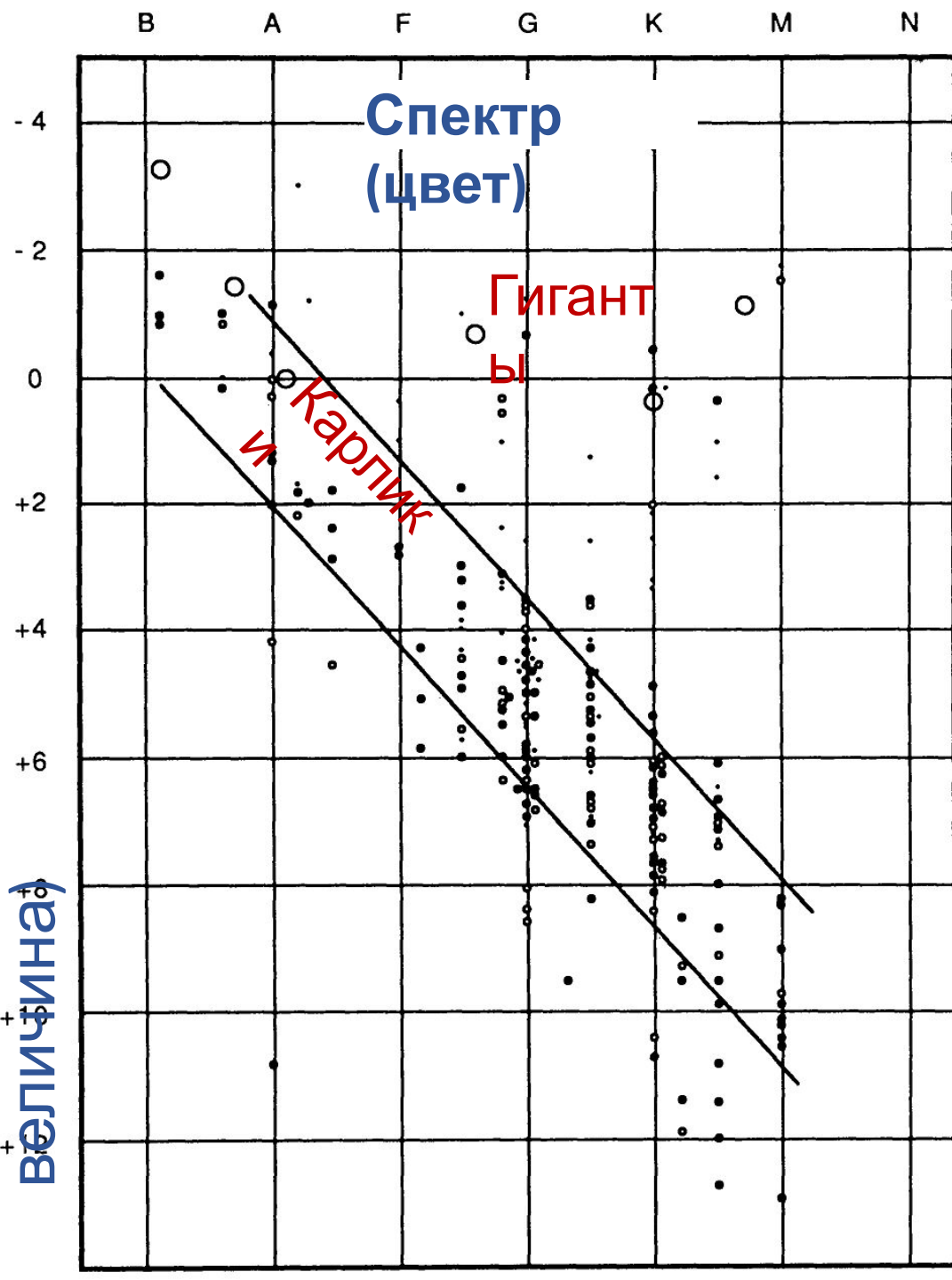
Диаграмма Г-Р для ближайших звезд

- Эйнар Герцшпрунг 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

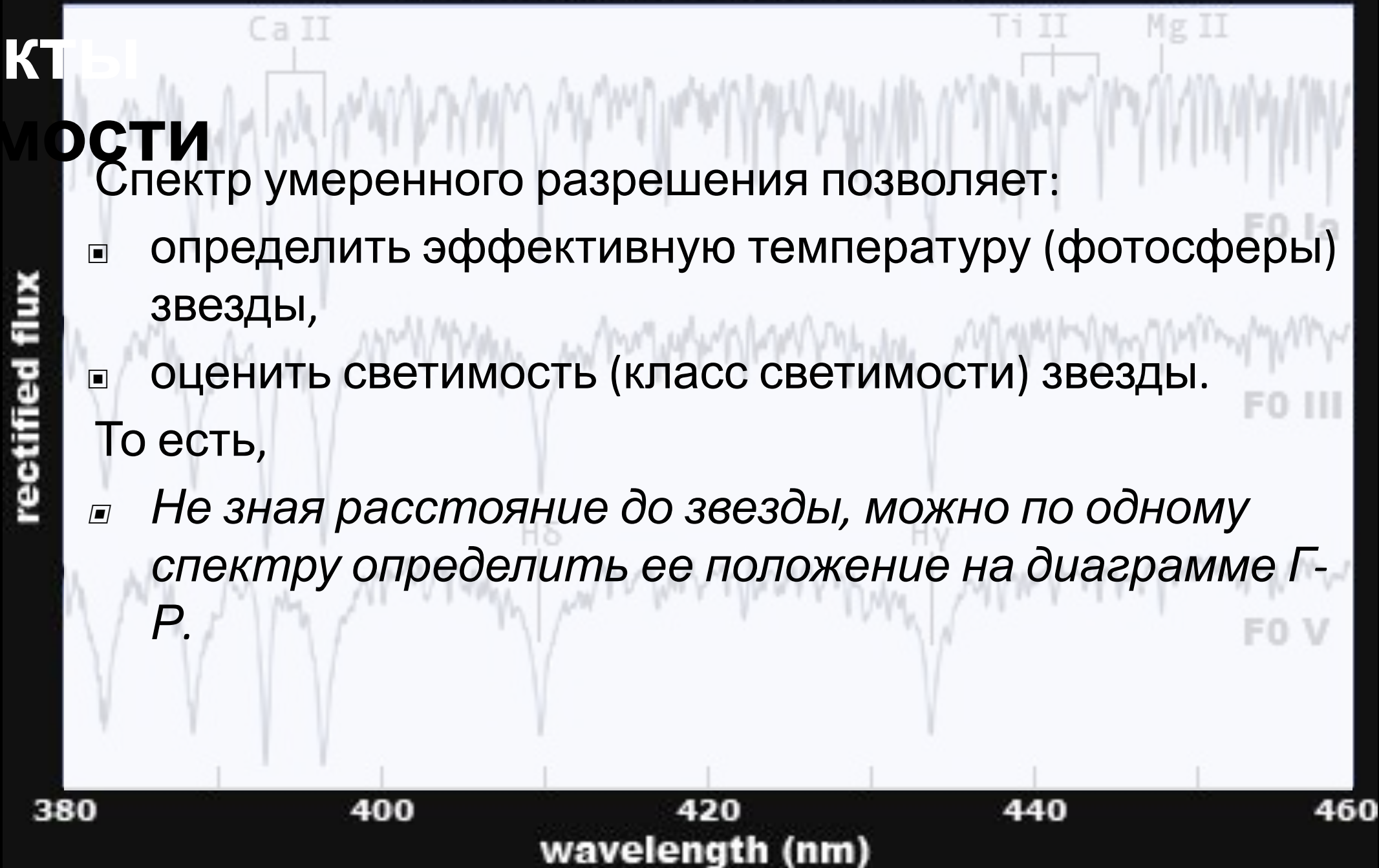
МОСТИ

Спектр умеренного разрешения позволяет:

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

То есть,

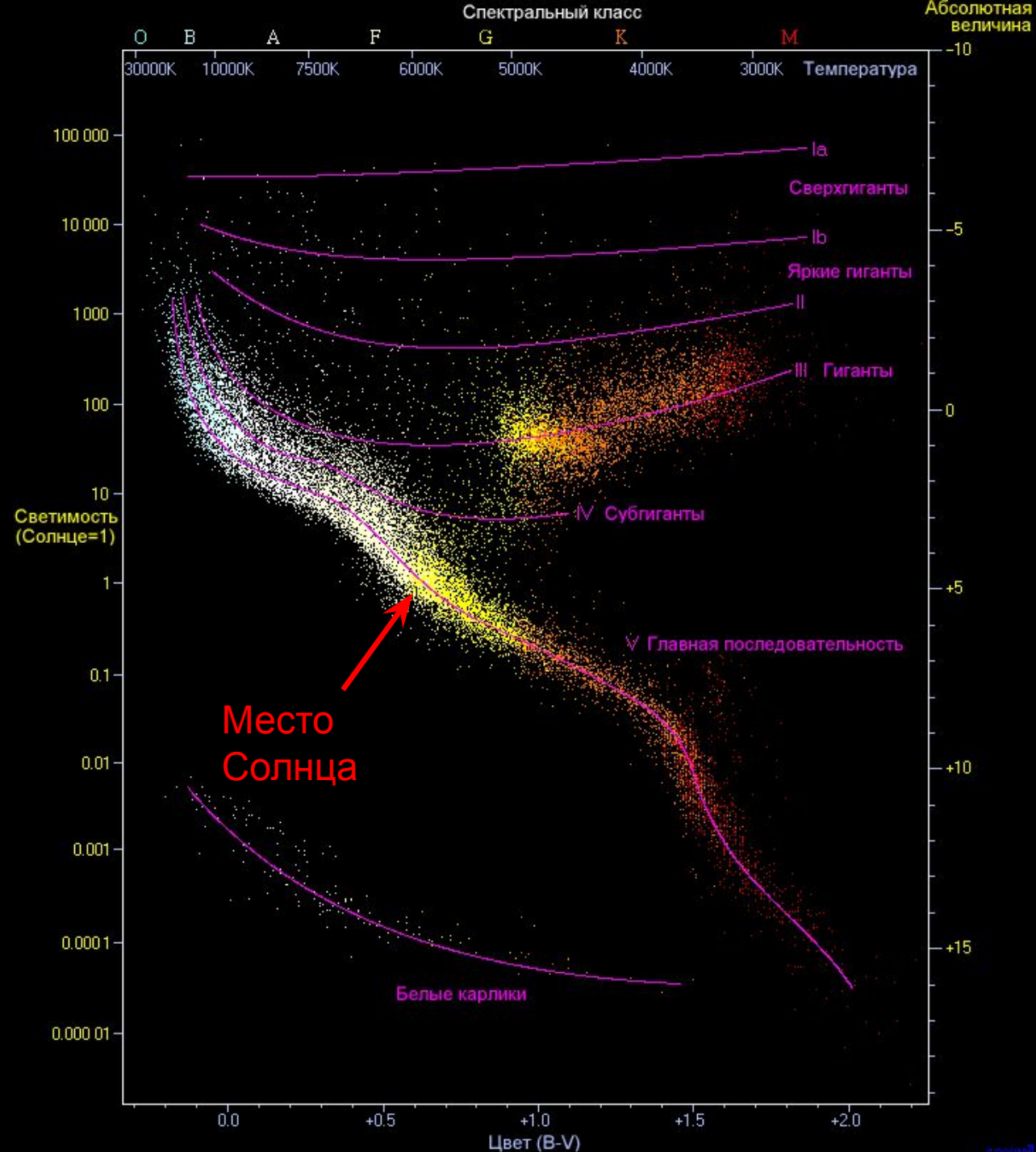
- ▣ *Не зная расстояние до звезды, можно по одному спектру определить ее положение на диаграмме Г-Р.*

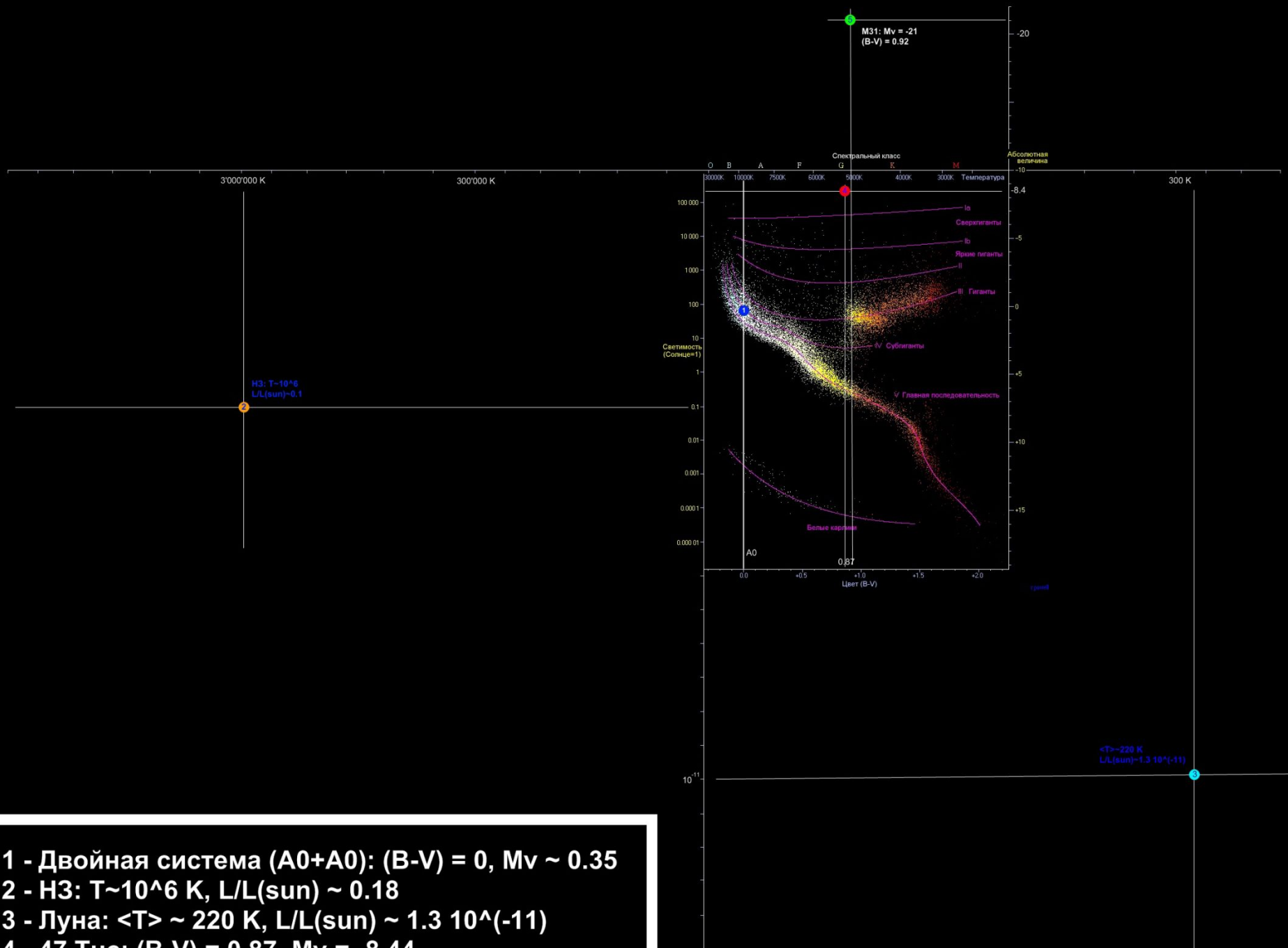


Параметры звезд

- 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

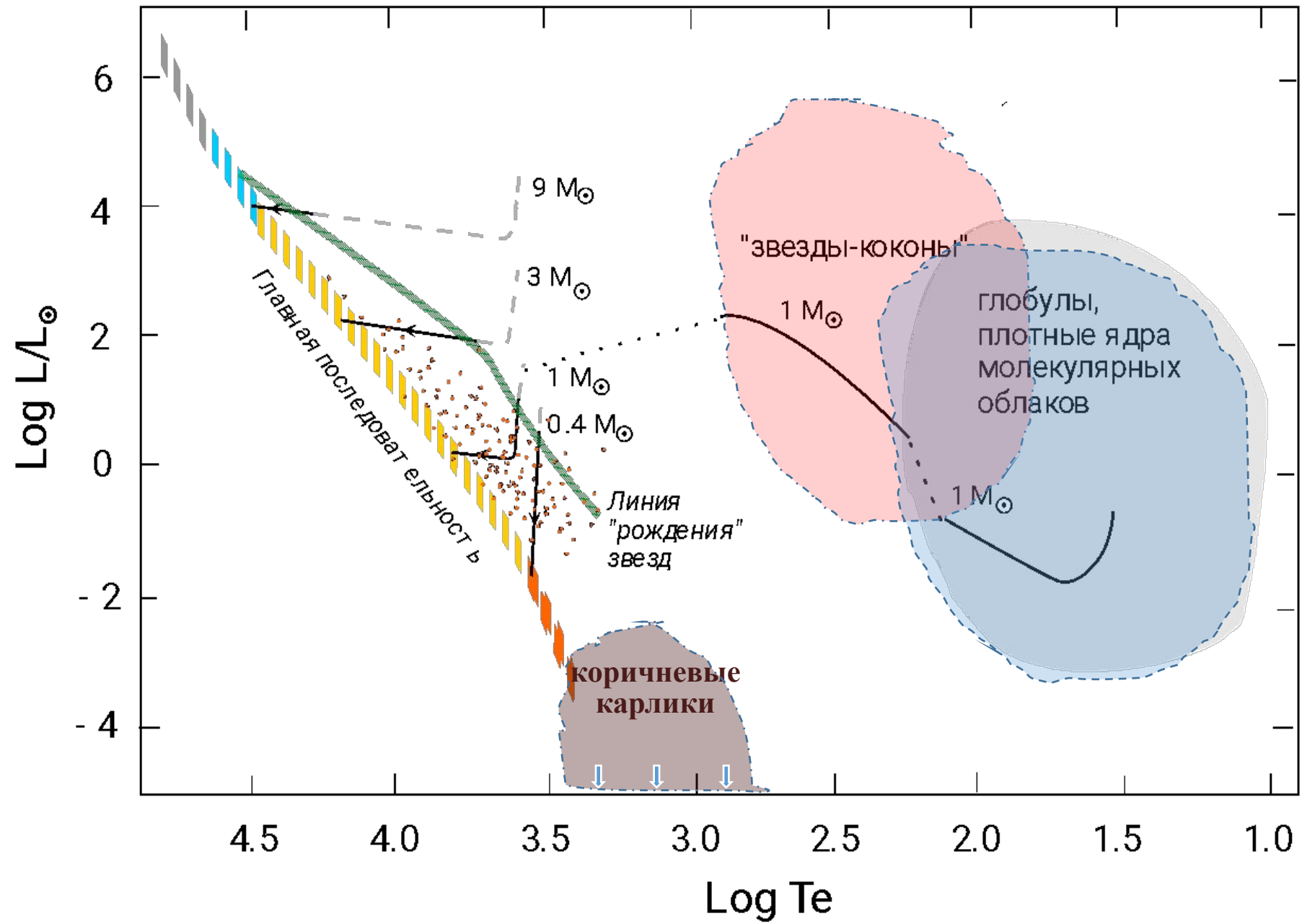
Диаграмма Г- Р: Спектр- Светимость или Цвет- Абсолютная Зв. Вел.





