

# **ЗВЕЗДЫ**

**Сергей Арктурович ЯЗЕВ**

Иркутский государственный университет  
г. Иркутск



# ЗВЕЗДЫ

- **Звезды – массивные горячие газовые шары (А.В.Засов, Э.В.Кононович, 1993)**
- **Звезды – газовые шары (Э. В.Кононович, В.И.Мороз, 2001)**
- **Звезда – гравитационно связанная непрозрачная для излучения масса вещества, светимость которой в основной поддерживается происходящими в ней термоядерными реакциями. (В.В.Иванов, В.Г.Сурдин, 2009)**
- **Звезда – тело массой от 0.1 до 150 масс Солнца (С.А.Ламзин, 2017)**

# **ЗВЕЗДЫ**

**Звезды – массивные горячие небесные тела, в недрах которых хотя бы на одном из этапов развития протекают термоядерные реакции**

- Массы – от 0.1 до 150 масс Солнца**
- Размеры – от 0.01 до 1000 радиусов Солнца**
- Светимость до 1 млн светимостей Солнца**
- Температура поверхности – от 3000 до 50000 К**

# ЗВЕЗДЫ

- Звезды – это небесные тела с массой от 0.1 до 150  $M_{\odot}$   
С.А.Ламзин
- Объекты с меньшей массой – коричневые карлики и планеты
- Звезды с массой  $> 150 M_{\odot}$  пока не найдены



- **ГИППАРХ**  
190 – 120 гг  
до нашей эры

Гиппарх предложил систему  
звездных величин для оценки  
блеска звезд

**1 величина** – самые яркие  
звезды

**6 величина** – самые слабые  
звезды, ещё видимые  
невооруженным глазом



- **ГИППАРХ**  
190 – 120 гг  
до нашей эры

**Солнце – 26.7<sup>m</sup>**

**Полная Луна – 12.7<sup>m</sup>**

**Венера, МКС – 4<sup>m</sup>**

**Самые слабые  
звёзды 30<sup>m</sup>**

- Разница в одну звездную величину соответствует отношению видимых яркостей  $E$  в 2.512 раз.
- Если одна звезда имеет звездную величину на  $n$  единиц больше, чем другая, то ее видимая яркость на небе меньше в  $2,512^n$  раз
- Поскольку  $2,512^5 = 100$ , то разница на 5 звездных величин соответствует отношению видимых яркостей ровно в 100 раз
- Формула Погсона

$$\frac{E_1}{E_2} = 2,512^{m_2 - m_1} \quad \text{или} \quad \lg \frac{E_1}{E_2} = 0,4(m_2 - m_1)$$



$$1 \text{ парсек (1 пк)} = 206265 \text{ а.е.} = \\ = 206265 \times 1,496 \times 10^8 \text{ км} = 3,08 \times 10^{13} \text{ км} = 3,26 \text{ св. года}$$

- Видимая звездная величина звезды, находящейся на расстоянии  $r_0 = 10 \text{ пк}$  называется ее **абсолютной звездной величиной**

Если звезда находится на расстоянии  $r$ ,

А ее видимая звездная величина  $m$ ,

Можно записать:

$$E / E_0 = 2,512^{(M - m)}$$

Но видимая яркость меняется  
обратно пропорционально расстоянию

$$E / E_0 = r_0^2 / r^2, \text{ или } E / E_0 = 10^2 / r^2$$

Поэтому

$$10^2 / r^2 = 2,512^{(M - m)}$$

Логарифмируем

$$2 - 2 \lg r = 0.4(M - m), \text{ откуда } M = m + 5 - 5 \lg r$$

- Абсолютная звездная величина Солнца  
 $M_{\text{Солнца}} = +4.8^{\text{m}}$

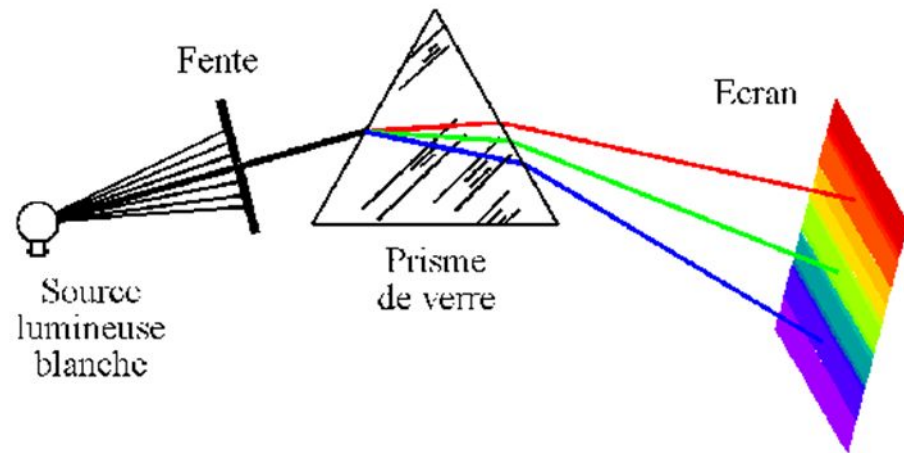


# ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЗВЕЗД

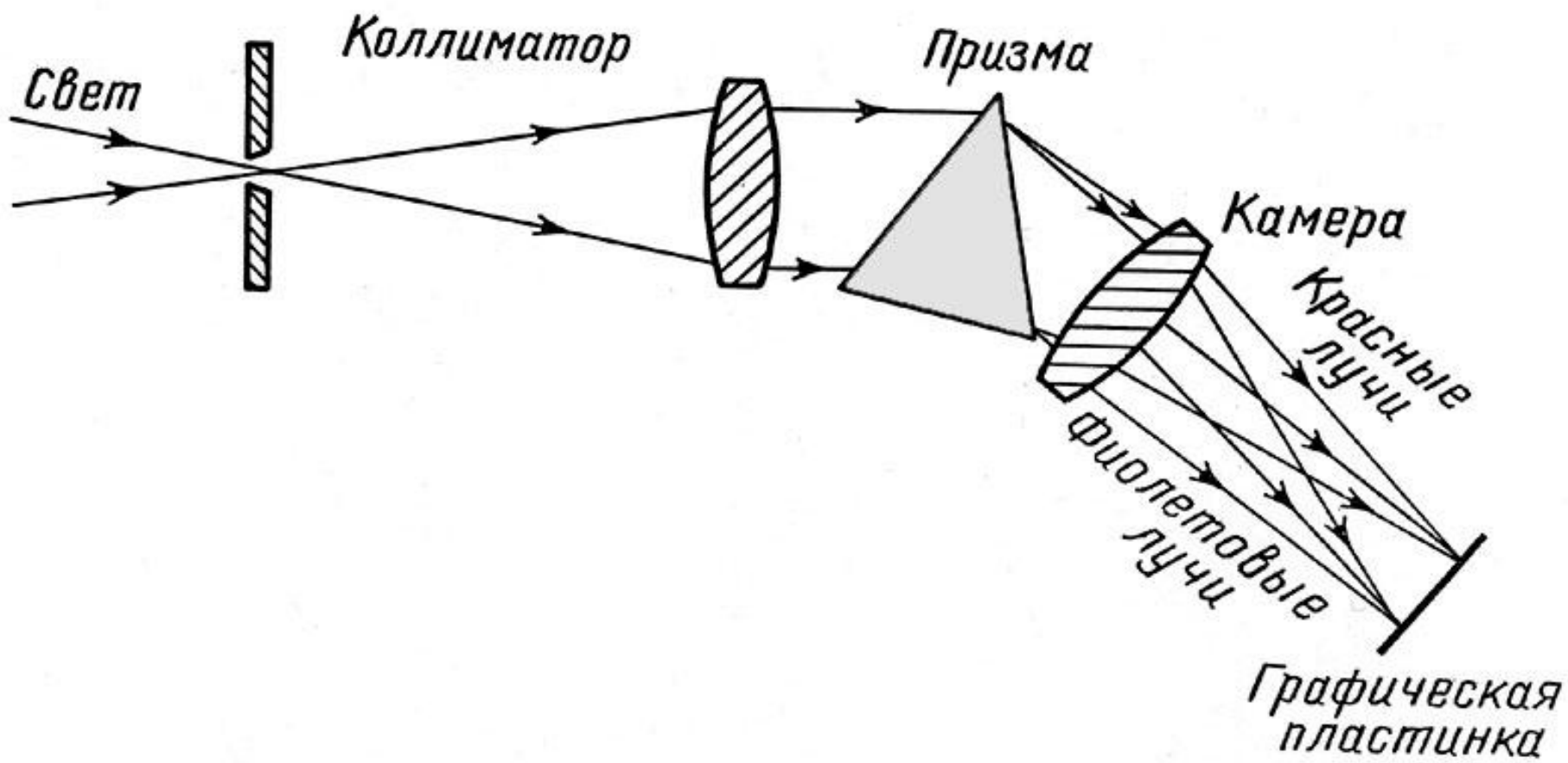


## ОПЫТЫ С ПЕРВЫМ СПЕКТРОГРАФОМ

ИСААК НЬЮТОН, 1672



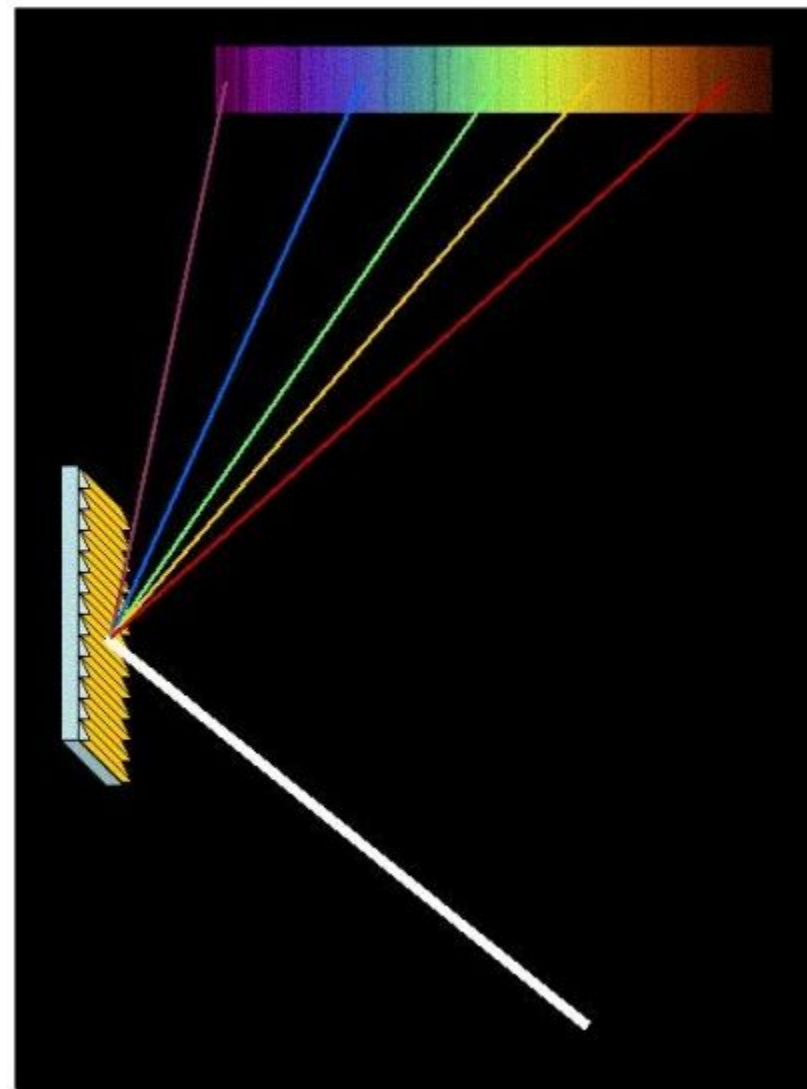
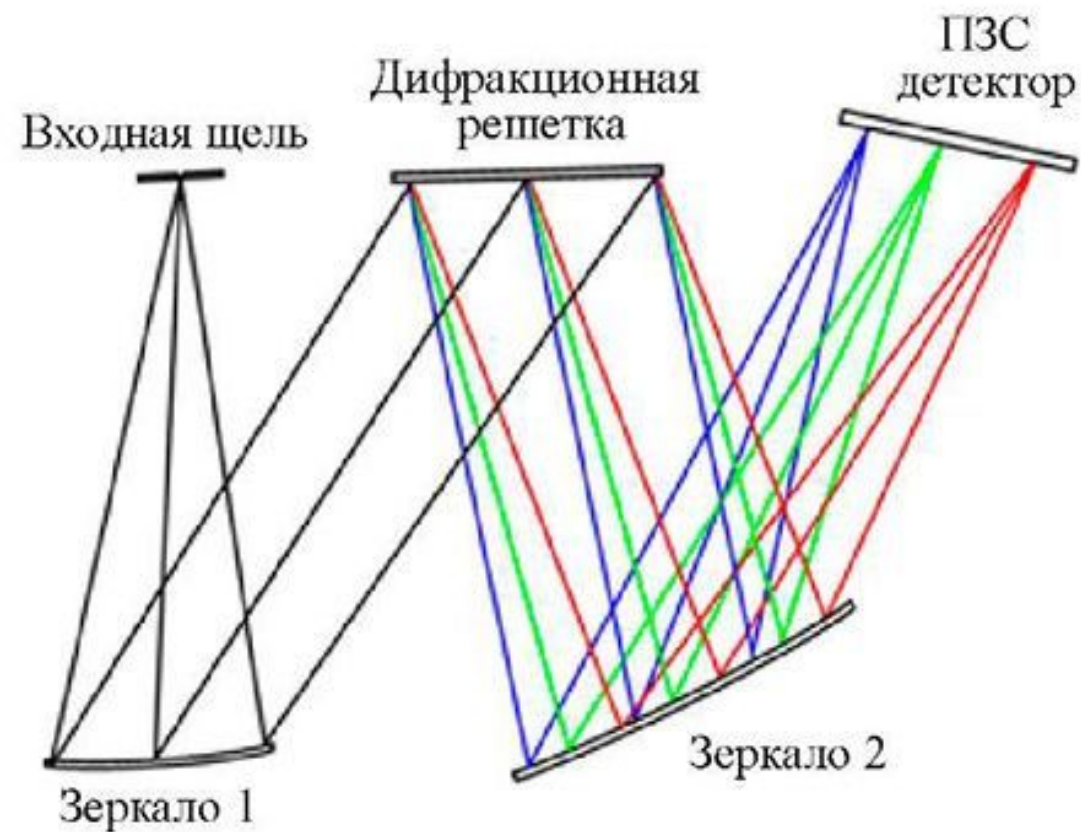
# СХЕМА ПРИЗМЕННОГО СПЕКТРОГРАФА



