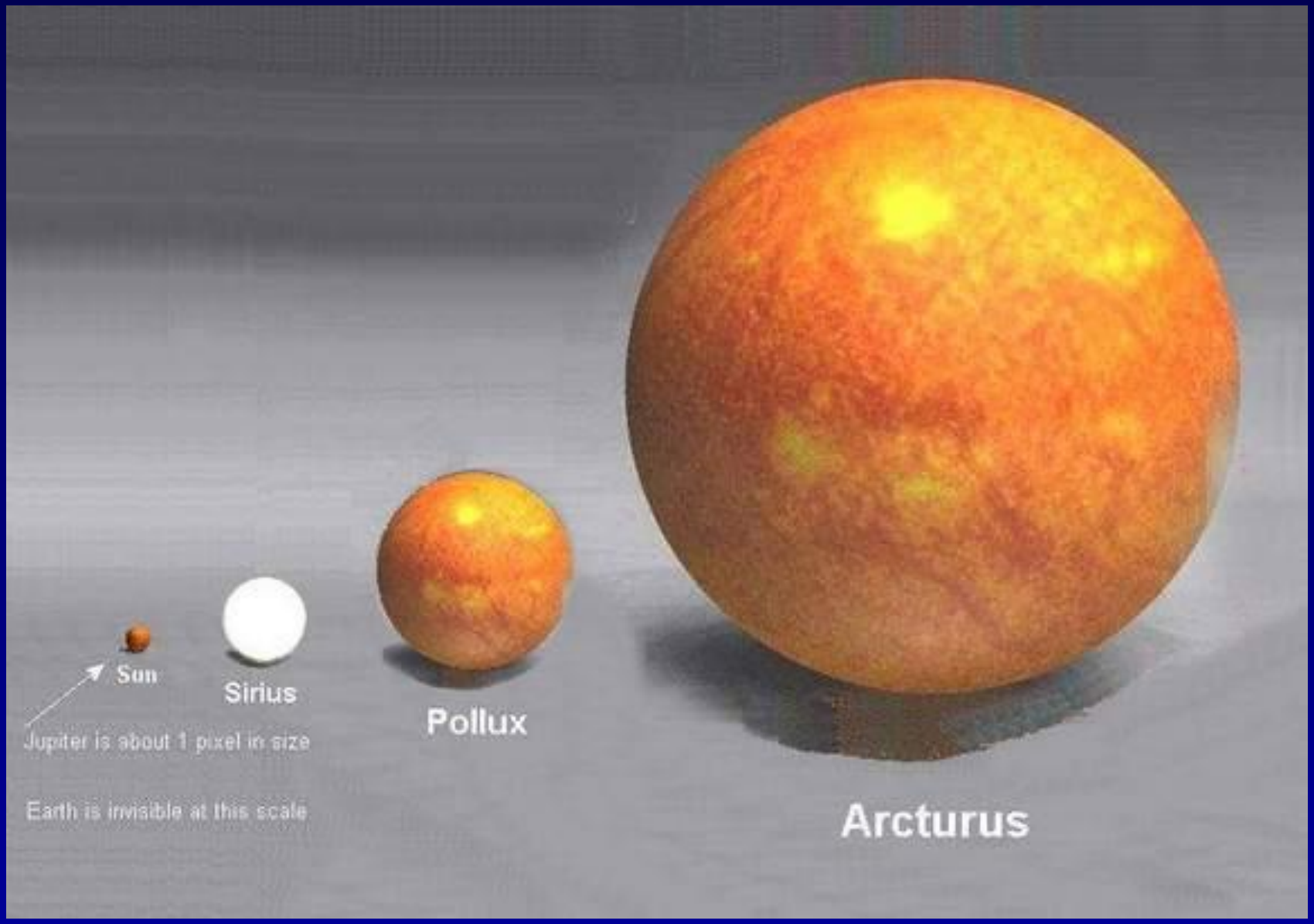
Диаграмма Гершпрунга-Рессела *(спектр-светимость)*

Диаграмма Герцшпрунга-Рессела (*1910 г.*)

Эйнар Херцшпрунг
(*Ejnar Hertzsprung*)
1873 — 1967

Генри Рессел
(*Henry Norris Russell*)
1877 — 1957

Нормальные звезды



Нормальные звезды

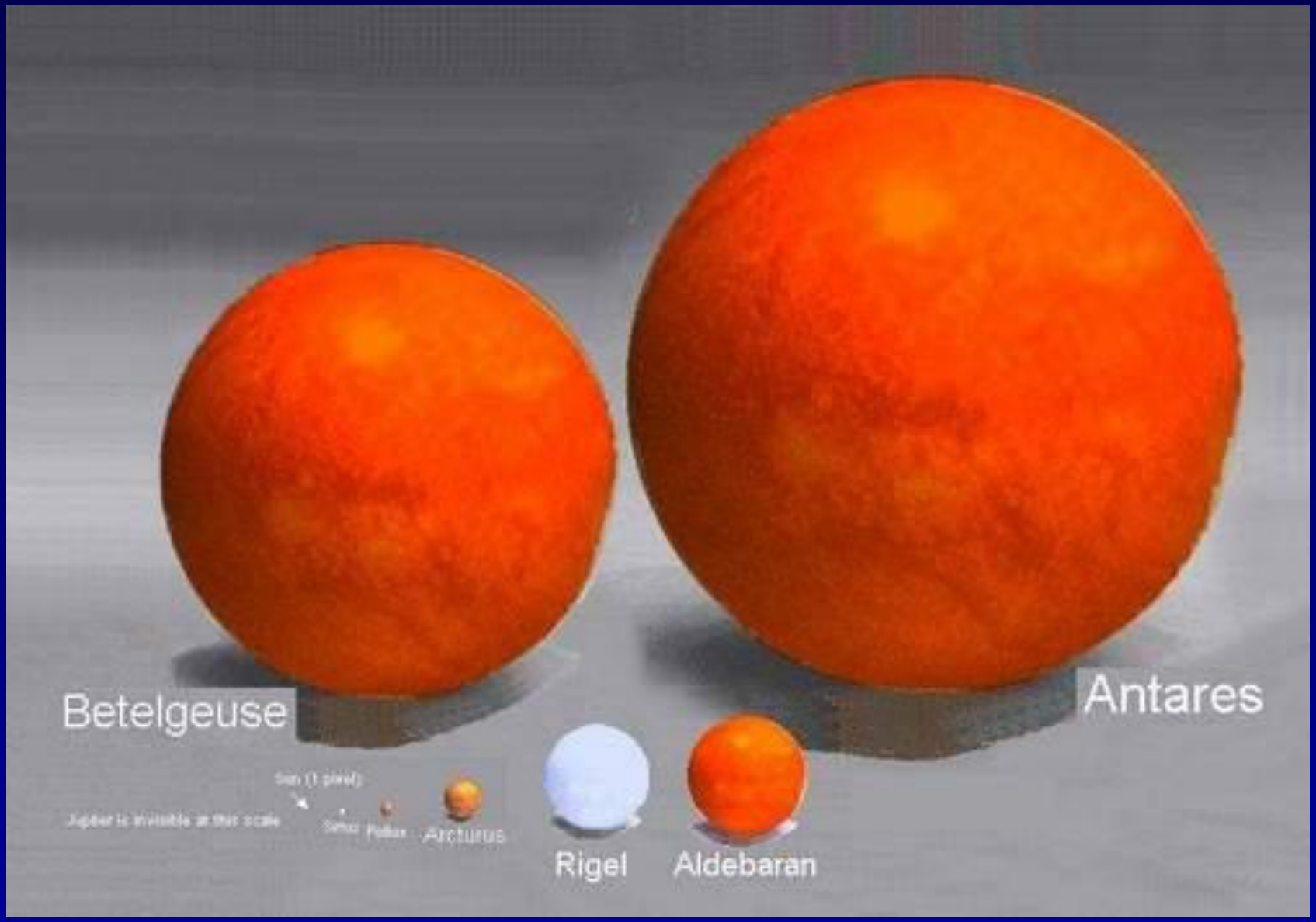
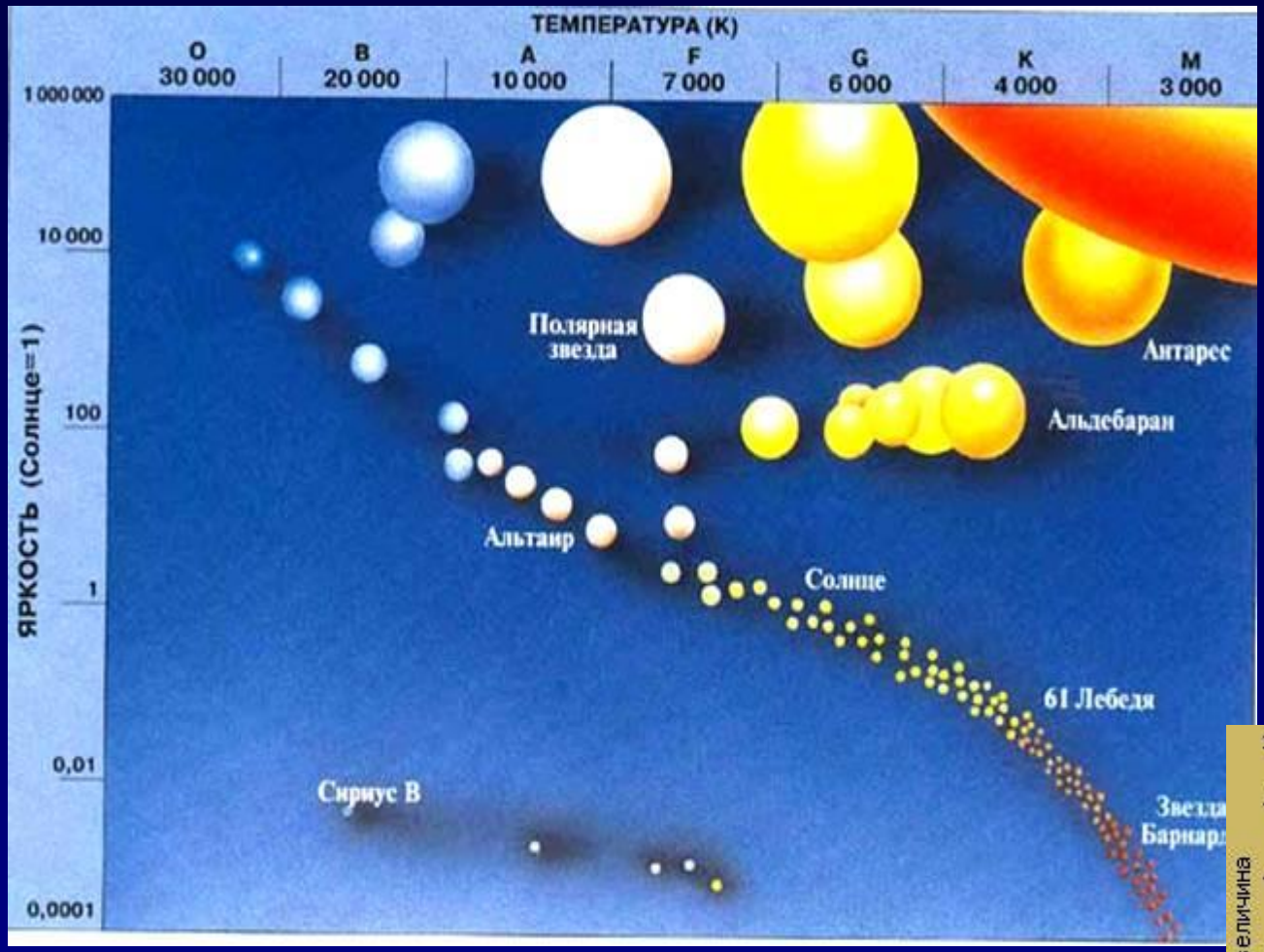
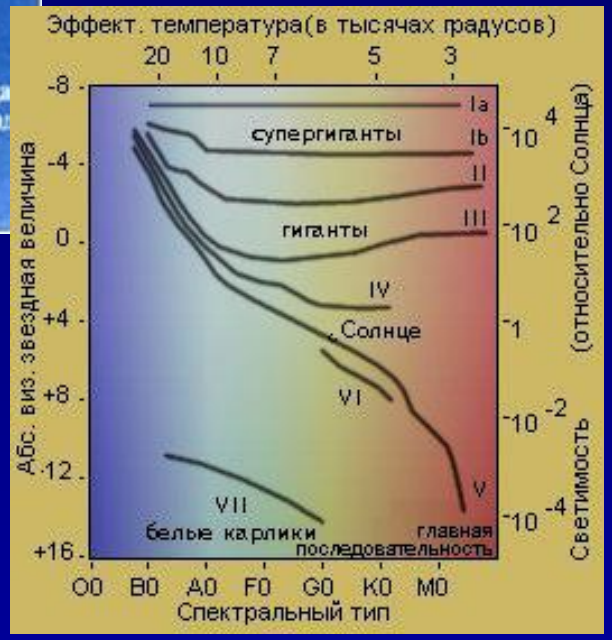
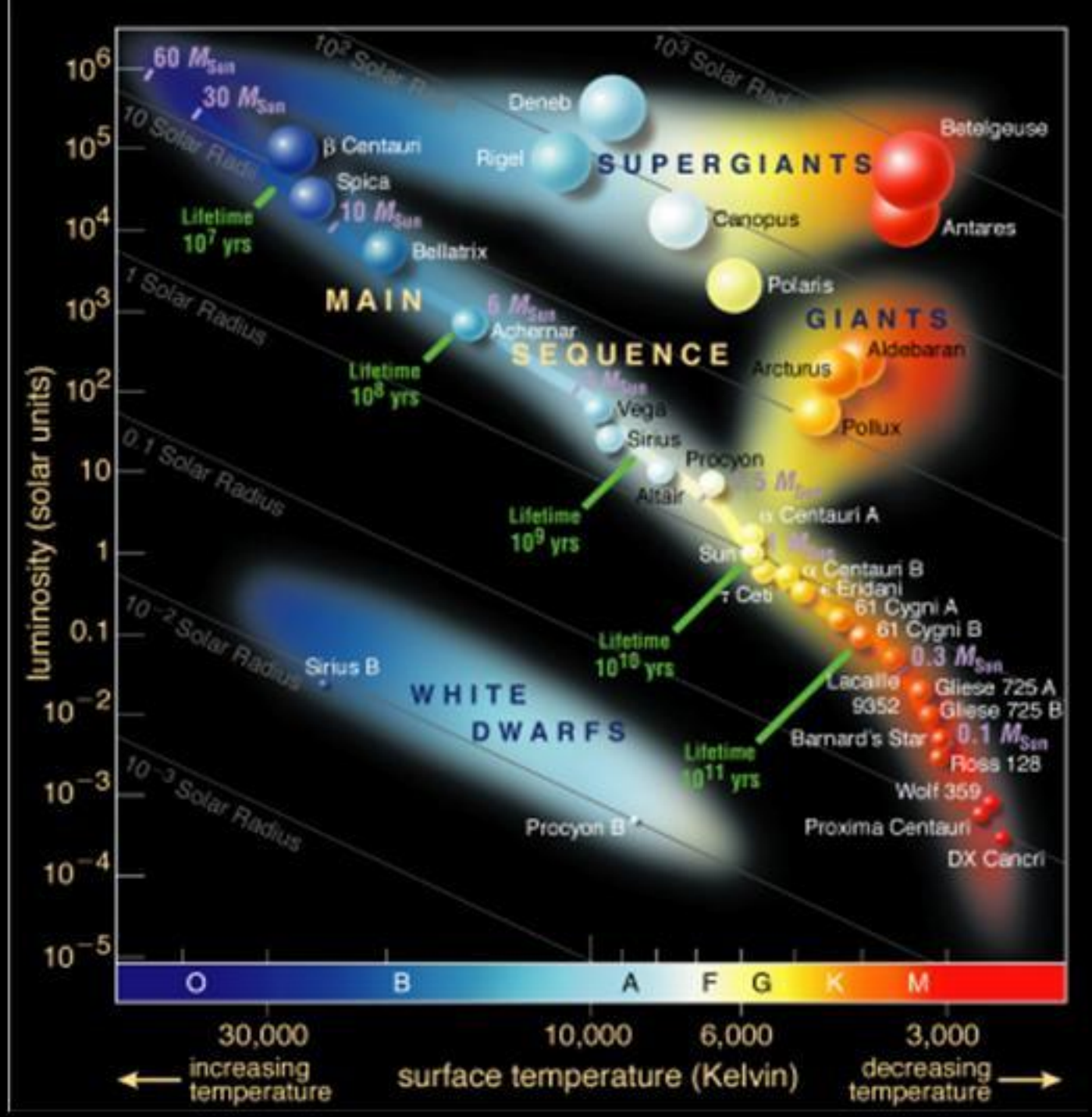