- 1 - Двойная система (A0+A0): $(B-V) = 0$, $M_v \sim 0.35$
- 2 - H3: $T \sim 10^6$ K, $L/L(\text{sun}) \sim 0.18$
- 3 - Луна: $\langle T \rangle \sim 220$ K, $L/L(\text{sun}) \sim 1.3 \cdot 10^{-11}$
- 4 - 47 Tuc: $(B-V) = 0.87$, $M_v = -8.44$
- 5 - M31: $(B-V) = 0.92$, $M_v = -21$

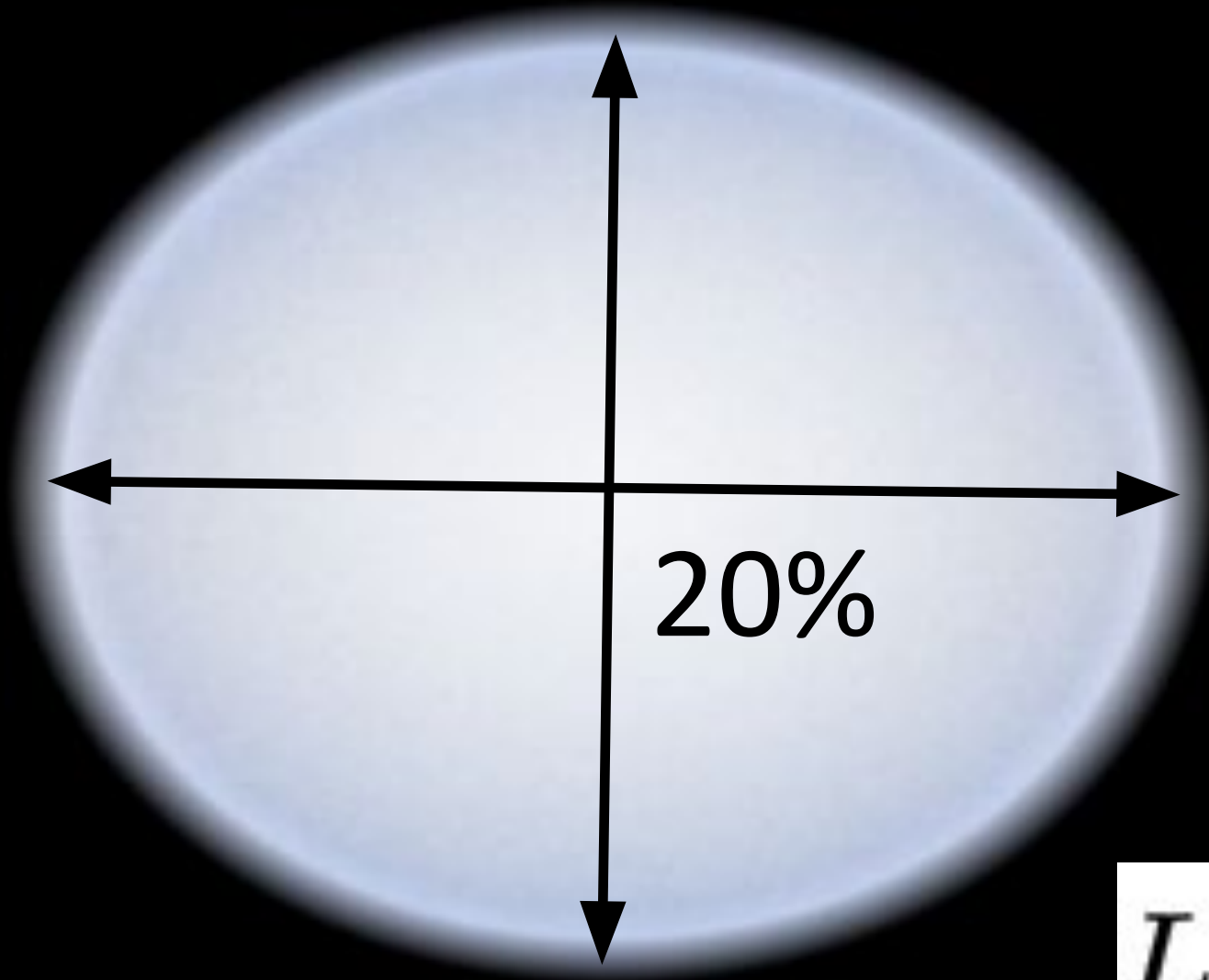
От облака к
звезде на ГП



Главная последовательность

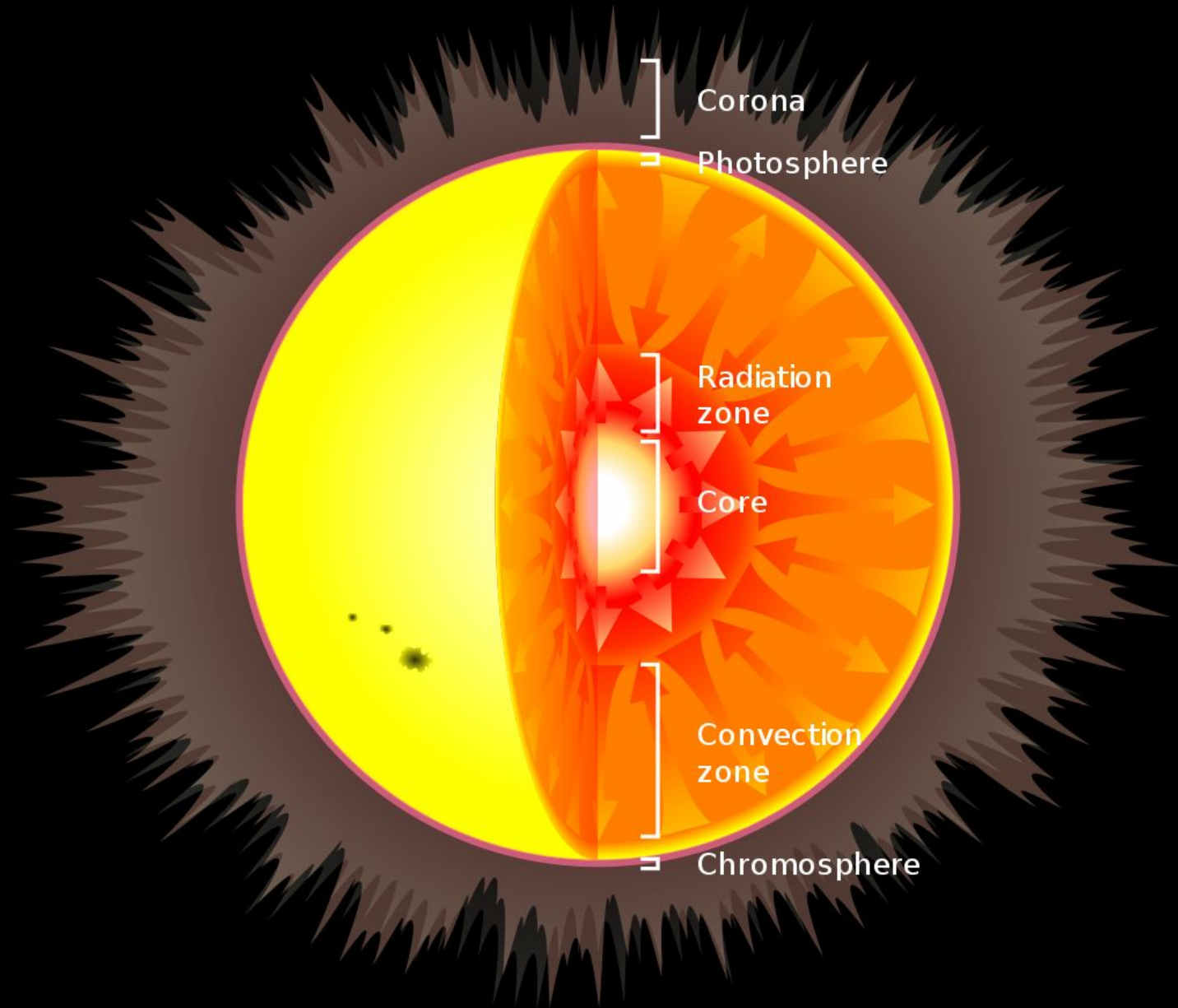
И ZAMS, Zero age main sequence, ГП нулевого возраста

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

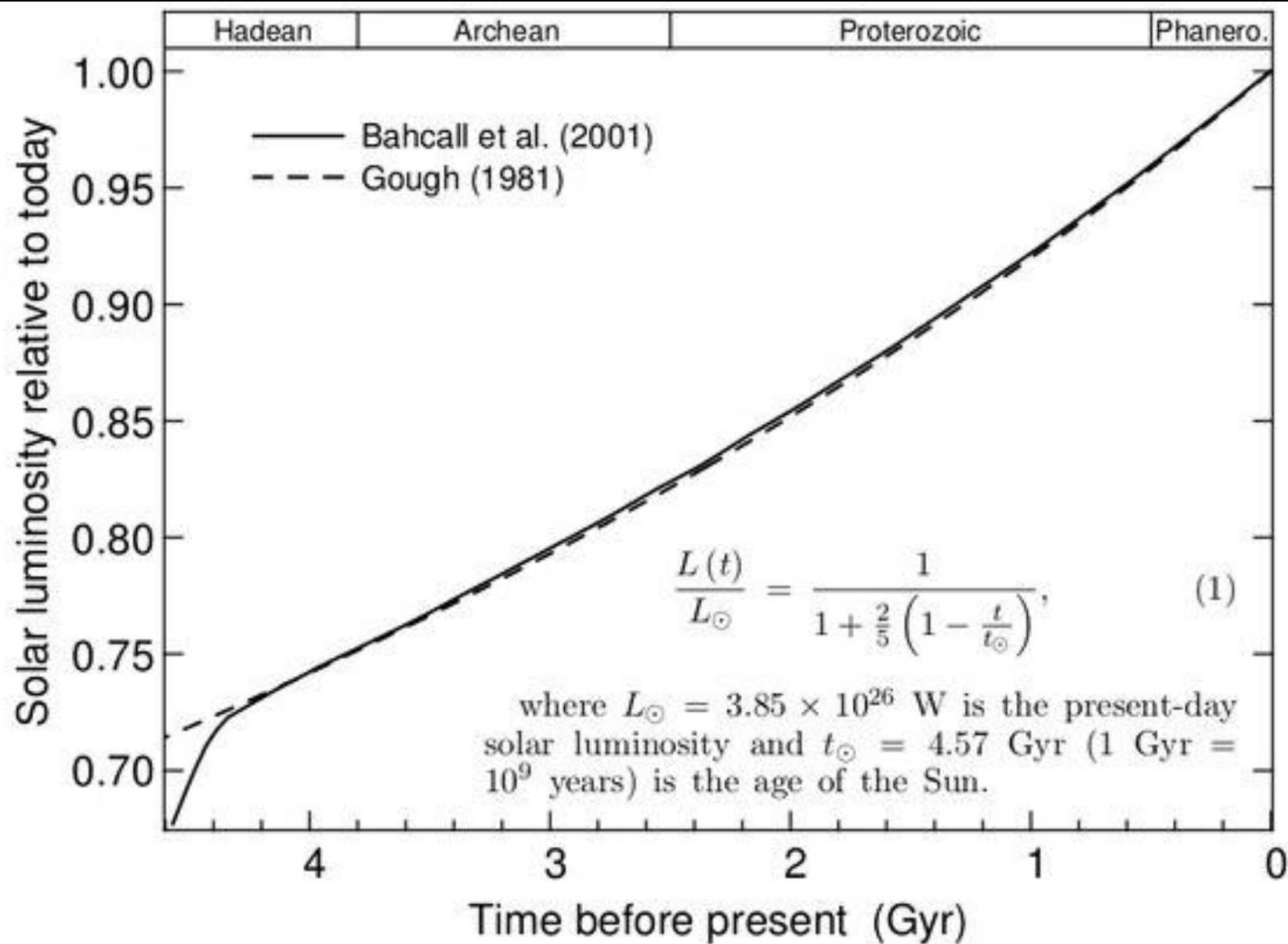


Figure 1. Evolution of solar luminosity over the four geologic eons for the standard solar model described in *Bahcall et al.* [2001, *solid line*] and according to the approximation formula [*Gough*, 1981, *dashed line*] given in equation (1).

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_{edd} приводит к
возникновению звездного
ветра

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



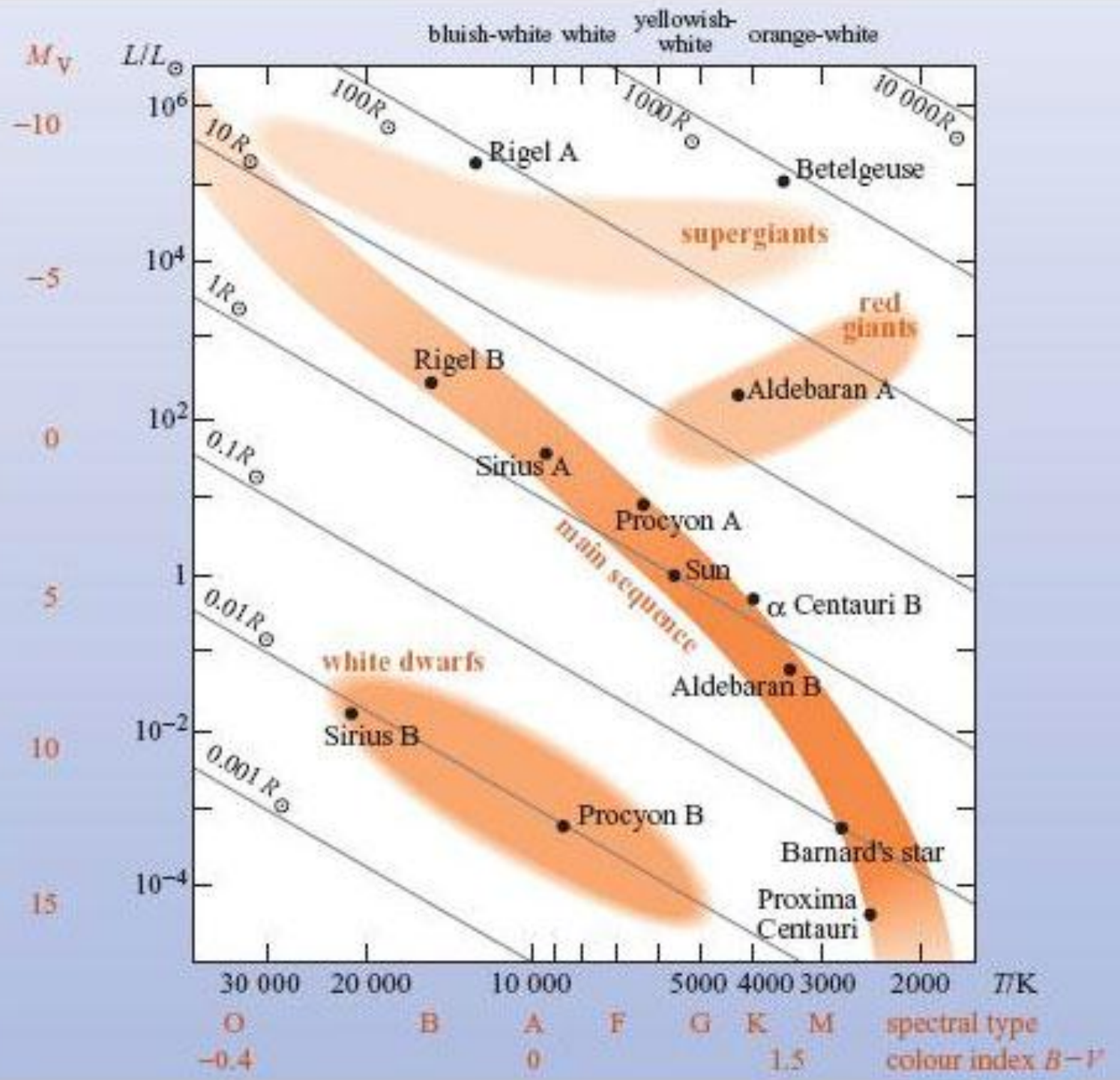
Сэр Артур
Эддингтон
(1882–1944)

Наблюдаемый предел Хэмпфри-Дэвидсона (1979)