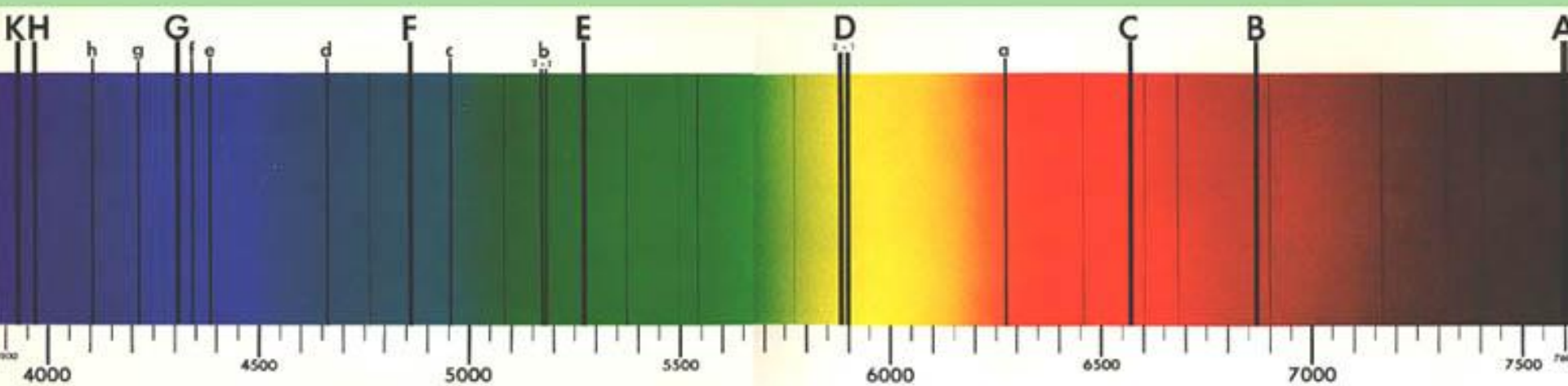


•© Ferlet 2003

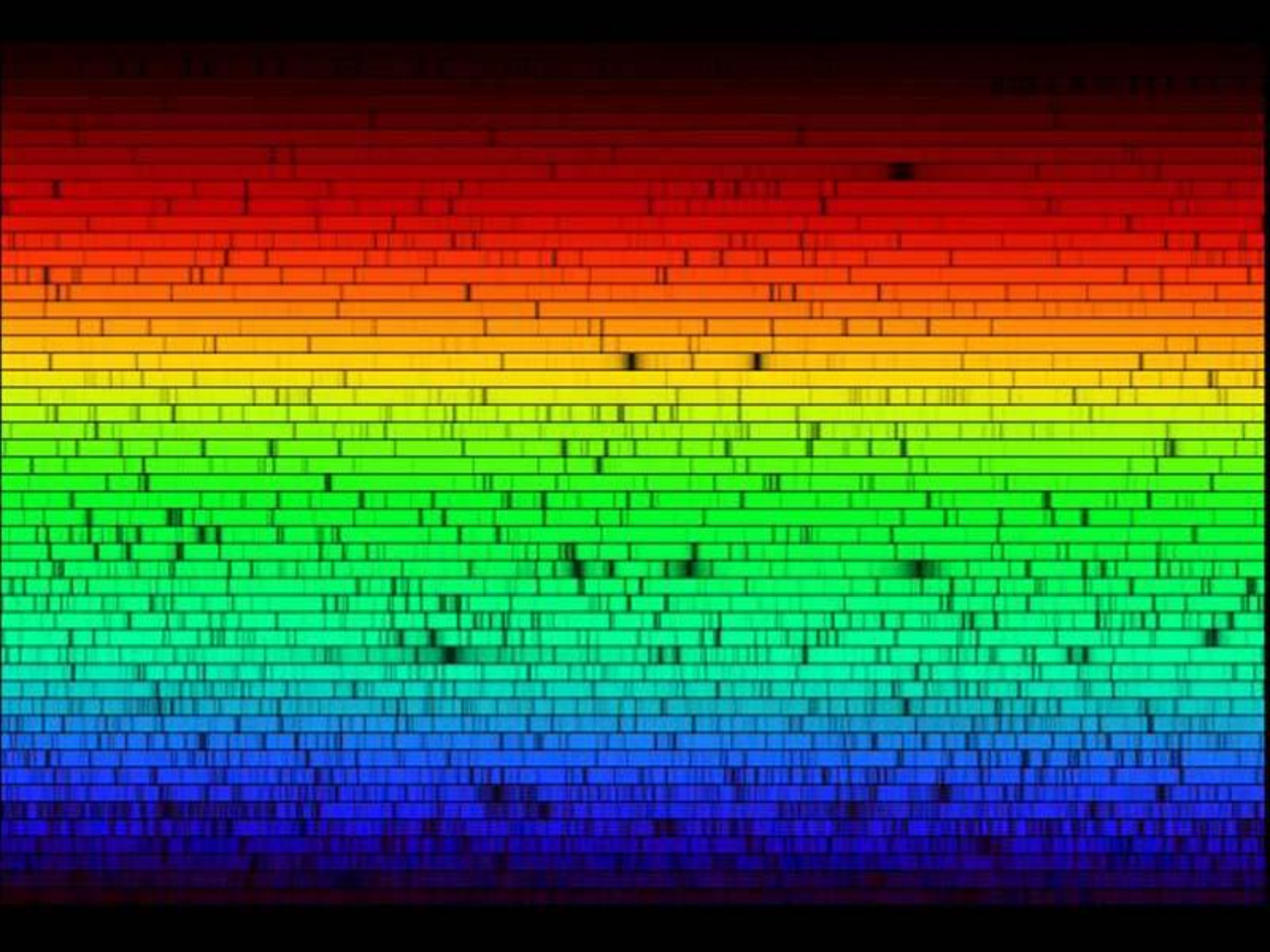
# СХЕМА ДИФРАКЦИОННОГО СПЕКТРОГРАФА



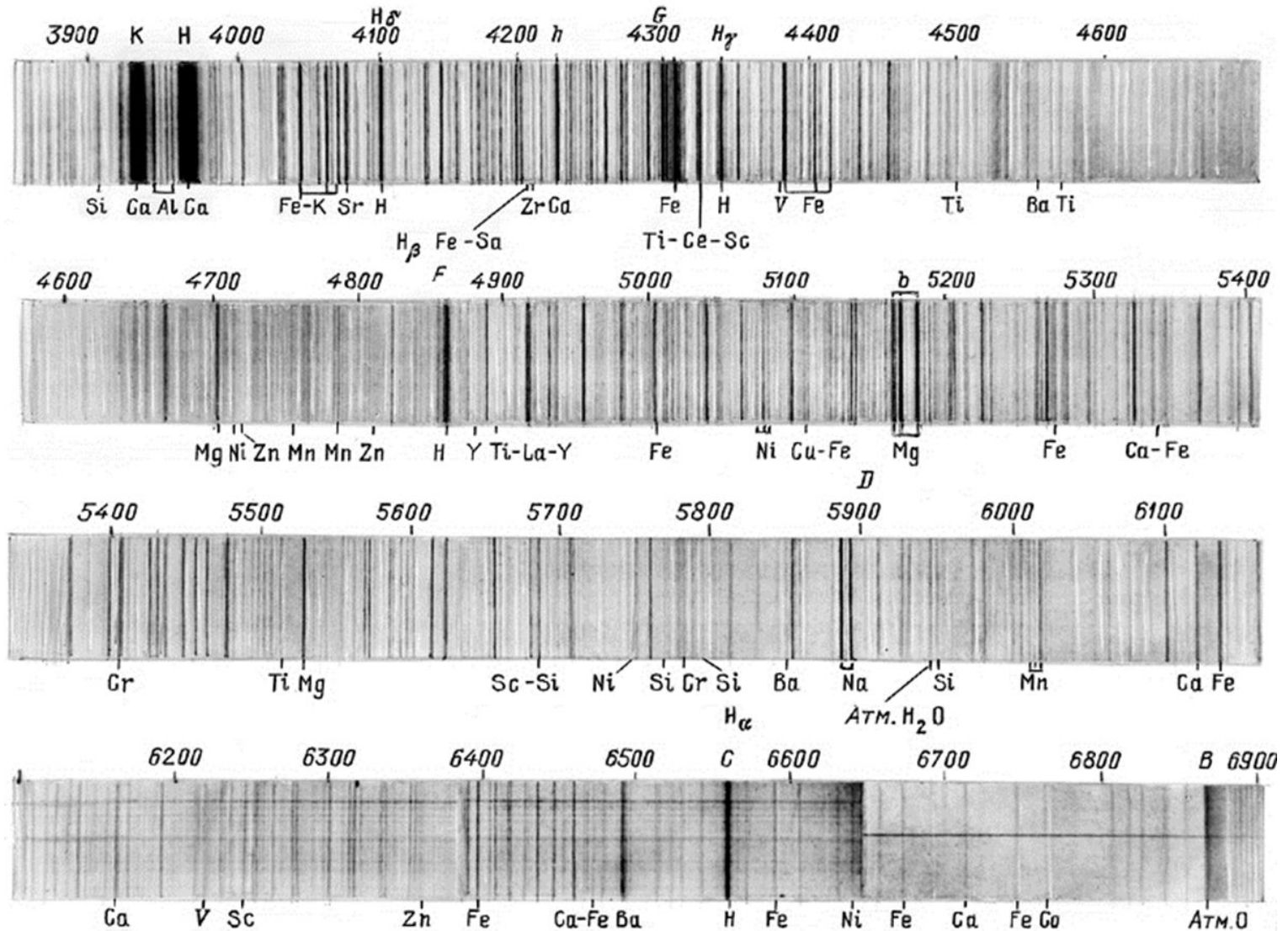
# Оптический спектр типичной звезды





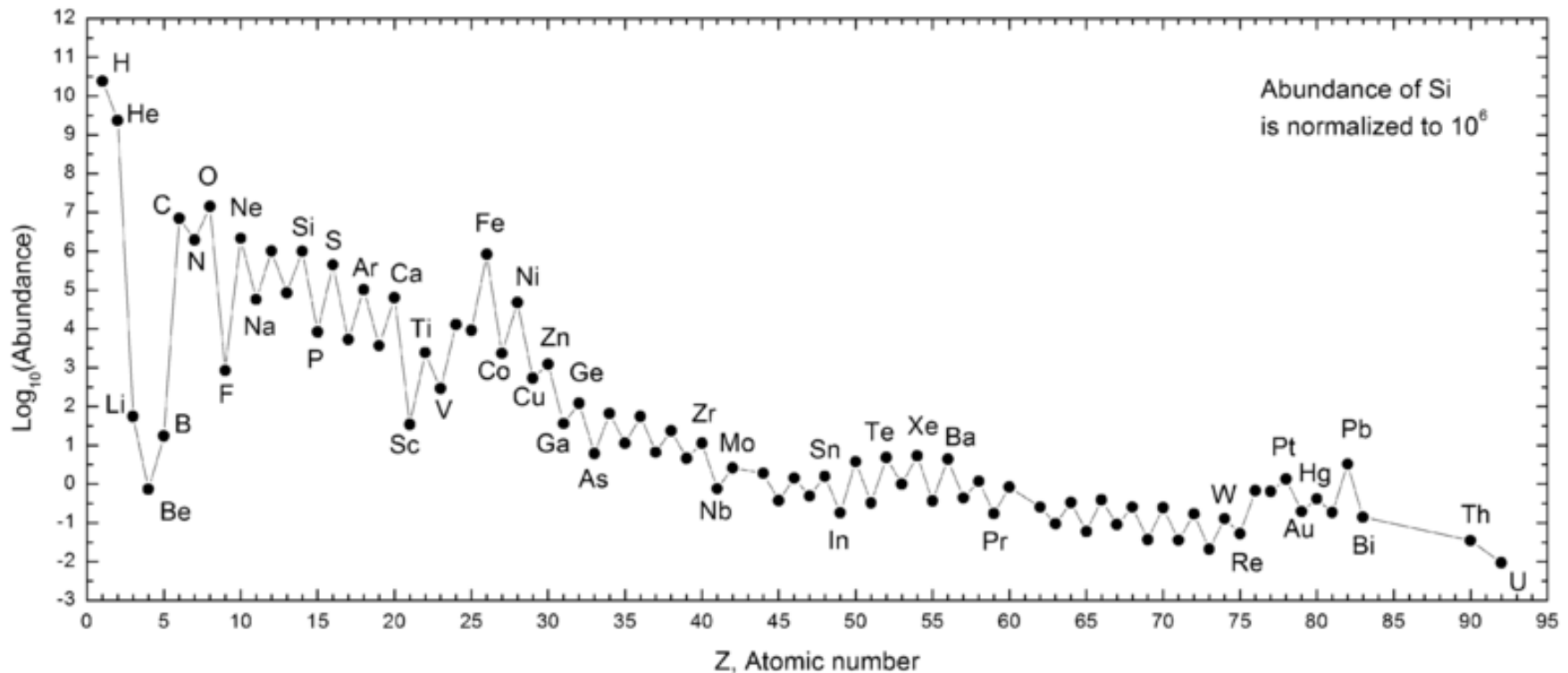


# СПЕКТР СОЛНЦА, ИСПЕЩРЕННЫЙ ЛИНИЯМИ ФРАУНГОФЕРА

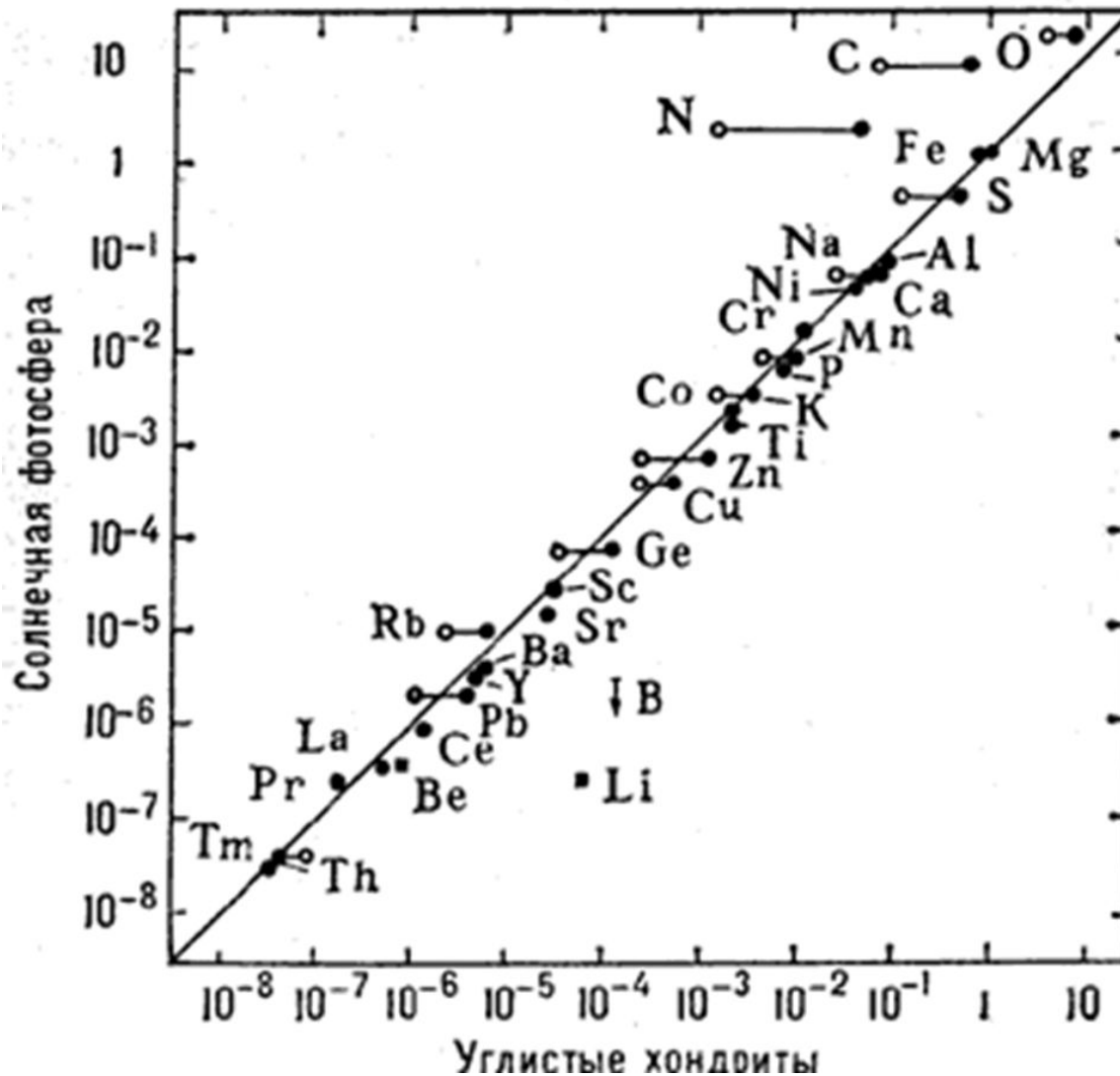


**Изучение спектров показало, что поверхностные слои звезд состоят, в основном, из водорода.**

**Атомов гелия примерно в 10 раз меньше, а всех остальных элементов таблицы Менделеева меньше в тысячи и миллионы раз**



# ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ СОЛНЦА

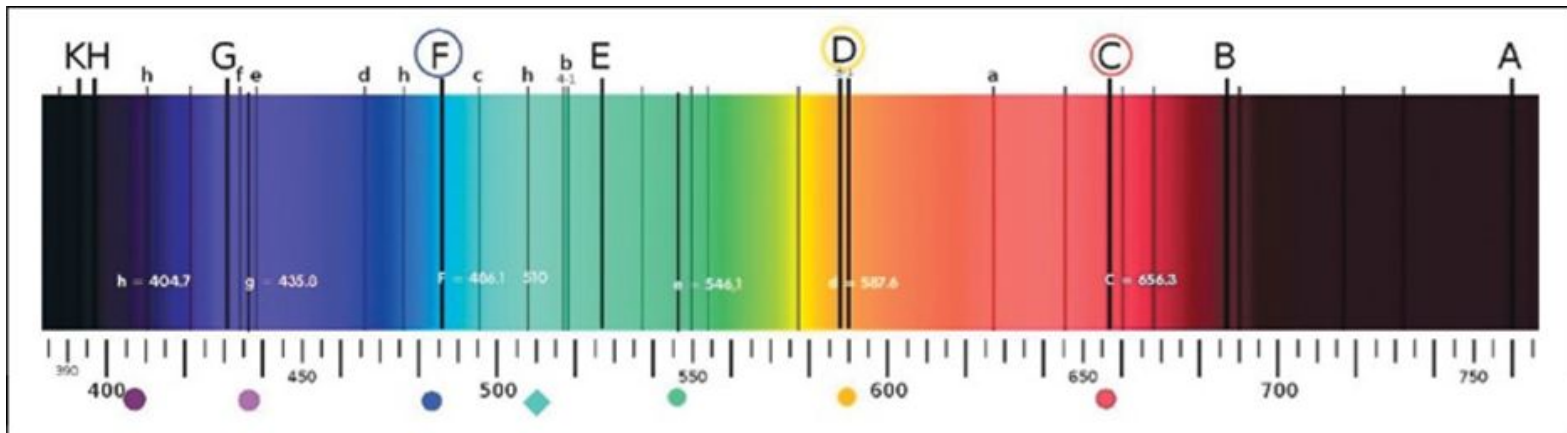


# ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ СОЛНЦА

**ВОДОРОД**      **90.7 %** по числу атомов  
**74 %** по массе

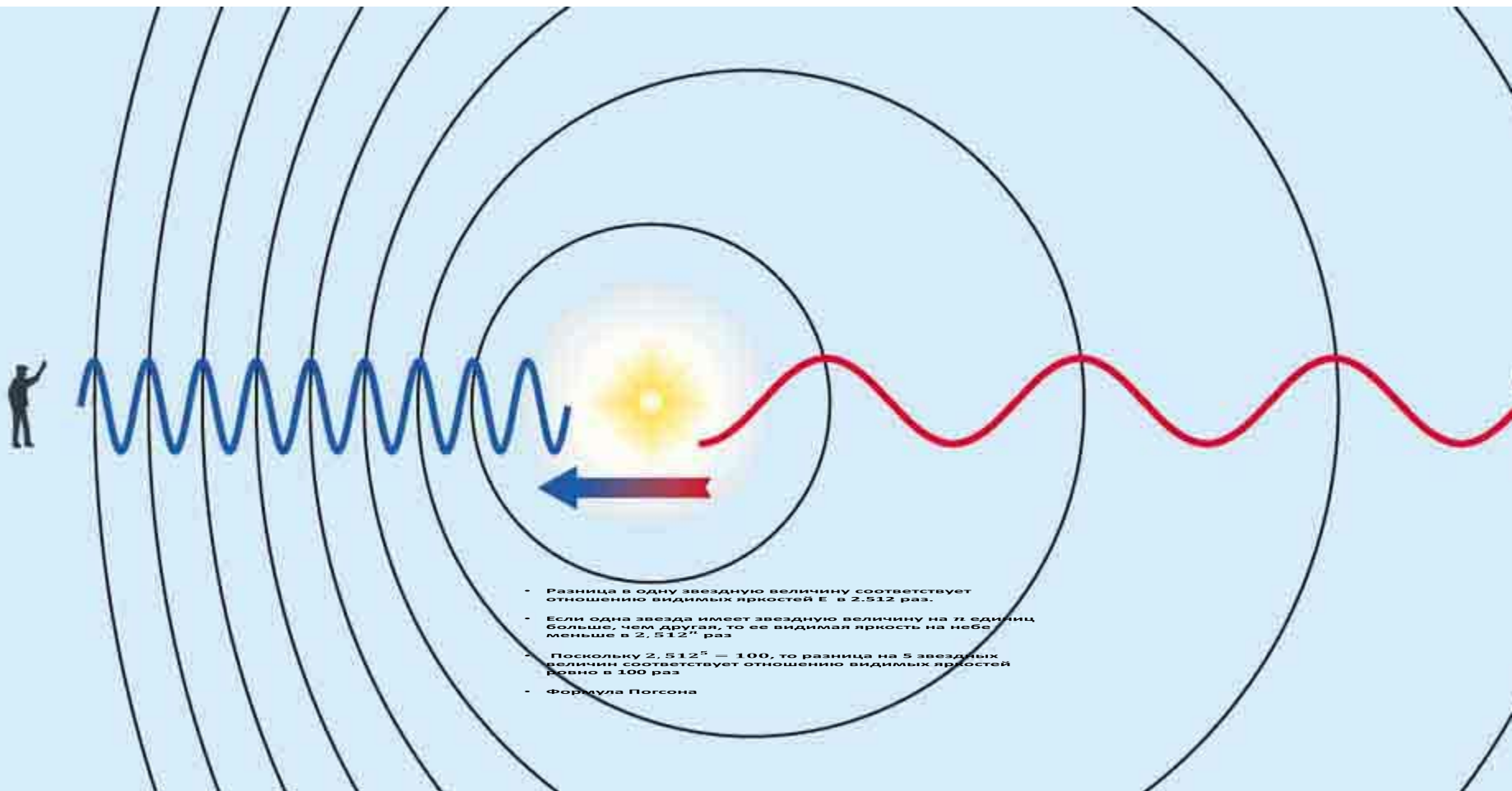
**ГЕЛИЙ**      **9.1 %** по числу атомов  
**24 %** по массе

**ОСТАЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ**      **0.2 %** по числу атомов  
**2 %** по массе



# Определение лучевых скоростей

- Эффект Доплера



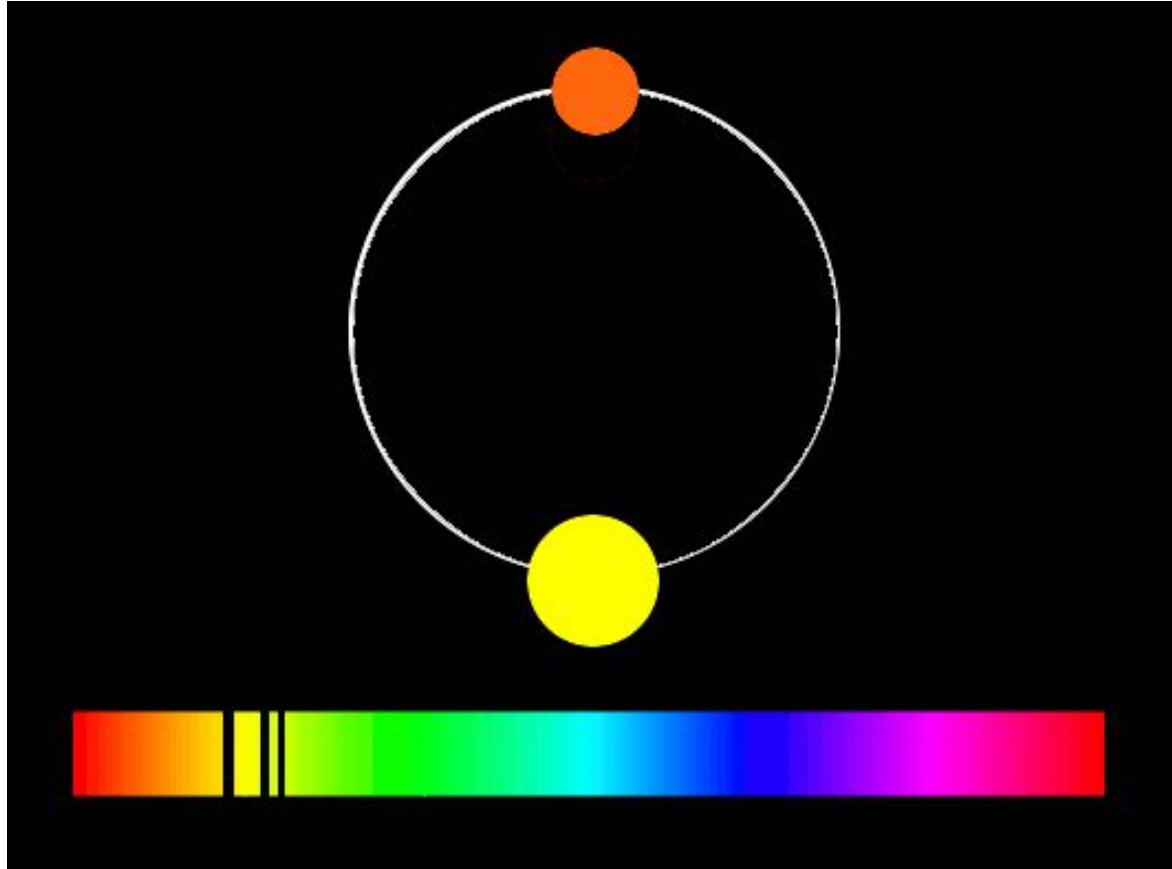
- Разница в одну звездную величину соответствует отношению видимых яркостей  $E$  в 2,512 раз.
- Если одна звезда имеет звездную величину на  $n$  единиц больше, чем другая, то ее видимая яркость на небе меньше в  $2,512^n$  раз.
- Поскольку  $2,512^5 = 100$ , то разница на 5 звездных величин соответствует отношению видимых яркостей ровно в 100 раз.
- Формула Погсона



# Определение лучевых скоростей

- Эффект Доплера

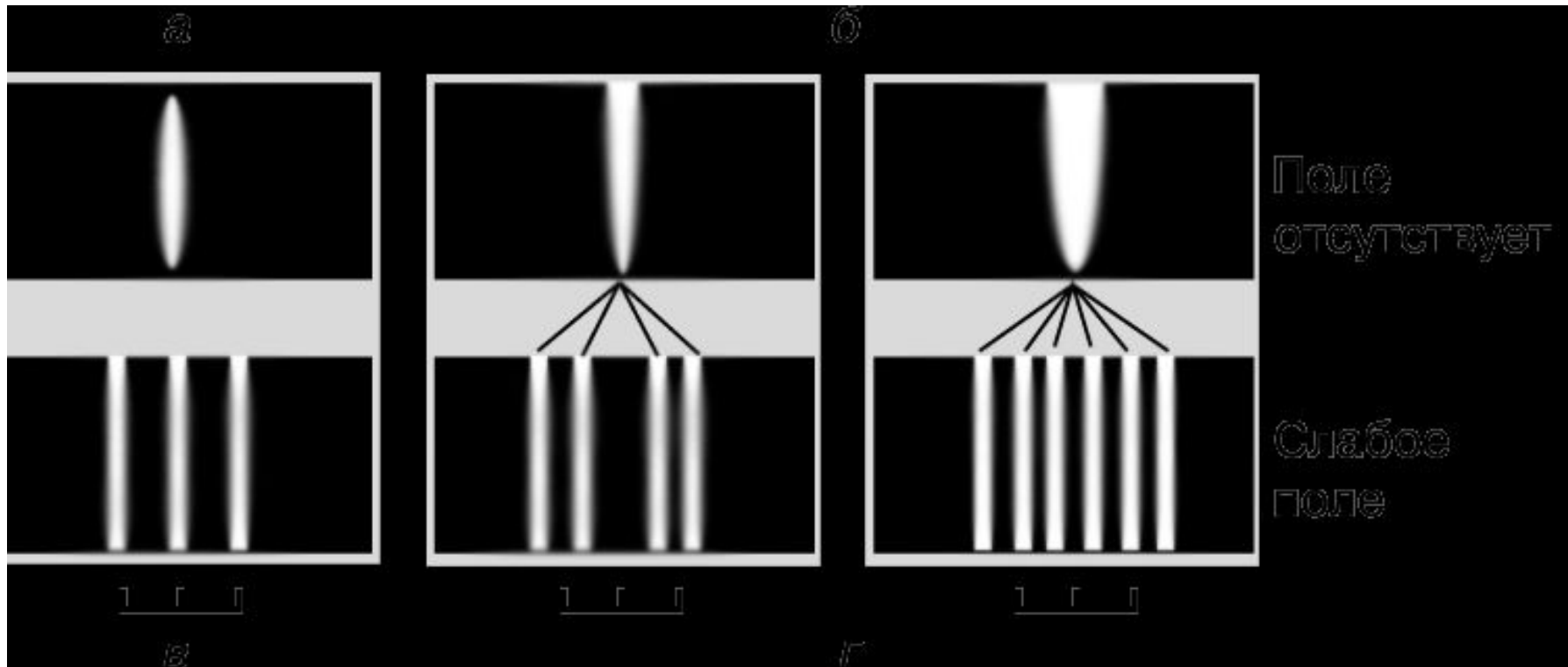
- Разница в одну звездную величину соответствует отношению видимых яркостей  $E$  в 2,512 раз.
- Если одна звезда имеет звездную величину на  $n$  единиц больше, чем другая, то ее видимая яркость на небе меньше в  $2,512^n$  раз
- Поскольку  $2,512^5 = 100$ , то разница на 5 звездных величин соответствует отношению видимых яркостей ровно в 100 раз
- Формула Погсона