ДИАГРАММА ГЕРЦШПРУНГА–РАССЕЛА
СПЕКТРАЛЬНЫЙ КЛАСС И ТЕМПЕРАТУРА
O B A F G K M
30000K 10000K 7500K 6000K 5000K 4000K 3000K
СВЕТИМОСТЬ (В СОЛНЕЧНЫХ)
100 000
10 000
1000
100
10
1
0.1
0.01
0.001
0.0001
0.000 01
АБСОЛЮТНАЯ ЗВЕЗДНАЯ ВЕЛИЧИНА
−10
−5
0
+5
+10
+15
Ia 1A
ГИПЕРГИГАНТЫ (КЛАСС O)
Ib 1B
II ЯРКИЕ ГИГАНТЫ
III ГИГАНТЫ
IV IV СУБГИГАНТЫ
V КАРЛИКИ (ГЛАВНАЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ)
VI СУБКАРЛИКИ
VII БЕЛЫЕ КАРЛИКИ
0.0 +0.5 +1.0 +1.5 +2.0
ЦВЕТ

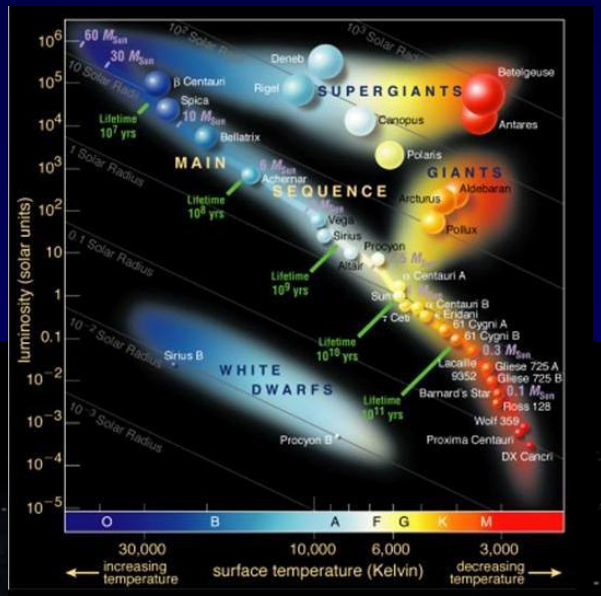

ТЕМПЕРАТУРА (К)
O 30 000
B 20 000
A 10 000
F 7 000
G 6 000
K 4 000
M 3 000
ЯРКОСТЬ (Солнце=1)
1 000 000
10 000
100
1
0,01
0,0001
Полярная звезда
Антарес
Альдебаран
Альтаир
Солнце
61 Лебедя
Сириус B


Эффект. температура (в тысячах градусов)
20 10 7 5 3
Абс. виз. звездная величина
-8
-4
0
+4
+8
+12
+16
супергиганты
гиганты
Ia
Ib
II
III
IV
V
VI
VII
Солнце
белые карлики
главная последовательность
Светимость (относительно Солнца)
10^4
10^2
1
10^{-2}
10^{-4}
O0 B0 A0 F0 G0 K0 M0
Спектральный тип

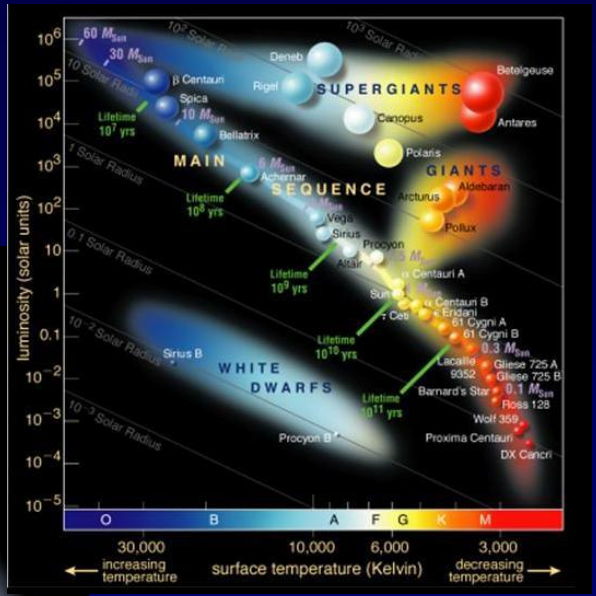

luminosity (solar units)
10^6
10^5
10^4
10^3
10^2
10
1
0.1
10^{-2}
10^{-3}
10^{-4}
10^{-5}
60 M_{Sun}
30 M_{Sun}
10 M_{Sun}
6 M_{Sun}
5 M_{Sun}
1 M_{Sun}
0.3 M_{Sun}
0.1 M_{Sun}
10^2 Solar Radius
10^3 Solar Radius
10 Solar Radius
1 Solar Radius
0.1 Solar Radius
10^{-2} Solar Radius
10^{-3} Solar Radius
Deneb
Rigel
Betelgeuse
Antares
Canopus
Polaris
SUPERGIANTS
GIANTS
Aldebaran
Arcturus
Pollux
β Centauri
Spica
Bellatrix
Lifetime 10^7 yrs
MAIN
SEQUENCE
Achernar
Lifetime 10^8 yrs
Vega
Sirius
Procyon
Altair
Lifetime 10^9 yrs
α Centauri A
Sun
α Centauri B
ε Eridani
τ Ceti
61 Cygni A
61 Cygni B
Lifetime 10^{10} yrs
Lacaille 9352
Gliese 725 A
Gliese 725 B
Barnard's Star
Ross 128
Wolf 359
Proxima Centauri
DX Cancri
Lifetime 10^{11} yrs
Sirius B
WHITE DWARFS
Procyon B
O
B
A
F
G
K
M
30,000
10,000
6,000
3,000
increasing temperature
surface temperature (Kelvin)
decreasing temperature