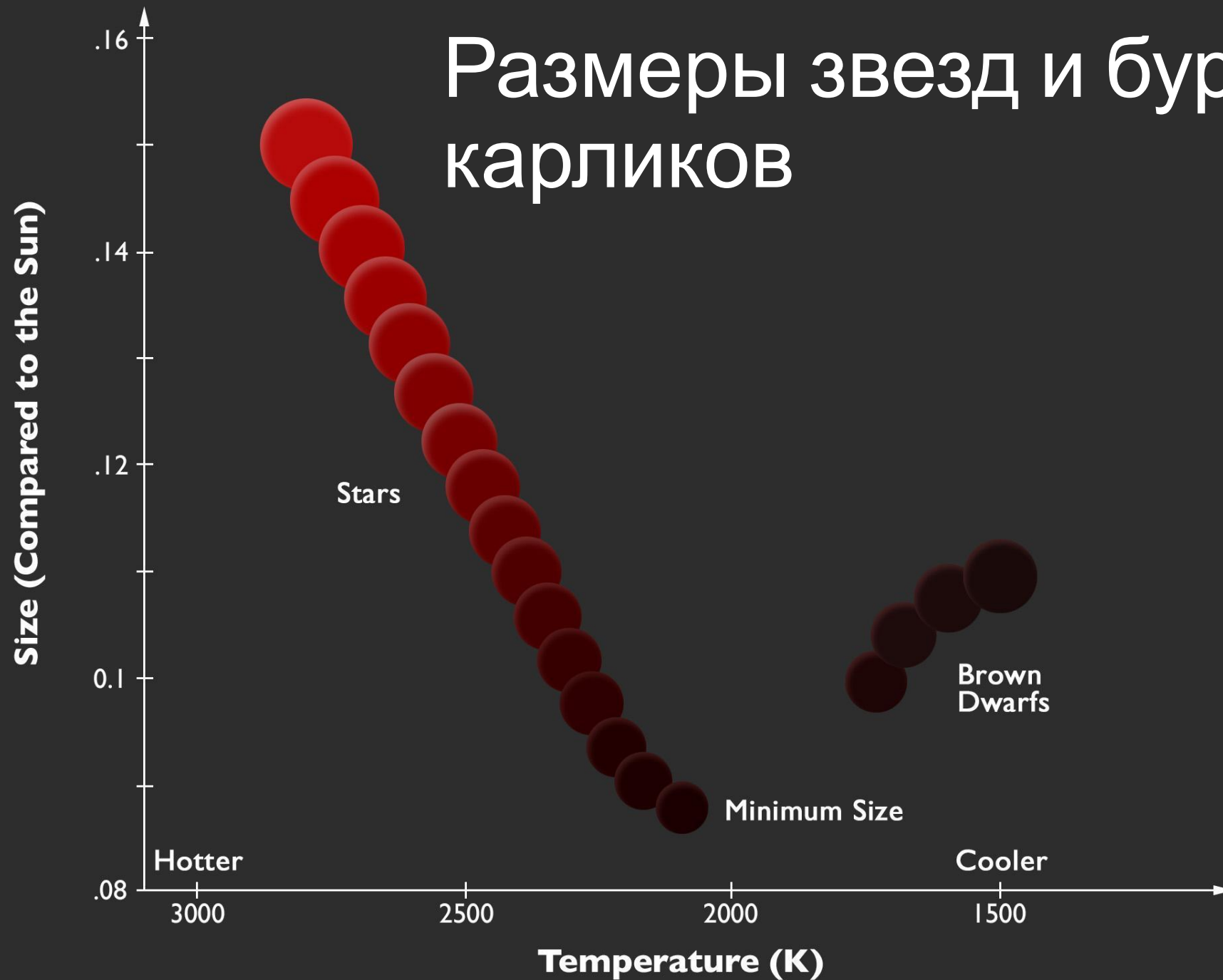


Желтые
гипергиганты

Диаграмма ГР для близких звезд: линии равных радиусов



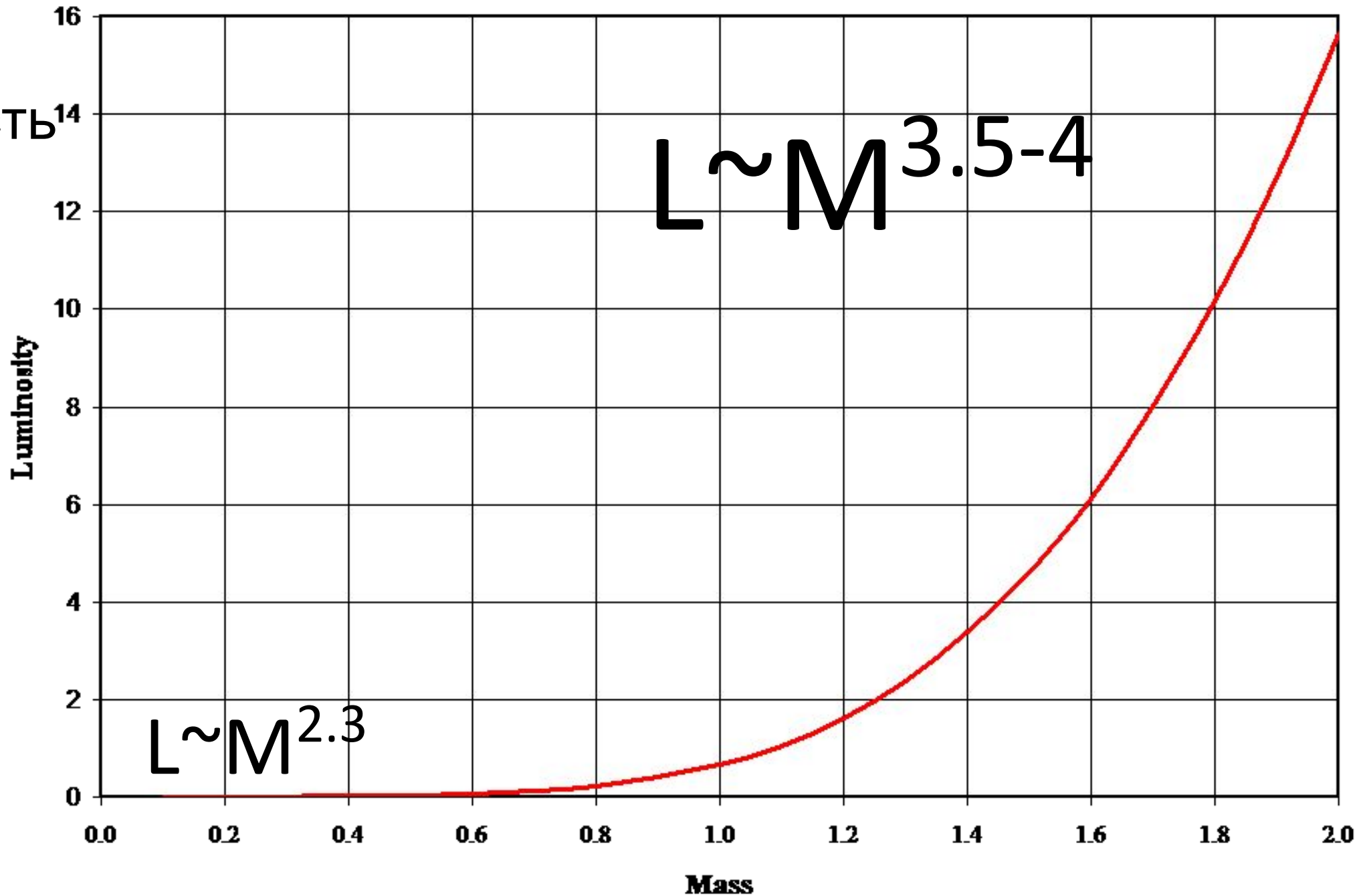
Размеры звезд и бурых карликов



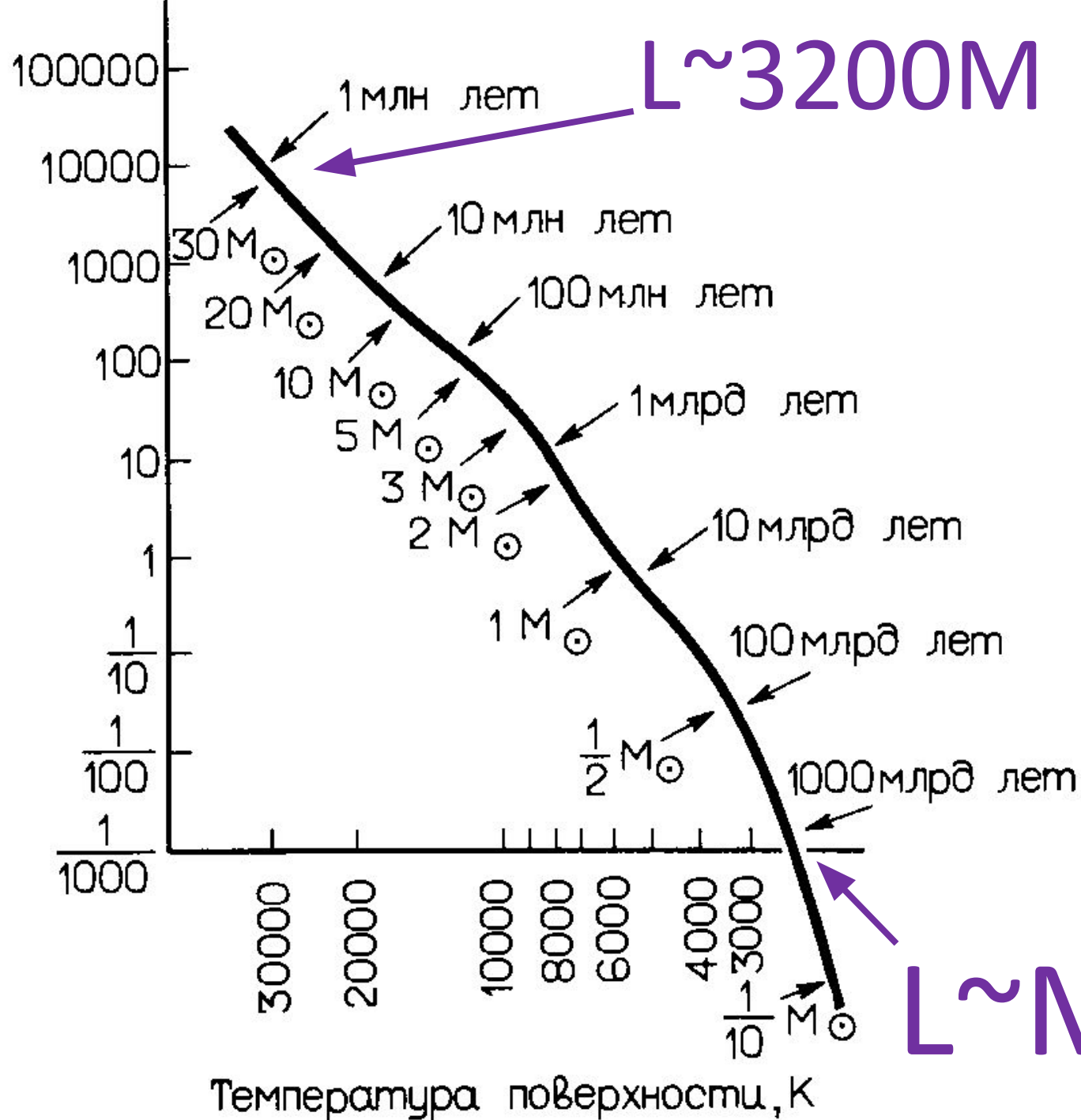
Звезды, планеты и бурые карлики (пределы снизу)



Зависимость
 $L - M$
для
ZAMS
(в
единицах
Солнца



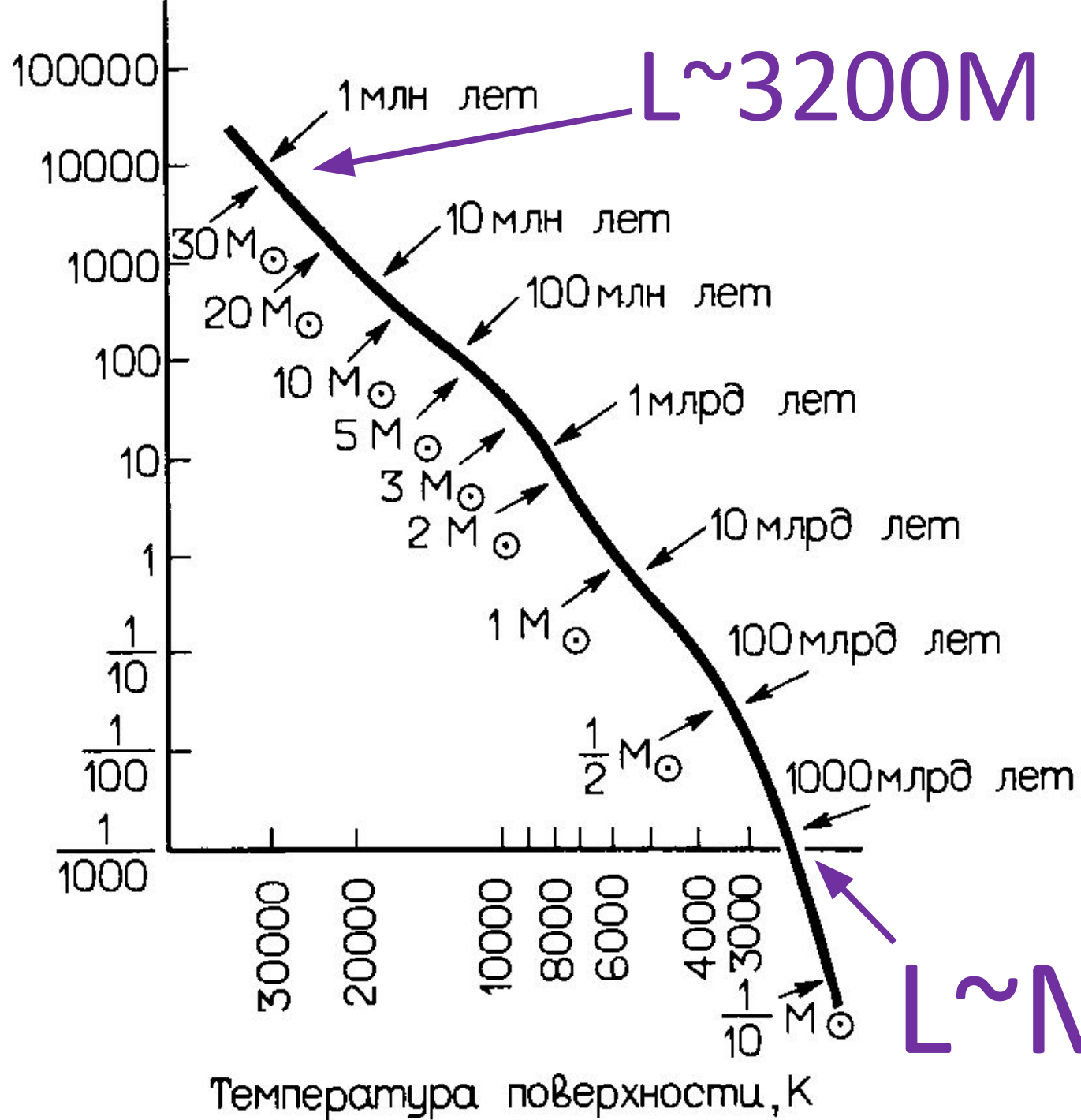
Светимость в видимой области Солнца
единицах светимости Солнца



Время жизни
на ГП звезд
различных
масс

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

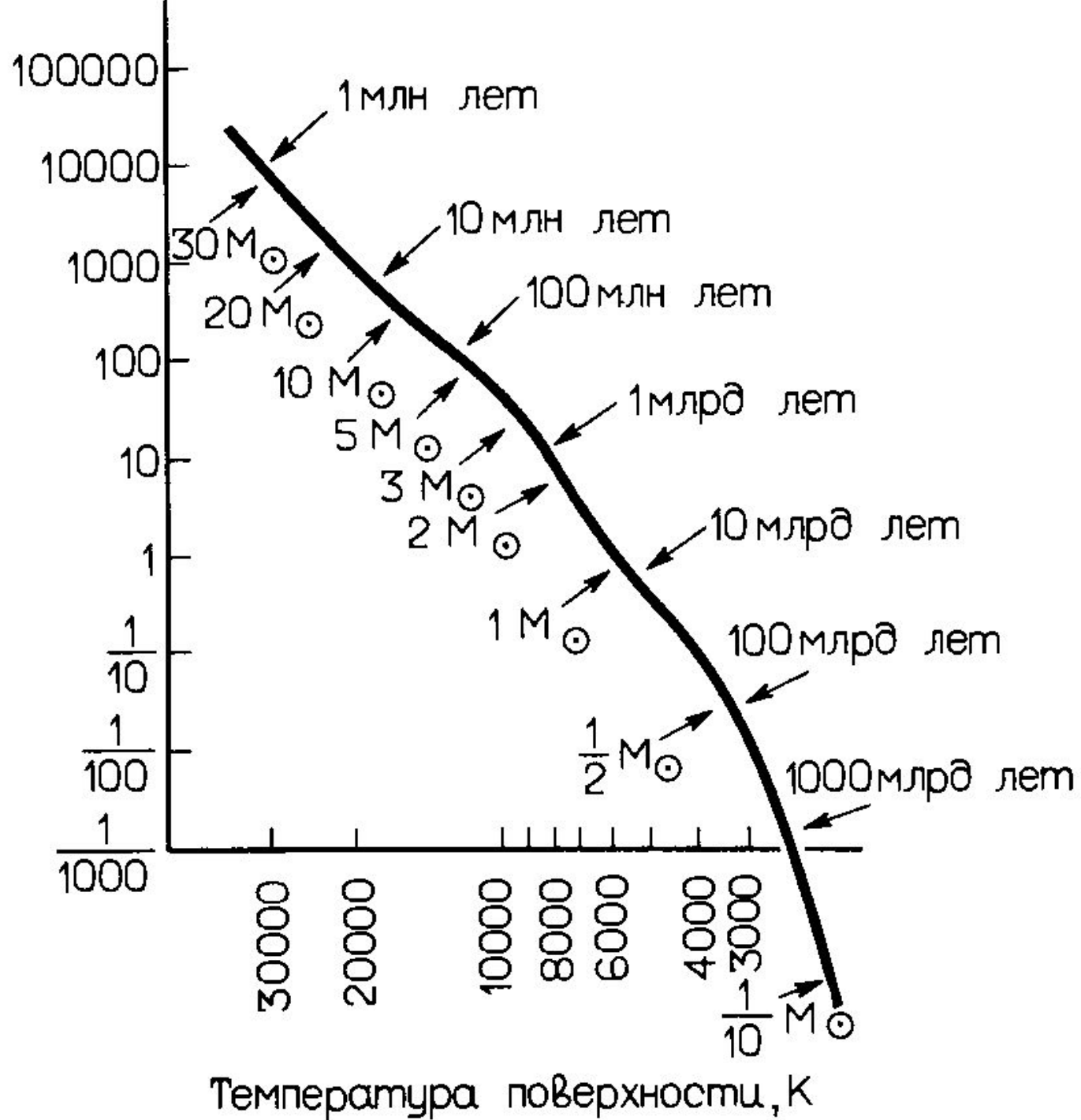
Светимость в видимой области Солнца
единицах светимости Солнца