# Определение магнитных полей

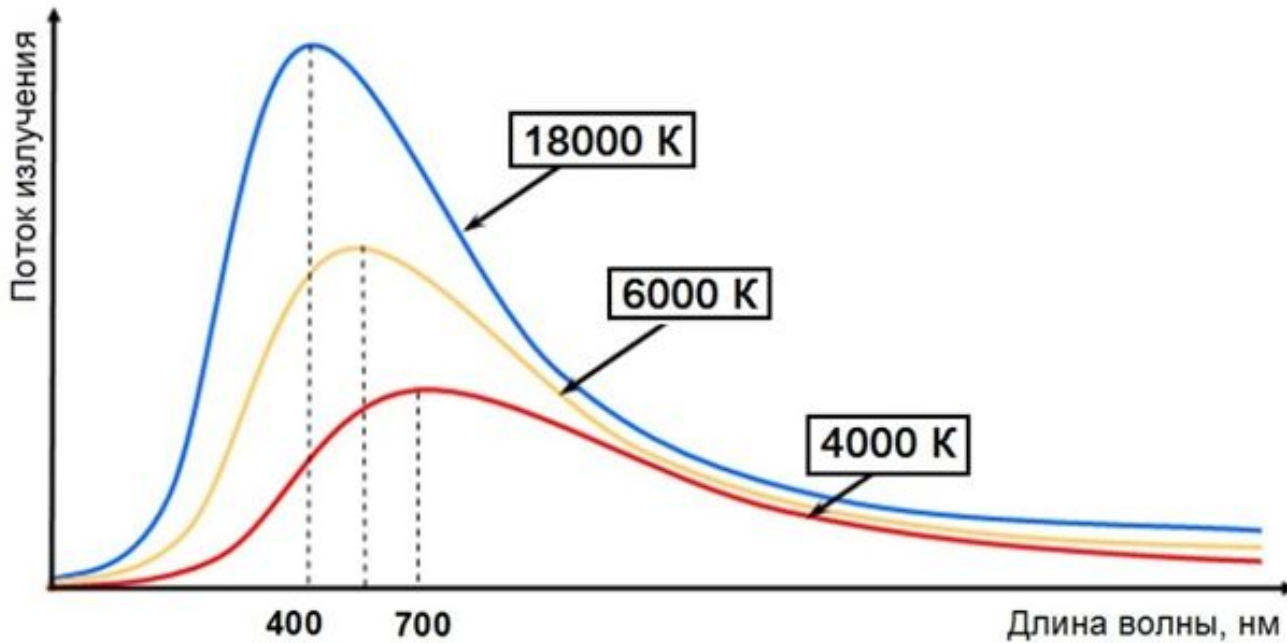
- Эффект Зеемана



# Определение температуры

- Закон смещения Вина

$$\lambda_{\text{max}} = \frac{b}{T}$$



# Определение температуры

- Закон Стефана-Больцмана
- $\varepsilon = \sigma T^4$
- $\sigma = 5,7 \times 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К}^4)$



# СПЕКТРАЛЬНЫЕ КЛАССЫ ЗВЕЗД

- Спектры звезд различаются по числу линий и их интенсивности
- Звезды с одинаковой температурой имеют сходные спектры
- Гарвардская классификация спектров звезд

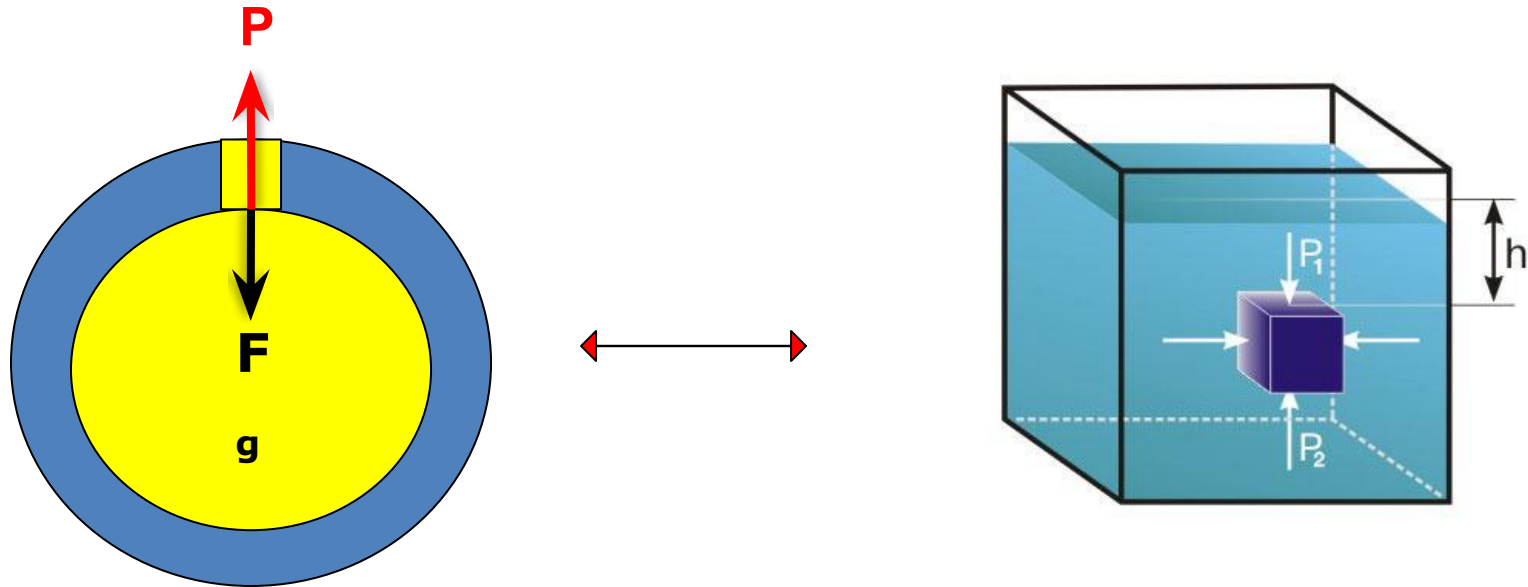
***O - B - A - F - G - K - M***

- Правило для запоминания:

**O, Be A Fine Girl, Kiss Me**

# ЭВОЛЮЦИЯ ЗВЁЗД

# Механическое равновесие звезды – результат баланса сил тяготения и газового давления



Чем глубже, тем больше вес вышележащих слоев,  
поэтому давление газа в звезде нарастает  
от поверхности к центру

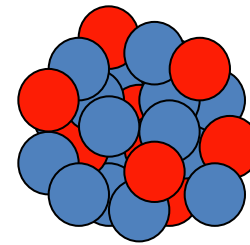
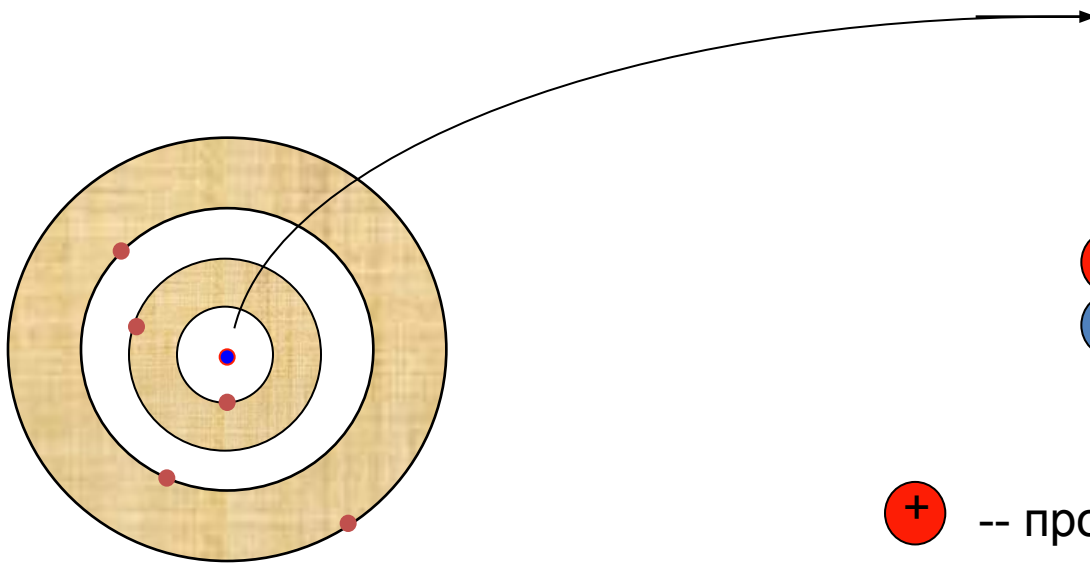
**Плотность и температура вещества  
растут по мере приближения к центру**

**Излучая энергию в окружающее пространство,  
звезды теряют тепловую энергию.  
Эта потеря в основном компенсируется за счет  
термоядерных реакций.**

**Что такое  
термоядерные реакции?**

# СТРОЕНИЕ АТОМА

Ядро



 -- протон       -- нейтрон

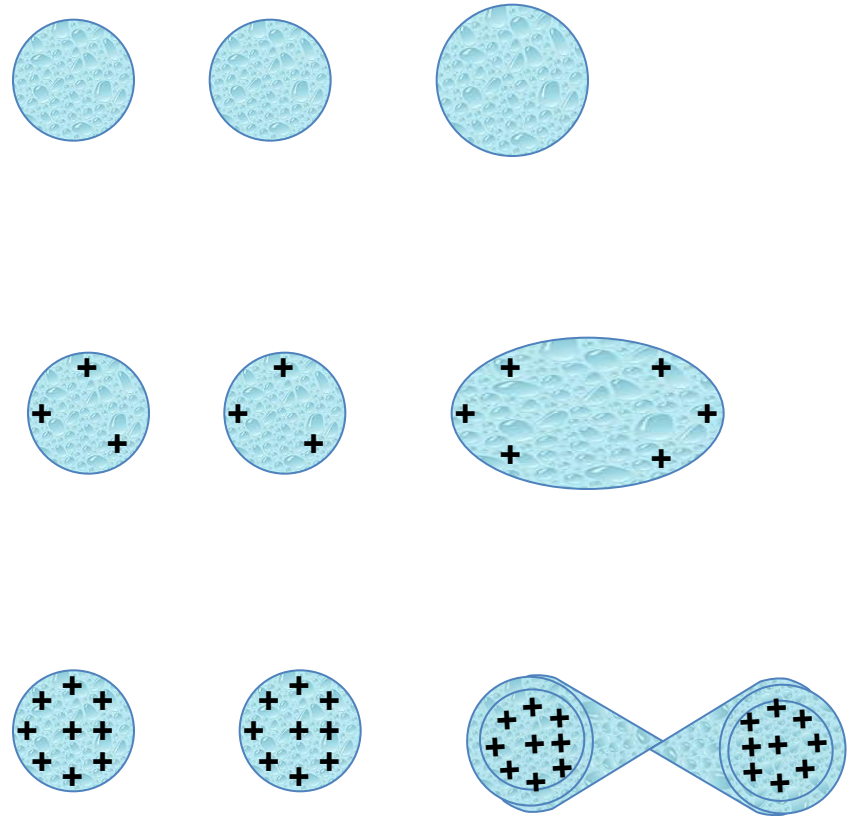
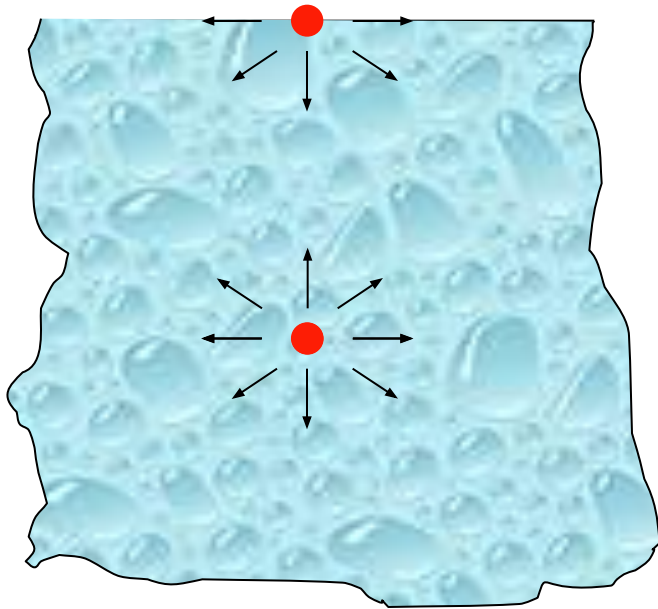
нуклоны

 -- электрон       -- ядро

При  $r < 10^{-15}$  м.  $F_{\text{нuc}} \gg F_e$



# КАПЕЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ЯДРА



Слияние ядер вплоть до ядра  $^{56}\text{Fe}_{26}$  происходит с выделением энергии, т.е. железо – ядерная зола !

# У элементов тяжелее свинца нет устойчивых изотопов !

ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ Д.И.МЕНДЕЛЕЕВА

www.calc.ru



Д.И. Менделеев  
1834–1907

СИМВОЛ ЭЛЕМЕНТА      ПОРЯДКОВЫЙ НОМЕР

**Rb 37**  
РУБИДИЙ  
85,468

НАЗВАНИЕ ЭЛЕМЕНТА  
ОТНОСИТЕЛЬНАЯ АТОМНАЯ МАССА

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ ПО СЛОЯМ

S-элементы  
p-элементы  
d-элементы  
f-элементы

Периоды	Ряды	ГРУППЫ ЭЛЕМЕНТОВ																Энергетические уровни	
		I		II		III		IV		V		VI		VII		VIII			
		а	б	а	б	а	б	а	б	а	б	а	б	а	б	а	б		
1	1	<b>H</b> 1.008 ВОДОРОД																<b>He</b> 4.003 ГЕЛИЙ	2
2	2	<b>Li</b> 6.941 ЛИТИЙ	<b>Be</b> 9.0122 БЕРИЛЛИЙ	<b>B</b> 10.811 БОР	<b>C</b> 12.011 УГЛЕРОД	<b>N</b> 14.007 АЗОТ	<b>O</b> 15.999 КИСЛОРОД	<b>F</b> 18.998 ФТОР										<b>Ne</b> 20.179 НЕОН	10
3	3	<b>Na</b> 22.99 НАТРИЙ	<b>Mg</b> 24.312 МАГНИЙ	<b>Al</b> 26.982 АЛЮМИНИЙ	<b>Si</b> 28.086 КРЕМНИЙ	<b>P</b> 30.974 ФОСФОР	<b>S</b> 32.064 СЕРА	<b>Cl</b> 35.453 ХЛОР										<b>Ar</b> 39.948 АРГОН	18
4	4	<b>K</b> 39.102 КАЛИЙ	<b>Ca</b> 40.08 КАЛЬЦИЙ	<b>Sc</b> 44.956 СКАНДИЙ	<b>Ti</b> 47.955 ТИТАН	<b>V</b> 50.941 ВАНАДИЙ	<b>Cr</b> 51.996 ХРОМ	<b>Mn</b> 54.938 МАРГАНЕЦ	<b>Fe</b> 55.845 ЖЕЛЕЗО	<b>Co</b> 58.933 КОБАЛЬТ	<b>Ni</b> 58.7 НИКЕЛЬ								
	5	<b>Cu</b> 63.546 МЕДЬ	<b>Zn</b> 65.37 ЦИНК	<b>Ga</b> 69.72 ГАЛЛИЙ	<b>Ge</b> 72.59 ГЕРМАНИЙ	<b>As</b> 74.922 МЫШЬЯК	<b>Se</b> 78.96 СЕЛЕН	<b>Br</b> 79.904 БРОМ											<b>Kr</b> 83.8 КРИПТОН
5	6	<b>Rb</b> 85.468 РУБИДИЙ	<b>Sr</b> 87.52 СТРОНЦИЙ	<b>Y</b> 88.908 ИТРИЙ	<b>Zr</b> 91.22 ЦИРКОНИЙ	<b>Nb</b> 92.906 НИОБИЙ	<b>Mo</b> 95.94 МОЛИБДЕН	<b>Tc</b> [99] ТЕХНЕЦИЙ	<b>Ru</b> 101.07 РУТЕНИЙ	<b>Rh</b> 102.906 РОДИЙ	<b>Pd</b> 106.4 ПАЛЛАДИЙ								
	7	<b>Ag</b> 107.868 СЕРЕБРО	<b>Cd</b> 112.41 КАДМИЙ	<b>In</b> 114.82 ИНДИЙ	<b>Sn</b> 118.69 ОЛОВО	<b>Sb</b> 121.75 СУРЬМА	<b>Te</b> 127.6 ТЕЛЛУР	<b>I</b> 126.905 ИОД											<b>Xe</b> 131.3 КСЕНОН
6	8	<b>Cs</b> 132.905 ЦЕЗИЙ	<b>Ba</b> 137.34 БАРИЙ	57–71 ЛАНТАНОИДЫ		<b>Hf</b> 178.49 ГАФНИЙ	<b>Ta</b> 180.948 ТАНТАЛ	<b>W</b> 183.85 ВОЛЬФРАМ	<b>Re</b> 186.207 РЕНИЙ	<b>Os</b> 196.2 ОСМИЙ	<b>Ir</b> 192.22 ИРИДИЙ	<b>Pt</b> 195.09 ПЛАТИНА							
	9	<b>Au</b> 196.967 ЗОЛОТО	<b>Hg</b> 200.59 РУТУТЬ	<b>Tl</b> 204.37 ТАЛЛИЙ	<b>Pb</b> 207.19 СВИНЕЦ	<b>Bi</b> 208.98 ВИСМУТ	<b>Po</b> [210] ПОЛОНИЙ	<b>At</b> [210] АСТАТ	<b>Rn</b> [222] РАДОН										
7	10	<b>Fr</b> [223] ФРАНЦИЙ	<b>Ra</b> [226] РАДИЙ	89–103 АКТИНОИДЫ		<b>Rf</b> [261] РЕЗЕРФОРДИЙ	<b>Db</b> [262] ДУБИНИЙ	<b>Sg</b> [263] СНВБОРГИЙ	<b>Bh</b> [262] БОРИЙ	<b>Hn</b> [265] ХАНИЙ	<b>Mt</b> [268] МЕЙТНЕРИЙ								
		ВЫСШИЕ ОКСИДЫ		$R_2O$	$RO$	$R_2O_3$	$RO_2$	$R_2O_5$	$RO_3$	$R_2O_7$	$RO_4$								
		ЛЕТУЧИЕ ВОДОРОДНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ				$RH_4$	$RH_3$	$H_2R$	$HR$										

ЛАНТАНОИДЫ														
57 <b>La</b> ЛАНТАН 138.906	58 <b>Ce</b> ЦЕРИЙ 140.12	59 <b>Pr</b> ПРАЗЕОДИЙ 140.908	60 <b>Nd</b> НЕОДИМ 144.24	61 <b>Pm</b> ПРОМЕТИЙ [145]	62 <b>Sm</b> САМАРИЙ 150.4	63 <b>Eu</b> ЕВРОПИЙ 151.96	64 <b>Gd</b> ГАДОЛИНИЙ 157.25	65 <b>Tb</b> ТЕРБИЙ 158.925	66 <b>Dy</b> ДИСПРОЗИЙ 162.5	67 <b>Ho</b> ГОЛЬМИЙ 164.93	68 <b>Er</b> ЭРБИЙ 167.26	69 <b>Tm</b> ТУЛЬМИЙ 168.934	70 <b>Yb</b> ИТТЕРБИЙ 173.04	71 <b>Lu</b> ЛЮТЕЦИЙ 174.97

АКТИНОИДЫ														
89 <b>Ac</b> АКТИНИЙ [227]	90 <b>Th</b> ТОРИЙ 232.038	91 <b>Pa</b> ПРОТАКТИНИЙ [231]	92 <b>U</b> УРАН 238.029	93 <b>Np</b> НЕПТУНИЙ [237]	94 <b>Pu</b> ПЛУТОНИЙ [244]	95 <b>Am</b> АМЕРЦИЙ [243]	96 <b>Cm</b> КЮРИЙ [247]	97 <b>Bk</b> БЕРКЛИЙ [247]	98 <b>Cf</b> КАЛИФОРНИЙ [251]	99 <b>Es</b> ЭЙНШТЕЙНИЙ [254]	100 <b>Fm</b> ФЕРМИЙ [257]	101 <b>Md</b> МЕНДЕЛЕВИЙ [258]	102 <b>No</b> НОБЕЛИЙ [259]	103 <b>Lr</b> ЛОУРЕНСИЙ [260]

**Ядерные силы притяжения начинают преобладать над силами электростатического отталкивания на расстояниях менее  $10^{-15}$  м.**

**Чтобы сблизить ядра на такое расстояние газ нужно нагреть**

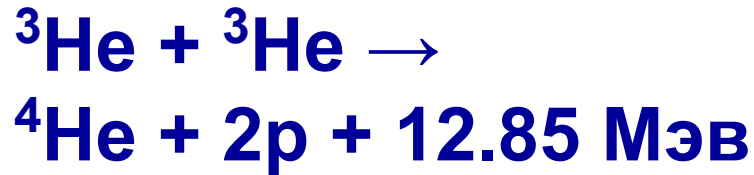
**Чем больше заряд сталкивающихся ядер, тем сильнее надо нагреть газ**



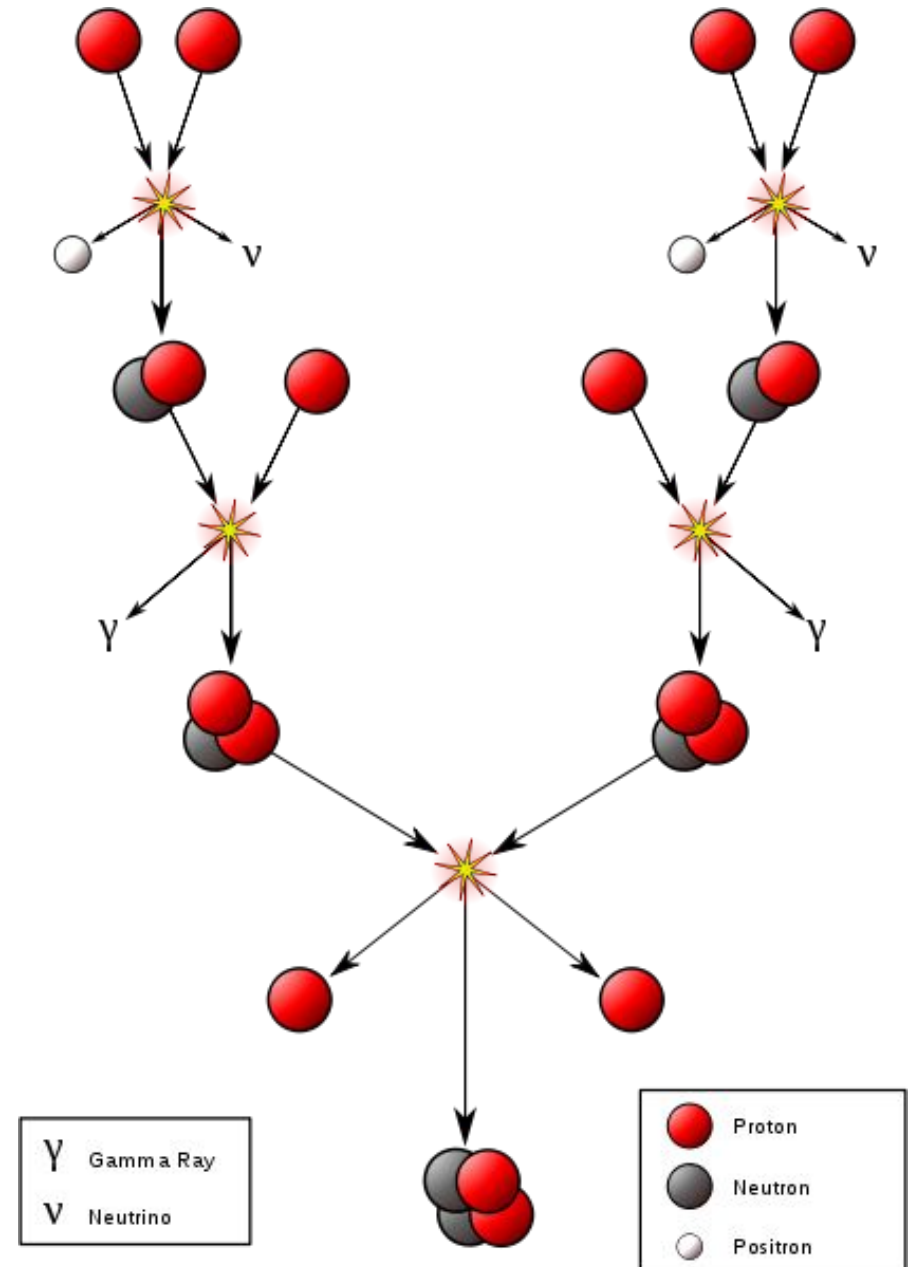
**СЛЕДОВАТЕЛЬНО:**

- 1) термоядерные реакции протекают в центральных областях звезд, т.е. там, где самая высокая температура
- 2) в данный момент может «гореть» только один вид ядерного топлива. Например, в центре Солнца  $4 \text{ H} \rightarrow \text{He}$ , но нет  $3 \text{ He} \rightarrow \text{C}$ .