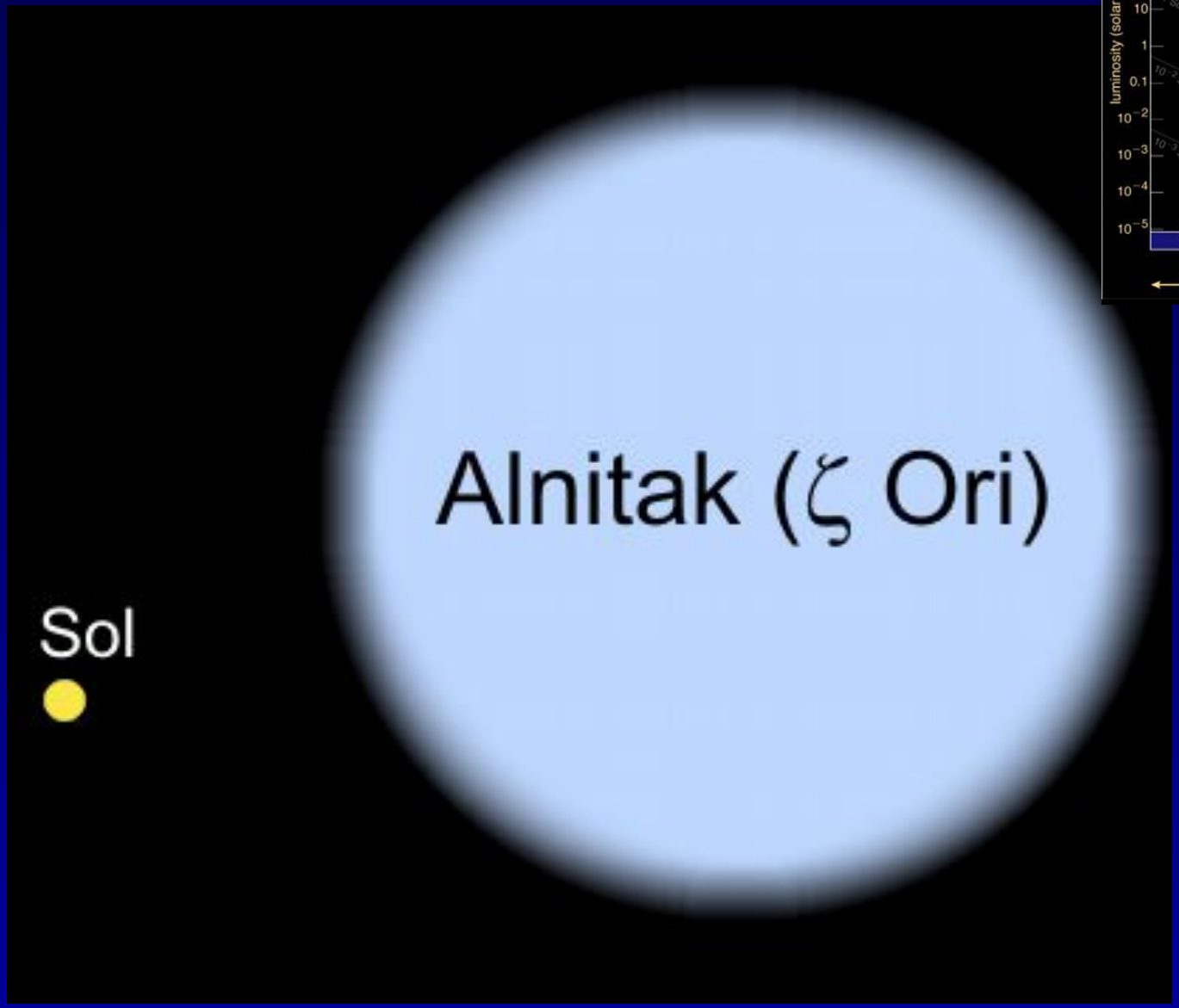
Модели звезд

Голубой гигант

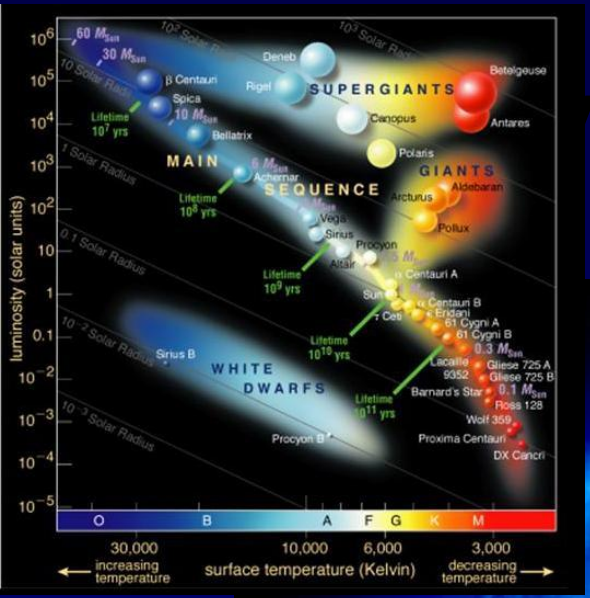


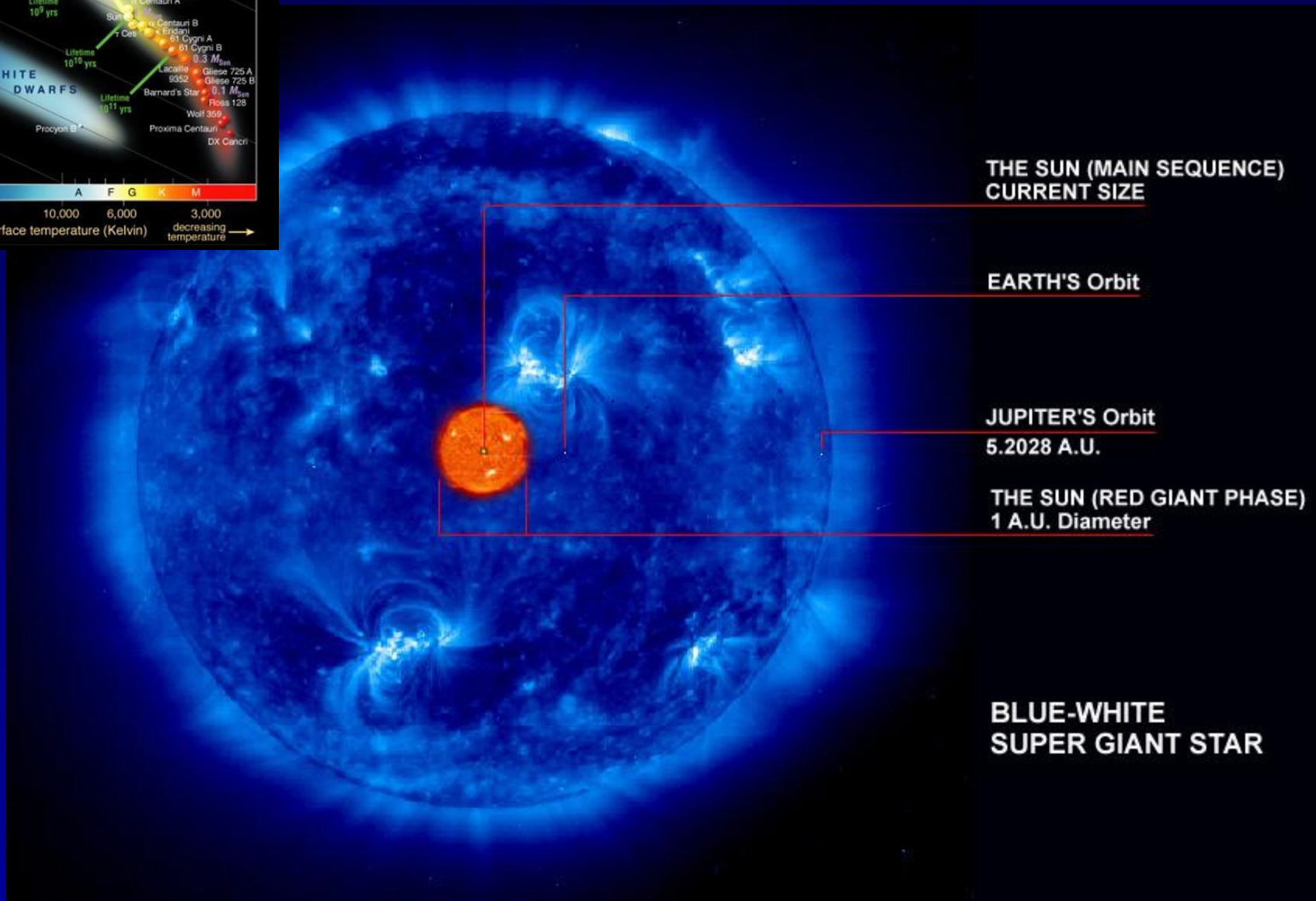
Голубой гигант



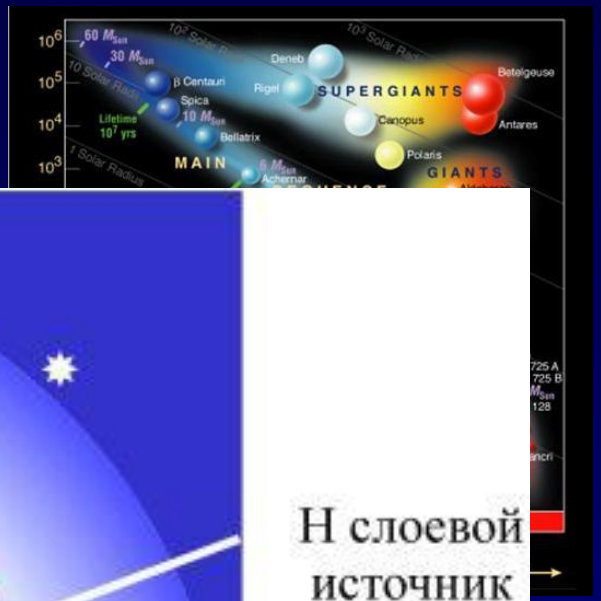


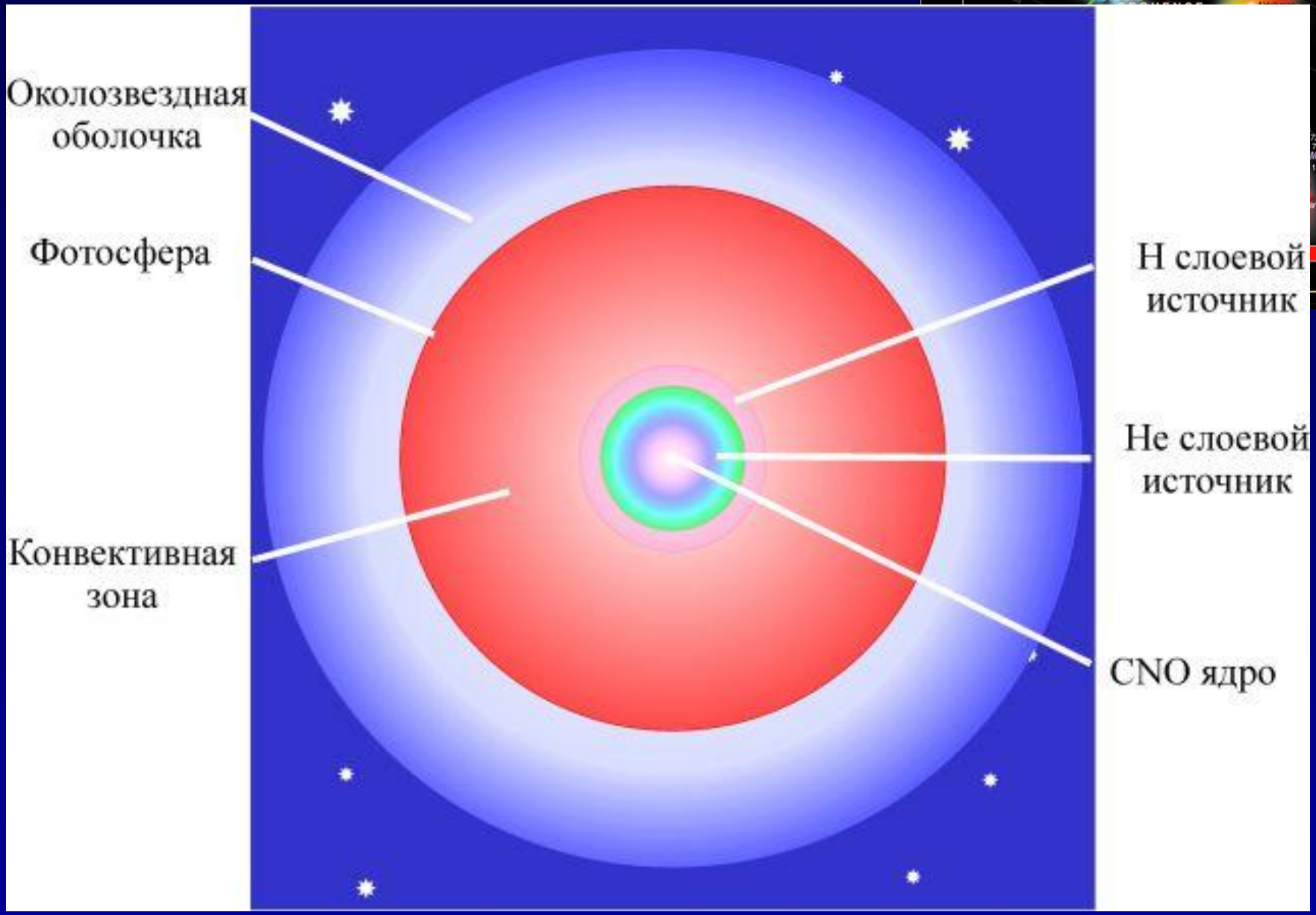
...убой гигант


luminosity (solar units)
surface temperature (Kelvin)
increasing temperature
decreasing temperature
30,000
10,000
6,000
3,000
O
B
A
F
G
K
M
SUPERGIANTS
GIANTS
MAIN SEQUENCE
WHITE DWARFS
Deneb
Rigel
Betelgeuse
Antares
Canopus
Polaris
Aldebaran
Arcturus
Pollux
Spica
Bellatrix
Achernar
Vega
Sirius
Procyon
Altair
Sun
Sirius B
Procyon B
Proxima Centauri
DX Cancri
Wolf 359
Barnard's Star
Lacaille 9352
Gliese 725 A
Gliese 725 B
Ross 128
61 Cygni A
61 Cygni B
Lifetime 10^7 yrs
Lifetime 10^8 yrs
Lifetime 10^9 yrs
Lifetime 10^{10} yrs
Lifetime 10^{11} yrs


THE SUN (MAIN SEQUENCE)
CURRENT SIZE
EARTH'S Orbit
JUPITER'S Orbit
5.2028 A.U.
THE SUN (RED GIANT PHASE)
1 A.U. Diameter
BLUE-WHITE
SUPER GIANT STAR

Голубой гигант





ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Атомная масса — Атомный номер

U 92 — 238,0289±1 — $5f^3 6d^1 7s^2$ — УРАН

Распределение электронов по застраивающимся и ближайшим подоболочкам — Распределение электронов по оболочкам