Время жизни
на ГП звезд
различных
масс

$$E = Lt$$

Светимость в видимой области Солнца
единицах светимости Солнца

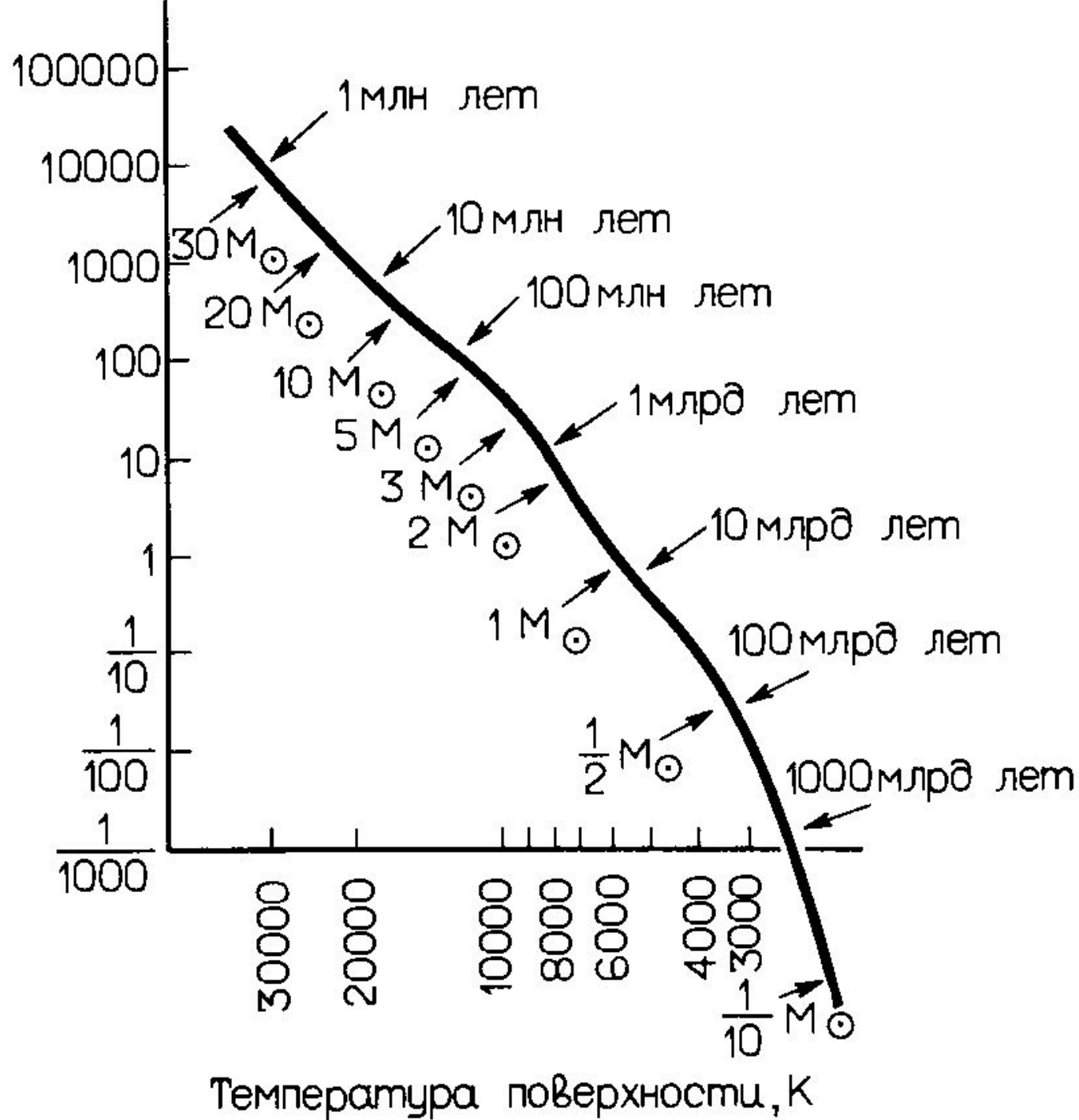


Время жизни
на ГП звезд
различных
масс

$$E=Lt$$

$$E=Mc^2$$

Светимость в видимой области Солнца
единицах светимости Солнца



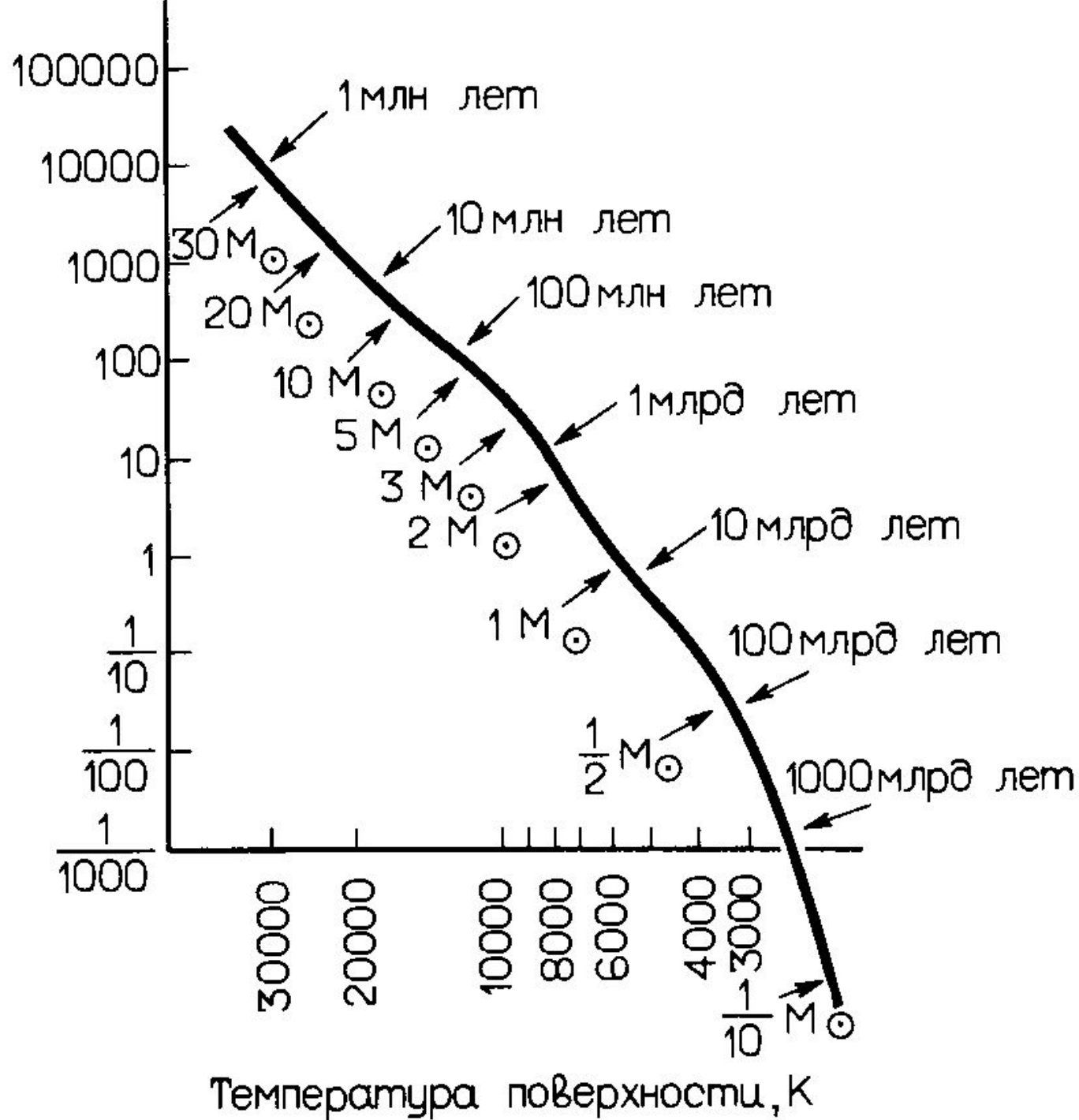
Время жизни
на ГП звезд
различных
масс

$$E = Lt$$

$$E = Mc^2$$

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

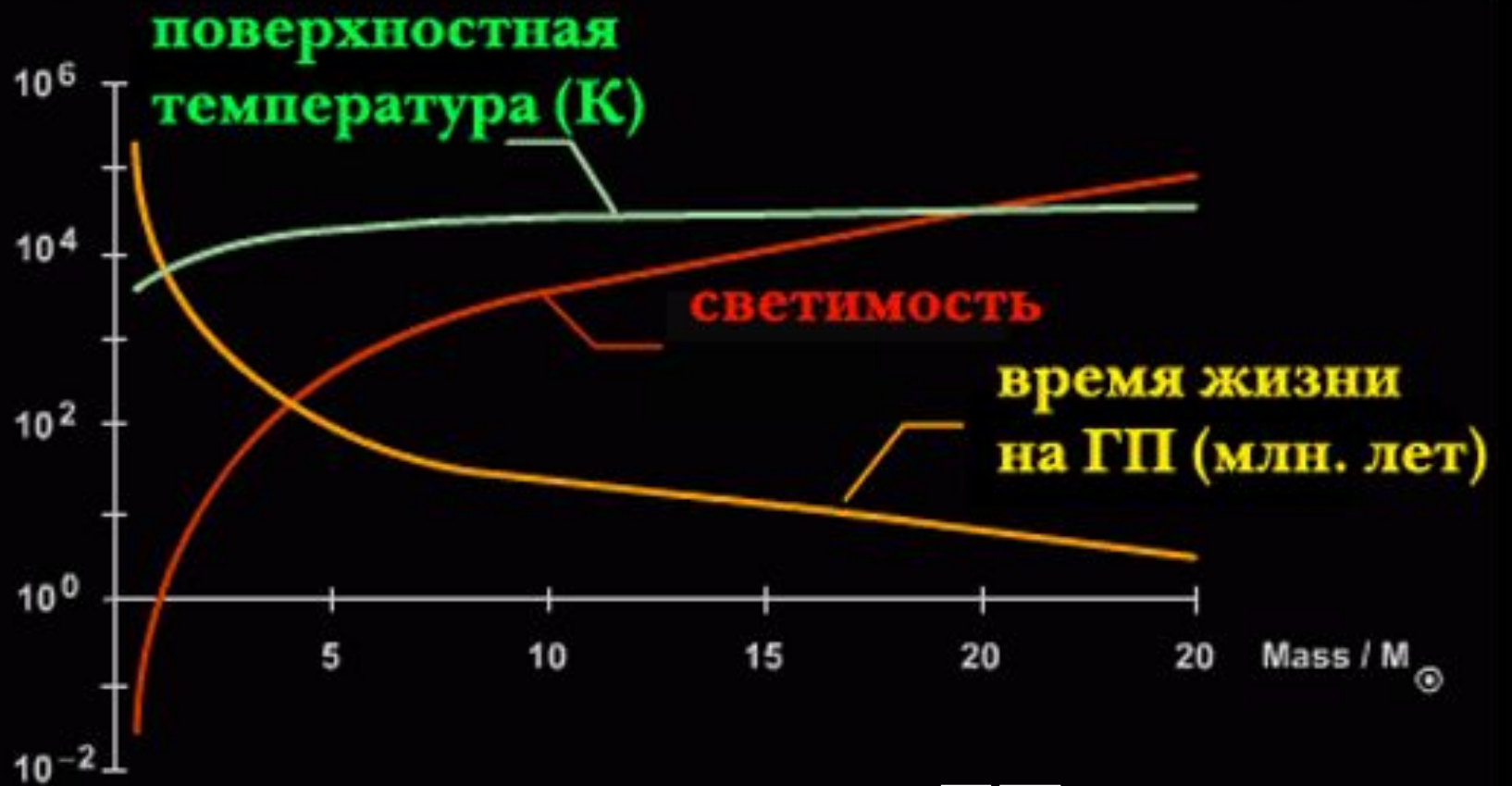
Светимость в видимой области Солнца
единицах светимости Солнца



Время жизни
на ГП звезд
различных
масс

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

(в годах и
массах
Солнца)

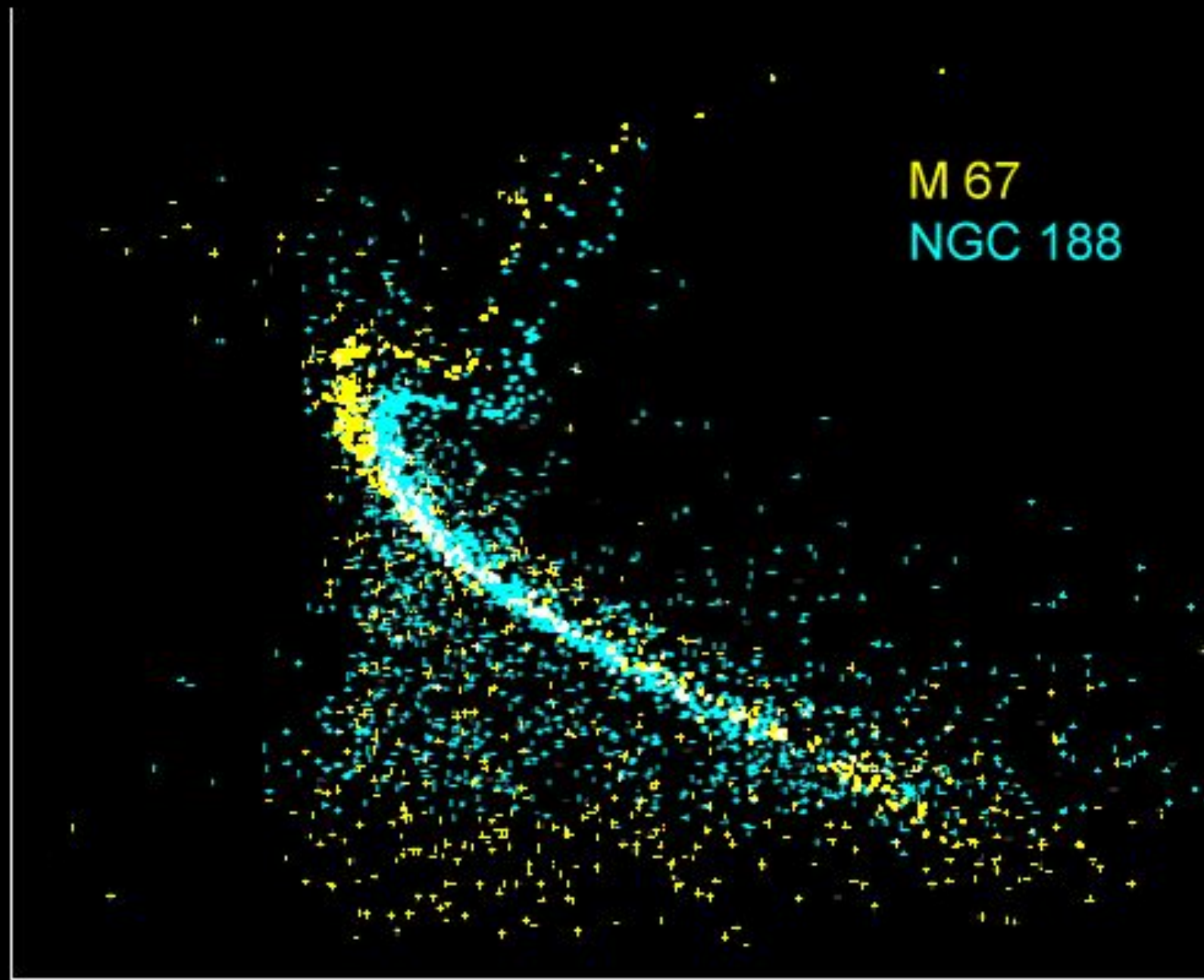


С увеличением массы звезды на ГП:

- Растет светимость,
- Растет эффективная температура,
- Падает время жизни на ГП.