# ПРОТОН-ПРОТОННАЯ ЦЕПОЧКА В ЯДРЕ СОЛНЦА



Дефект массы - 0.007



# ПОЧЕМУ СВЕТЯТ ЗВЕЗДЫ?

•ЕЖЕСЕКУНДНО

4 МИЛЛИОНА ТОНН ВОДОРОДА В ЯДРЕ СОЛНЦА  
ПРЕВРАЩАЮТСЯ В ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЕ,  
СОГЛАСНО ФОРМУЛЕ ЭЙНШТЕЙНА

$$E = mc^2$$

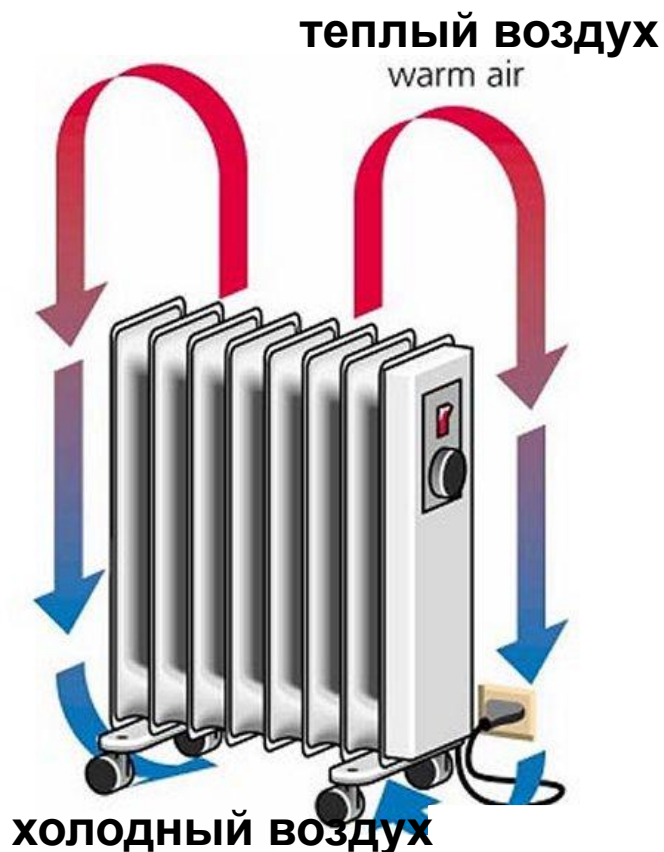
ЭТО И ЕСТЬ  
ИСТОЧНИК ЭНЕРГИИ СОЛНЦА И ДРУГИХ ЗВЁЗД





# ВЫДЕЛЯЮЩЕЕСЯ В ЦЕНТРАЛЬНЫХ ОБЛАСТЯХ ЗВЕЗДЫ ТЕПЛО ПЕРЕНОСИТСЯ К ЕЁ ПОВЕРХНОСТИ

В звездах перенос тепла происходит либо излучением, либо конвекцией.

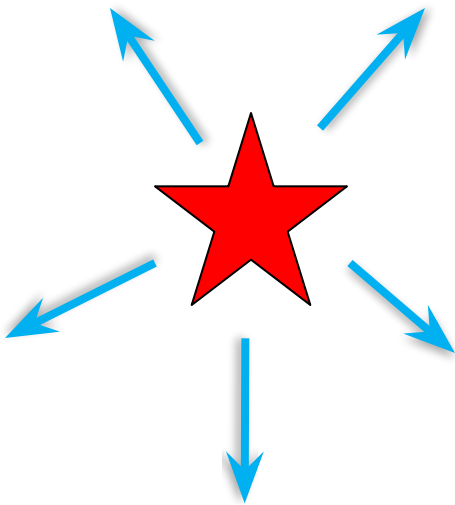


**Конвекция не только переносит тепло, но и перемешивает вещество звезды, вынося продукты ядерных превращений на ее поверхность**



# **ЗВЕЗДА - ЭТО ХОЛОДИЛЬНИК НАОБОРОТ !**

**Звезда излучает энергию в окружающее пространство. Если у нее нет источников ядерной энергии, то для того, чтобы скомпенсировать уносимую излучением энергию звезда должна сжиматься.**



**Из-за того, что при сжатии сохраняется механическое равновесие звезды, только половина работы сил тяготения идет на компенсацию потерь на излучение, а вторая половина – на нагрев вещества звезды.**

**Это приводит к тому, что если у звезды нет источников ядерной энергии, то с течением времени ее центральные области становятся все более плотными и горячими.**

**ПРИ ЭТОМ ВНЕШНИЕ СЛОИ, КАК ПРАВИЛО, РАСШИРЯЮТСЯ !!!**

**Звезды эволюционируют,  
т.е. меняют свою структуру,  
Химический состав, светимость и температуру  
ТОЛЬКО потому что излучают,  
т.е. теряют тепловую энергию**

**ЗВЕЗДА – НЕЗАМКНУТАЯ СИСТЕМА !!!!**

# Что известно о звездах и как это узнали ?

Информация о звездах получена путем сравнения наблюдений с результатами расчета их внутреннего строения

## Наблюдения:

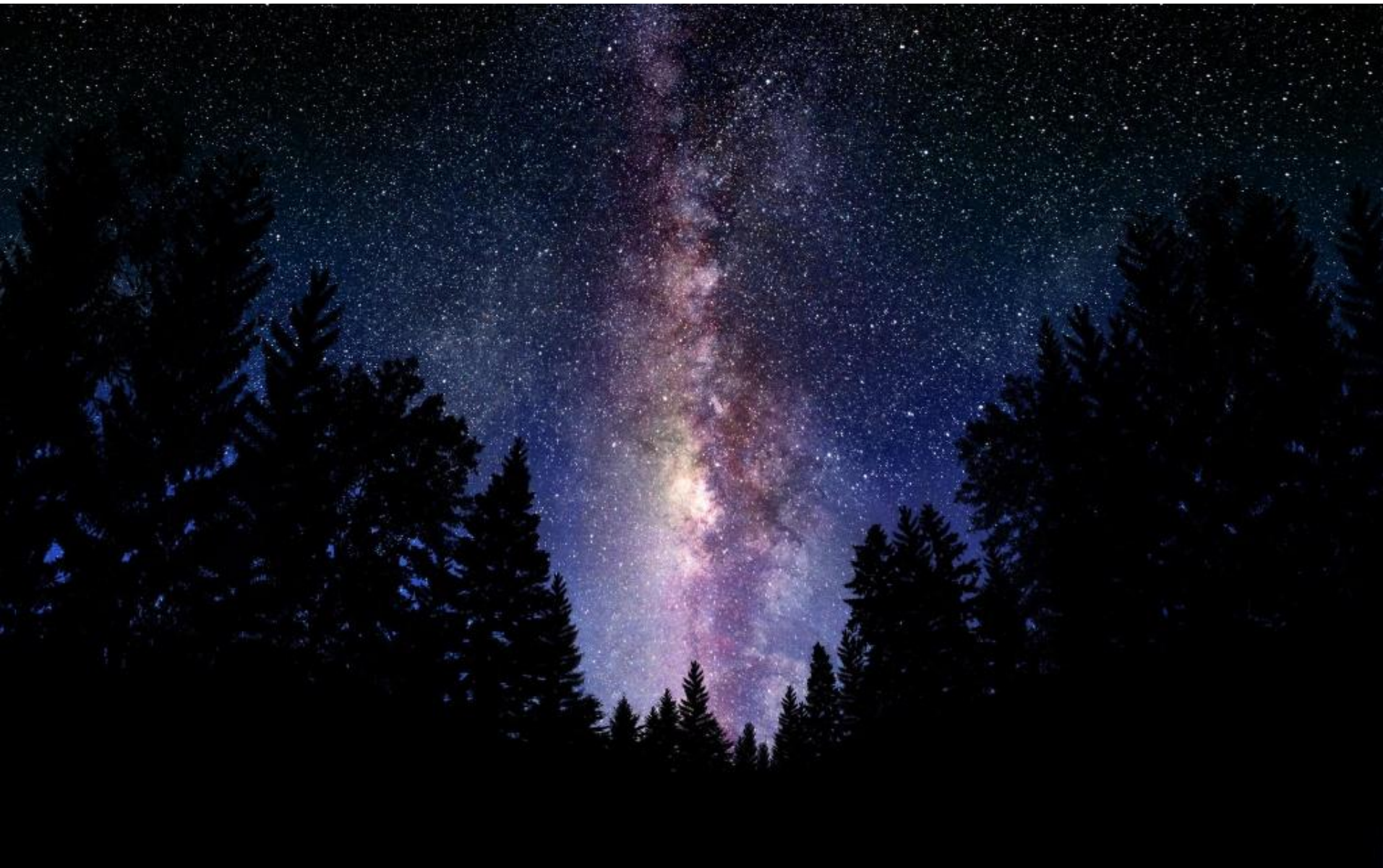
- Поверхностные слои  
температура, светимость и химический состав
- Внутренние области  
астросейсмология, нейтринное излучение

## Расчеты моделей звезд:

- внутреннее строение и эволюция звезд разной массы



# Млечный путь



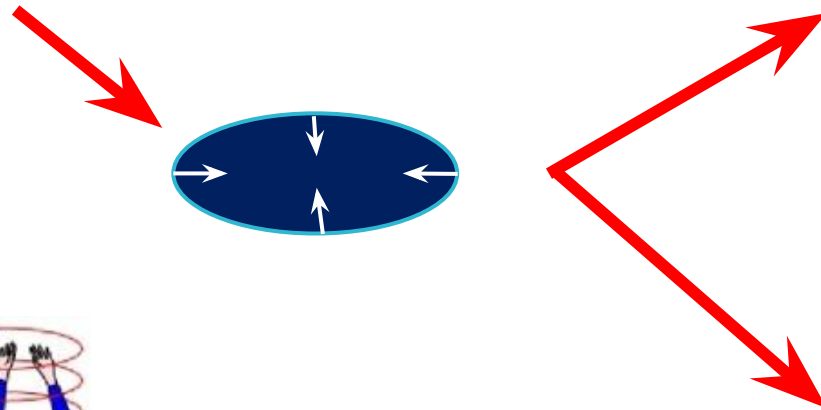
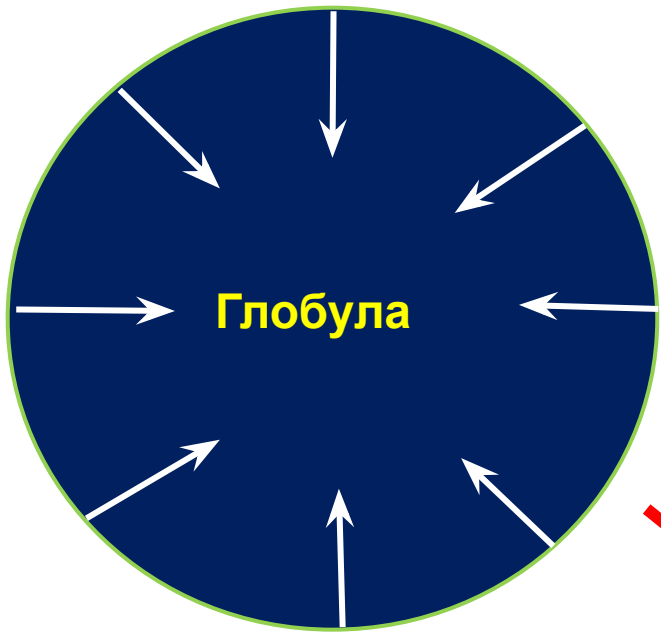
# ГЛОБУЛЫ – ЗАРОДЫШИ ЗВЕЗД



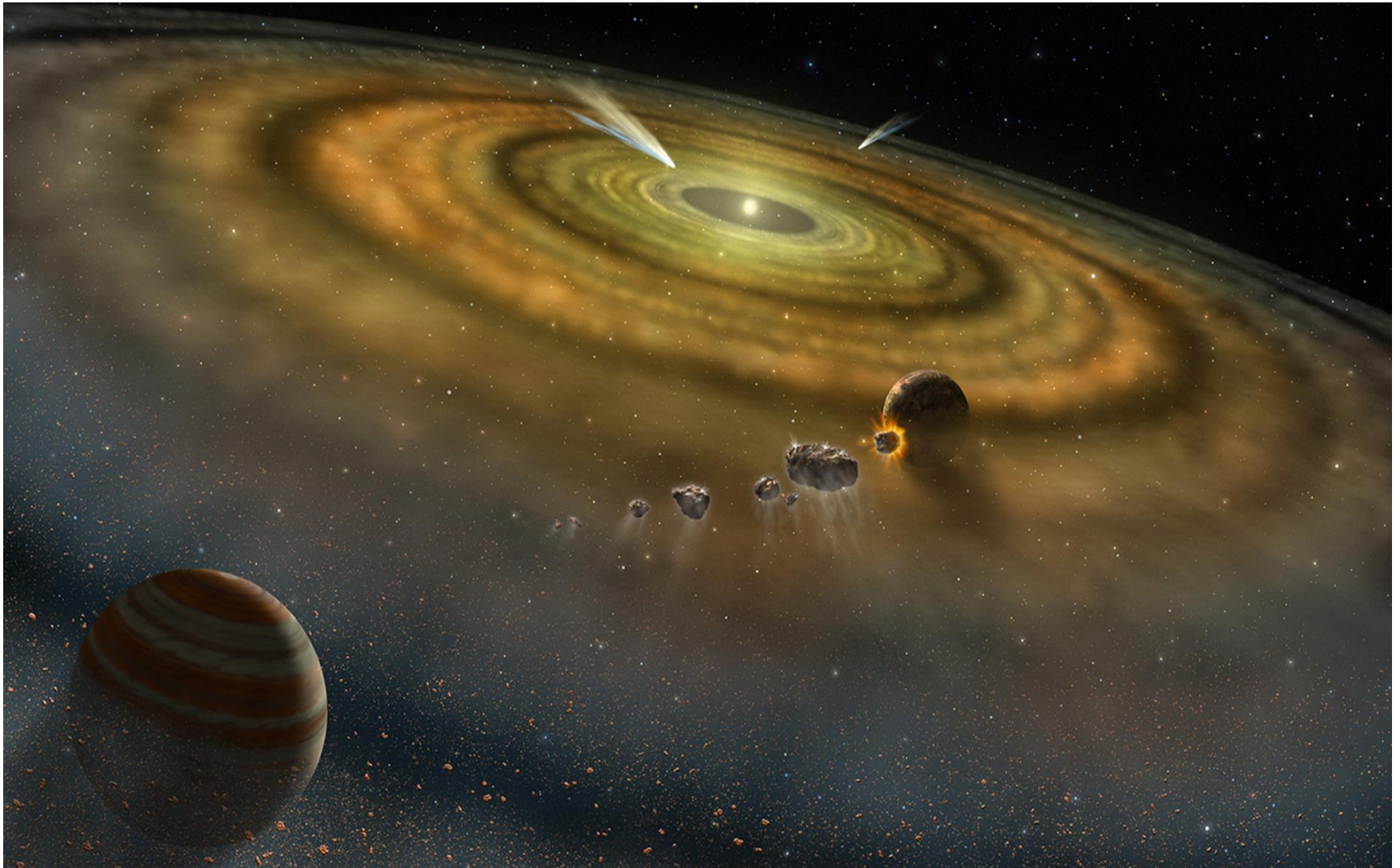
Pre-Collapse Black Cloud B68 (visual view)  
(VLT ANTU + FORS 1)



AAT 77

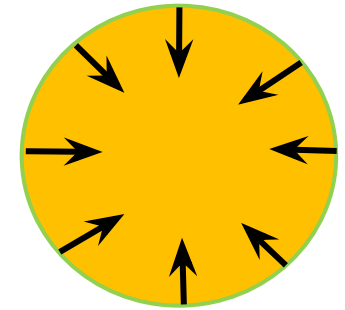


# ФОРМИРОВАНИЕ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ В ПРЕДСТАВЛЕНИИ ХУДОЖНИКА





**Протозвездное облако теряет энергию, излучая ее с поверхности в окружающее пространство, и поэтому вынуждено сжиматься**



**По мере сжатия зародыша звезды температура в ее центральной области растет и когда достигает  $\approx 5$  млн К, начинаются термоядерные реакции. Сжатие прекращается и возникает **звезда главной последовательности.****



**У протозвездных облаков с  $M < 0.1 M_{\odot}$  температура никогда не поднимается выше 3 млн К и они будут сжиматься вечно.**

**Такие объекты - не звезды, а коричневые карлики**

# Рост $T_c$ у коричневых карликов ограничивает «вырождение» электронного газа.

Любая частица имеет свойство волны, длина которой  $\lambda = h / mv$   
(длина волны де Бройля),  
где  $h$  – постоянная Планка,  $m$  – масса частицы,  $v$  – скорость частицы.

В центре Солнца у электронов  $\lambda \ll$  расстояния между ними  $r$ .  
Электрону «все равно», точечный его сосед или имеет размер  $\lambda$ .

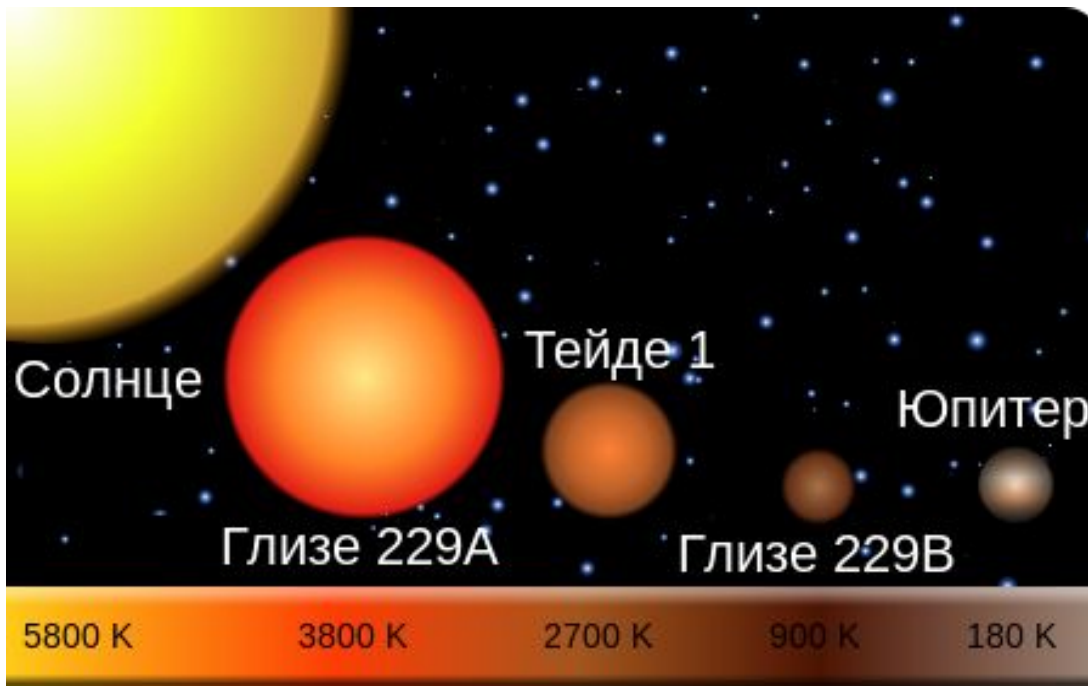
Чем меньше  $T$  газа, тем меньше скорость его частиц  $v$  и больше  $\lambda$ ,  
а чем выше плотность газа, тем меньше  $r$ .

Поэтому если при данной температуре повышать плотность газа,  
то в какой-то момент окажется, что  $r < \lambda$ .  
**Газ станет «вырожденным» -- квантовым**

**У вырожденного газа давление сильно зависит от плотности,  
почти не зависит от температуры  
и не равно нулю даже при  $T = 0$**

В результате при сжатии коричневого карлика из-за вырождения электронного газа растет только плотность, а не температура

Т.к.  $T_c < 3$  млн К, в центре этих объектов может гореть только дейтерий, но его мало и он быстро кончается.