ПЕРИОДЫ	ГРУППЫ ЭЛЕМЕНТОВ: а I б	а II б	а III б	а IV б	а V б	а VI б	а VII б	а VIII б		
1	H						**H** 1 1,00794±7 $1s^1$ ВОДОРОД	**He** 2 4,002602±2 $1s^2$ ГЕЛИЙ		
2	**Li** 3 6,941±2 $2s^1$ ЛИТИЙ	**Be** 4 9,012182±3 $2s^2$ БЕРИЛЛИЙ	**B** 5 10,811±7 $2s^2 2p^1$ БОР	**C** 6 12,0107±8 $2s^2 2p^2$ УГЛЕРОД	**N** 7 14,00674±7 $2s^2 2p^3$ АЗОТ	**O** 8 15,9994±3 $2s^2 2p^4$ КИСЛОРОД	**F** 9 18,9984032±5 $2s^2 2p^5$ ФТОР	**Ne** 10 20,1797±6 $2s^2 2p^6$ НЕОН		
3	**Na** 11 22,989770±2 $3s^1$ НАТРИЙ	**Mg** 12 24,3050±6 $3s^2$ МАГНИЙ	**Al** 13 26,981538±2 $3s^2 3p^1$ АЛЮМИНИЙ	**Si** 14 28,0855±3 $3s^2 3p^2$ КРЕМНИЙ	**P** 15 30,973761±2 $3s^2 3p^3$ ФОСФОР	**S** 16 32,066±6 $3s^2 3p^4$ СЕРА	**Cl** 17 35,4527±9 $3s^2 3p^5$ ХЛОР	**Ar** 18 39,948±1 $3s^2 3p^6$ АРГОН		
4	**K** 19 39,0983±1 $4s^1$ КАЛИЙ	**Ca** 20 40,078±4 $4s^2$ КАЛЬЦИЙ	21 **Sc** 44,955910±8 $3d^1 4s^2$ СКАНДИЙ	22 **Ti** 47,867±1 $3d^2 4s^2$ ТИТАН	23 **V** 50,9415±1 $3d^3 4s^2$ ВАНАДИЙ	24 **Cr** 51,9961±6 $3d^5 4s^1$ ХРОМ	25 **Mn** 54,938049±9 $3d^5 4s^2$ МАРГАНЕЦ	26 **Fe** 55,845±2 $3d^6 4s^2$ ЖЕЛЕЗО	27 **Co** 58,933200±9 $3d^7 4s^2$ КОБАЛЬТ	28 **Ni** 58,6934± $3d^8 4s^2$ НИКЕЛЬ
	29 **Cu** 63,546±3 $3d^{10} 4s^1$ МЕДЬ	30 **Zn** 65,39±2 $3d^{10} 4s^2$ ЦИНК	31 **Ga** 69,723±1 $4s^2 4p^1$ ГАЛЛИЙ	32 **Ge** 72,61±2 $4s^2 4p^2$ ГЕРМАНИЙ	33 **As** 74,92160±2 $4s^2 4p^3$ МЫШЬЯК	34 **Se** 78,96±3 $4s^2 4p^4$ СЕЛЕН	35 **Br** 79,904±1 $4s^2 4p^5$ БРОМ	36 **Kr** 83,80±1 $4s^2 4p^6$ КРИПТОН		
5	**Rb** 37 85,4678±3 $5s^1$ РУБИДИЙ	**Sr** 38 87,62±1 $5s^2$ СТРОНЦИЙ	39 **Y** 88,90585±2 $4d^1 5s^2$ ИТТРИЙ	40 **Zr** 91,224±2 $4d^2 5s^2$ ЦИРКОНИЙ	41 **Nb** 92,90638±2 $4d^4 5s^1$ НИОБИЙ	42 **Mo** 95,94±1 $4d^5 5s^1$ МОЛИБДЕН	43 **Tc** [98] $4d^5 5s^2$ ТЕХНЕЦИЙ	44 **Ru** 101,07±2 $4d^7 5s^1$ РУТЕНИЙ	45 **Rh** 102,90550±2 $4d^8 5s^1$ РОДИЙ	46 **Pd** 106,42±1 $4d^{10} 5s^0$ ПАЛЛАДИЙ
	47 **Ag** 107,8682±2 $4d^{10} 5s^1$ СЕРЕБРО	48 **Cd** 112,411±8 $4d^{10} 5s^2$ КАДМИЙ	49 **In** 114,818±3 $5s^2 5p^1$ ИНДИЙ	50 **Sn** 118,710±7 $5s^2 5p^2$ ОЛОВО	51 **Sb** 121,760±1 $5s^2 5p^3$ СУРЬМА	52 **Te** 127,60±3 $5s^2 5p^4$ ТЕЛЛУР	53 **I** 126,90447±3 $5s^2 5p^5$ ИОД	54 **Xe** 131,29±2 $5s^2 5p^6$ КСЕНОН		
6	**Cs** 55 132,90545±2 $6s^1$ ЦЕЗИЙ	**Ba** 56 137,327±7 $6s^2$ БАРИЙ	57 **La*** 138,9055±2 $5d^1 6s^2$ ЛАНТАН	72 **Hf** 178,49±2 $5d^2 6s^2$ ГАФНИЙ	73 **Ta** 180,9479±1 $5d^3 6s^2$ ТАНТАЛ	74 **W** 183,84±1 $5d^4 6s^2$ ВОЛЬФРАМ	75 **Re** 186,207±1 $5d^5 6s^2$ РЕНИЙ	76 **Os** 190,23±3 $5d^6 6s^2$ ОСМИЙ	77 **Ir** 192,217±3 $5d^7 6s^2$ ИРИДИЙ	78 **Pt** 195,078±2 $5d^9 6s^1$ ПЛАТИНА
	79 **Au** 196,96655±2 $5d^{10} 6s^1$ ЗОЛОТО	80 **Hg** 200,59±2 $5d^{10} 6s^2$ РТУТЬ	81 **Tl** 204,3833±2 $6s^2 6p^1$ ТАЛЛИЙ	82 **Pb** 207,2±1 $6s^2 6p^2$ СВИНЕЦ	83 **Bi** 208,98038±2 $6s^2 6p^3$ ВИСМУТ	84 **Po** [209] $6s^2 6p^4$ ПОЛОНИЙ	85 **At** [210] $6s^2 6p^5$ АСТАТ	86 **Rn** [222] $6s^2 6p^6$ РАДОН		
7	**Fr** 87 [223] $7s^1$ ФРАНЦИЙ	**Ra** 88 [226] $7s^2$ РАДИЙ	89 **Ac**** [227] $6d^1 7s^2$ АКТИНИЙ	104 **Rf** [261] $6d^2 7s^2$ РЕЗЕРФОРДИЙ	105 **Db** [262] $6d^3 7s^2$ ДУБНИЙ	106 **Sg** [265] $6d^4 7s^2$ СИБОРГИЙ	107 **Bh** [261] $6d^5 7s^2$ БОРИЙ	108 **Hs** [265] $6d^6 7s^2$ ХАССИЙ	109 **Mt** [266] $6d^7 7s^2$ МЕЙТНЕРИЙ	

*** ЛАНТАНОИДЫ**

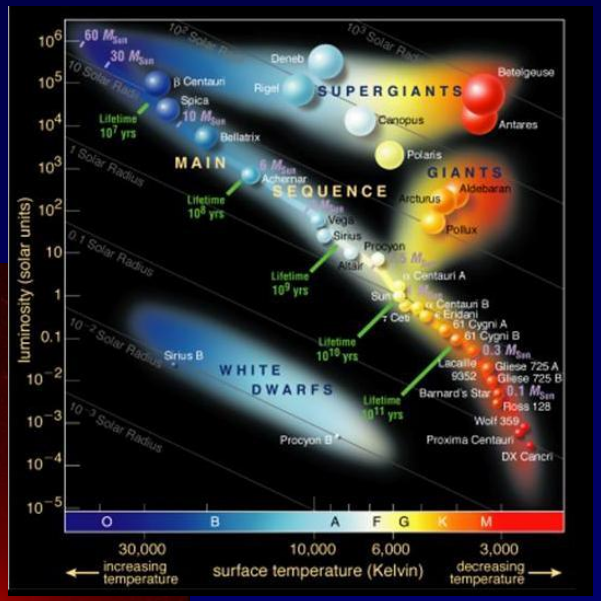
Ce 58 140,116±1 $4f^1 5d^1 6s^2$ ЦЕРИЙ	**Pr** 59 140,90765±2 $4f^3 6s^2$ ПРАЗЕОДИМ	**Nd** 60 144,24±3 $4f^4 6s^2$ НЕОДИМ	**Pm** 61 [145] $4f^5 6s^2$ ПРОМЕТИЙ	**Sm** 62 150,36±3 $4f^6 6s^2$ САМАРИЙ	**Eu** 63 151,964±1 $4f^7 6s^2$ ЕВРОПИЙ	**Gd** 64 157,25±3 $4f^7 5d^1 6s^2$ ГАДОЛИНИЙ	**Tb** 65 158,92534±2 $4f^9 6s^2$ ТЕРБИЙ	**Dy** 66 162,50±3 $4f^{10} 6s^2$ ДИСПРОЗИЙ	**Ho** 67 164,93032±2 $4f^{11} 6s^2$ ГОЛЬМИЙ	**Er** 68 167,26±3 $4f^{12} 6s^2$ ЭРБИЙ	**Tm** 69 168,93421±2 $4f^{13} 6s^2$ ТУЛИЙ	**Yb** 70 173,04±3 $4f^{14} 6s^2$ ИТТЕРБИЙ	**Lu** 71 174,967±1 $4f^{14} 5d^1 6s^2$ ЛЮТЕЦИЙ

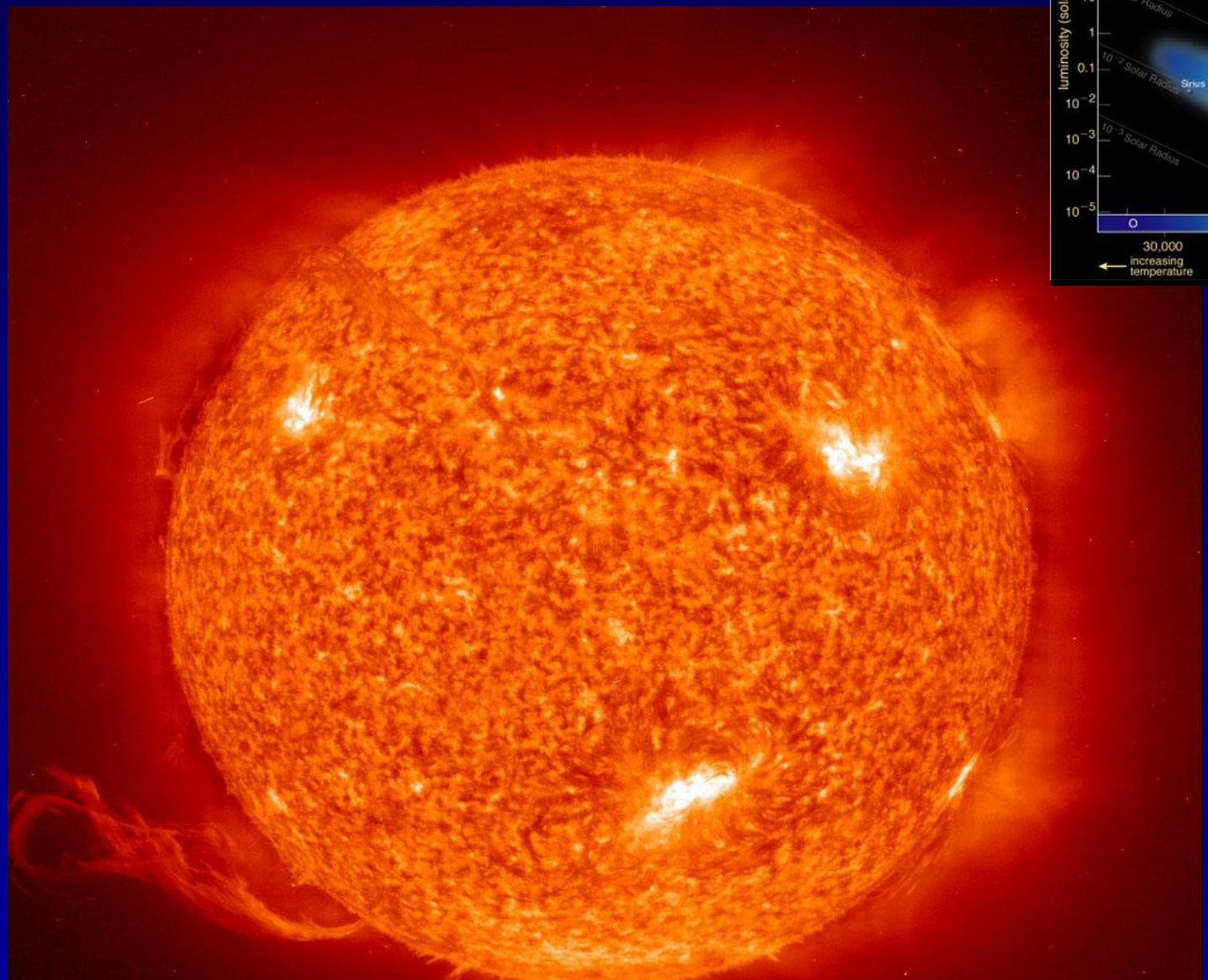
**** АКТИНОИДЫ**

Th 90 232,0381±1 $6d^2 7s^2$ ТОРИЙ	**Pa** 91 231,03588±2 $5f^2 6d^1 7s^2$ ПРОТАКТИНИЙ	**U** 92 238,0289±1 $5f^3 6d^1 7s^2$ УРАН	**Np** 93 [237] $5f^4 6d^1 7s^2$ НЕПТУНИЙ	**Pu** 94 [244] $5f^6 7s^2$ ПЛУТОНИЙ	**Am** 95 [243] $5f^7 7s^2$ АМЕРИЦИЙ	**Cm** 96 [247] $5f^7 6d^1 7s^2$ КЮРИЙ	**Bk** 97 [247] $5f^8 6d^1 7s^2$ БЕРКЛИЙ	**Cf** 98 [251] $5f^{10} 7s^2$ КАЛИФОРНИЙ	**Es** 99 [252] $5f^{11} 7s^2$ ЭЙНШТЕЙНИЙ	**Fm** 100 [257] $5f^{12} 7s^2$ ФЕРМИЙ	**Md** 101 [258] $5f^{13} 7s^2$ МЕНДЕЛЕВИЙ	**No** 102 [259] $5f^{14} 7s^2$ НОБЕЛИЙ	**Lr** 103 [262] $5f^{14} 6d^1 7s^2$ ЛОУРЕНСИЙ