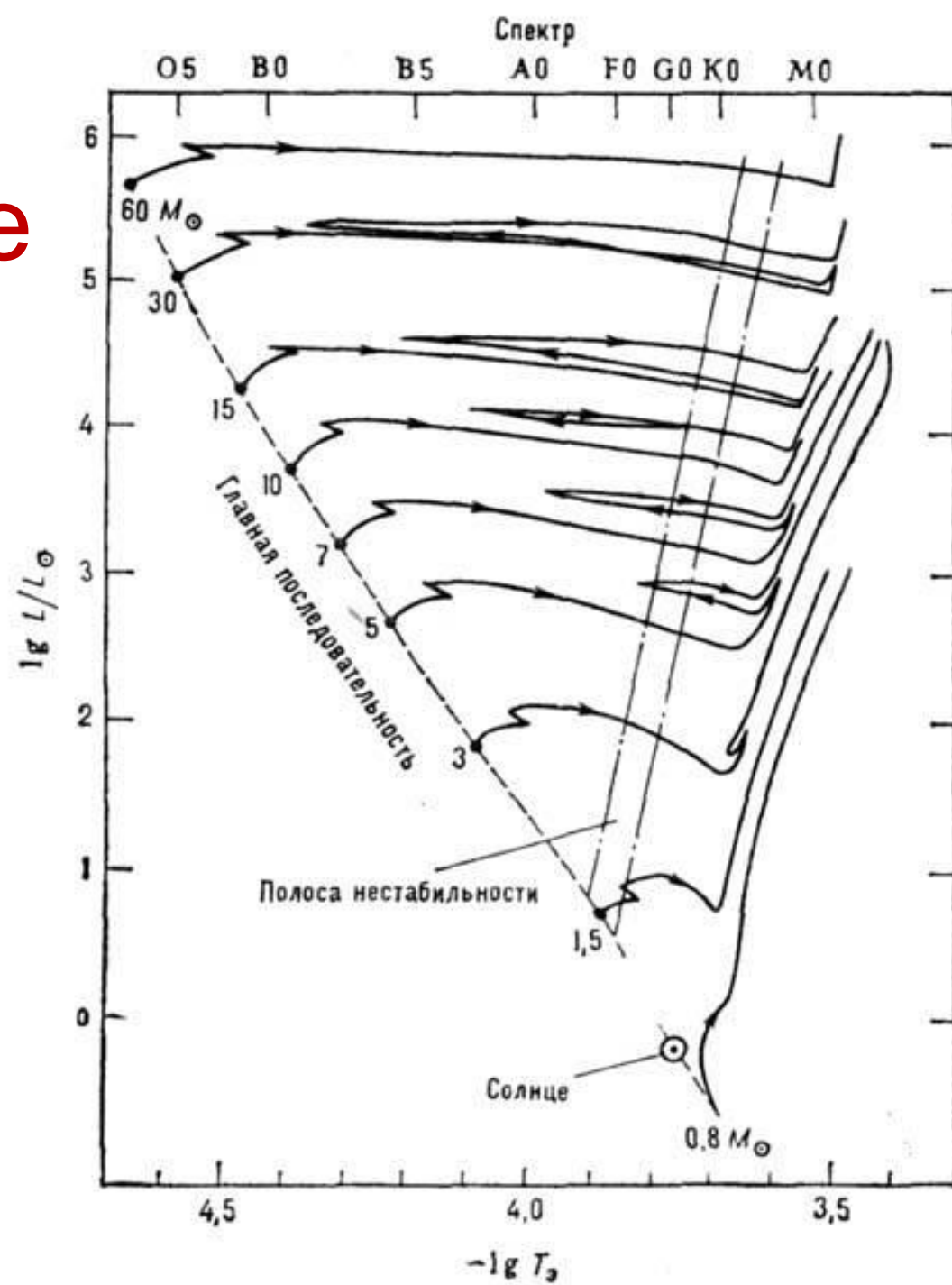
Эволюция звезд

← Absolute magnitude



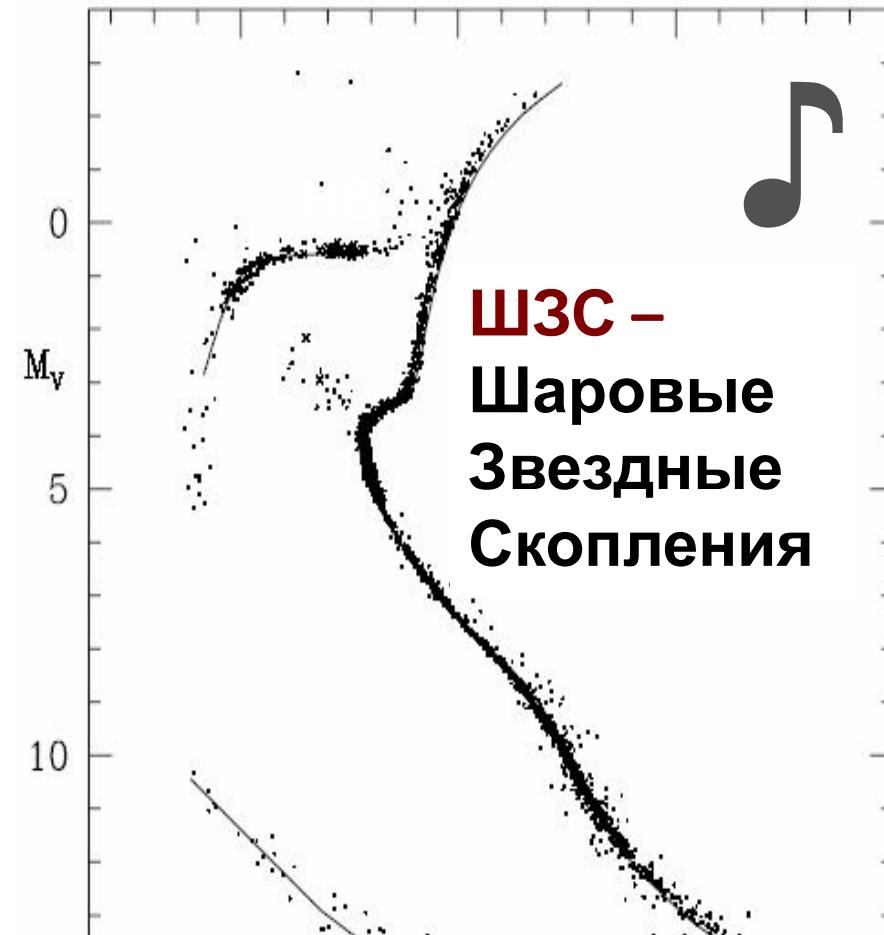
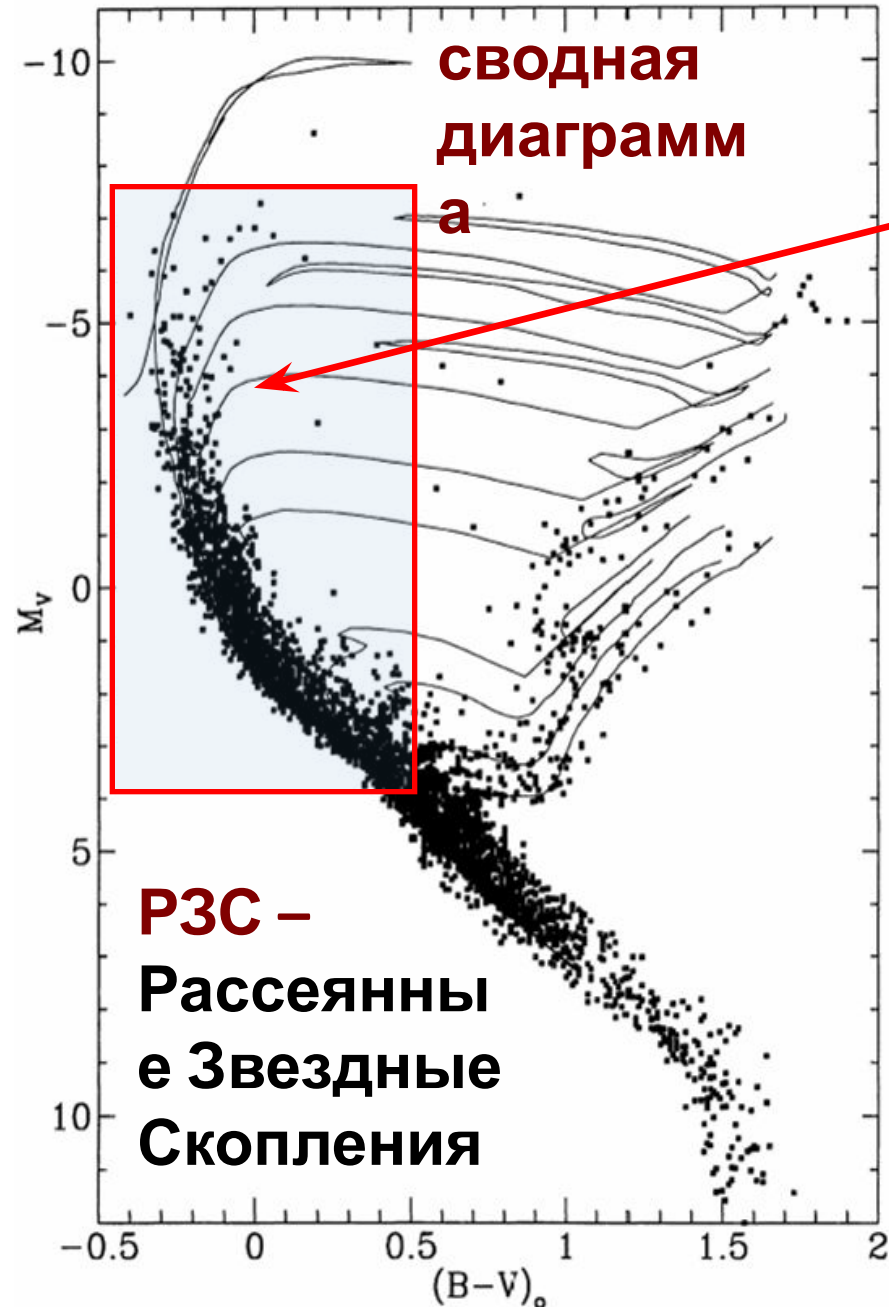
← Temperature

Эволюционные треки

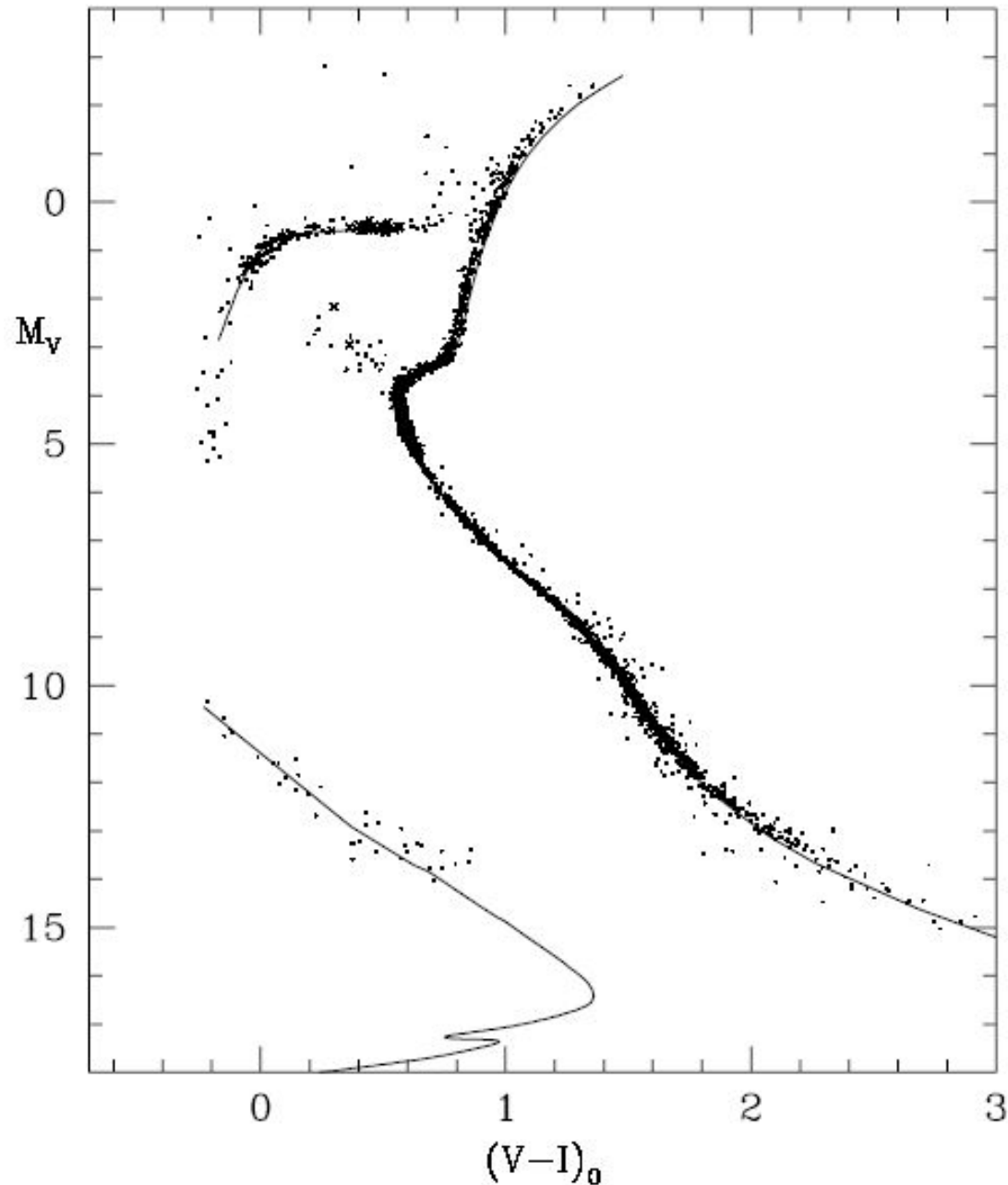


Различия возрастов звездных скоплений

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

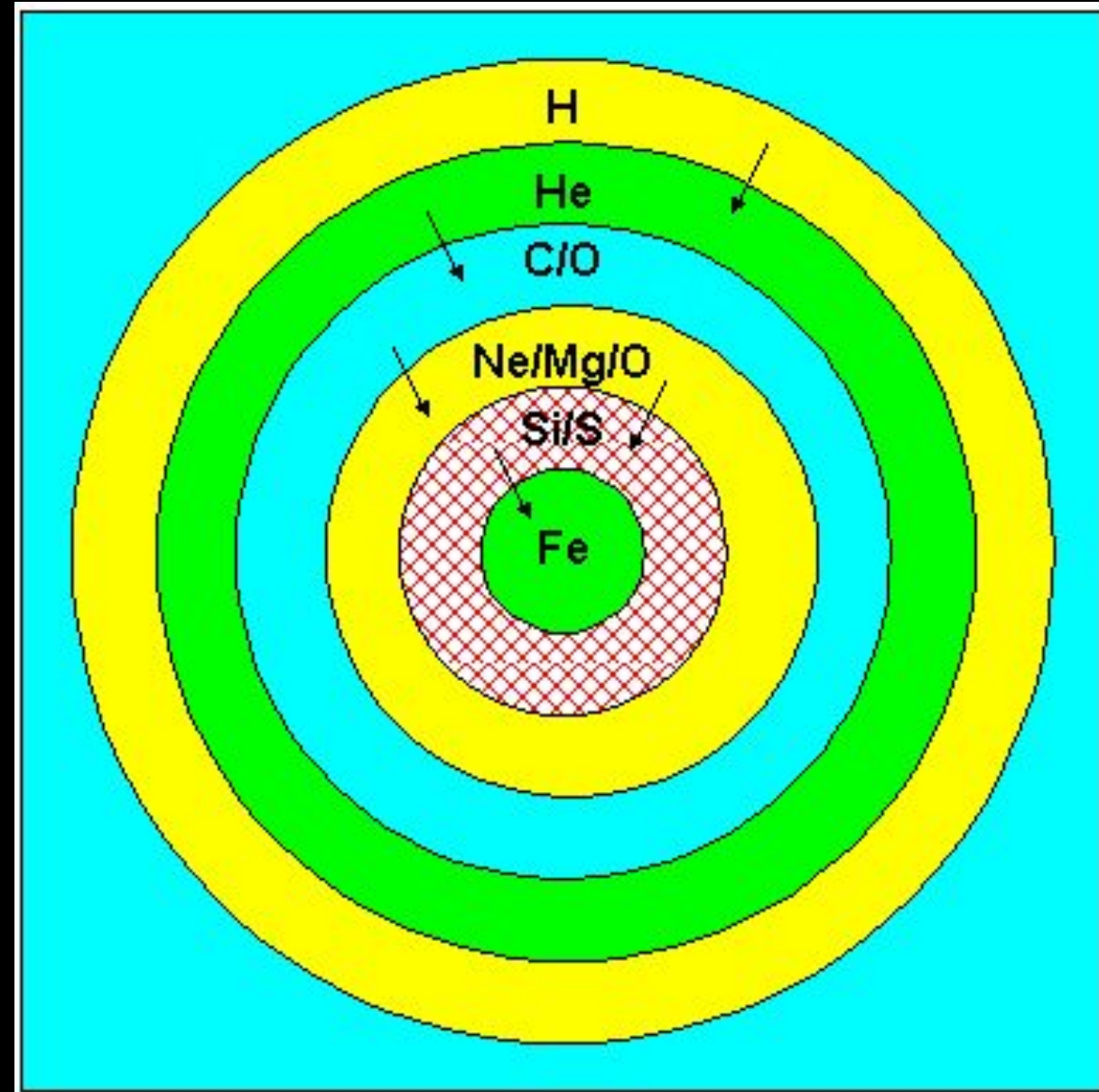
Планетарные туманности

- 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?**



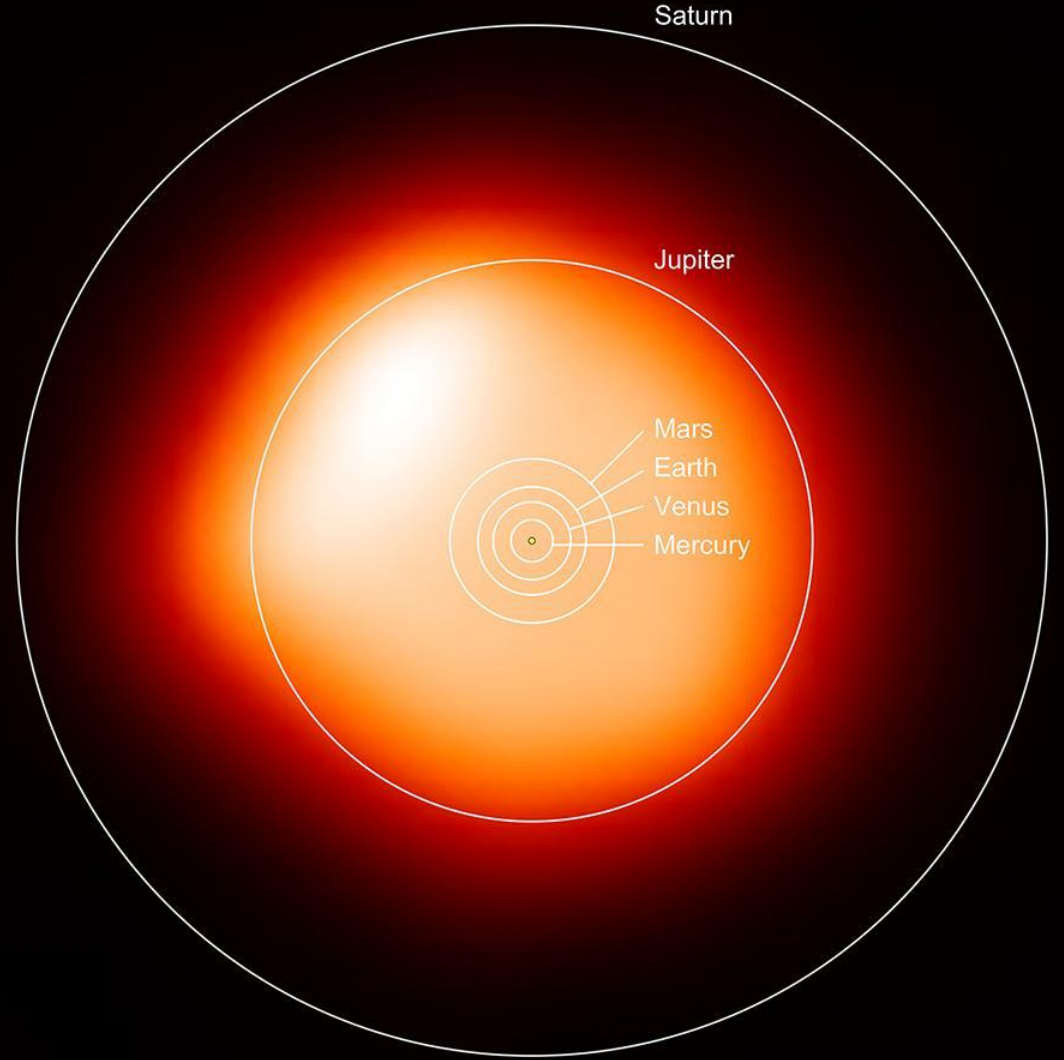
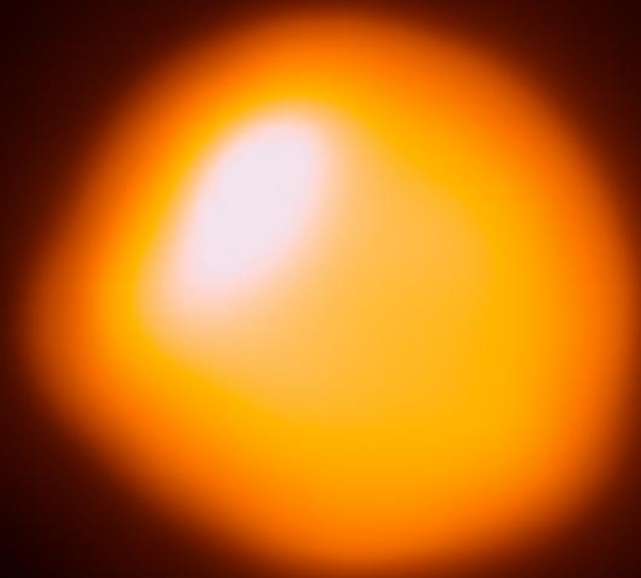
Процессы в массивных звездах

- 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**

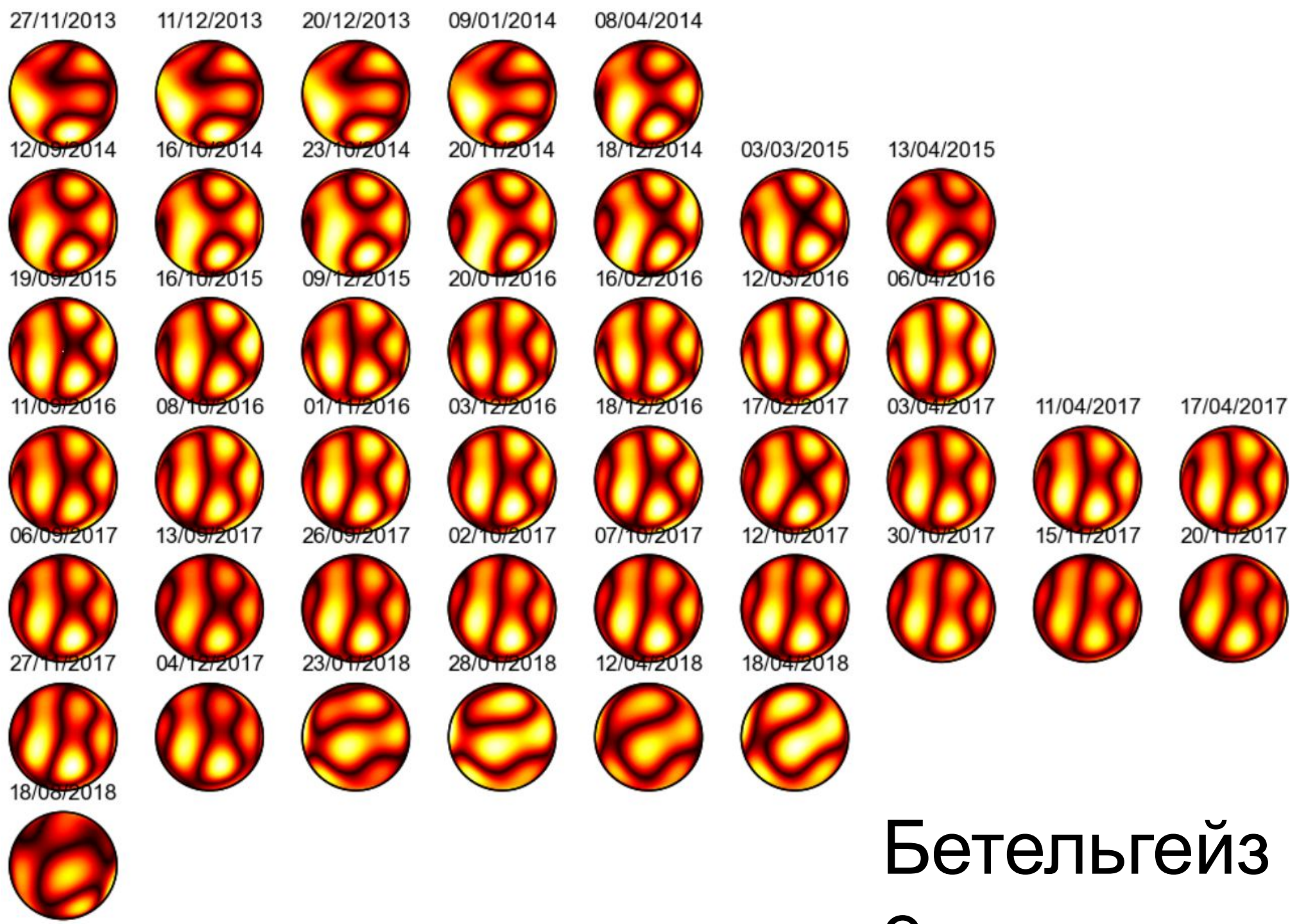


- За какими типами звезд нам нужно следить, если мы желаем увидеть развитие взрыва сверхновой с самого начала?