**У объектов с  $M < 0.01 M_{\odot}$   
не загорается даже  
дейтерий – это планеты**

# СПЕКТРАЛЬНЫЕ КЛАССЫ ЗВЕЗД

- Спектры звезд различаются по числу линий и их интенсивности
- Звезды с одинаковой температурой имеют сходные спектры
- Гарвардская классификация спектров звезд

***O - B - A - F - G - K - M***

- Правило для запоминания:

**O, Be A Fine Girl, Kiss Me**

# СВЯЗЬ МЕЖДУ ПАРАМЕТРАМИ ЗВЕЗД

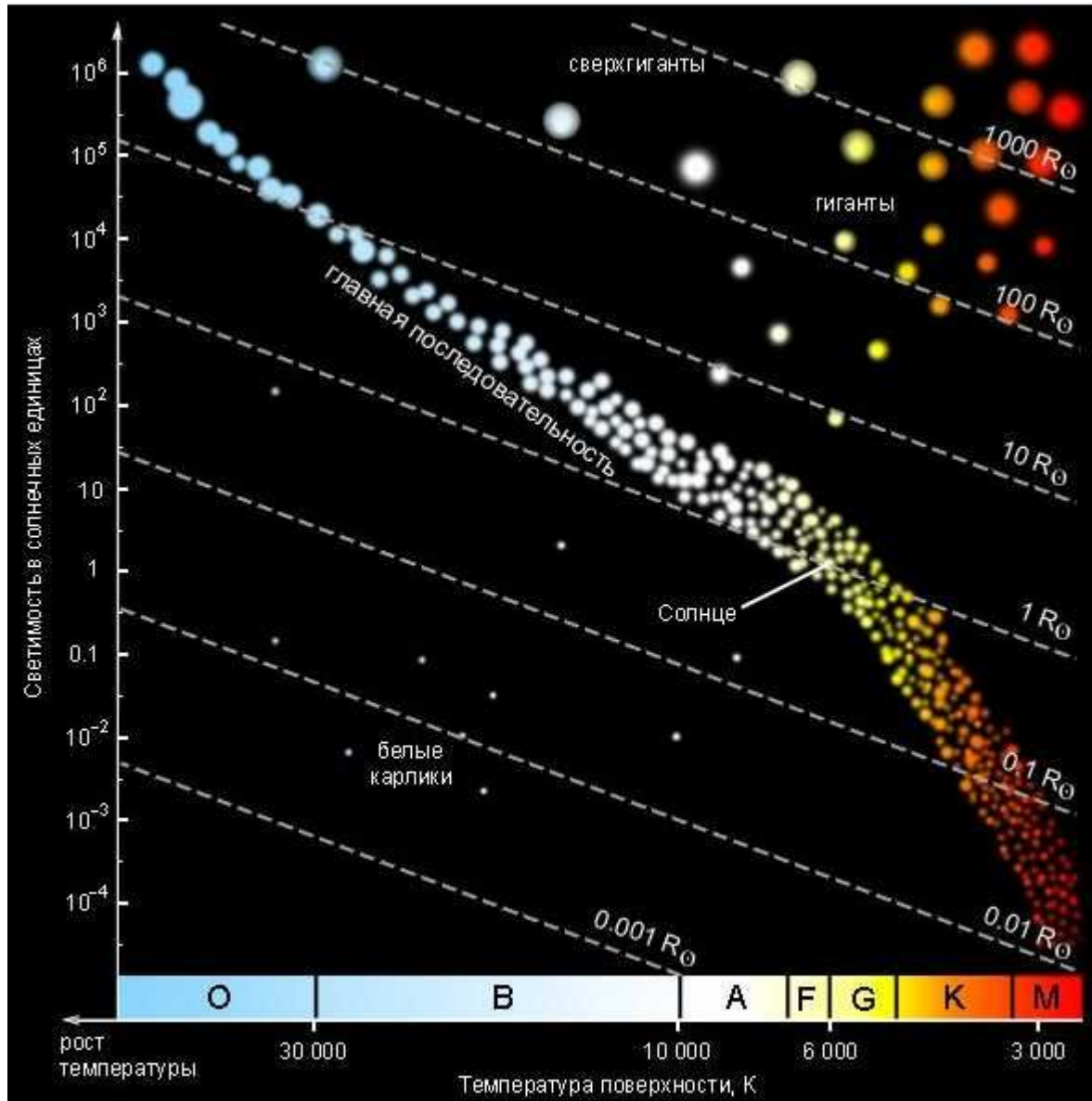


Диаграмма  
Герцшпрунга-  
Рассела

спектр-  
светимость

цвет-светимость

температура-  
светимость

# СВЯЗЬ МЕЖДУ ПАРАМЕТРАМИ ЗВЕЗД

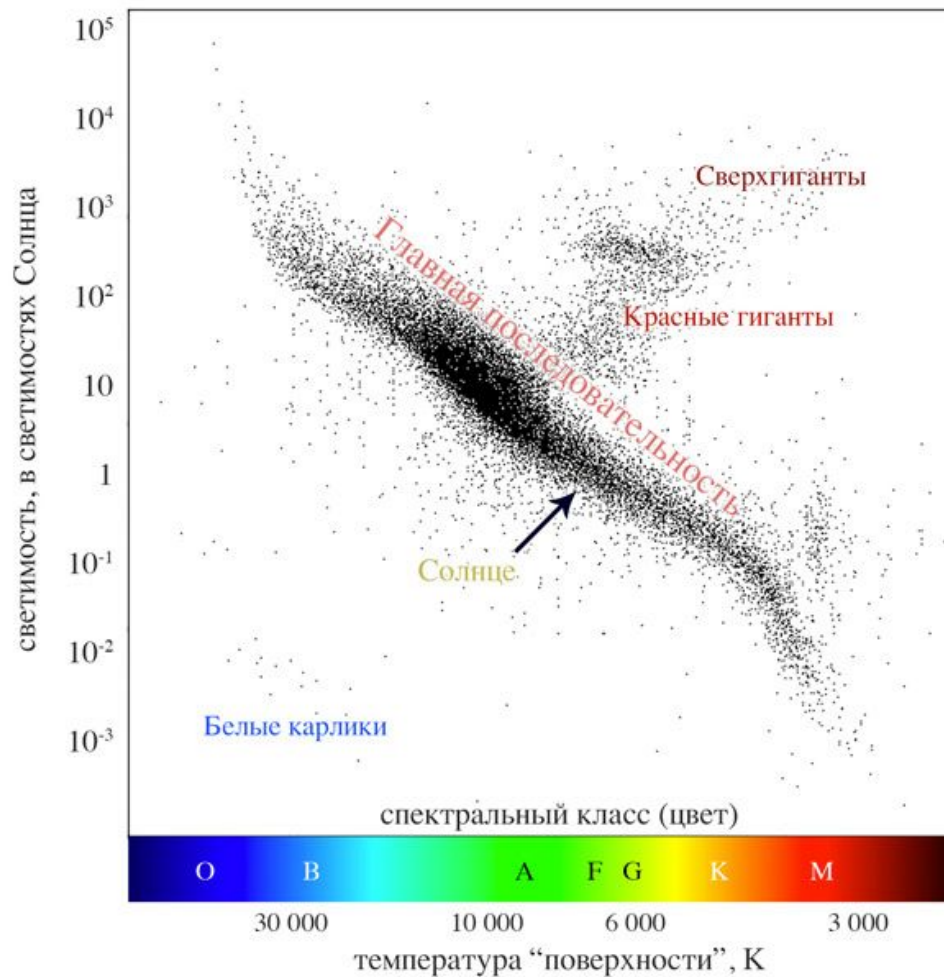


Диаграмма  
Герцшпрунга-  
Рассела

спектр-  
свечетимость

цвет-свечетимость

температура-  
свечетимость

# СВЯЗЬ МЕЖДУ ПАРАМЕТРАМИ ЗВЕЗД

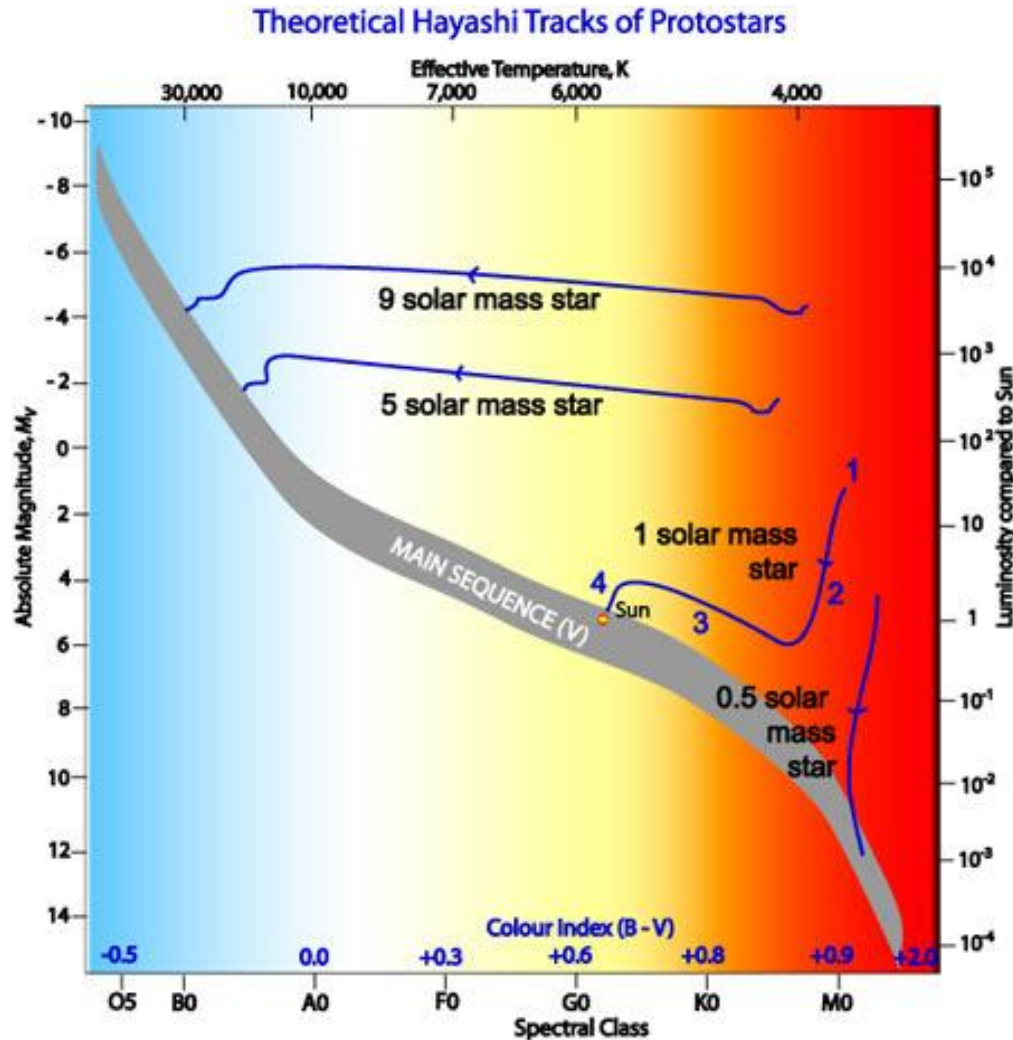


Диаграмма  
Герцшпрунга-  
Рассела

спектр-  
светимость

цвет-светимость

температура-  
светимость

# СВЯЗЬ МЕЖДУ ПАРАМЕТРАМИ ЗВЕЗД

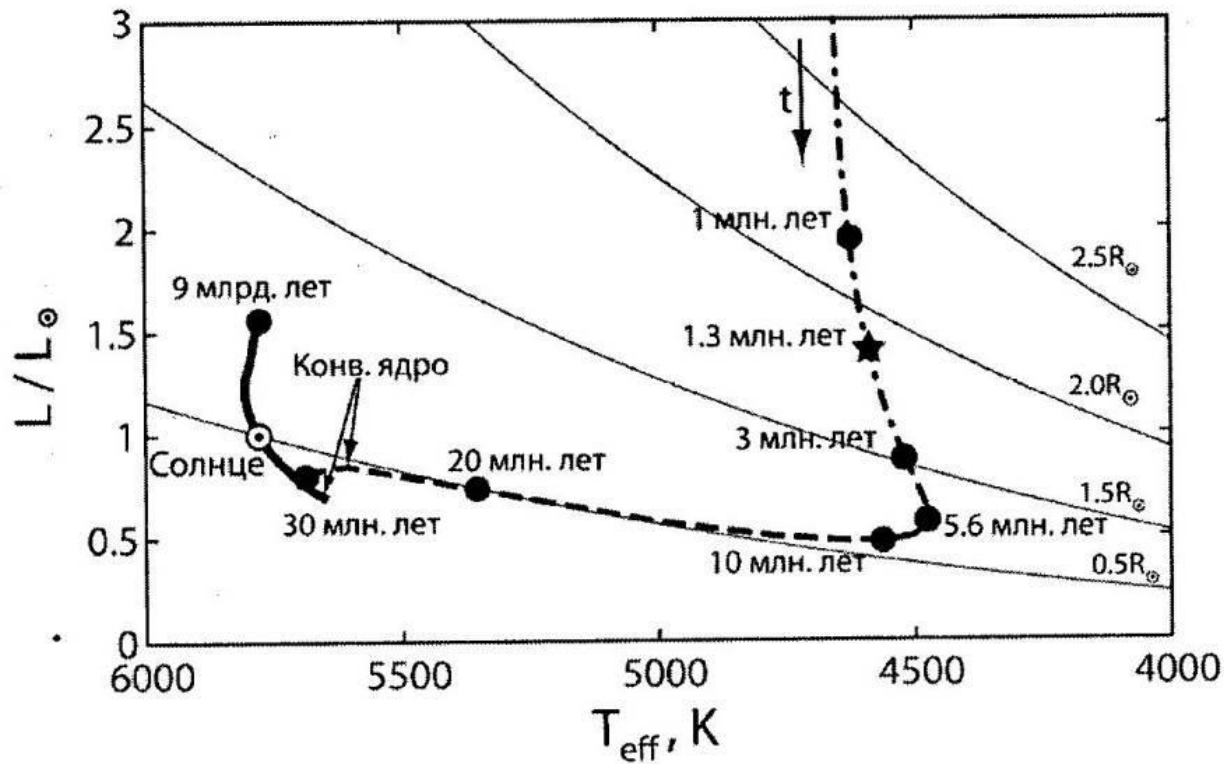


Диаграмма  
Герцшпрунга-  
Рассела

спектр-  
светимость

цвет-светимость

температура-  
светимость



# СВЯЗЬ МЕЖДУ ПАРАМЕТРАМИ ЗВЕЗД

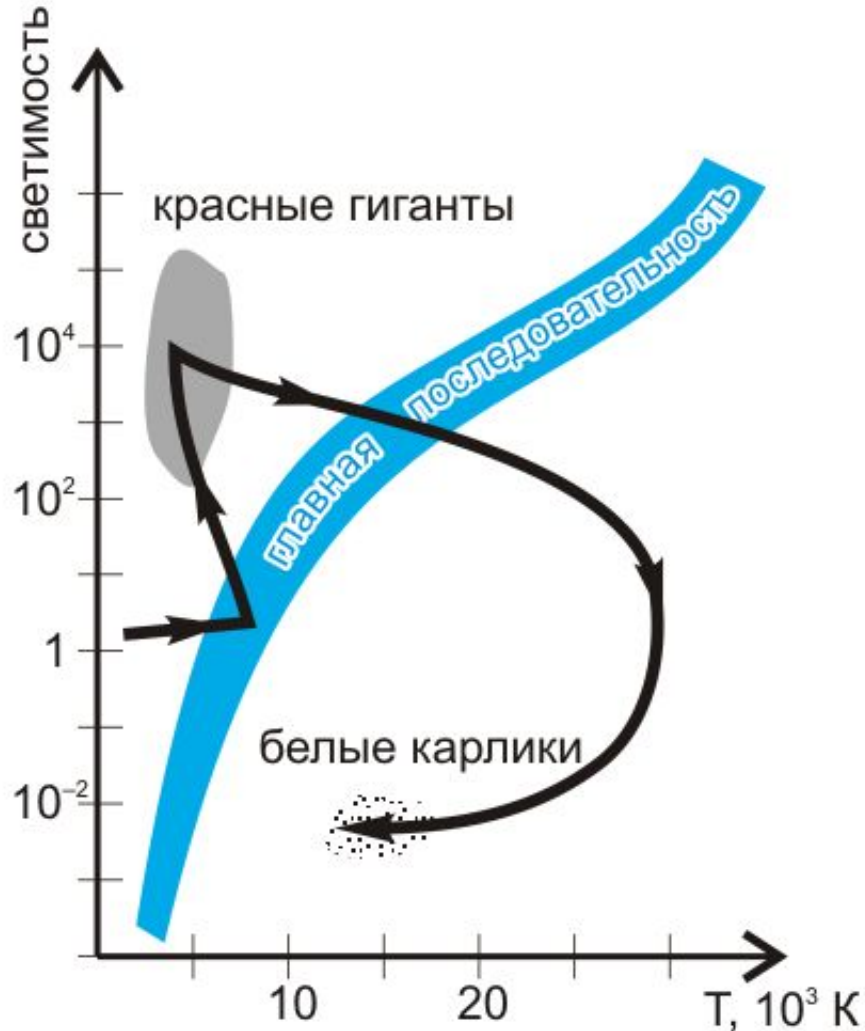


Диаграмма  
Герцшпрунга-  
Рассела

спектр-  
светимость

цвет-светимость

температура-  
светимость

# СВЯЗЬ МЕЖДУ ПАРАМЕТРАМИ ЗВЕЗД

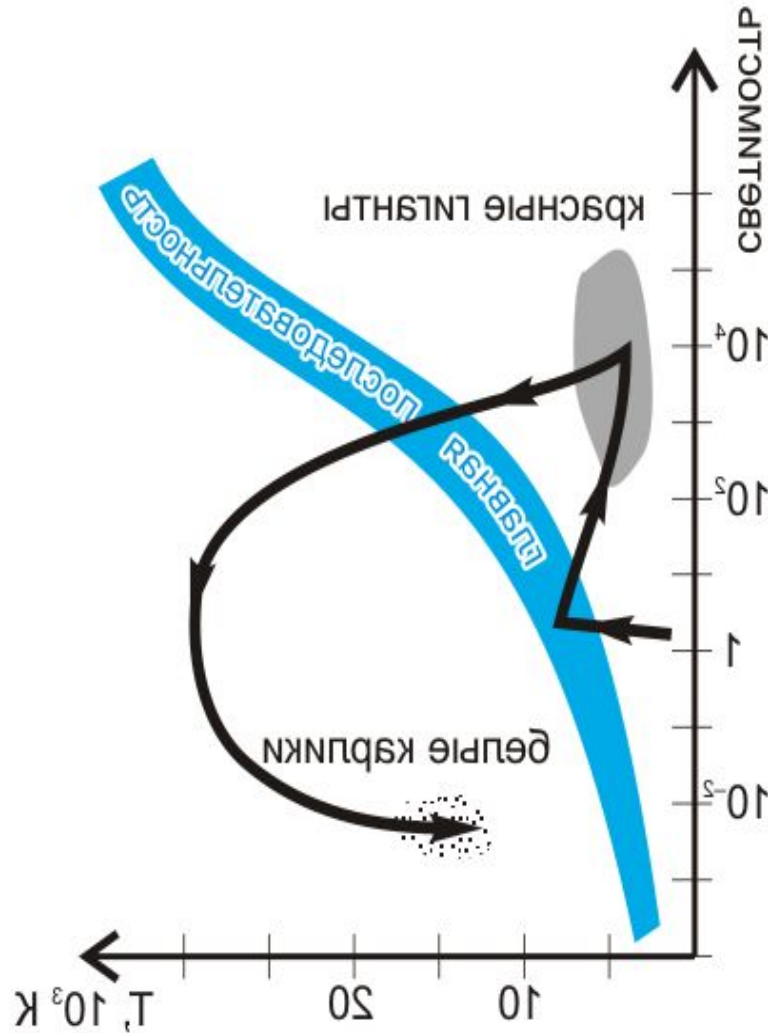


Диаграмма  
Герцшпрунга-  
Рассела

спектр-  
светимость

цвет-светимость

температура-  
светимость

# СВЯЗЬ МЕЖДУ ПАРАМЕТРАМИ ЗВЕЗД

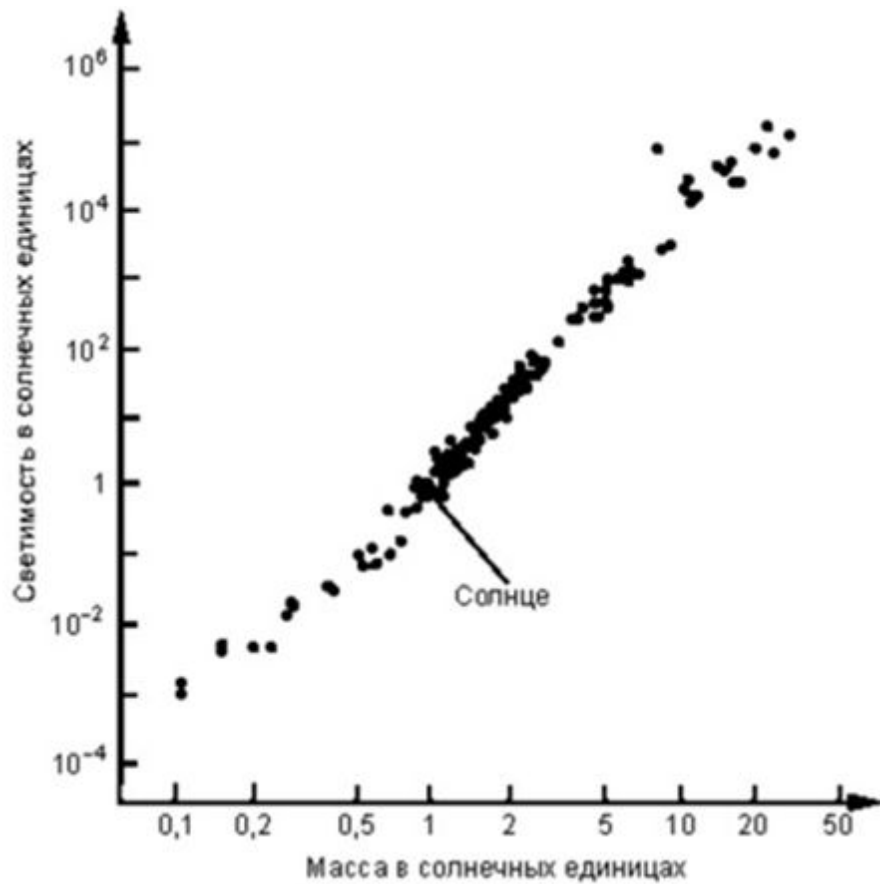
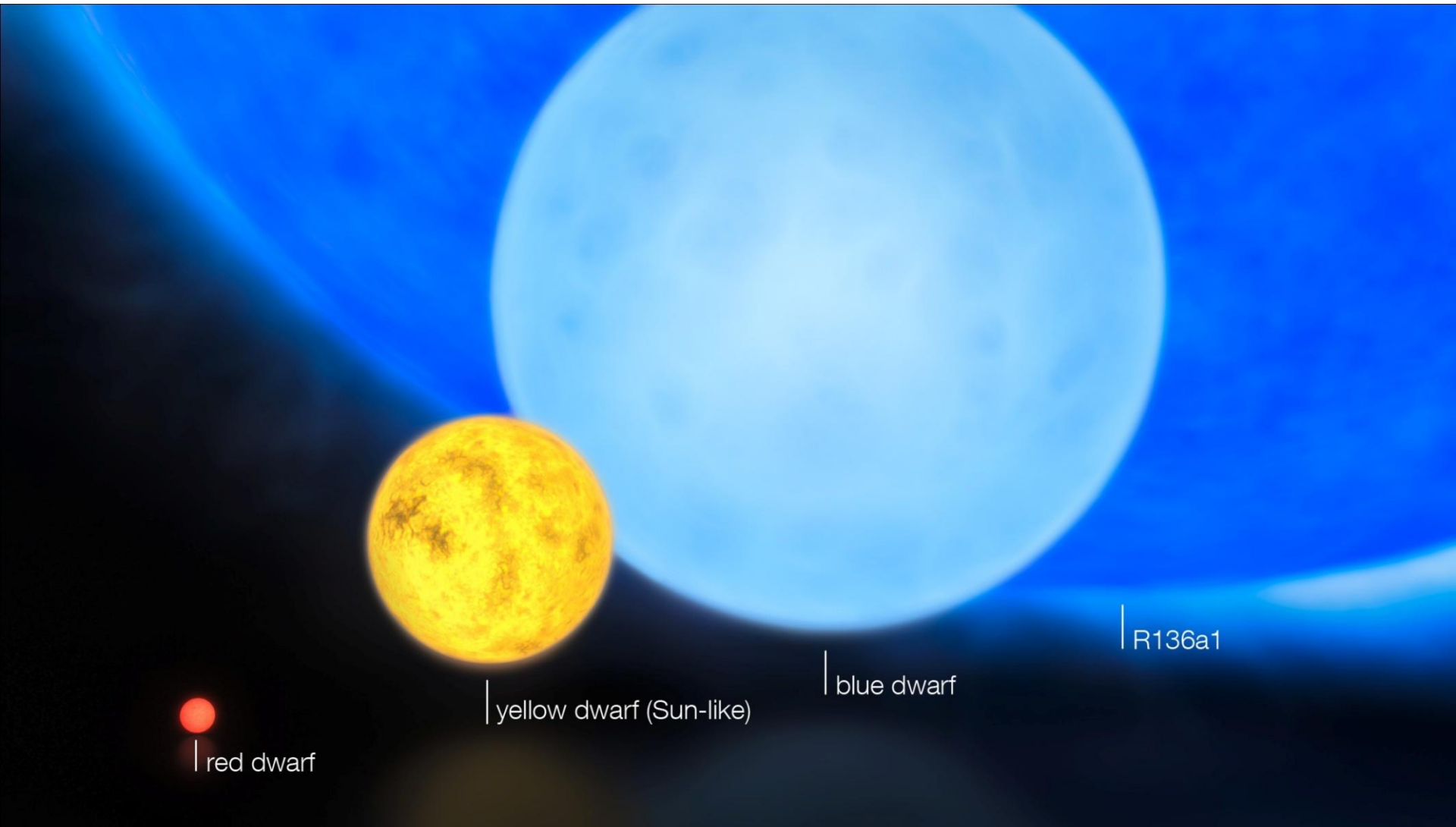