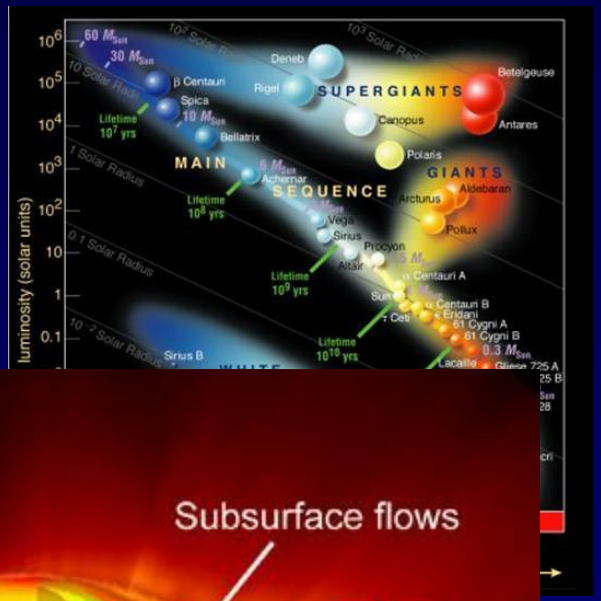
Относительные атомные массы приведены по Международной таблице 1995 года (точность указана для последней значащей цифры). Для элементов, не имеющих стабильных