Бетельгейз е



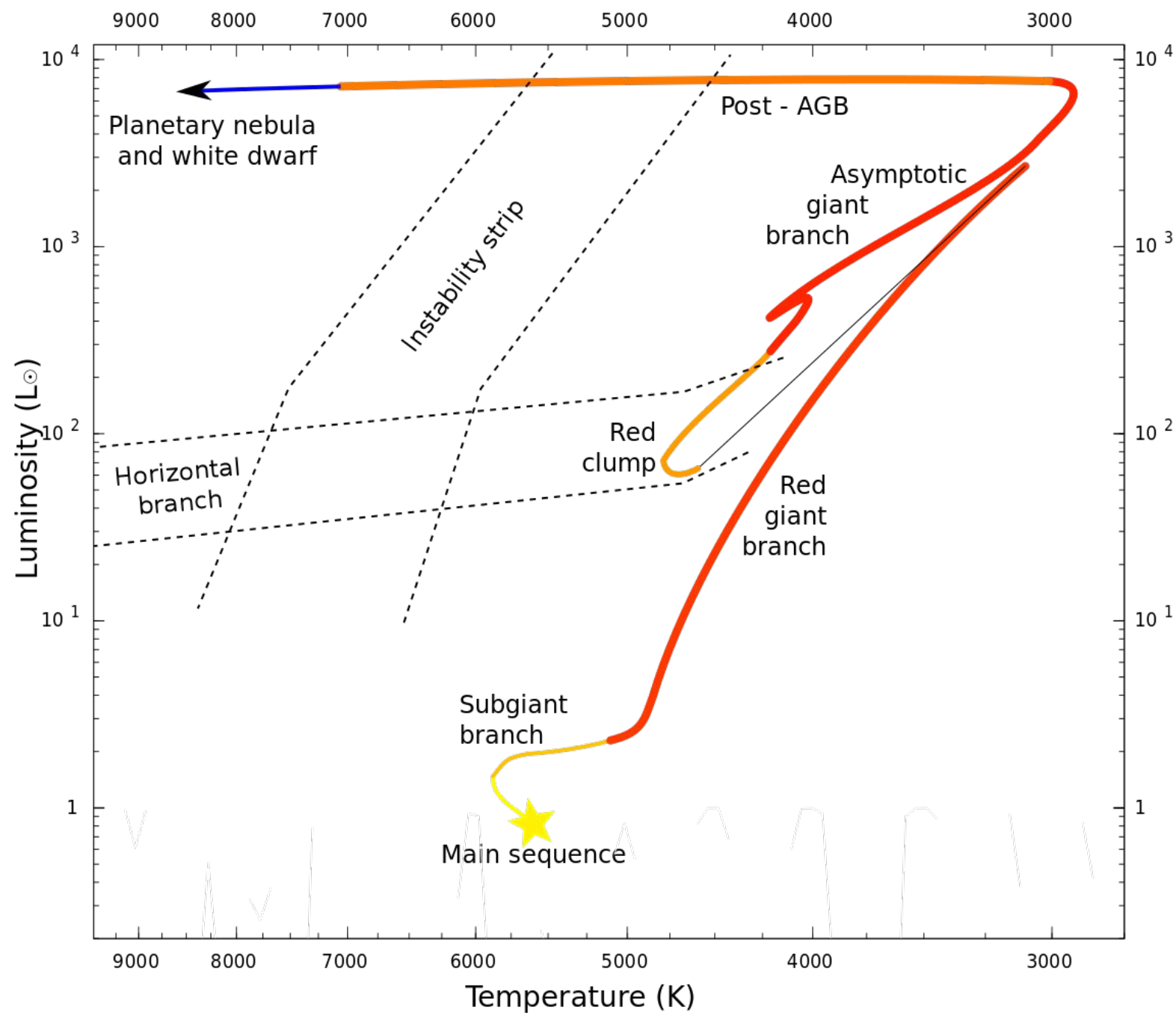
0.015"

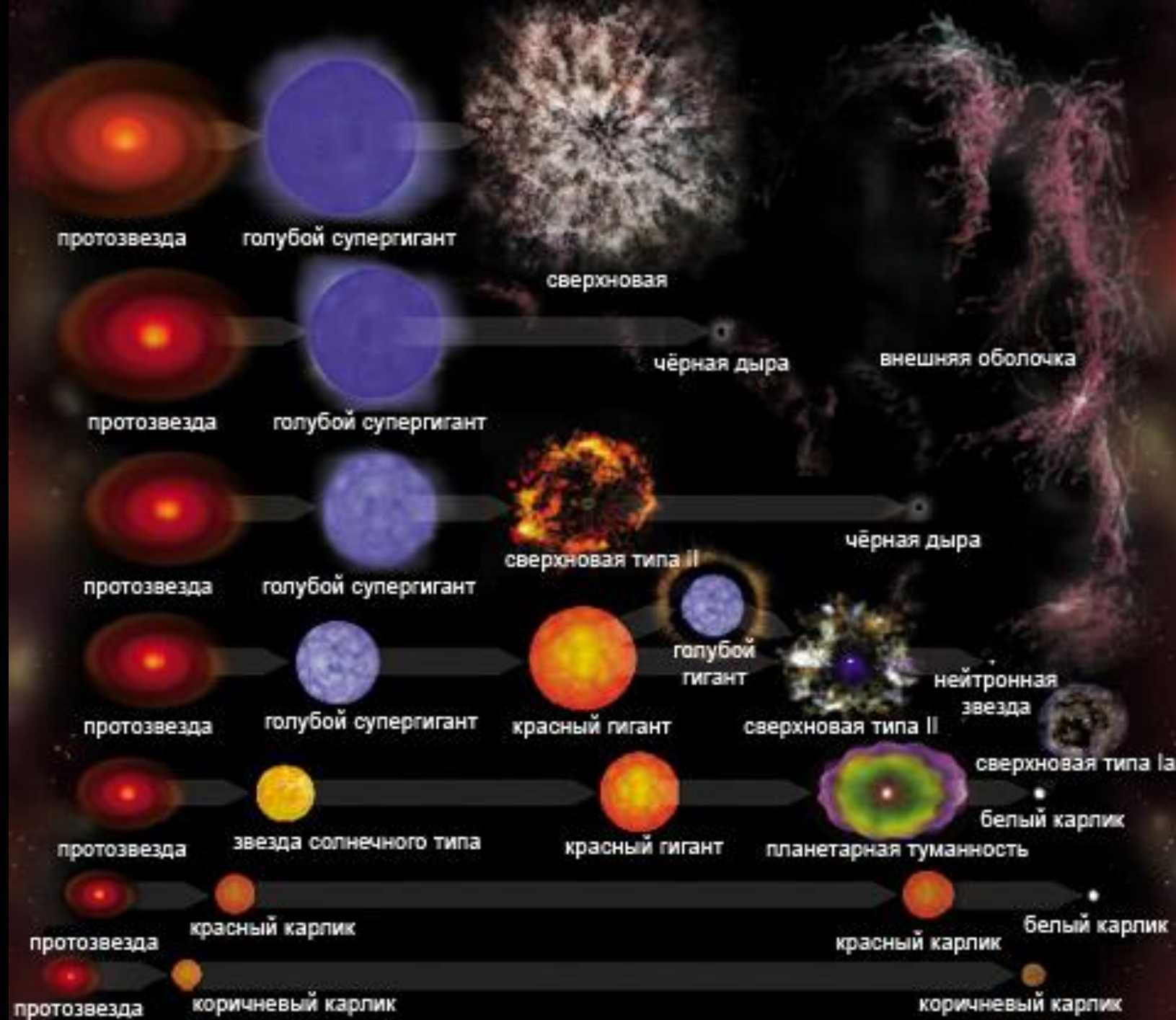


Типичный эволюционный трек



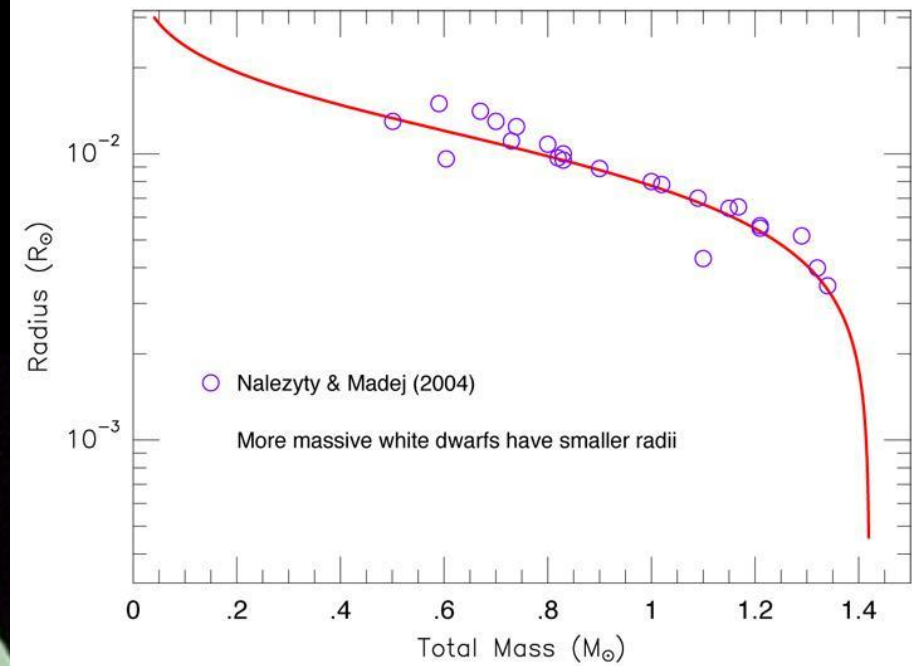
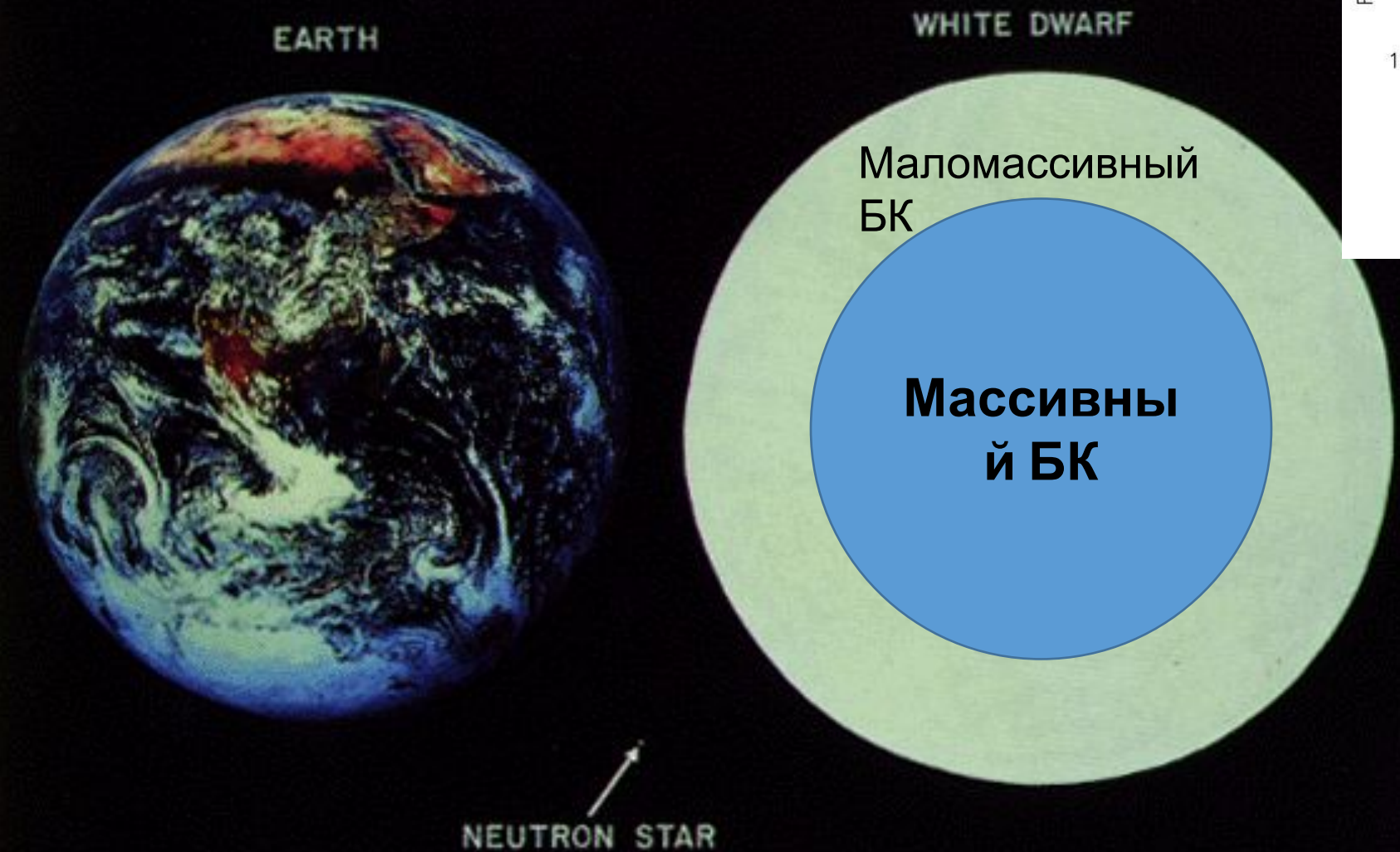
Evolution of a $1 M_{\odot}$ star





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

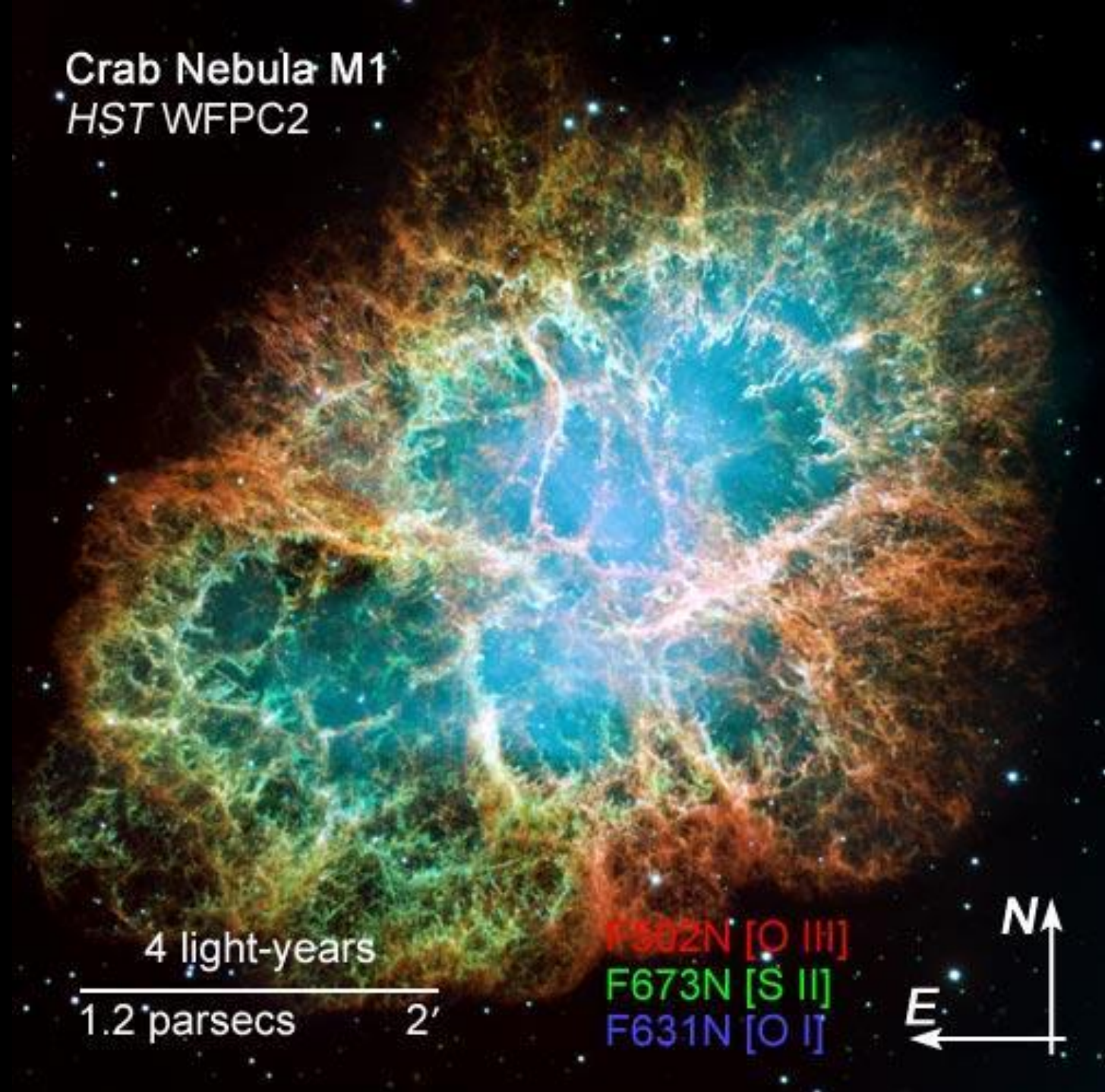
- Белый карлик – фактически, обнажившееся ядро звезды, в котором прекратились ядерные реакции
- Если масса БК превысит предел Чандрасекара в ~ 1.4 массы Солнца, в процессе коллапса (и нейтронизации вещества) рождается нейтронная звезда (самое плотное вещество во Вселенной) или черная дыра
- В НЗ ядра 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