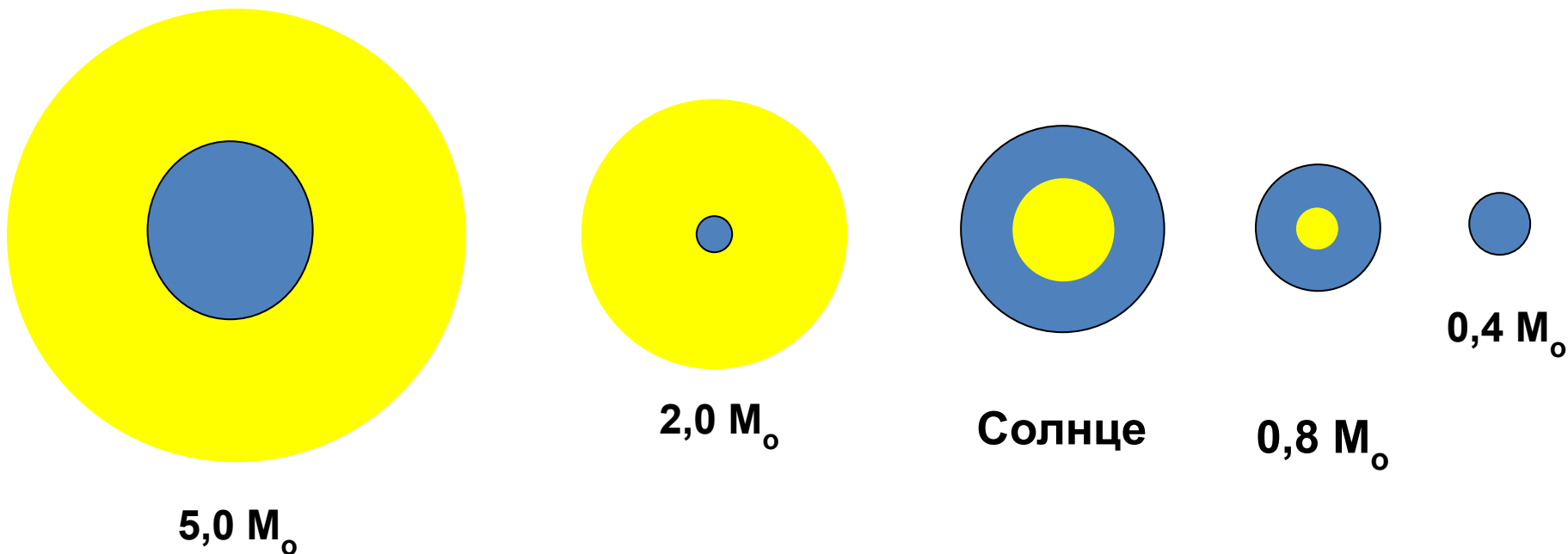
Диаграмма  
масса-светимость

$$L = M^{3,9}$$

# Солнце – средняя по всем параметрам звезда Галактики...



ПОЛОЖЕНИЕ И РАЗМЕРЫ ЗОН  
ЛУЧИСТОГО  И КОНВЕКТИВНОГО   
ПЕРЕНОСА ТЕПЛА  
У ЗВЕЗД ГЛАВНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ  
РАЗНЫХ МАСС



Светимость  $L \sim M^{3,9}$

# ЧТО ПРОИСХОДИТ СО ЗВЕЗДАМИ РАЗНОЙ МАССЫ ПОСЛЕ ТОГО, КАК ОНИ ПОКИДАЮТ ГЛАВНУЮ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ?

Начнем со звезд с  $M < \text{примерно } 10 M_{\odot}$   
(включая Солнце!).

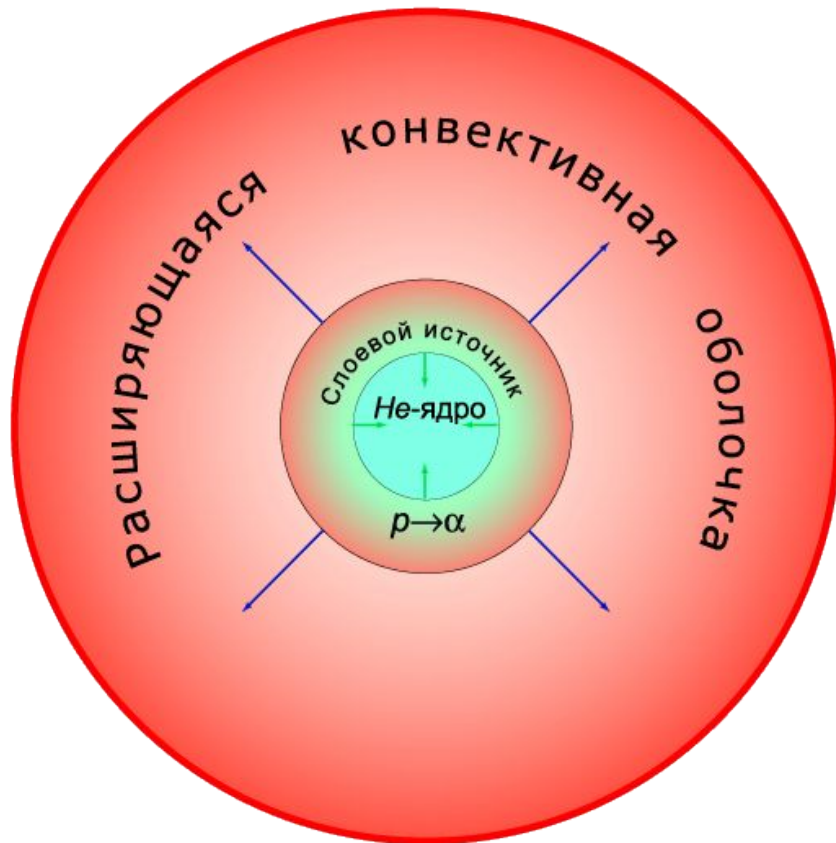
После того как водород в центральных областях звезды превратился в гелий, эти области начинают сжиматься, а внешние, наоборот, расширяться и становиться все холоднее и холоднее.

Когда  $T$  ядра достигает величины  $\approx 200$  млн. К, начинает гореть гелий. К этому моменту звезда увеличивает свой первоначальный радиус примерно в 10 раз, а  $T_{\text{ef}}$  падает до  $\approx 2000\text{-}3000$  К

## **ЗВЕЗДА СТАНОВИТСЯ КРАСНЫМ ГИГАНТОМ**

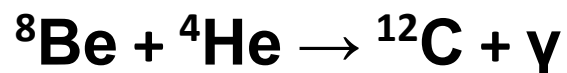
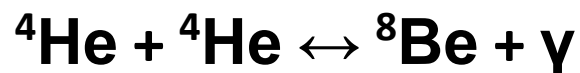
# ЧТО ПРОИСХОДИТ СО ЗВЕЗДАМИ РАЗНОЙ МАССЫ ПОСЛЕ ТОГО, КАК ОНИ ПОКИДАЮТ ГЛАВНУЮ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ?

## Строение красного гиганта

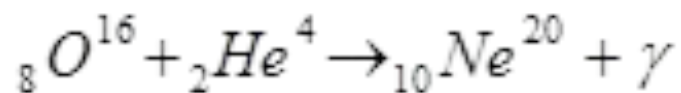
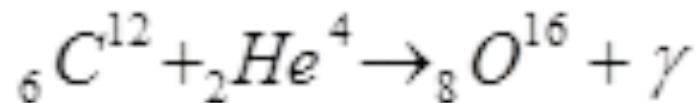


Красный гигант состоит из гелиевого ядра, окруженного тонким слоем, в котором «горит» водород, над которым располагается протяженная оболочка

При более высоких температурах в ядре звезды реализуется тройной альфа-процесс (гелиевый цикл)



Температура ядра растет до 200 млн К



Температура ядра растет до 600 млн К



**Когда  $\text{He}_4$  кончается, C-O ядро сжимается и нагревается, но не настолько, чтобы эти элементы «загорелись» !**

## **МЕШАЕТ ВЫРОЖДЕНИЕ ГАЗА ЭЛЕКТРОНОВ**

- **Образуется плотное ( $\sim 1 \text{ т/см}^3$ ) ядро, оболочка улетает**
- **Остается горячий белый карлик, который остывает**

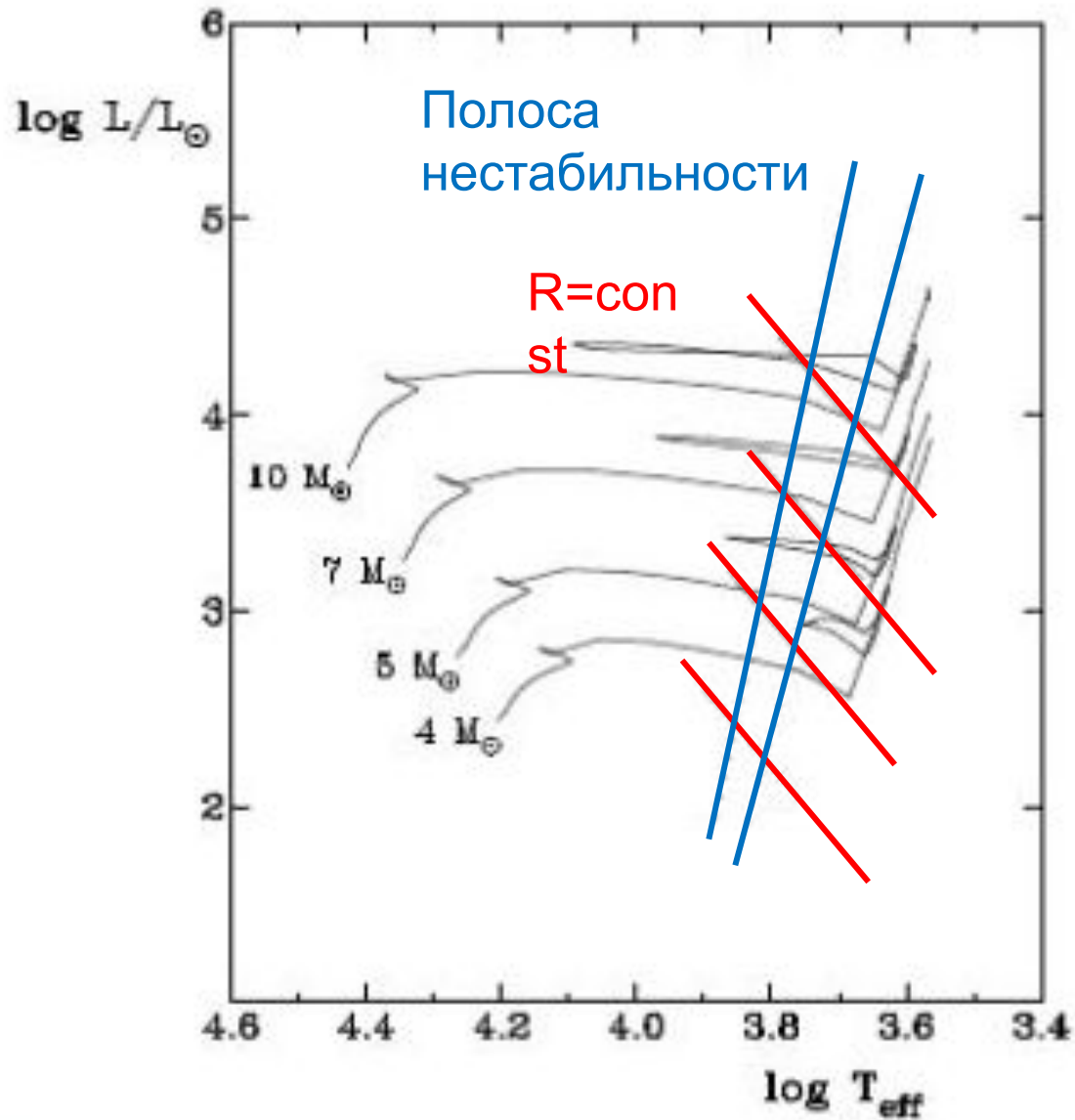
**Загадка красного Сириуса...**

# ПЛАНЕТАРНЫЕ ТУМАННОСТИ – СБРОС ОСТАТКОВ ОБОЛОЧКИ ЗВЕЗДЫ, ОБОГАЩЕННОЙ ЭЛЕМЕНТАМИ НЕ, С, О



От звезды остается  
горячее компактное сверхплотное С-О ядро,  
которое остывает  
и превращается в белый карлик

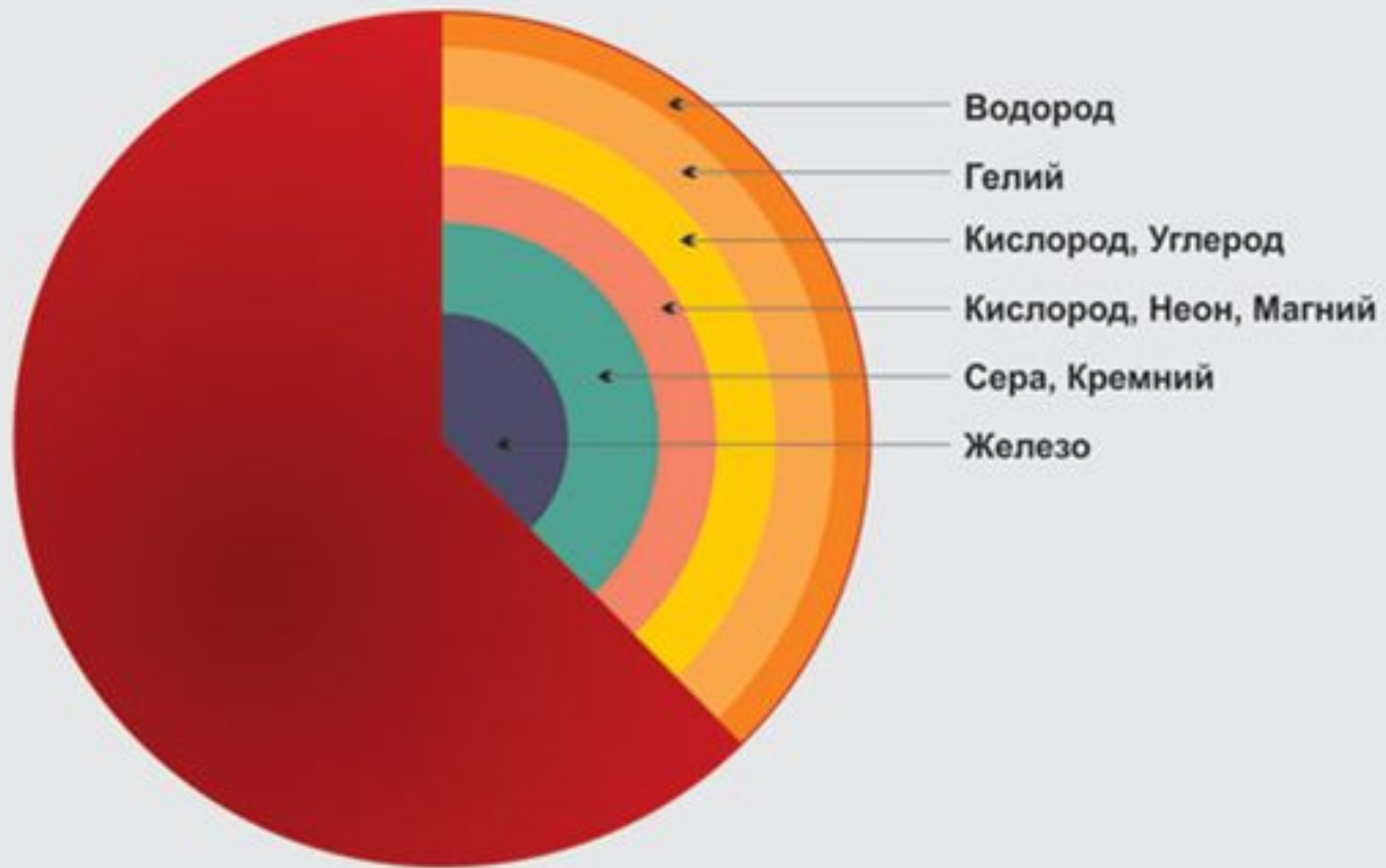
Пересекая полосу неустойчивости цефеиды могут как увеличивать, так и уменьшать радиус (период!)



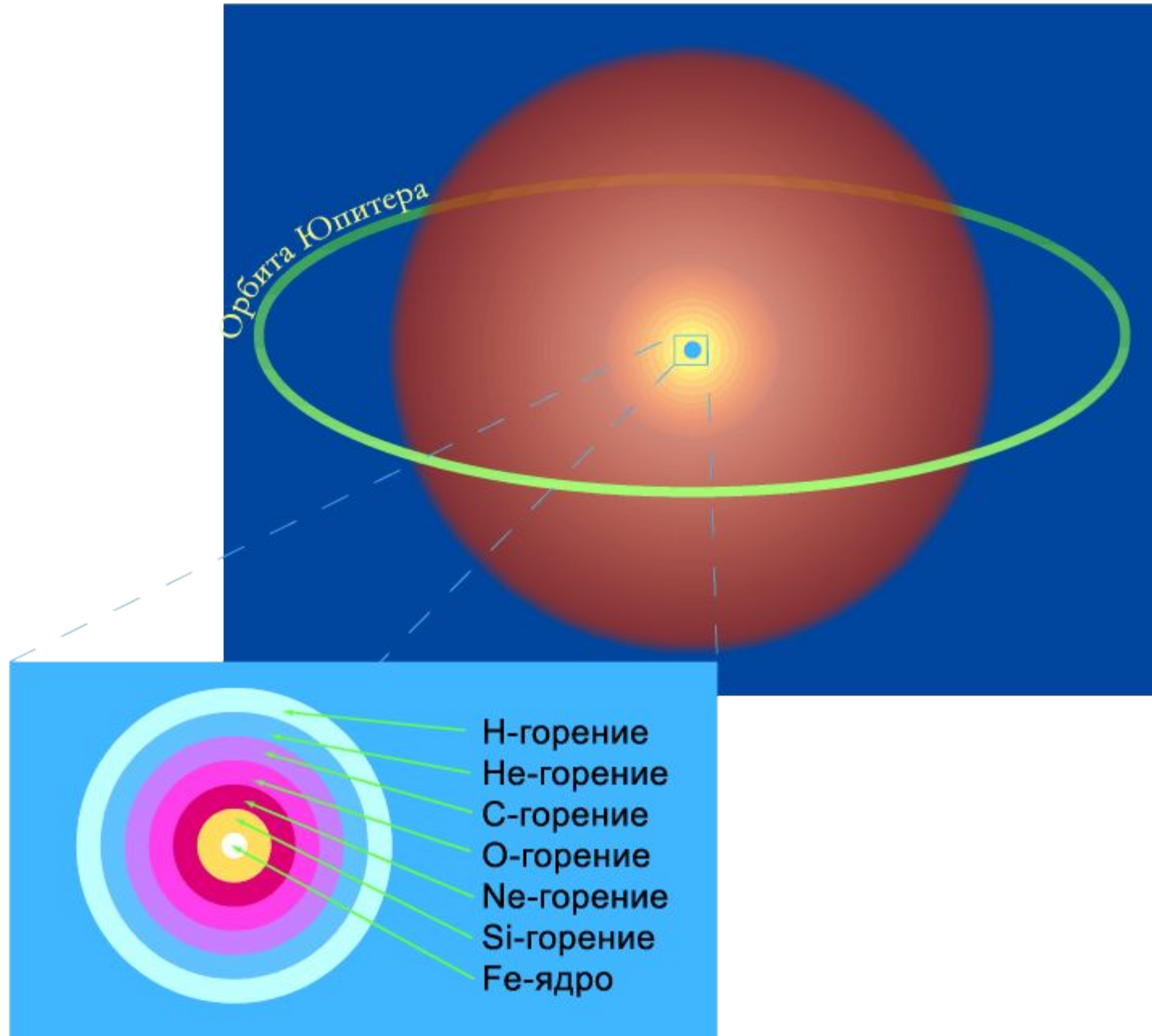
# СХЕМАТИЧЕСКИ ЭВОЛЮЦИЯ ЗВЕЗДЫ С МАССОЙ 10-60 $M_{\odot}$

- $4 \text{H}_1 \text{ ----> He}_4$  : формируется гелиевое ядро
- водород кончается, гелиевое ядро сжимается и нагревается;
- при  $T \sim 100$  млн К начинает гореть гелий:  
 $3 \text{He}_4 \text{ ----> C}_{12}$  ,  $\text{He}_4 + \text{C}_{12} \text{ ----> O}_{16}$   
формируется углеродно-кислородное ядро;
- гелий кончается, углеродное ядро сжимается, нагревается  
и при  $T \sim 10^9$  К загорается С и О:  
 $\text{C}_{12} + \text{C}_{12} \text{ ----> Mg}_{24}$  ,  $\text{O}_{16} + \text{O}_{16} \text{ ----> S}_{32}$
- и т. д. вплоть до образования ядра из  $\text{Fe}_{56}$

# Строение звезды



# Строение сверхгиганта



**.Синтез элементов тяжелее железа происходит с поглощением тепла, поэтому при сжатии ядра его температура растет довольно медленно.**

**В результате давление газа в центре звезды больше не может противостоять гравитации, механическое равновесие нарушается, ядро начинает стремительно сжиматься.**

**За 0.001 с железное ядро превращается либо в нейтронную звезду ( $M \approx 1 M_{\odot}$ ,  $R \approx 10$  км, плотность  $\sim 10^9$  т/см<sup>3</sup>), либо в черную дыру.**