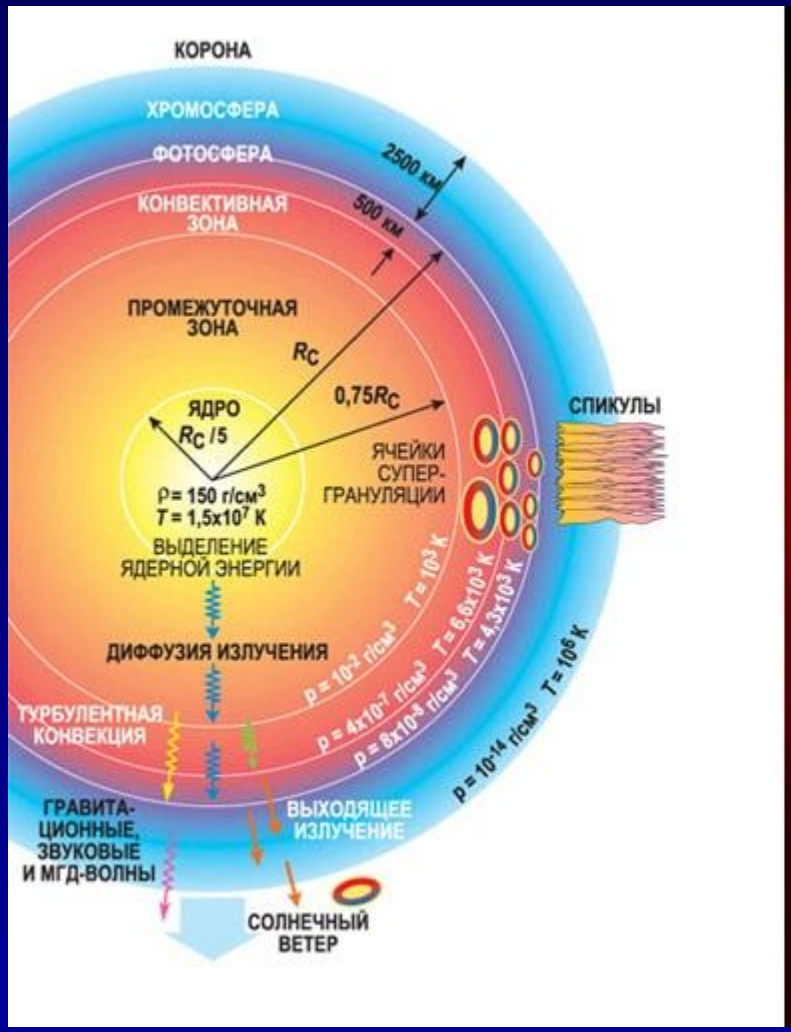
Звезда Главной последовательности

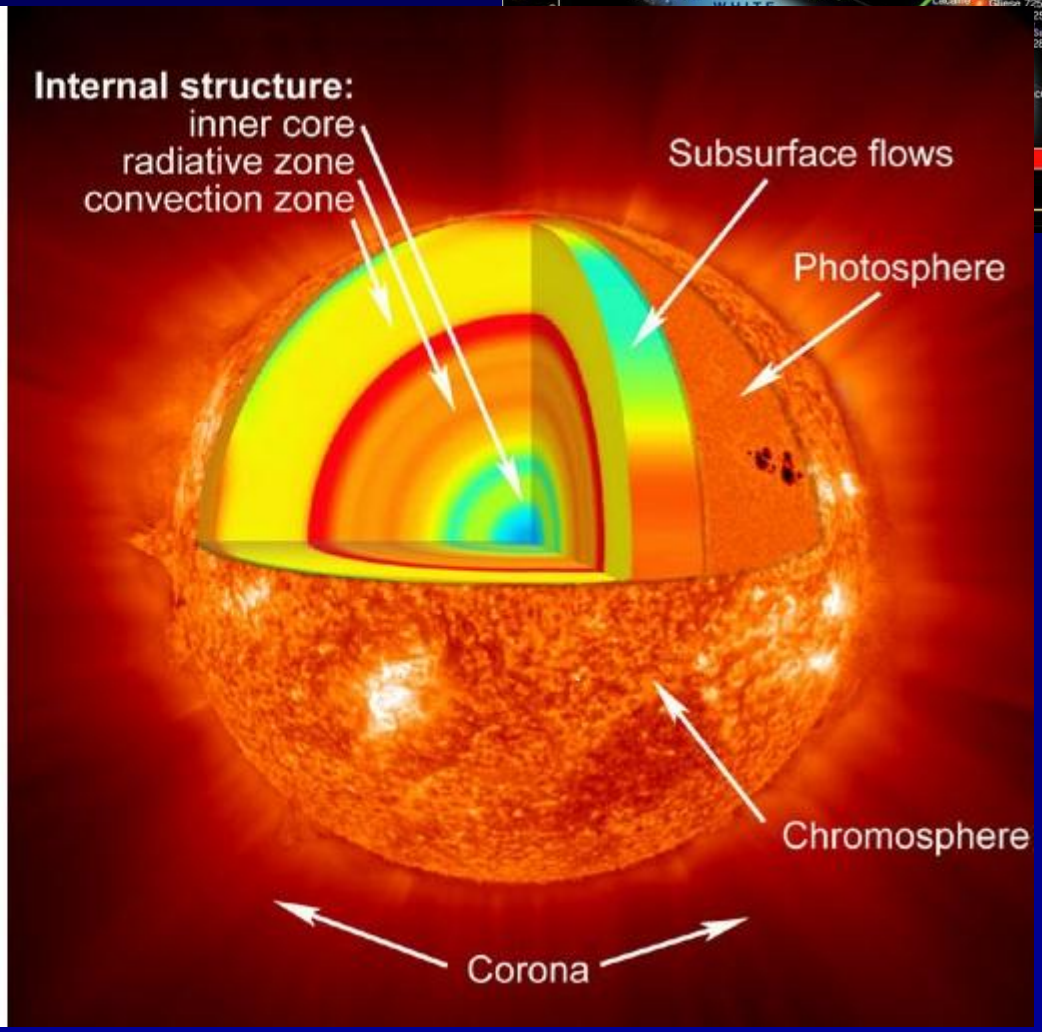


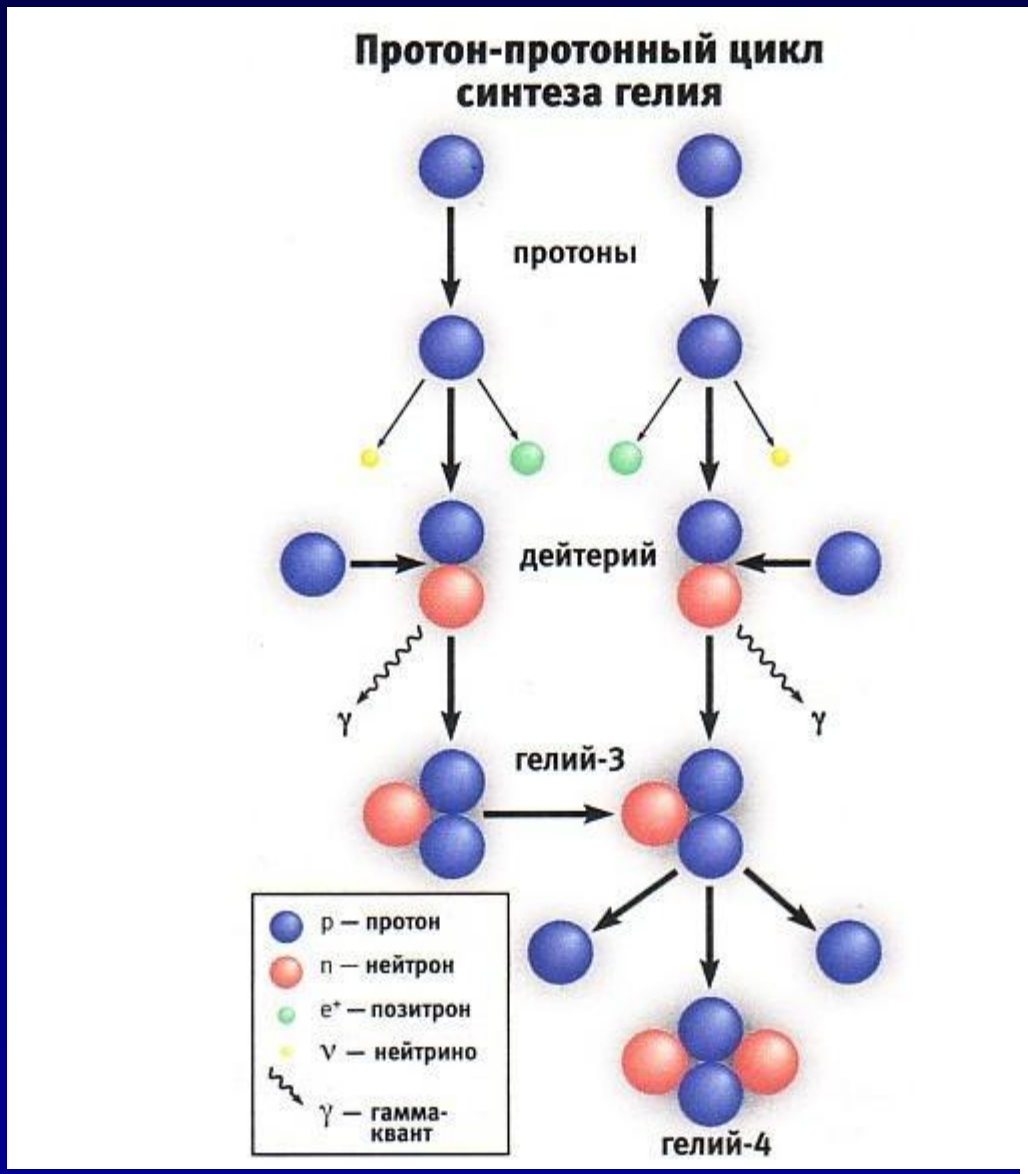


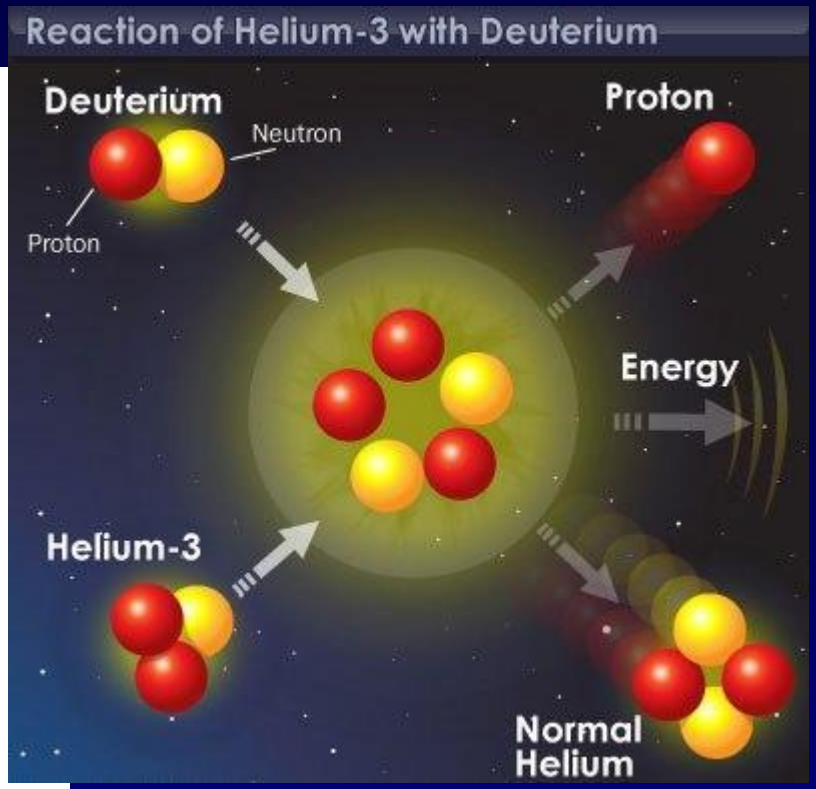
Звезда Главной последовательности

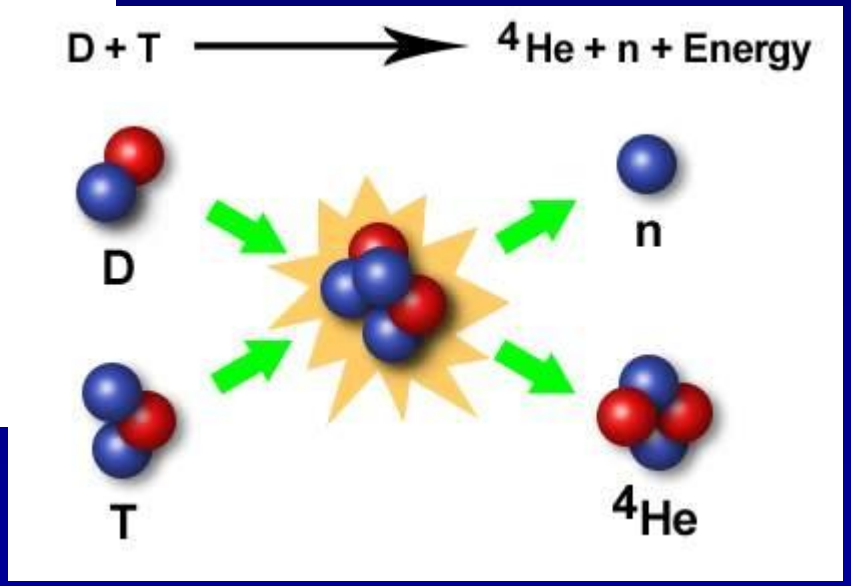




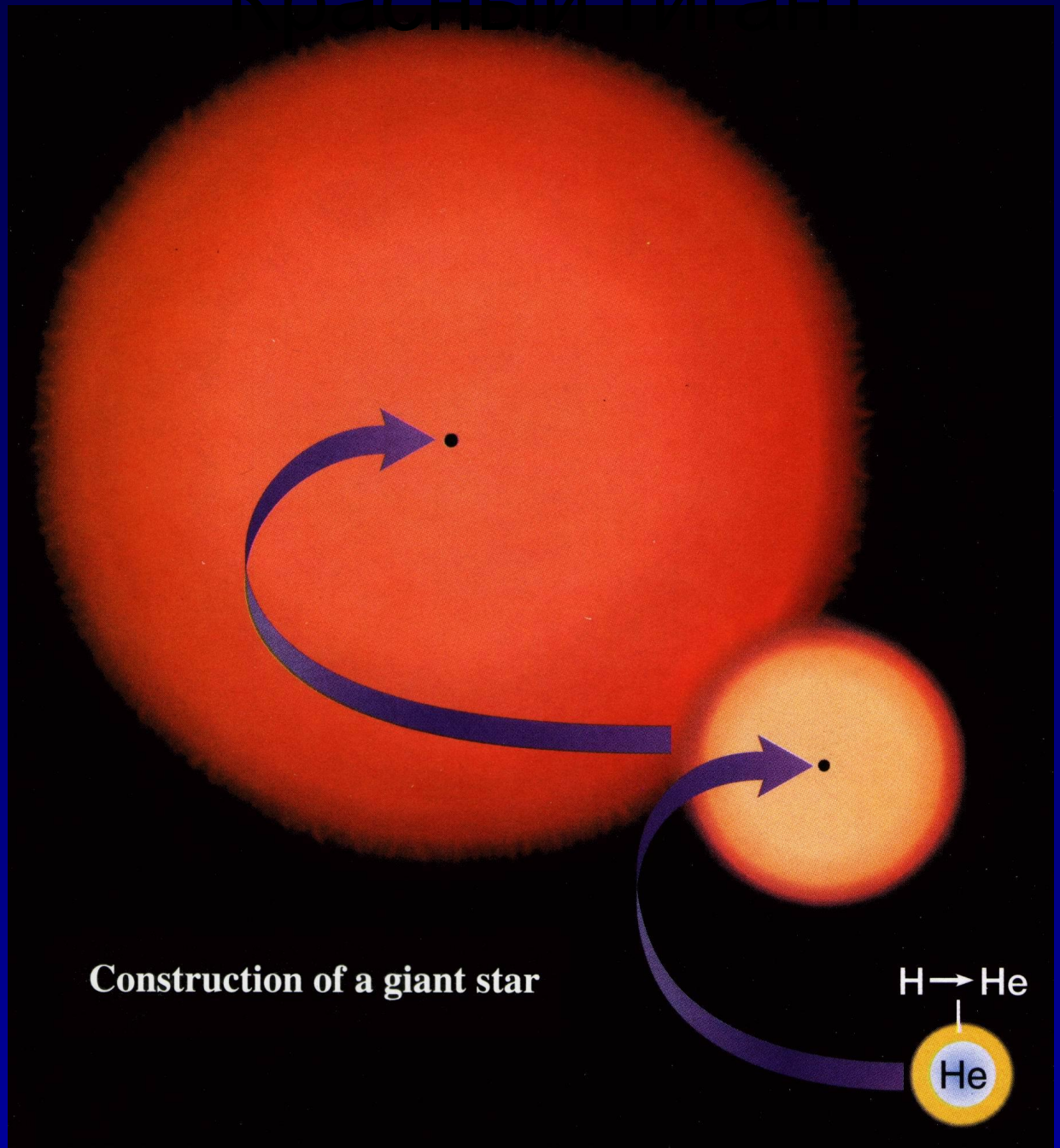


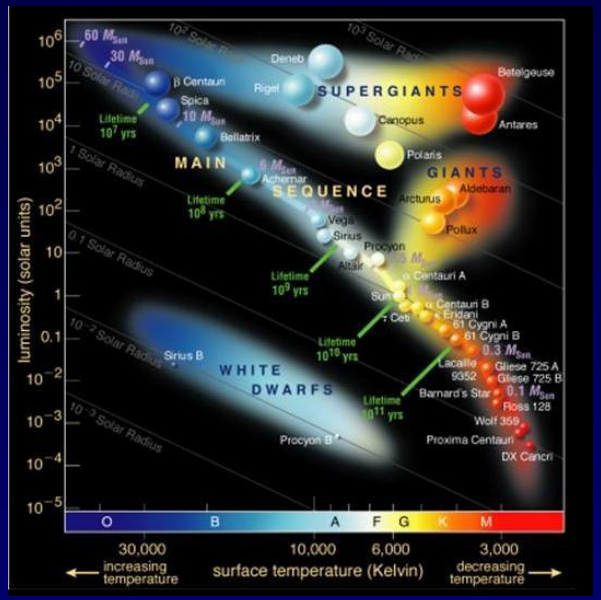

Протон-протонный цикл синтеза гелия
протоны
дейтерий
γ
γ
гелий-3
гелий-4
p — протон
n — нейтрон
e⁺ — позитрон
ν — нейтрино
γ — гамма-квант


Reaction of Helium-3 with Deuterium
Deuterium
Neutron
Proton
Proton
Energy
Helium-3
Normal Helium