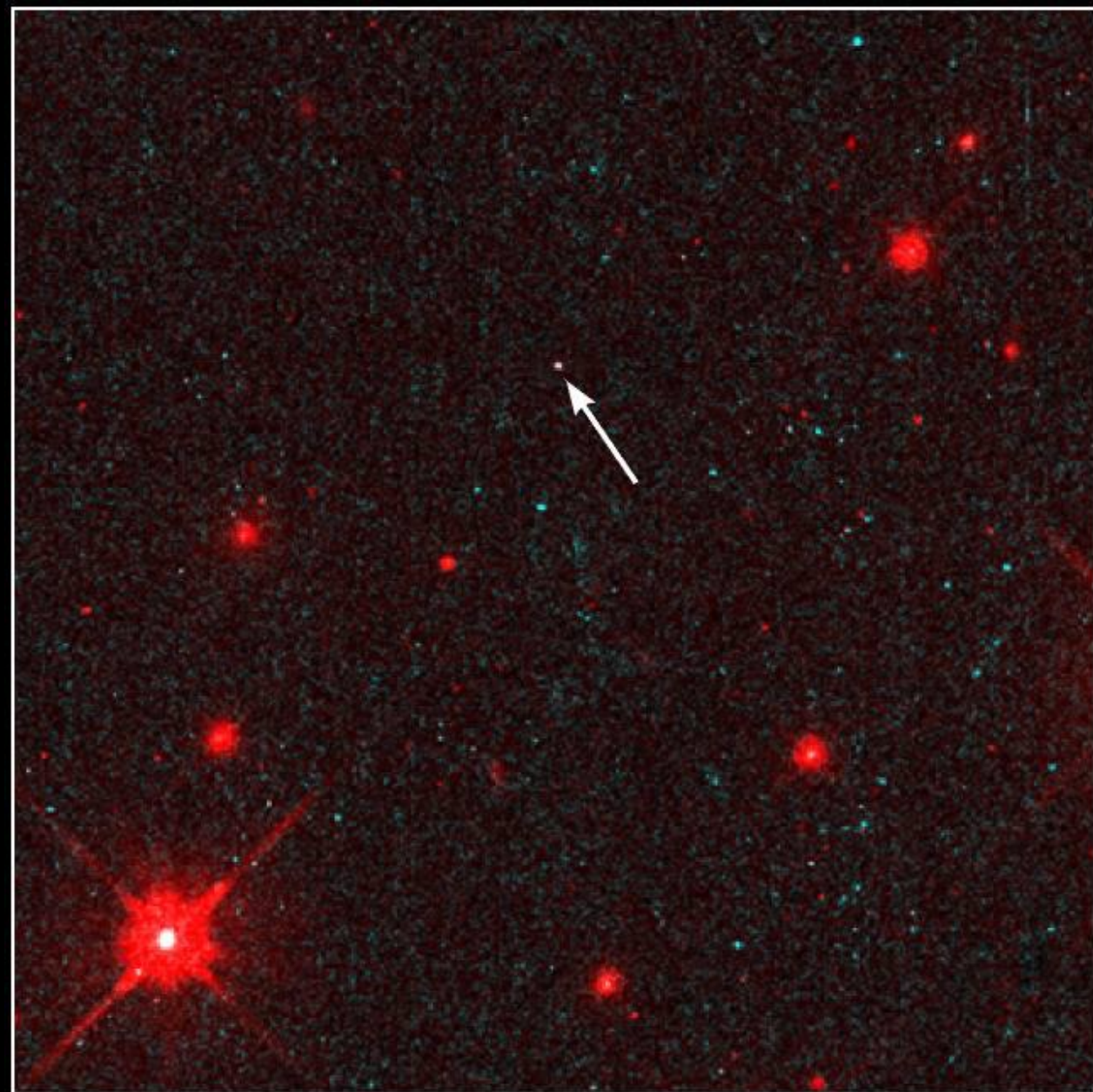
Скорость расширения Крабовидной туманности

- 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



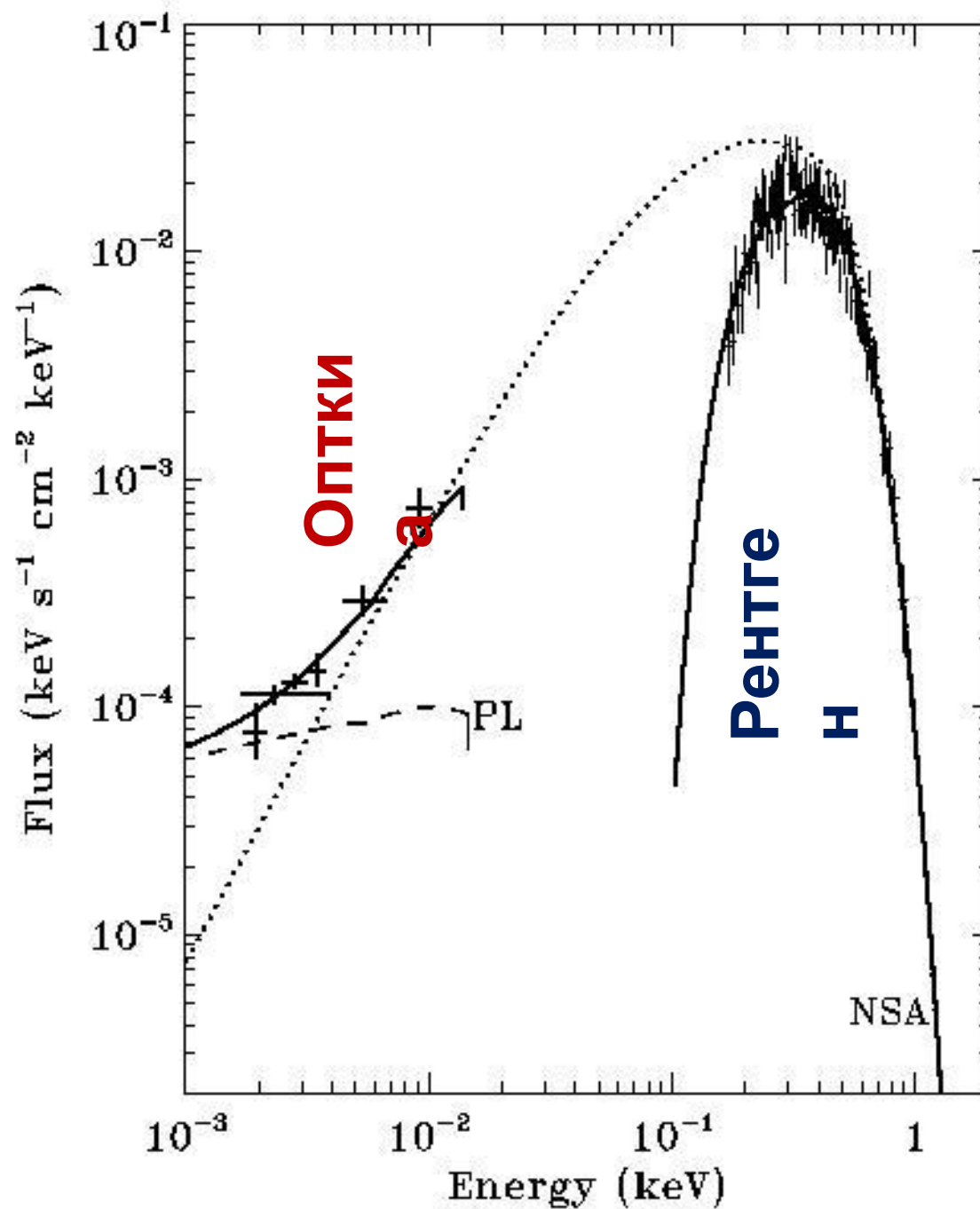
Isolated Neutron Star RX J185635-3754

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

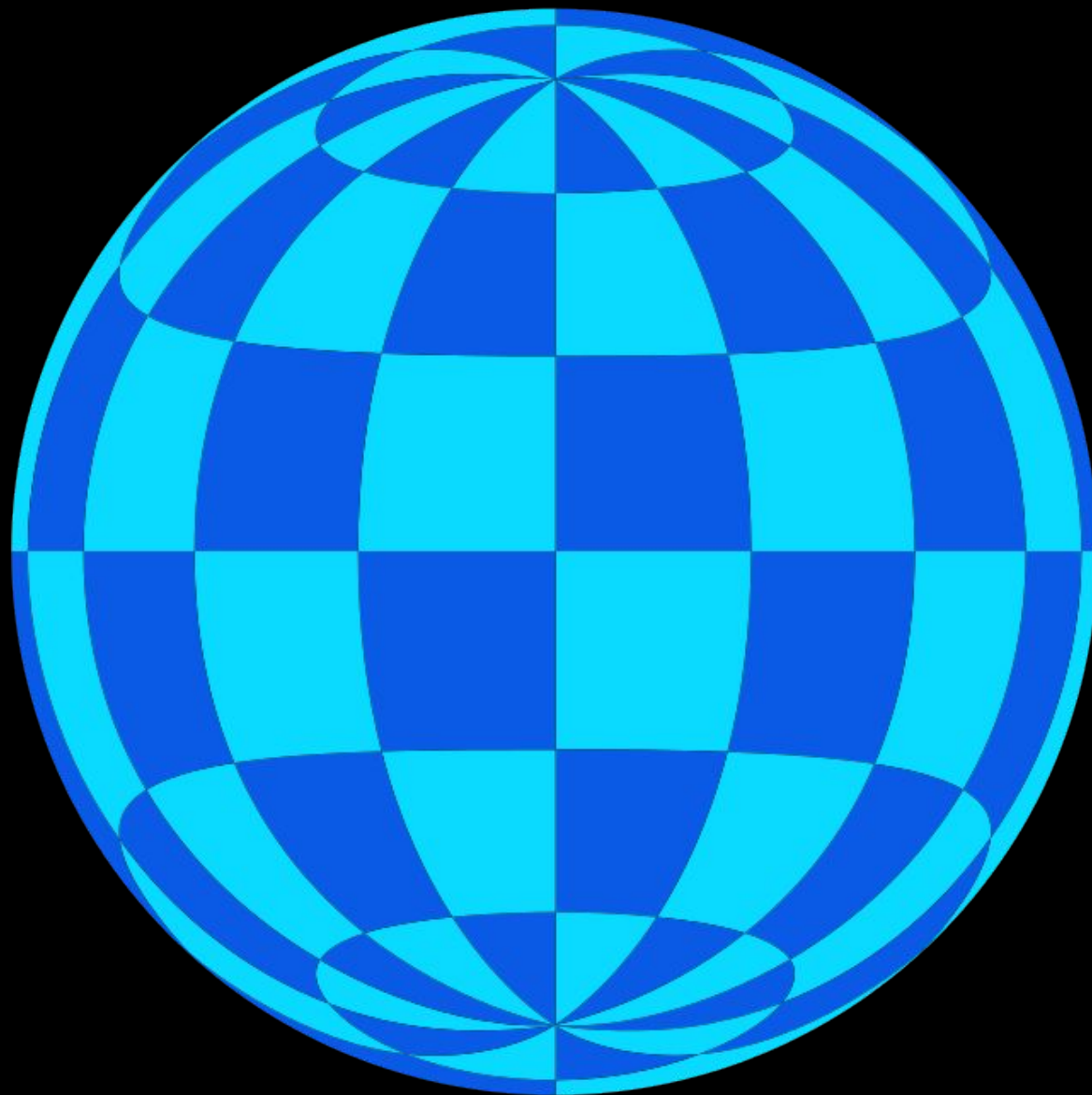


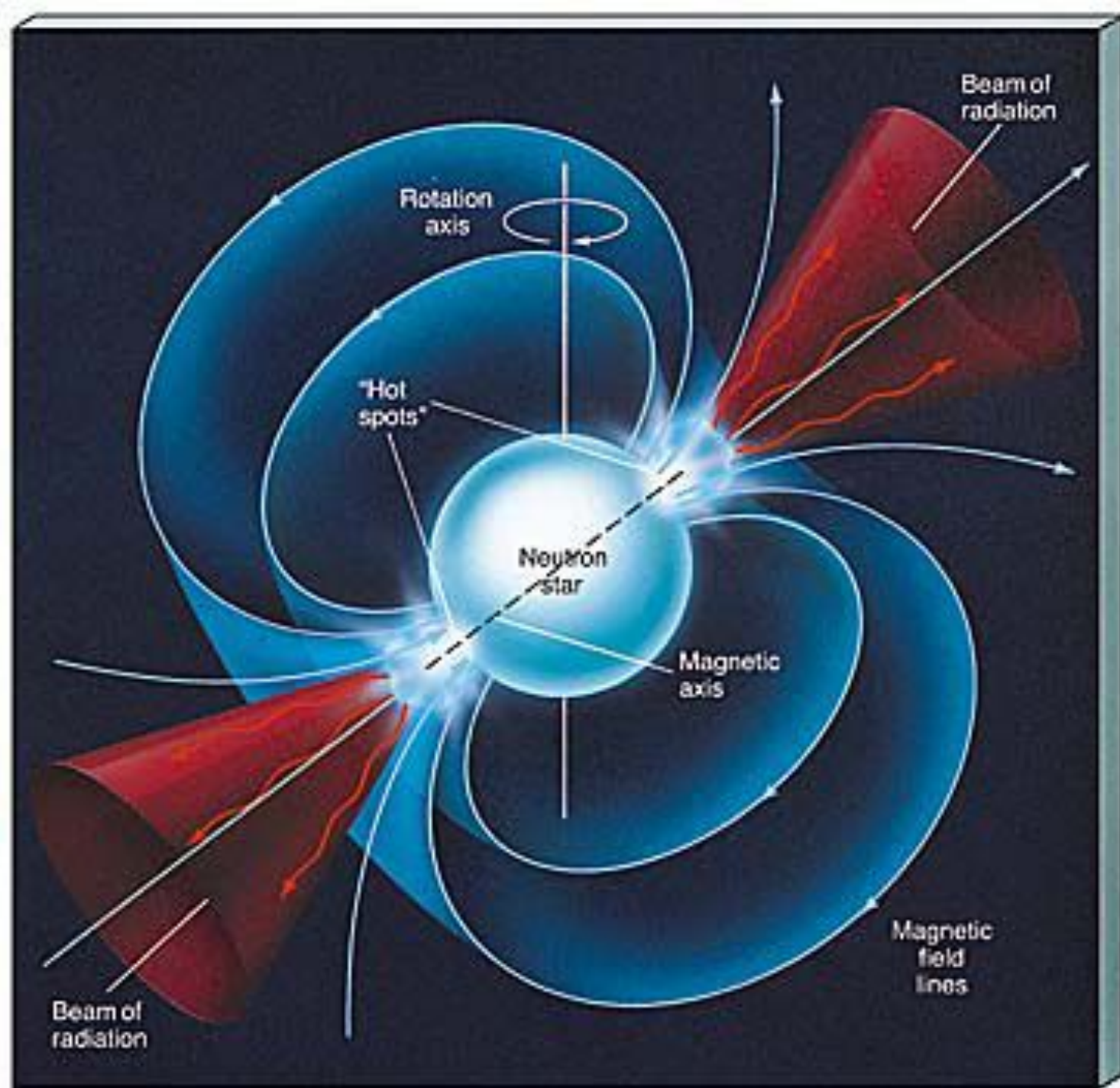
Может ли нейтронная звезда считаться переменной?

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



Эффекты
ОТО: мы
видим более
половины
поверхности
НЗ!





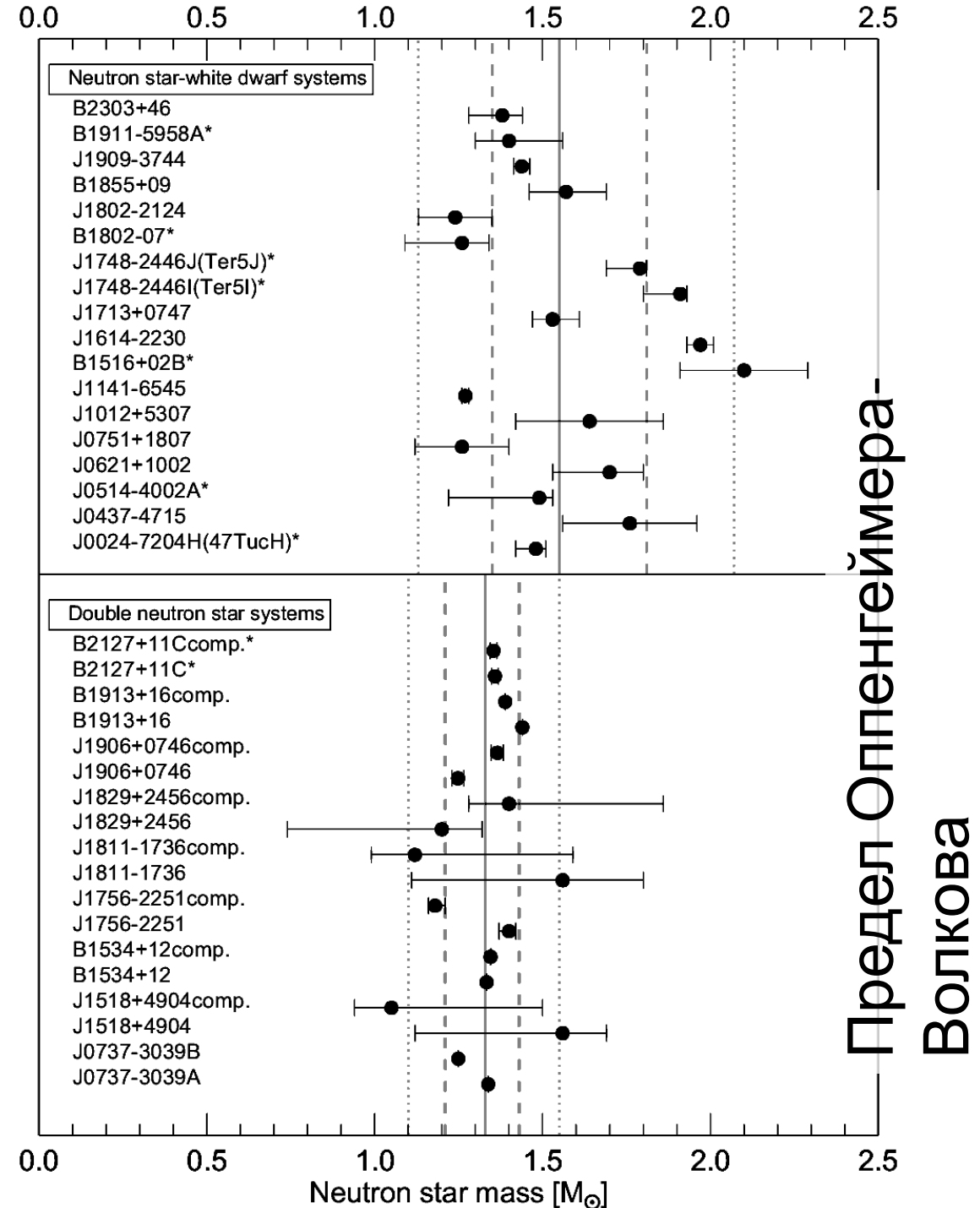
Рентгеновские пульсары

Тесная
двойная
система:
нейтронная
звезда и
нормальная
звезда.