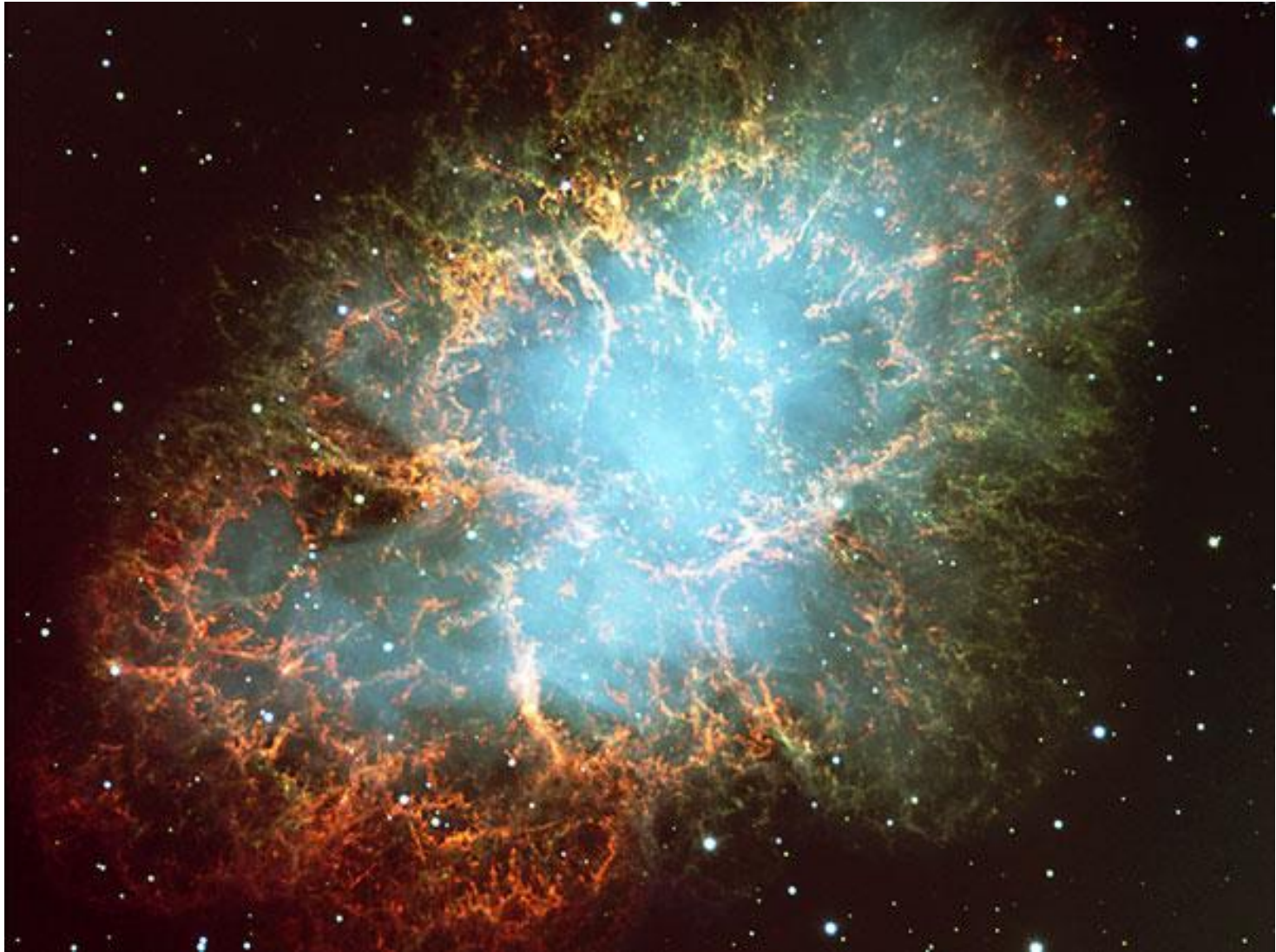
**Падающее на ядро вещество, богатое ядерным топливом, оказывается в области очень высокой температур, мгновенно «сгорает» – происходит термоядерный взрыв.**

**Звезды являются фабриками  
химических элементов в нашей  
Вселенной**

**Элементы тяжелее железа  
генерируются во время взрывов  
сверхновых звезд и  
столкновений в тесных двойных  
системах**



**КРАБОВИДНАЯ ТУМАННОСТЬ –  
ОСТАТОК ВСПЫШКИ СВЕРХНОВОЙ.  
ВНУТРИ ТУМАННОСТИ РАСПОЛОЖЕНА  
НЕЙТРОННАЯ ЗВЕЗДА.**



# СТАРЫЙ ОСТАТОК ВСПЫШКИ СВЕРХНОВОЙ



**При взрыве сверхновой выделяется огромное количество тепла, часть которого тратится на синтез элементов тяжелее железа**





**ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ЭЛЕМЕНТОВ  
Д.И.МЕНДЕЛЕЕВА**

VII (H) VIII  
2 4.002602  
Гелий



Периодический закон открыт  
Д.И.МЕНДЕЛЕЕВЫМ в 1869 году

1	<b>H</b> 100794 ВОДОРОД							2	<b>He</b> 4.002602 Гелий					
2	<b>Li</b> 6,941 ЛИТИЙ	<b>Be</b> 9,012182 БЕРИЛЛИЙ	5	<b>B</b> 10,811 БОР	6	<b>C</b> 12,011 УГЛЕРОД	7	<b>N</b> 14,00674 АЗОТ	8	<b>O</b> 15,9994 КИСЛОРОД	9	<b>F</b> 18,9984032 ФТОР	10	<b>Ne</b> 20,1797 НЕОН
3	<b>Na</b> 22,989768 НАТРИЙ	<b>Mg</b> 24,3050 МАГНИЙ	13	<b>Al</b> 26,981539 АЛЮМИНИЙ	14	<b>Si</b> 28,0855 КРЕМНИЙ	15	<b>P</b> 30,973762 ФОСФОР	16	<b>S</b> 32,066 СЕРА	17	<b>Cl</b> 35,4527 ХЛОР	18	<b>Ar</b> 39,948 АРГОН
4	<b>K</b> 39,0983 КАЛИЙ	<b>Ca</b> 40,078 КАЛЬЦИЙ	<b>Sc</b> 44,955910 СКАНДИЙ	<b>Ti</b> 47,88 ТИТАН	<b>V</b> 50,9415 ВАНАДИЙ	<b>Cr</b> 51,9961 ХРОМ	<b>Mn</b> 54,93805 МАРГАНЕЦ	<b>Fe</b> 55,847 ЖЕЛЕЗО	<b>Co</b> 58,93320 КОБАЛЬТ	<b>Ni</b> 58,69 НИКЕЛЬ				
	29	<b>Cu</b> 63,546 МЕДЬ	<b>Zn</b> 65,39 ЦИНК	31	<b>Ga</b> 69,723 ГАЛЛИЙ	32	<b>Ge</b> 72,61 ГЕРМАНИЙ	33	<b>As</b> 74,92159 МЫШЬЯК	34	<b>Se</b> 78,96 СЕЛЕН	35	<b>Br</b> 79,904 БРОМ	36
5	<b>Rb</b> 85,4678 РУБИДИЙ	<b>Sr</b> 87,62 СТРОНЦИЙ	<b>Y</b> 88,90585 ИТРИЙ	<b>Zr</b> 91,224 ЦИРКОНИЙ	<b>Nb</b> 92,90638 НИОБИЙ	<b>Mo</b> 95,94 МОЛИБДЕН	<b>Tc</b> 97,9072 ТЕХНЕЦИЙ	<b>Ru</b> 101,07 РУТЕНИЙ	<b>Rh</b> 102,90550 РОДИЙ	<b>Pd</b> 106,42 ПАЛЛАДИЙ				
	47	<b>Ag</b> 107,8682 СЕРЕБРО	<b>Cd</b> 112,411 КАДМИЙ	49	<b>In</b> 114,82 ИНДИЙ	50	<b>Sn</b> 118,710 ОЛОВО	51	<b>Sb</b> 121,75 СУРЬМА	52	<b>Te</b> 127,60 ТЕЛЛУР	53	<b>I</b> 126,90447 ИОД	54
6	<b>Cs</b> 132,90543 ЦЕЗИЙ	<b>Ba</b> 137,327 БАРИЙ	<b>La</b> <sup>57</sup> - <b>Lu</b> <sup>71</sup> *	<b>Hf</b> 178,49 ГАФНИЙ	<b>Ta</b> 180,9479 ТАНТАЛ	<b>W</b> 183,85 ВОЛЬФРАМ	<b>Re</b> 186,207 РЕНИЙ	<b>Os</b> 190,2 ОСМИЙ	<b>Ir</b> 192,22 ИРИДИЙ	<b>Pt</b> 195,08 ПЛАТИНА				
	79	<b>Au</b> 196,96654 ЗОЛОТО	<b>Hg</b> 200,59 РУТУТЬ	81	<b>Tl</b> 204,3833 ТАЛЛИЙ	82	<b>Pb</b> 207,2 СВИНЕЦ	83	<b>Bi</b> 208,98037 ВИСМУТ	84	<b>Po</b> 209 ПОЛОНИЙ	85	<b>At</b> 209,9871 АСТАТ	86
7	<b>Fr</b> 223,0197 ФРАНЦИЙ	<b>Ra</b> 226,0254 РАДИЙ	<b>Ac</b> <sup>89</sup> ( <b>Lr</b> ) <sup>103</sup> **	( <b>Ku</b> ) 261,11 (КУРЧАТОВИЙ)	( <b>Ns</b> ) 262,114 (НИЛЬСБОРИЙ)	106 263,118	107 262,12							

**Li** 3  
6,941  
ЛИТИЙ

Атомный номер  
Относительная атомная масса

— s-элементы  
— p-элементы  
— d-элементы  
— f-элементы

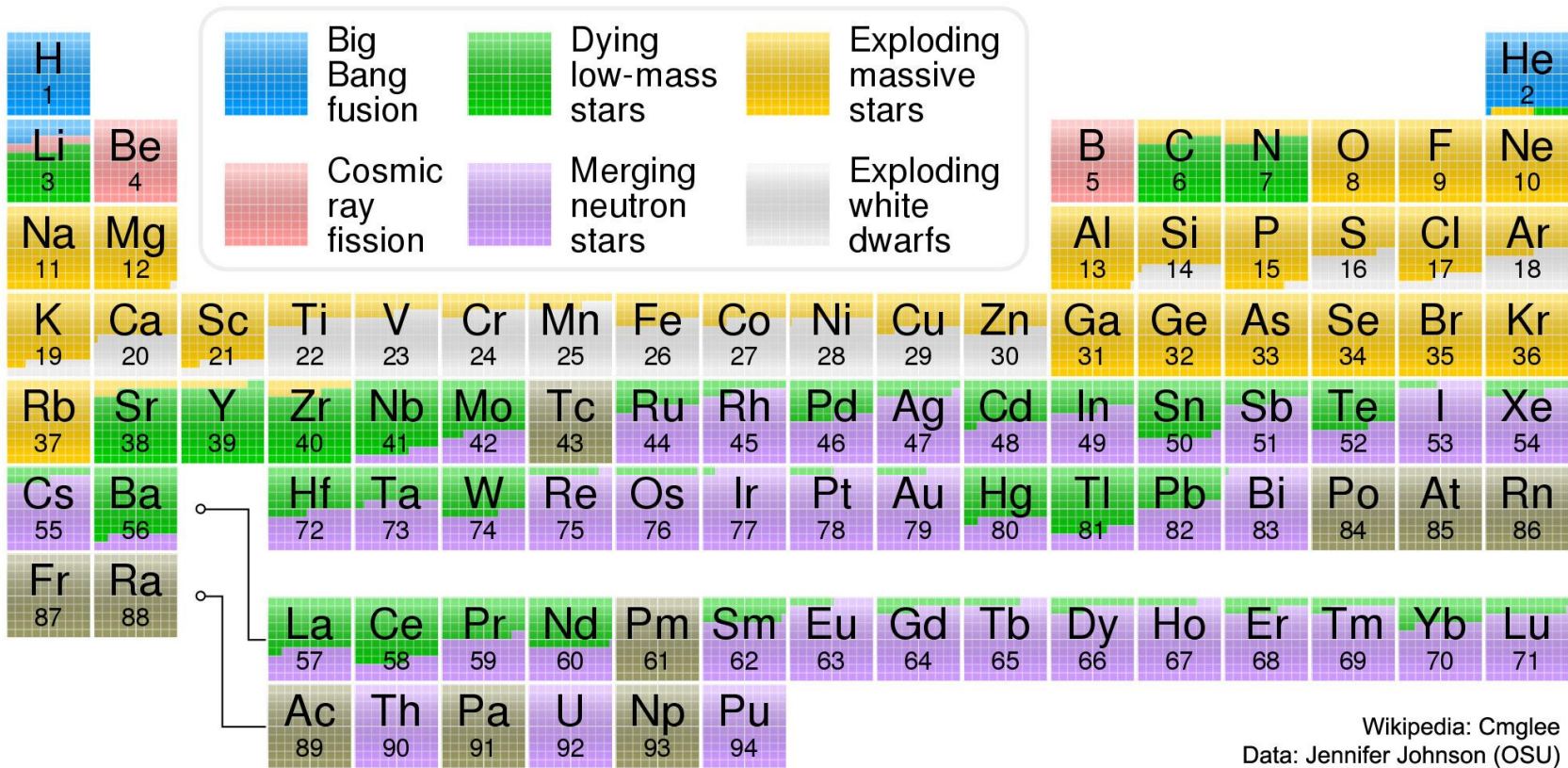
Относительные атомные массы  
приведены по Международной таблице  
1985 года

★ ЛАНТАНОИДЫ

<b>La</b> <sup>57</sup> 138,9055 ЛАНТАН	<b>Ce</b> <sup>58</sup> 140,115 ЦЕРИЙ	<b>Pr</b> <sup>59</sup> 140,90765 ПРАЗЕОДИМ	<b>Nd</b> <sup>60</sup> 144,24 НЕОДИМ	<b>Pm</b> <sup>61</sup> 144,9127 ПРОМЕТИЙ	<b>Sm</b> <sup>62</sup> 150,36 САМАРИЙ	<b>Eu</b> <sup>63</sup> 151,965 ЕВРОПИЙ	<b>Gd</b> <sup>64</sup> 157,25 ГАДОЛИНИЙ	<b>Tb</b> <sup>65</sup> 158,92534 ТЕРБИЙ	<b>Dy</b> <sup>66</sup> 162,50 ДИСПРОЗИЙ	<b>Ho</b> <sup>67</sup> 164,93032 ГОЛЬМИЙ	<b>Er</b> <sup>68</sup> 167,26 ЭРБИЙ	<b>Tm</b> <sup>69</sup> 168,93421 ТУЛИЙ	<b>Yb</b> <sup>70</sup> 173,04 ИТТЕРБИЙ	<b>Lu</b> <sup>71</sup> 174,967 ЛЮТЦИЙ
---	---	---	---	---	--	---	--	--	--	---	--	---	---	--

★★ АКТИНОИДЫ

<b>Ac</b> <sup>89</sup> 227,0278 АКТИНИЙ	<b>Th</b> <sup>90</sup> 232,0381 ТОРИЙ	<b>Pa</b> <sup>91</sup> 231,03588 ПРОТАКТИНИЙ	<b>U</b> <sup>92</sup> 238,0289 УРАН	<b>Np</b> <sup>93</sup> 237,0482 НЕПТУНИЙ	<b>Pu</b> <sup>94</sup> 244,0642 ПЛУТОНИЙ	<b>Am</b> <sup>95</sup> 243,0614 АМЕРИЦИЙ	<b>Cm</b> <sup>96</sup> 247,0703 КУРИЙ	<b>Bk</b> <sup>97</sup> 247,0703 БЕРКЛИЙ	<b>Cf</b> <sup>98</sup> 242,0587 КАЛИФОРНИЙ	<b>Es</b> <sup>99</sup> 252,083 ЭЙНШТЕЙНИЙ	<b>Fm</b> <sup>100</sup> 257,0951 ФЕРМИЙ	<b>Md</b> <sup>101</sup> 258,10 МЕНДЕЛЕВИЙ	( <b>No</b> ) <sup>102</sup> 259,1009 (НОБЕЛИЙ)	( <b>Lr</b> ) <sup>103</sup> 260,105 (ЛОУРЕНСИЙ)
--	--	---	--	---	---	---	--	--	---	--	--	--	---	--

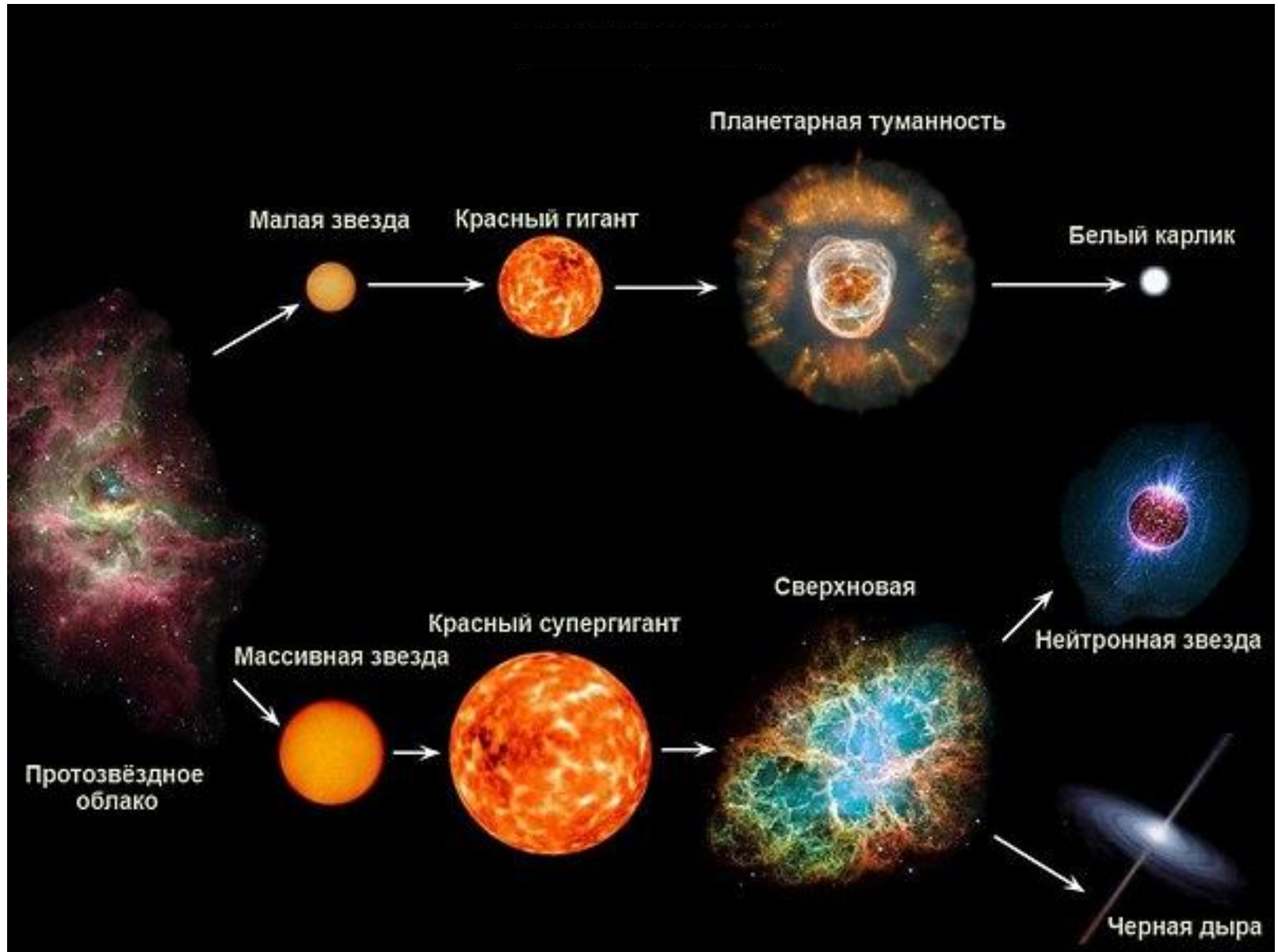


Wikipedia: Cmglee  
 Data: Jennifer Johnson (OSU)

# ЭВОЛЮЦИЯ ЗВЕЗД С МАССОЙ $>60 M_{\odot}$

- $4 \text{H}_1 \text{ ----> He}_4$  : формируется гелиевое ядро;
- Н кончается, He-ядро сжимается и нагревается;
- при  $T \sim 100$  млн К начинает «гореть» гелий:  
 $3 \text{He}_4 \text{ ----> C}_{12}$  ,  $\text{He}_4 + \text{C}_{12} \text{ ----> O}_{16}$   
формируется углеродно-кислородное ядро;
- в центре звезды формируются электрон-позитронные пары, что понижает упругость газа. Из-за этого ядро звезды коллапсирует и быстро нагревается;
- «загораются» C,O - происходит взрыв – вспышка сверхновой, возникает черная дыра (и гамма-всплеск ? )