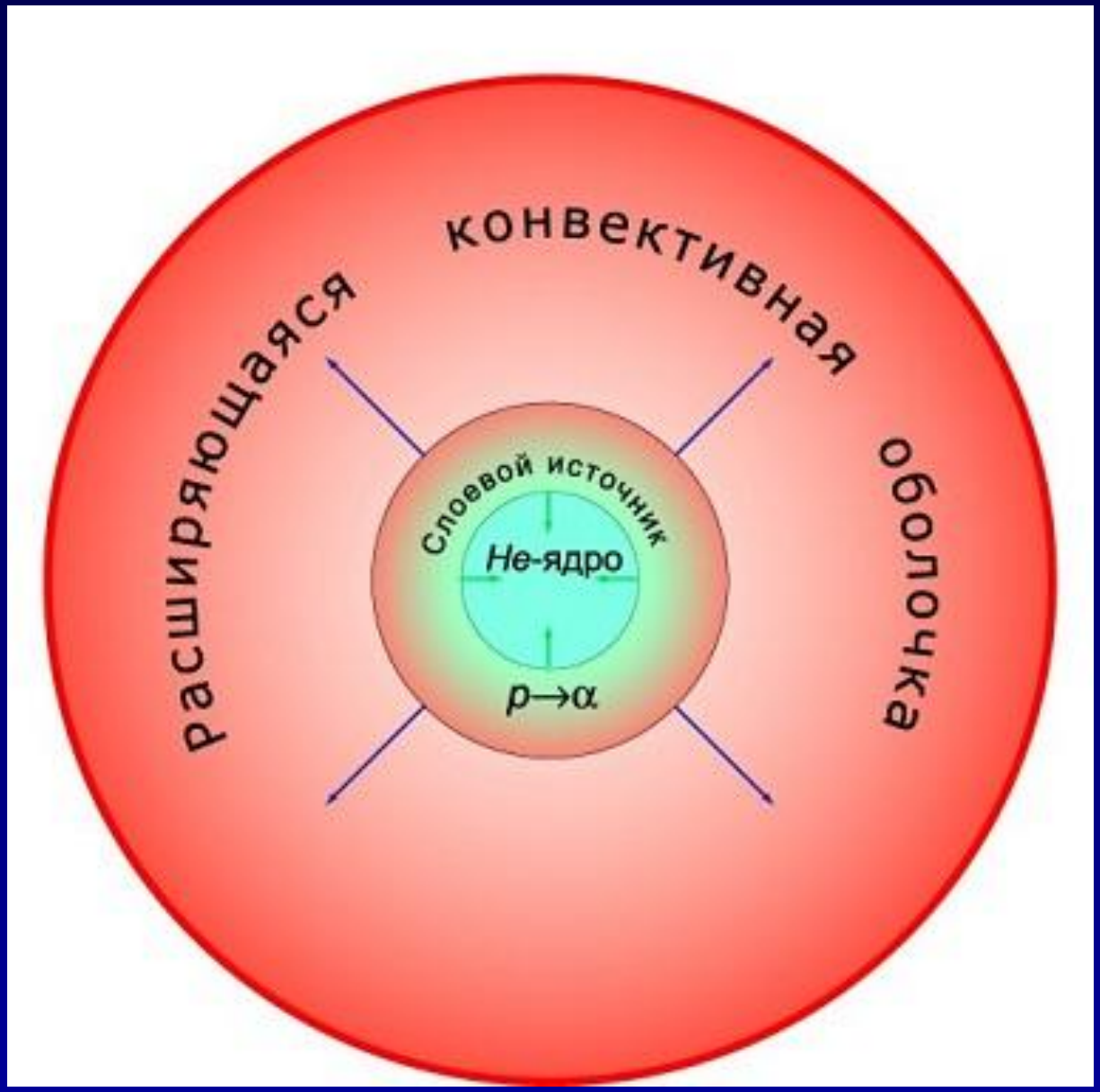

D + T → ⁴He + n + Energy
D
T
n
⁴He

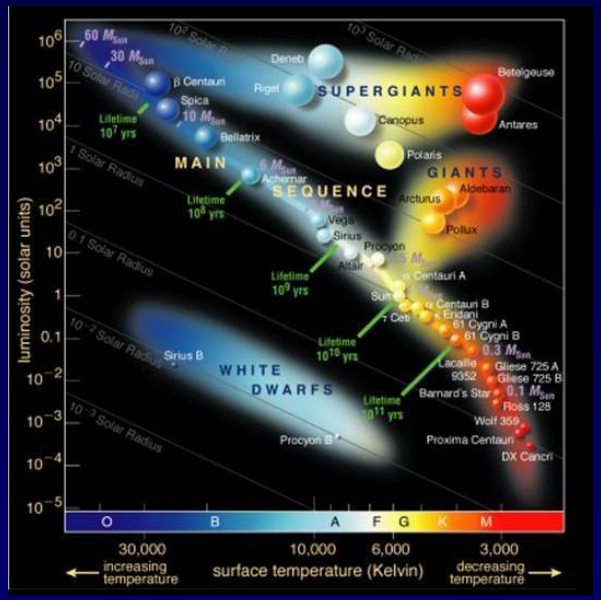
Красный гигант

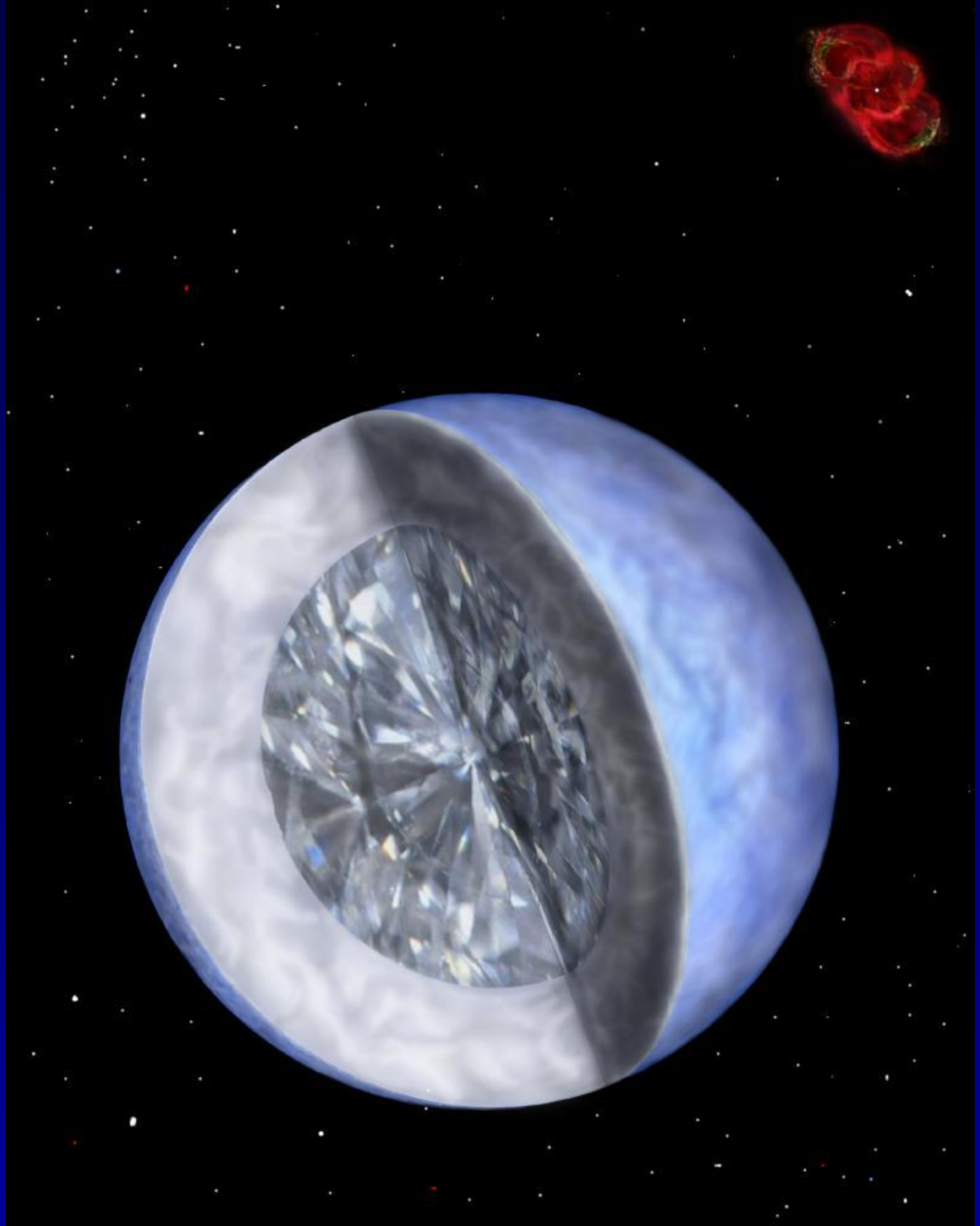


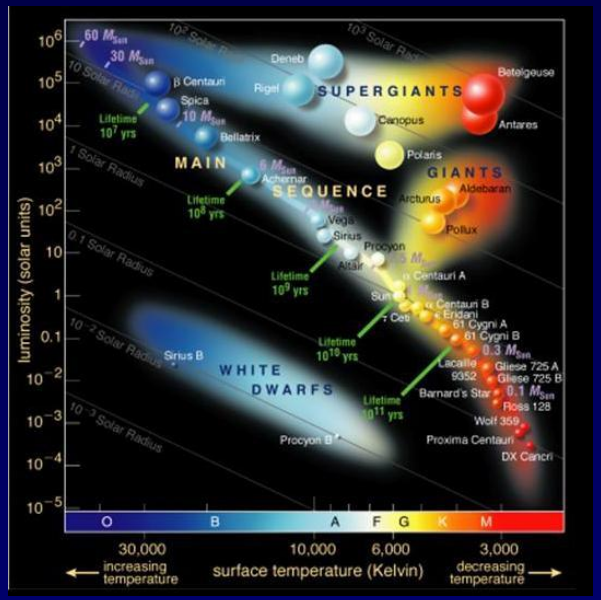


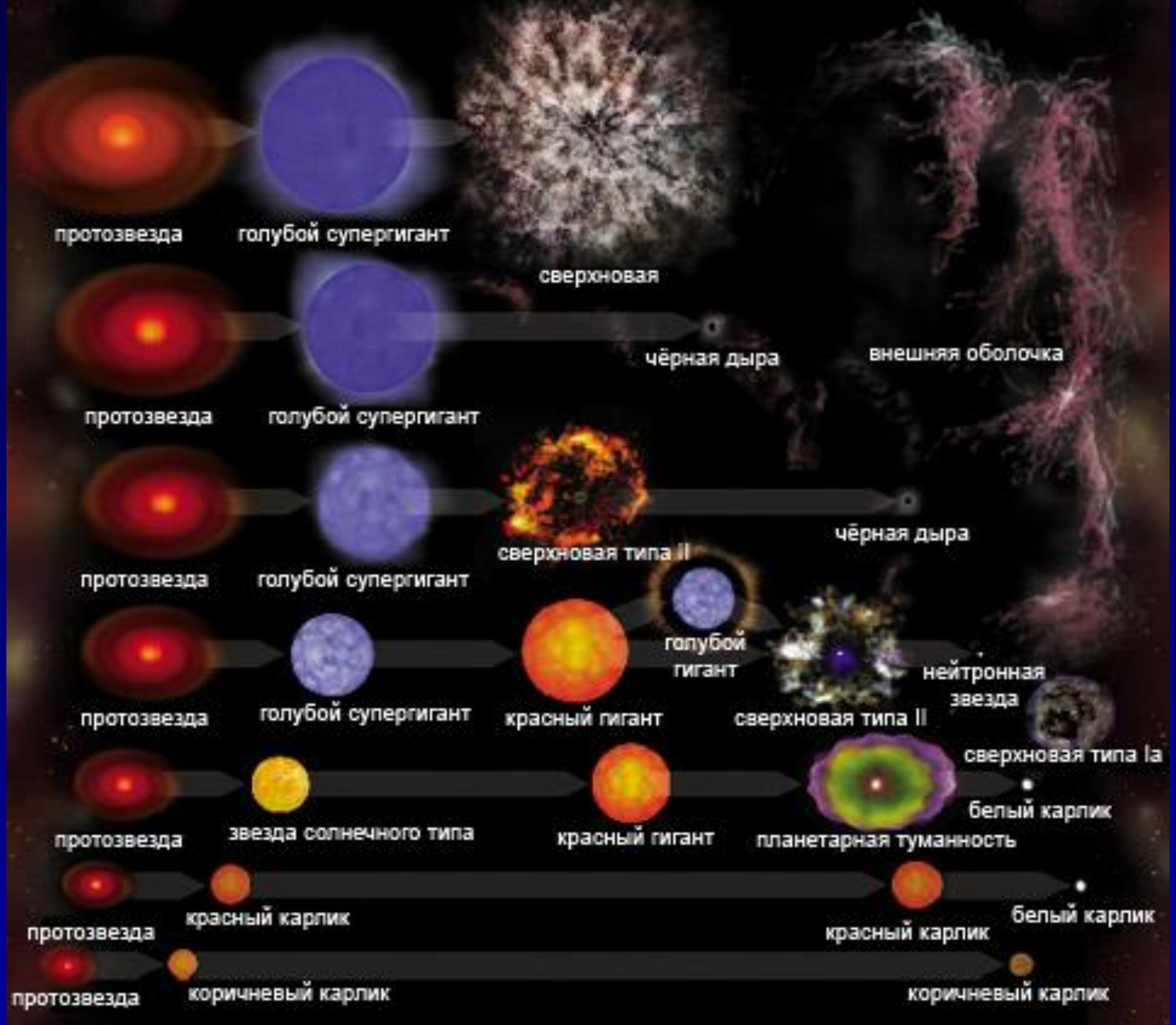
Красный гигант





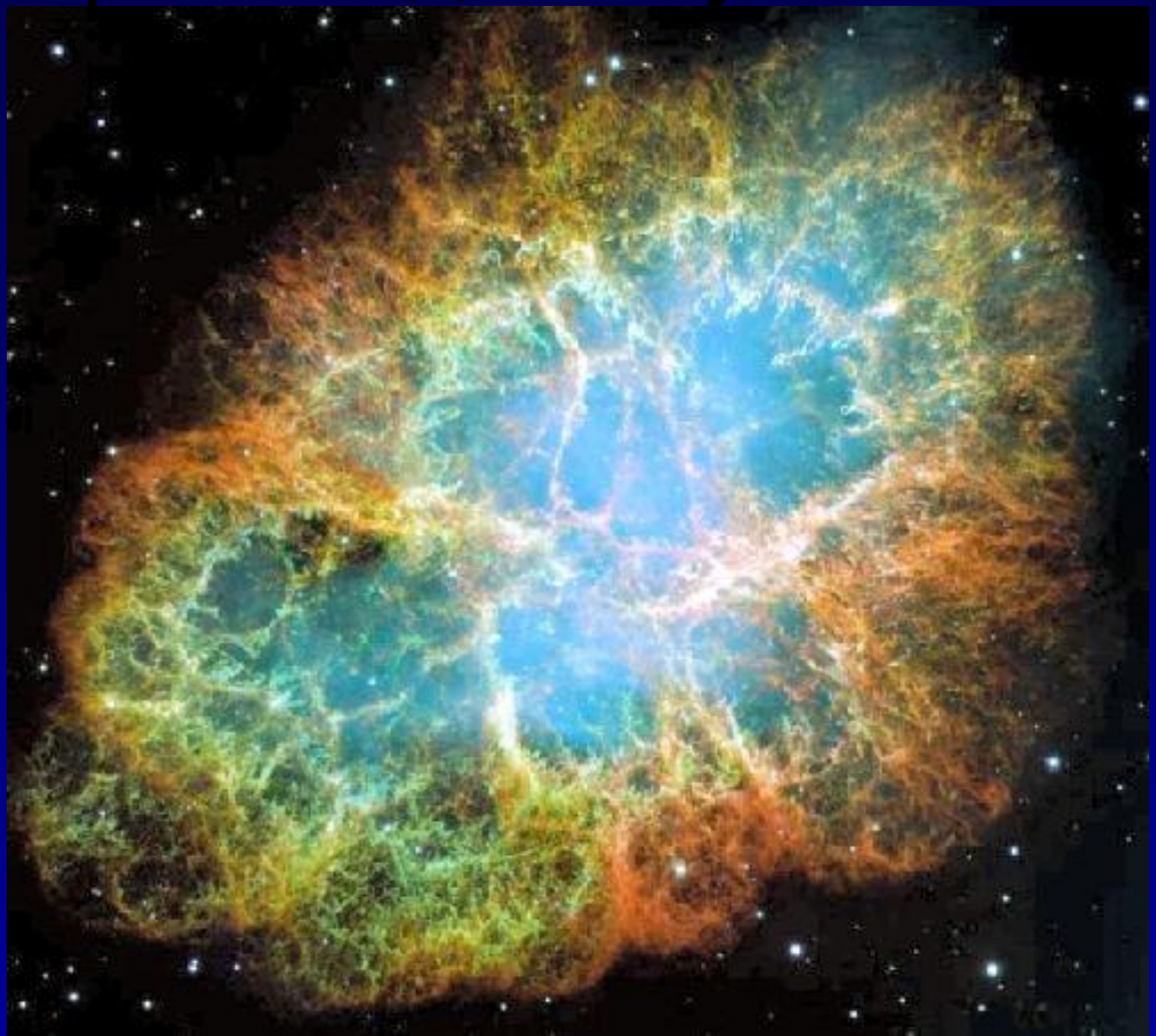



luminosity (solar units)
SUPERGIANTS
GIANTS
MAIN SEQUENCE
WHITE DWARFS
Deneb
Rigel
Betelgeuse
Canopus
Antares
Polaris
Aldebaran
Arcturus
Pollux
β Centauri
Spica
Bellatrix
Achernar
Vega
Sirius
Procyon
Altair
α Centauri A
Sun
α Centauri B
τ Ceti
ε Eridani
61 Cygni A
61 Cygni B
Lacaille 9352
Gliese 725 A
Gliese 725 B
Barnard's Star
Ross 128
Wolf 359
Proxima Centauri
DX Cancri
Sirius B
Procyon B
Lifetime 10^7 yrs
Lifetime 10^8 yrs
Lifetime 10^9 yrs
Lifetime 10^{10} yrs
Lifetime 10^{11} yrs
1 Solar Radius
0.1 Solar Radius
O B A F G K M
30,000
10,000
6,000
3,000
increasing temperature
surface temperature (Kelvin)
decreasing temperature