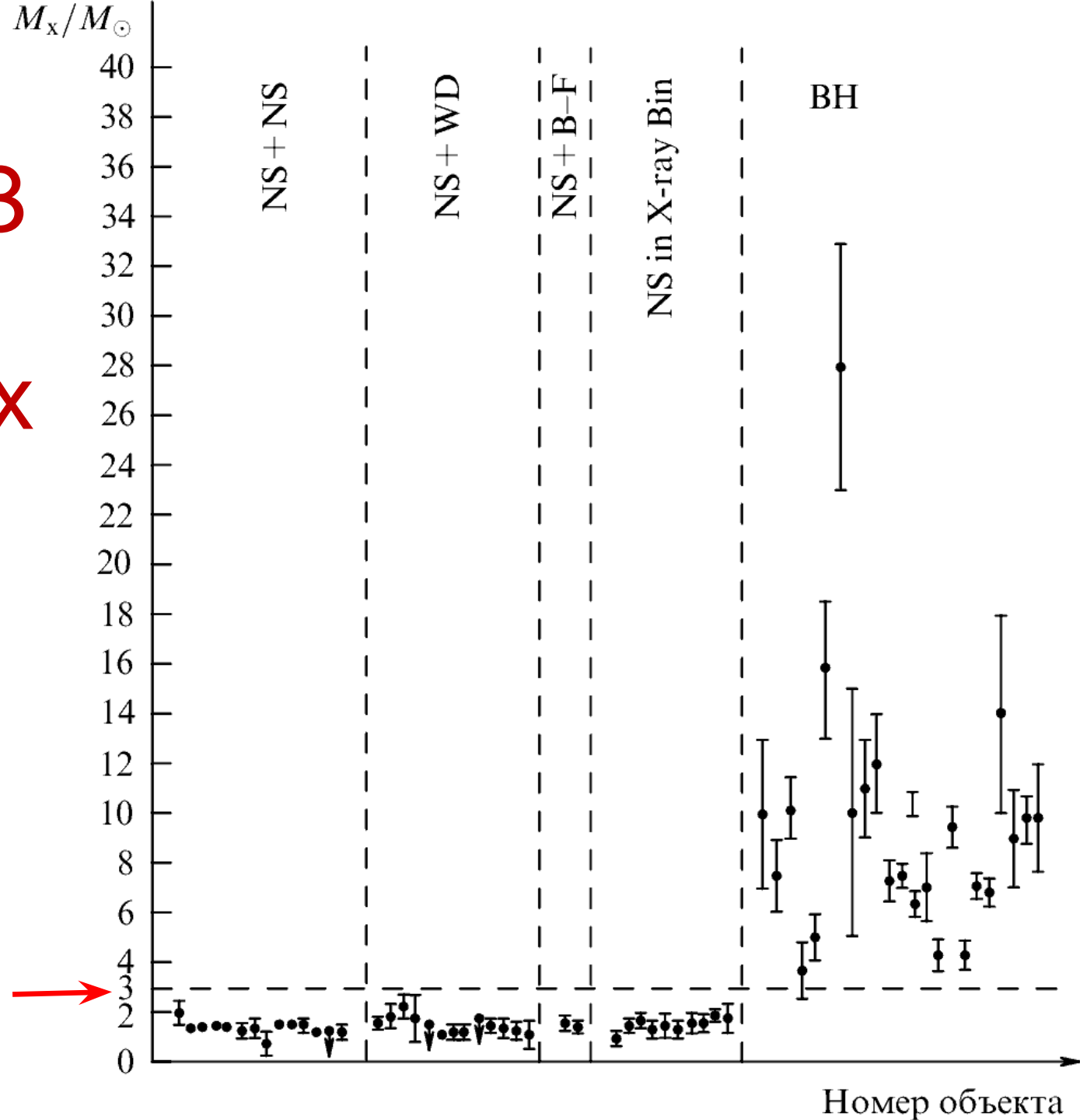
Массы нейтронных звезд в двойных системах

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



Массы НЗ и ЧД в двойных системах

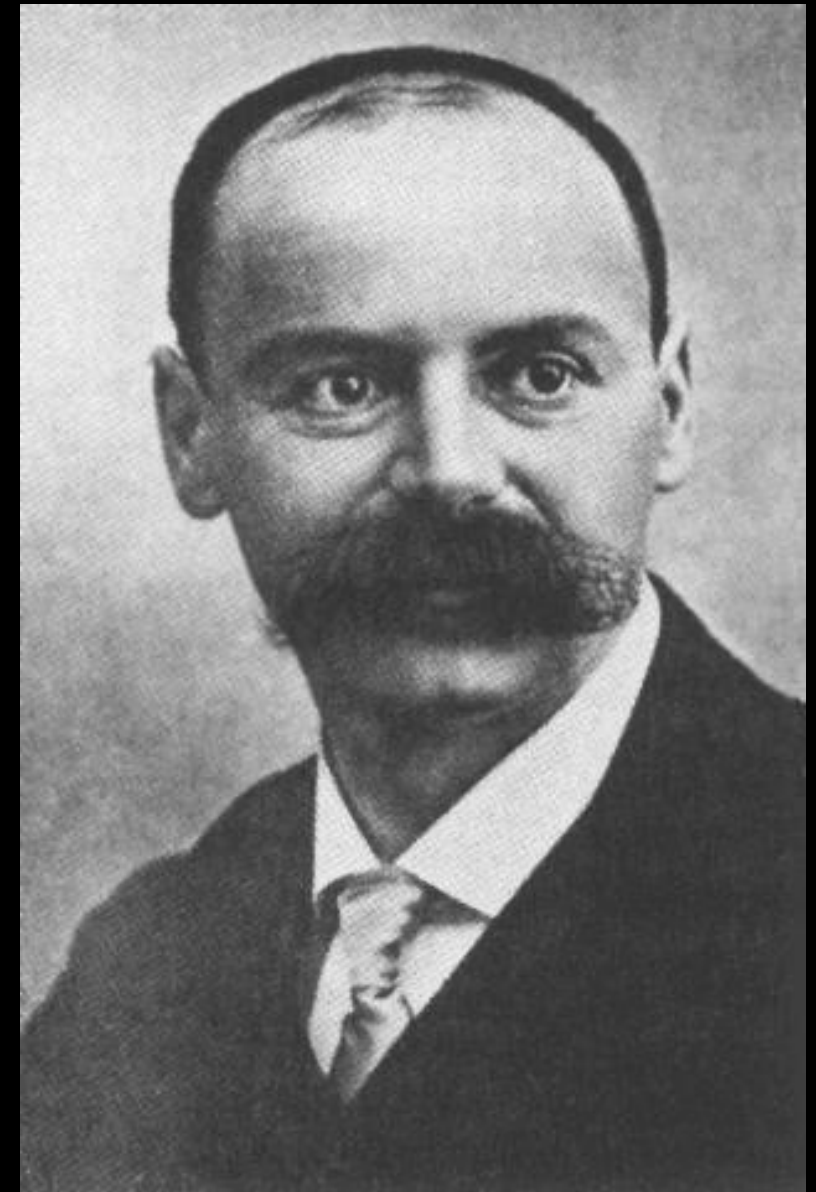
Предел О-
В



Радиус Шварцшильда и горизонт событий

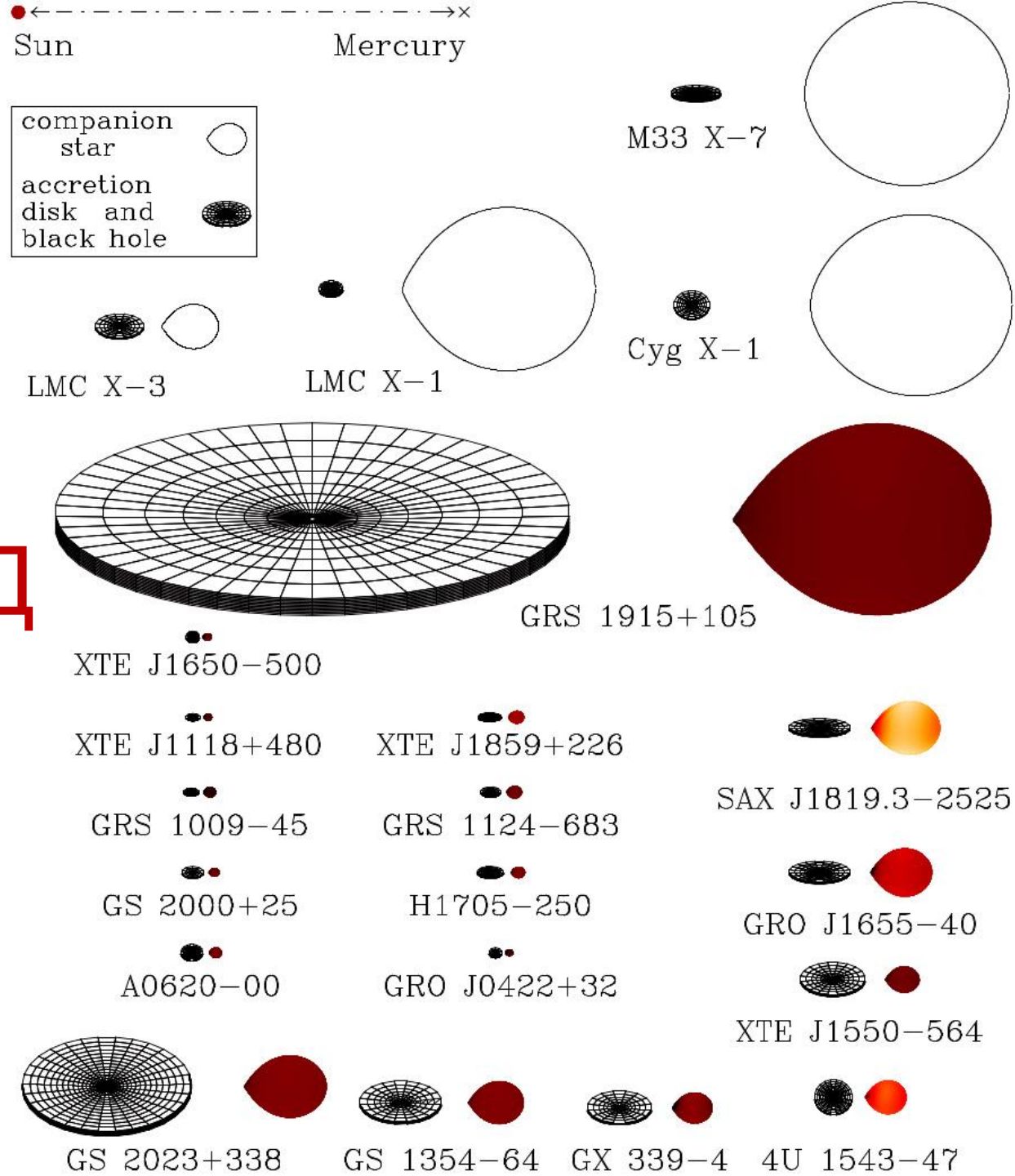
1915 – первое точное решение
уравнений Эйнштейна:
гравитационное поле не
вращающегося, сферически
симметричного тела.

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



Карл Шварцшильд
(1873 – 1916)

Почти все
системы с ЧД

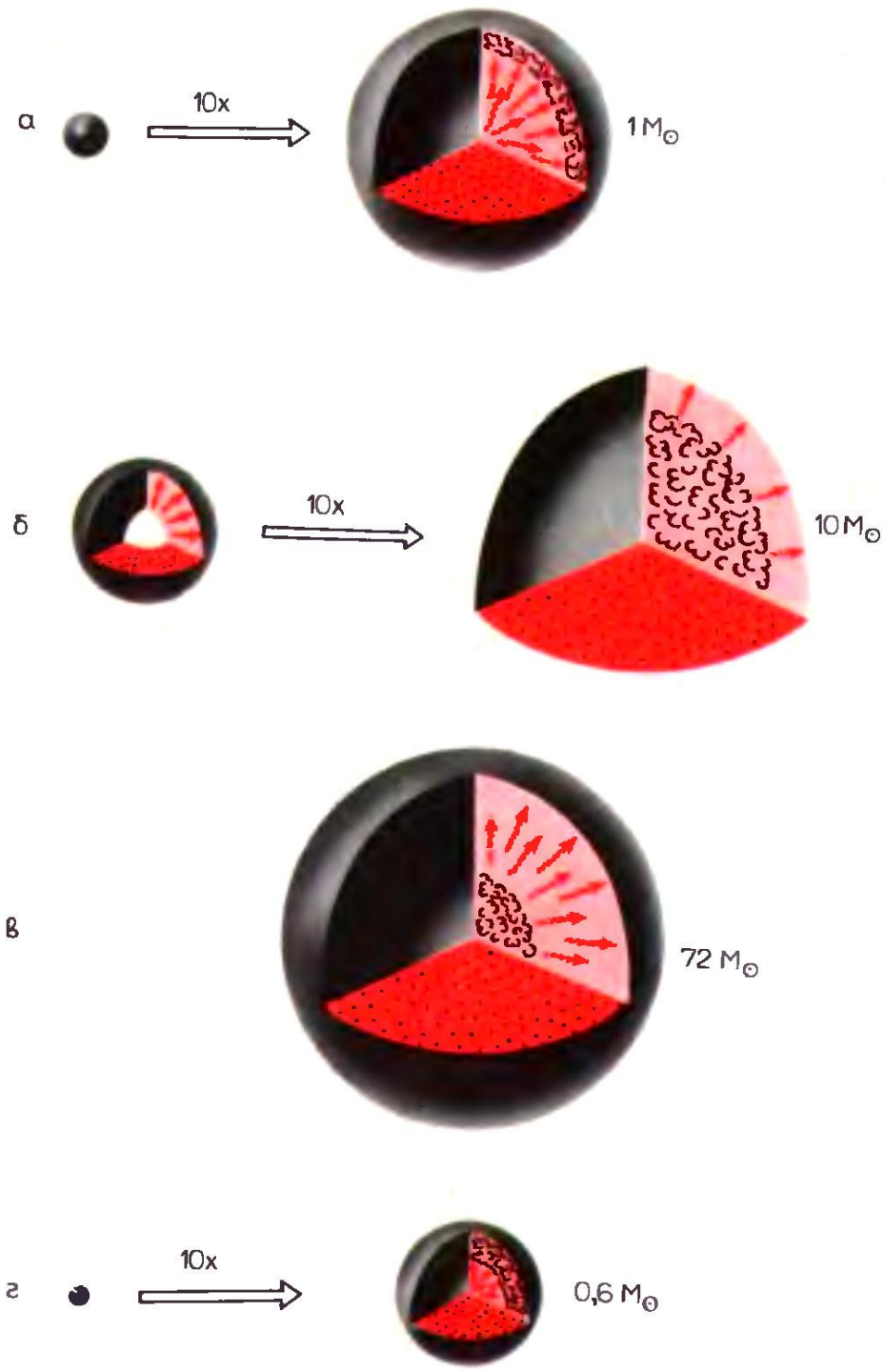


Строение звезд разной массы

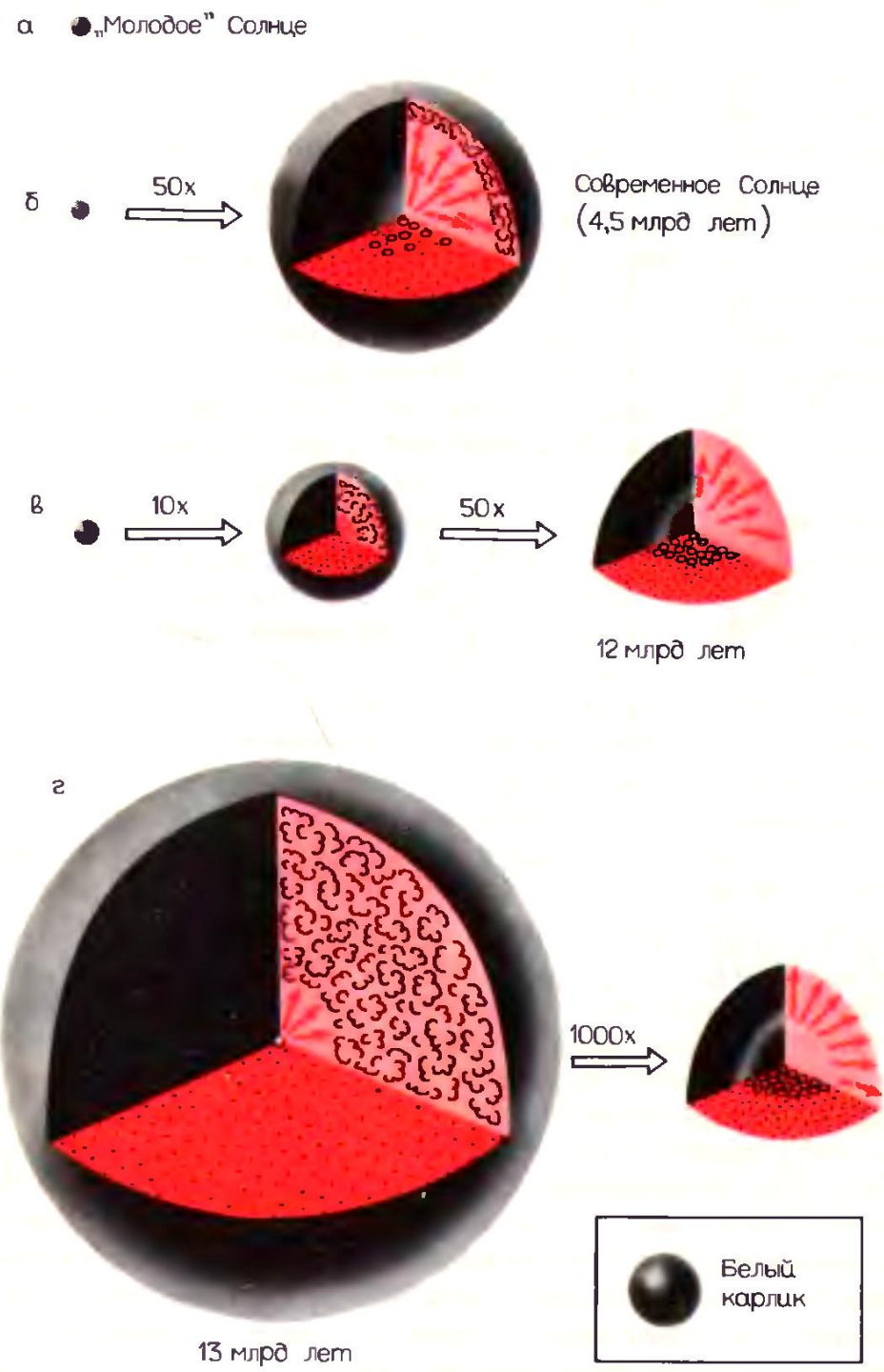
Плотность в центре – 100
г в 1 см³: в 13 раз больше
плотности железа!

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

Но это газ!



Эволюция Солнца



Звезда с $M = 7 M_{\odot}$