# СХЕМА ЭВОЛЮЦИИ ОДИНОЧНЫХ ЗВЕЗД РАЗНЫХ МАСС



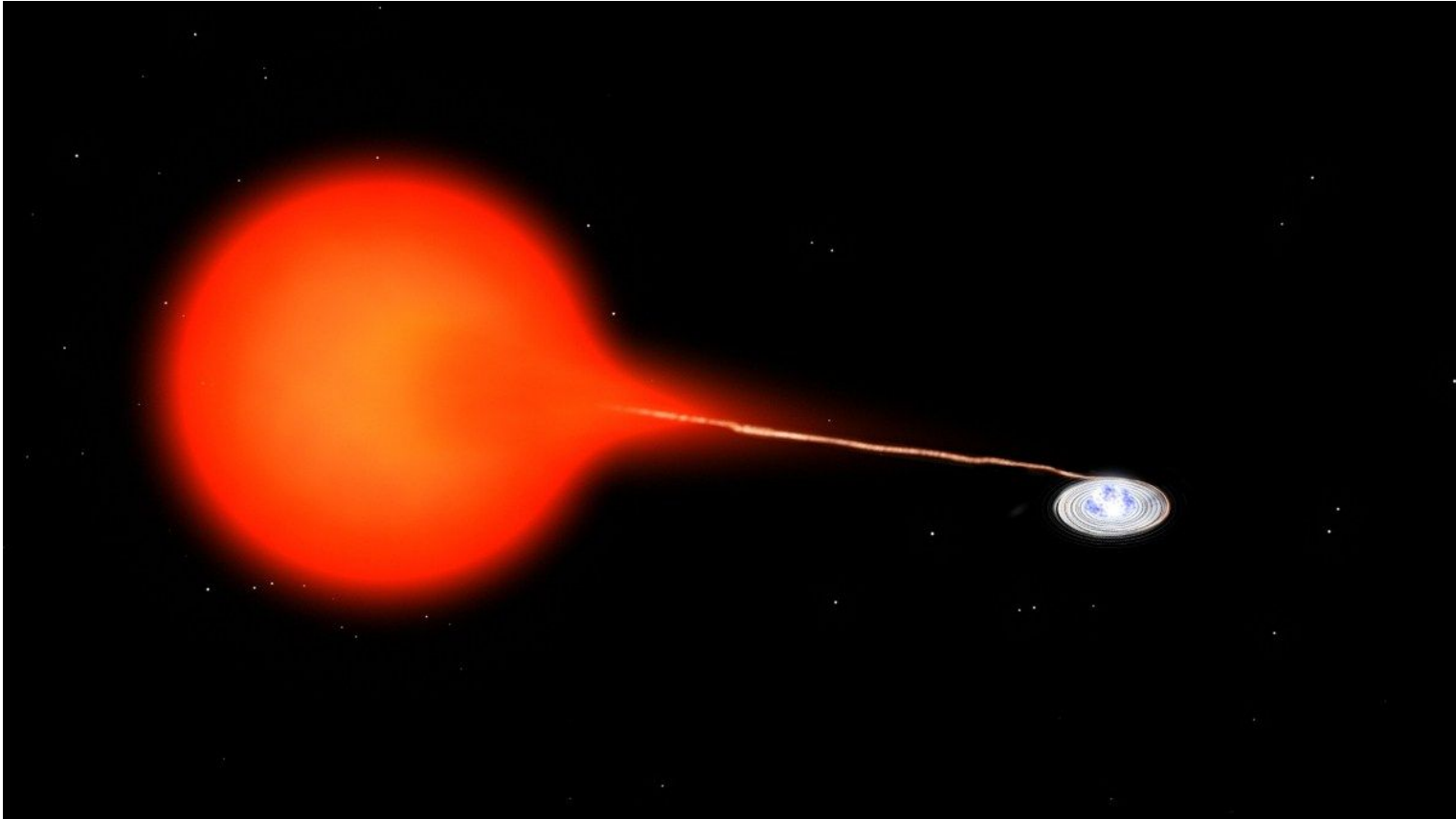


# Эволюция двойных звезд

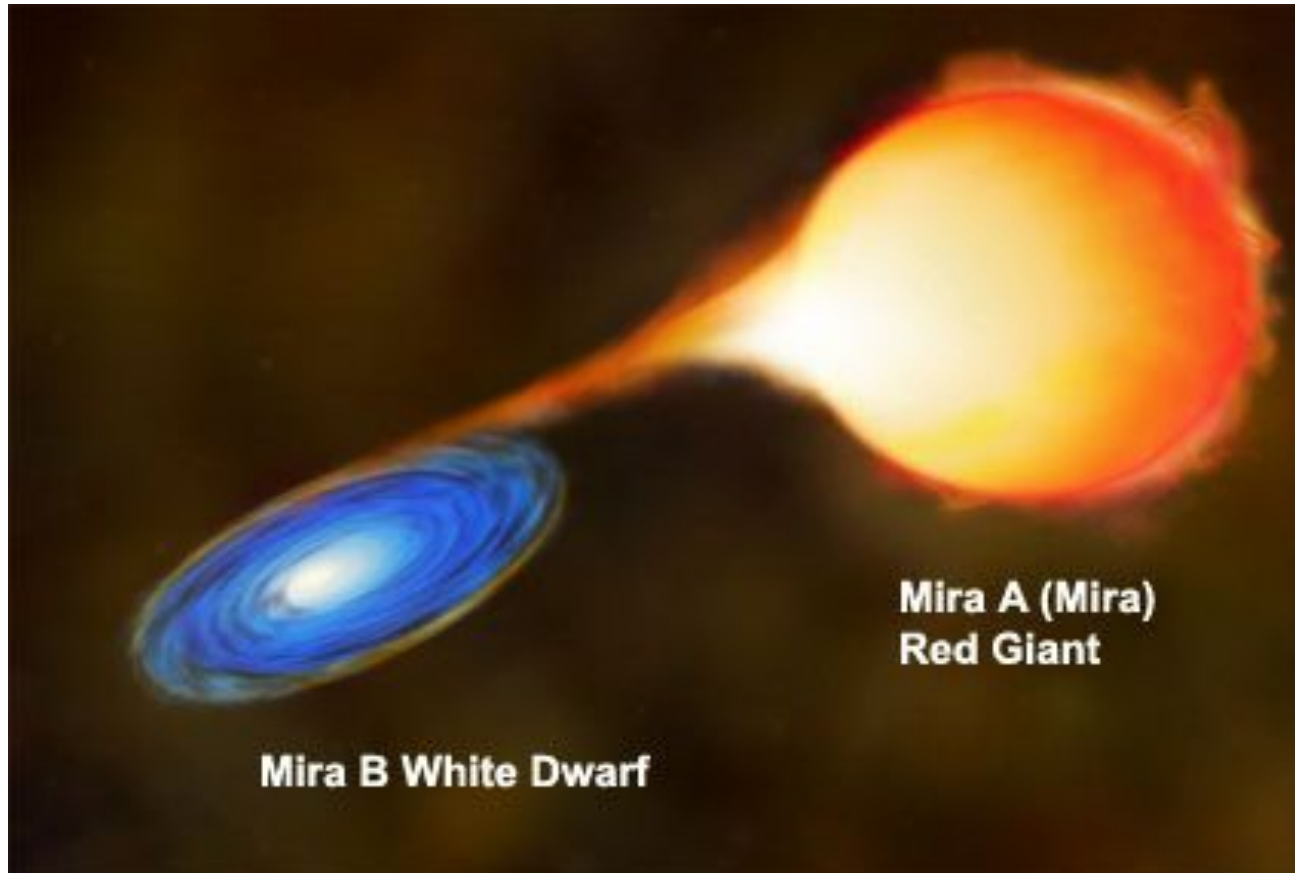
# ЗВЕЗДЫ РАЗНООБРАЗНЫ

- Кратные звезды
- Переменные звезды - более 100 различных типов
- Вспыхивающие звезды

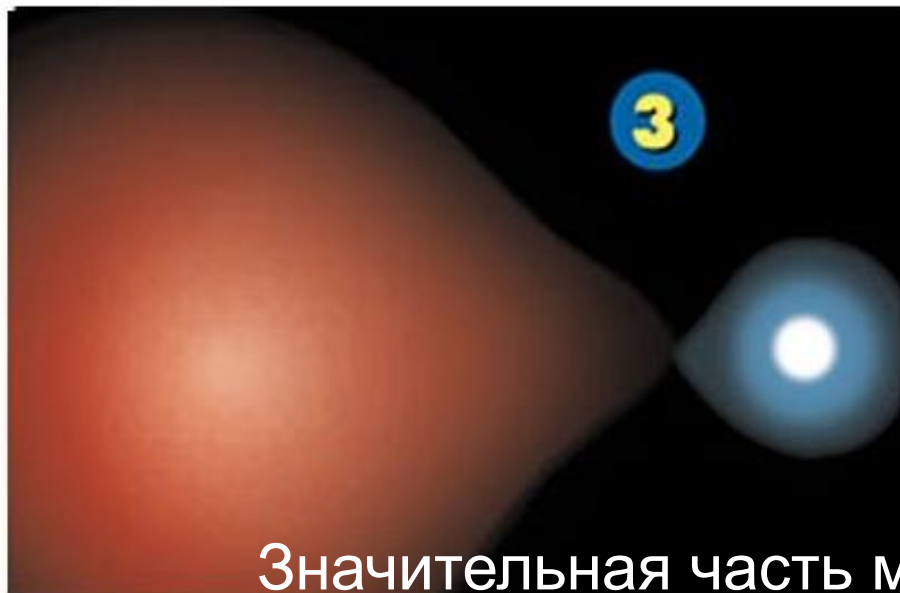
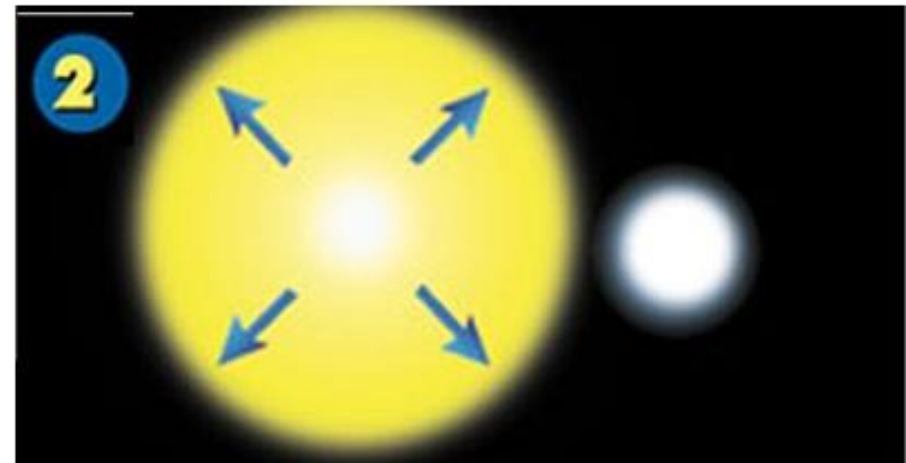
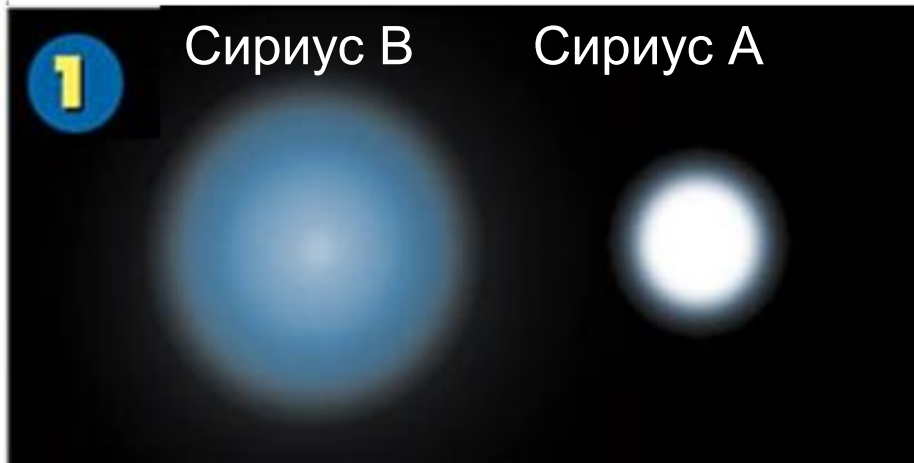
# ЗВЕЗДЫ РАЗНООБРАЗНЫ



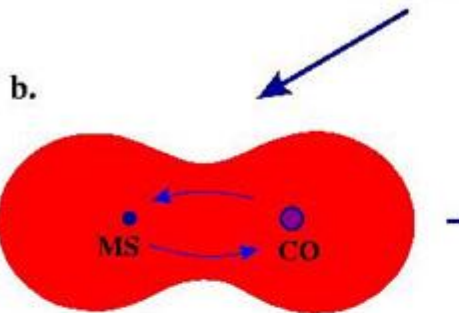
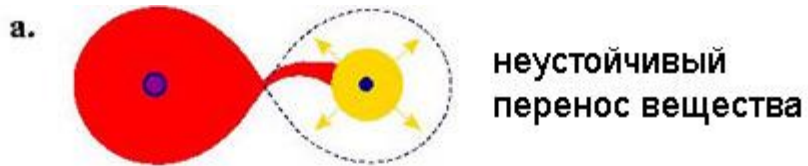
# ЗВЕЗДЫ РАЗНООБРАЗНЫ



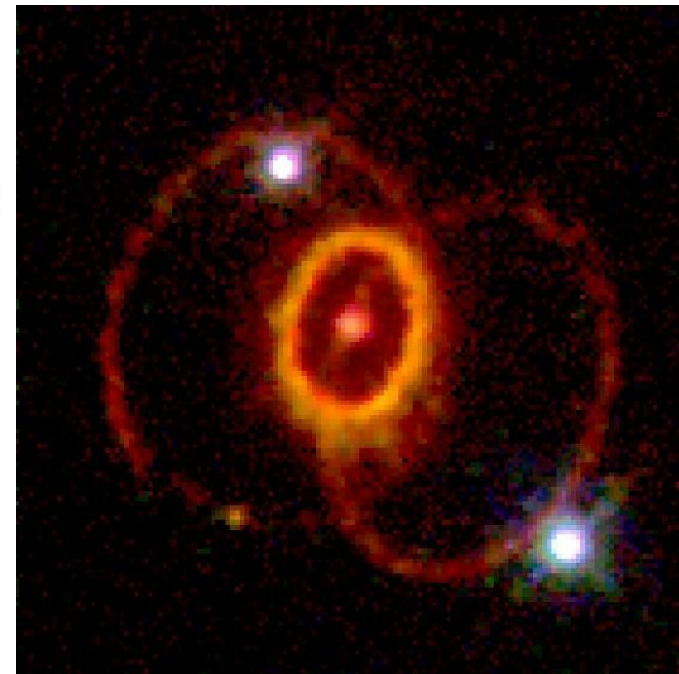
# ОБМЕН МАССОЙ В ТЕСНОЙ ДВОЙНОЙ СИСТЕМЕ – ОБЪЯСНЕНИЕ ПАРАДОКСА СИРИУСА А/В



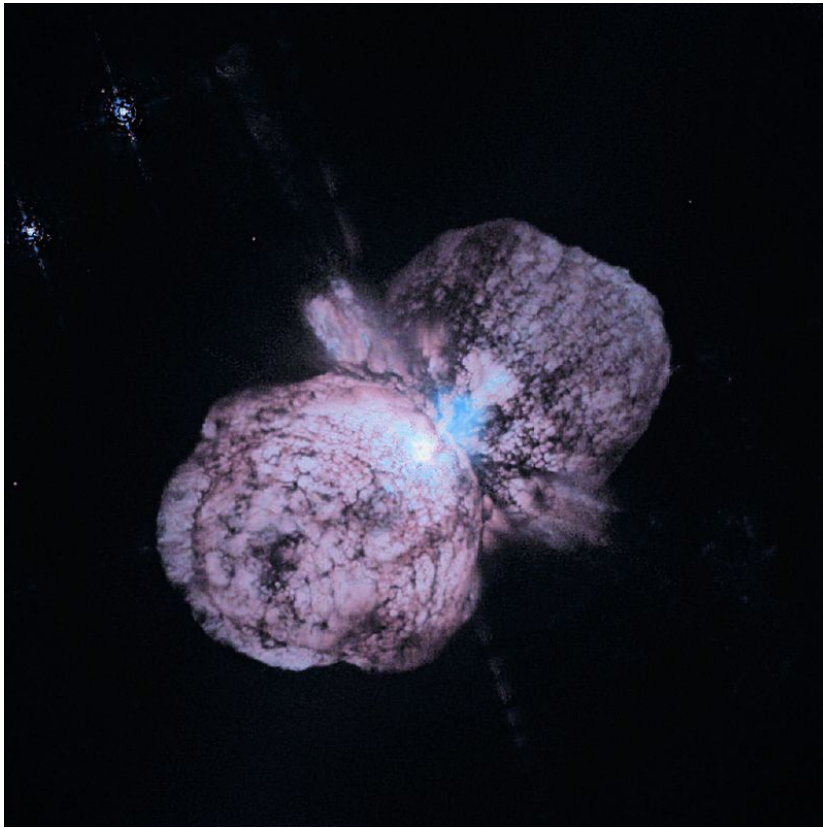
Значительная часть массы ушла из системы!



## SN 1987 A

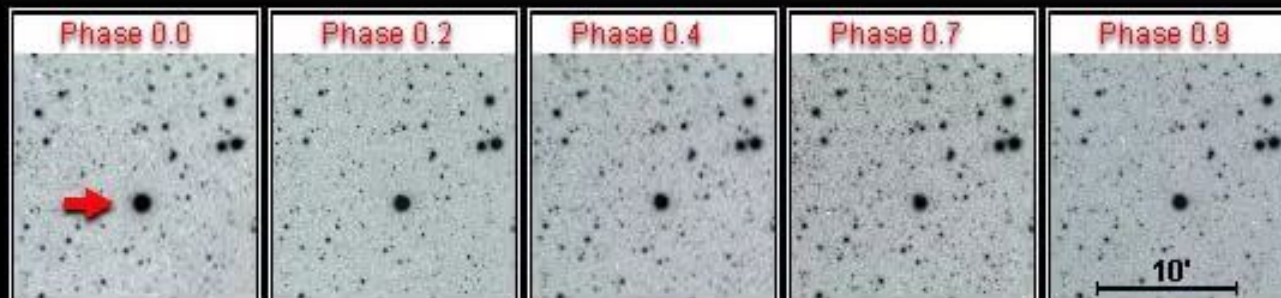
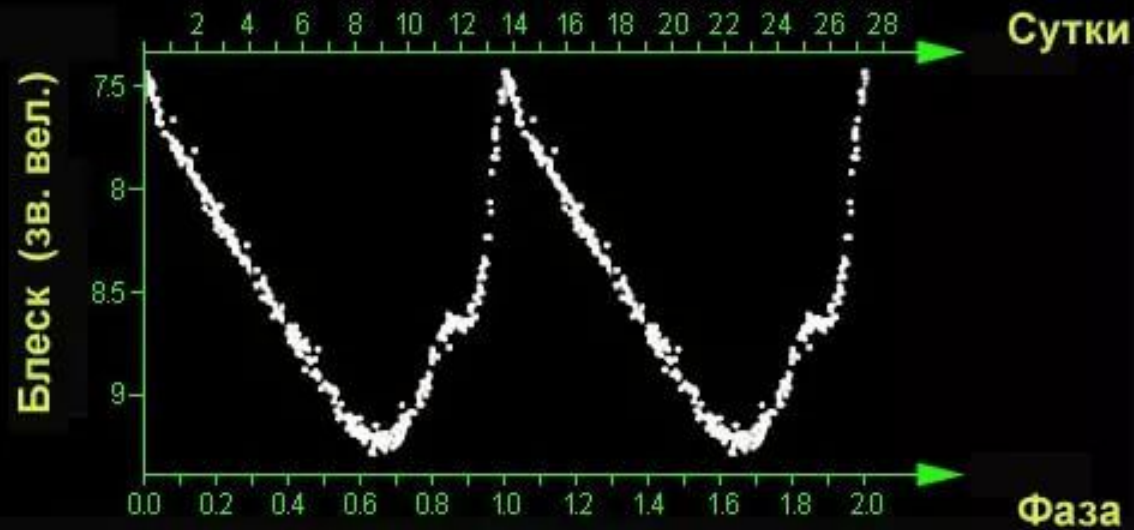


# ЗВЕЗДЫ РАЗНООБРАЗНЫ



- $\eta$  (эта) Киля
- Туманность «Гомункул»
- Звезда- гипергигант со сброшенной оболочкой

# Цефеида ТТ Орла (ТТ Aql)





**Когда возраст Вселенной достиг трех минут нуклеосинтез закончился. При этом элементы тяжелее гелия практически, отсутствовали.**

**Эти элементы, включая С, N, O, Fe и другие, из которых состоят органические молекулы родились в недрах звезд.**

**Затем эти элементы попали в межзвездную среду. Из них сформировались новые звезды, которые после своей гибели еще больше обогатили межзвездный газ тяжелыми элементами.**

**За 9 млрд. лет этот процесс повторялся многократно.**

**Примерно 5 млрд. лет назад из облака межзвездного газа сформировалось Солнце и окружающие его планеты, включая Землю. К этому моменту доля элементов тяжелее гелия составляла примерно 2%.**

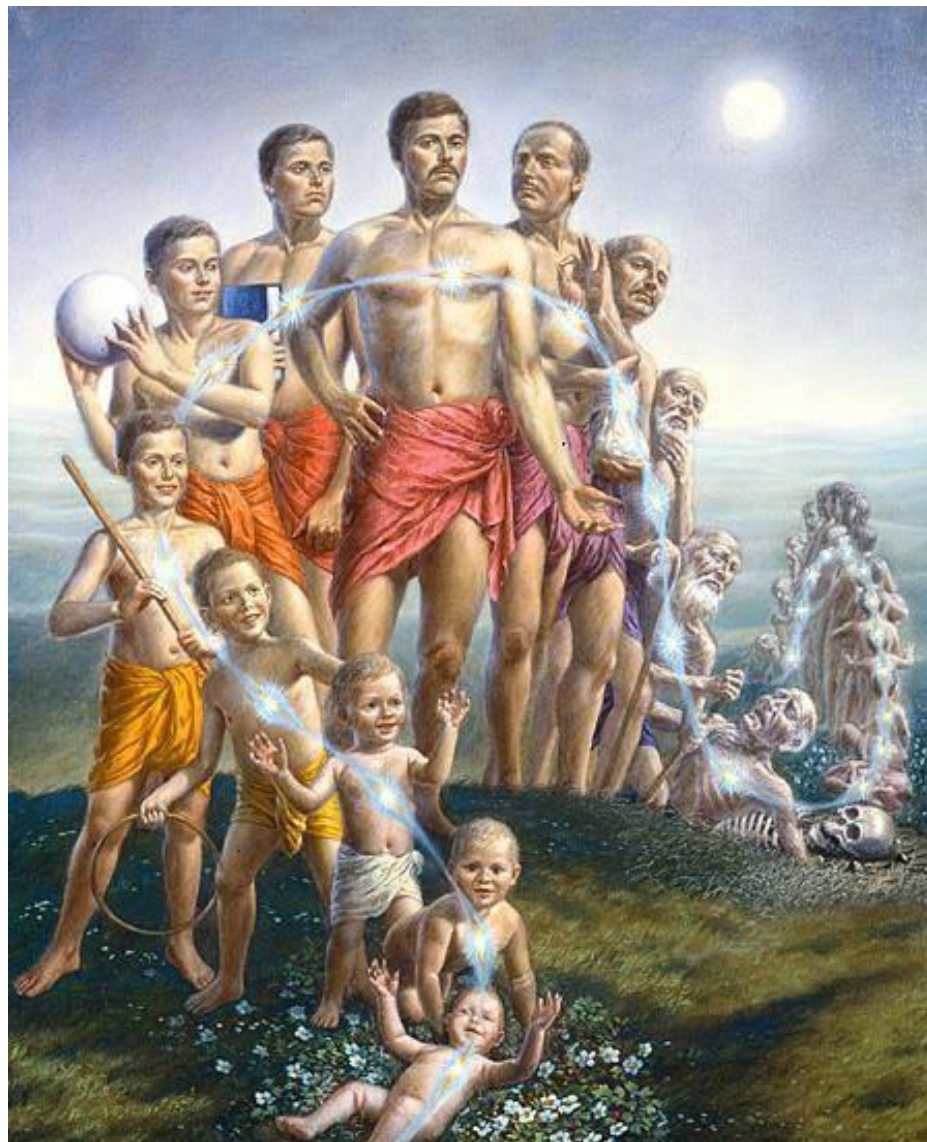
**Большинство из этих элементов попало в межзвездную среду при вспышках сверхновых, но основная масса углерода вынесена ветром из красных сверхгигантов.**

**Элементы тяжелее гелия стали основой для зарождения жизни на Земле**



**Мы – звездные люди !!!**

**Один из основных результатов астрофизики XX века – вывод о том, что звезды, как и люди, рождаются, живут и умирают.**



**Спасибо за  
внимание!  
С.А.Язев 2018**