протозвезда
голубой супергигант
сверхновая
чёрная дыра
внешняя оболочка
протозвезда
голубой супергигант
чёрная дыра
сверхновая типа II
протозвезда
голубой супергигант
голубой гигант
нейтронная звезда
протозвезда
голубой супергигант
красный гигант
сверхновая типа II
сверхновая типа Ia
белый карлик
протозвезда
звезда солнечного типа
красный гигант
планетарная туманность
протозвезда
красный карлик
красный карлик
белый карлик
протозвезда
коричневый карлик
коричневый карлик

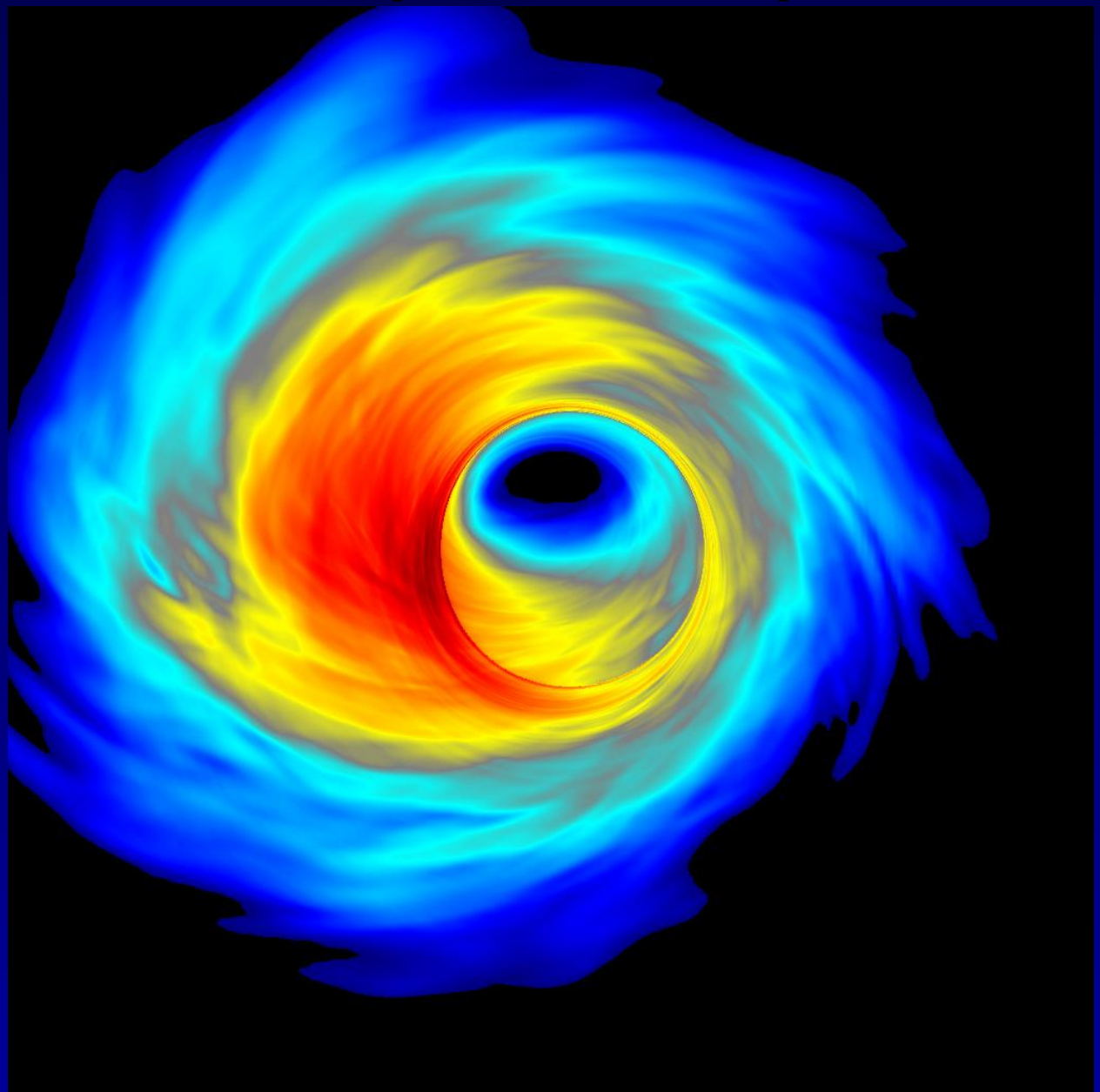
Эволюция звезды главной последовательности

Крабовидная туманность

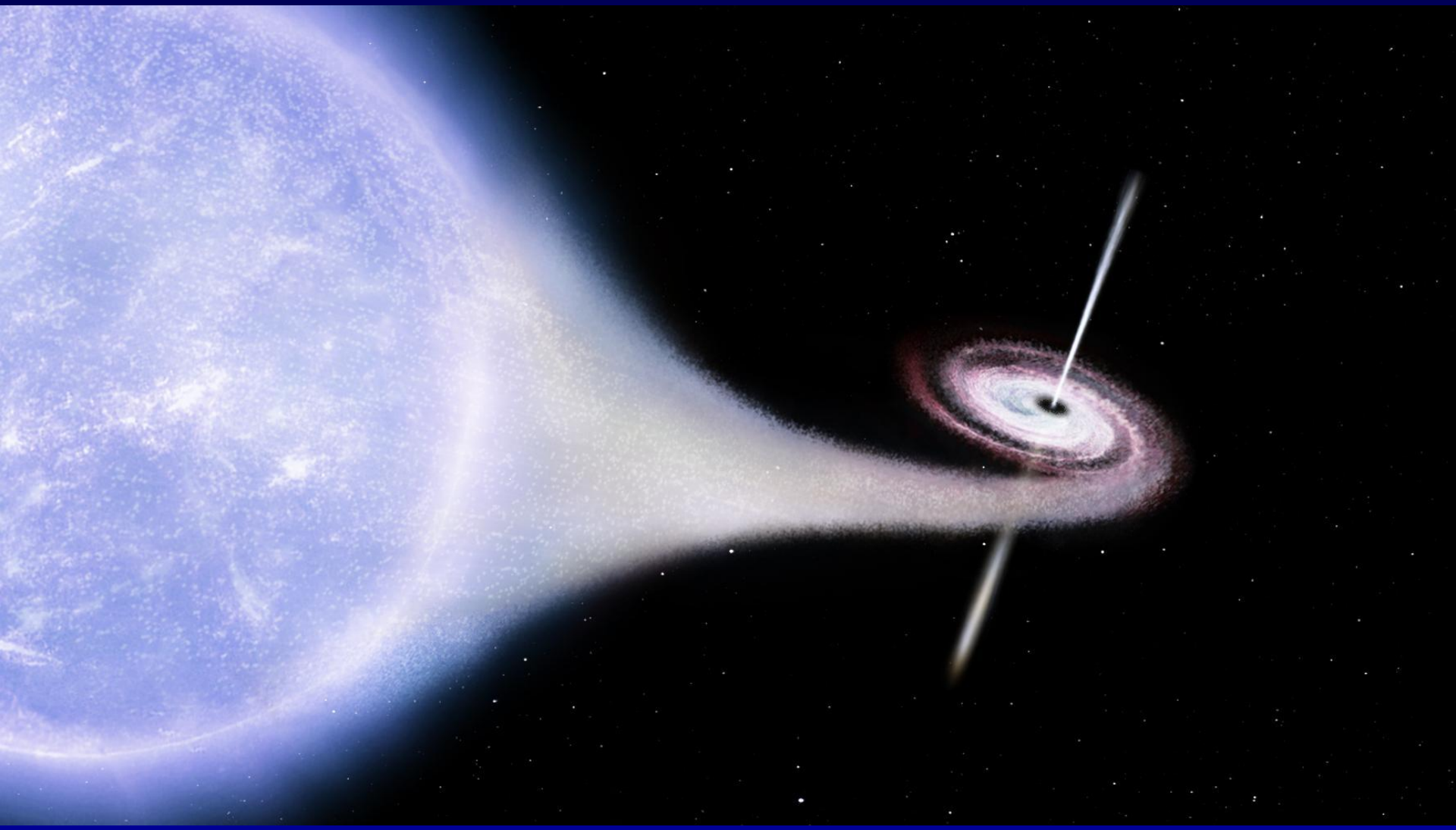


Нейтронная звезда

Черная дыра

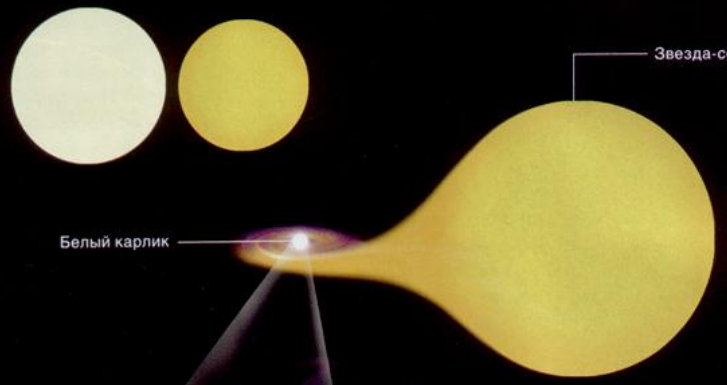


Черная дыра



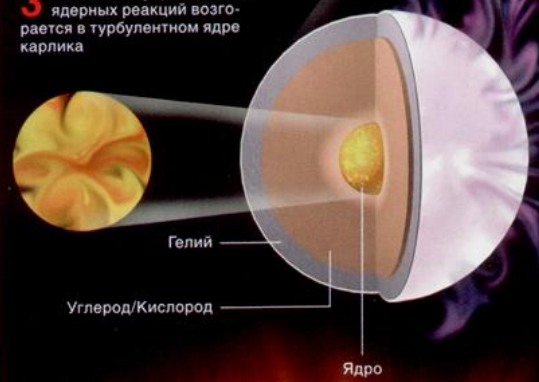
ТЕРМОЯДЕРНАЯ СВЕРХНОВАЯ

Один из видов сверхновых типа *Ia* — результат внезапной ядерной детонации звезды



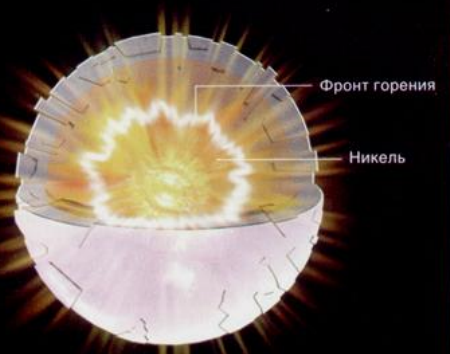
1 Более массивная из двух звезд солнечного типа, исчерпав свое топливо, превращается в белый карлик

2 Белый карлик захватывает газ, теряемый соседкой, и приближается к критической массе

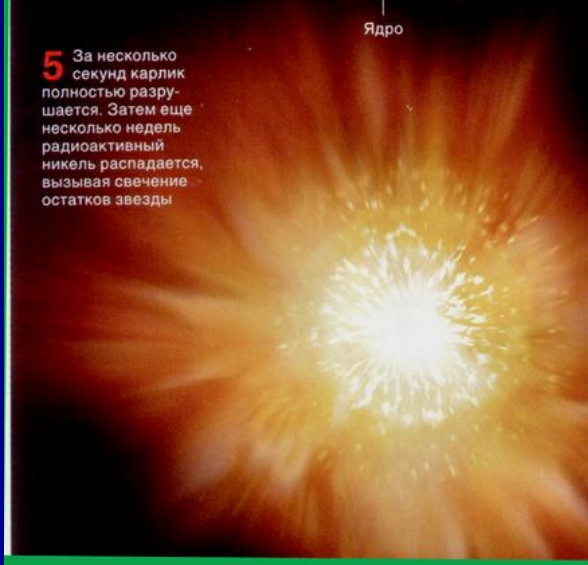


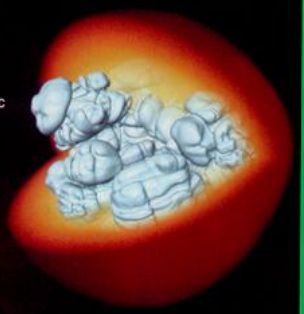
3 «Пламя» неуправляемых ядерных реакций возгорается в турбулентном ядре карлика

4 Пламя устремляется наружу, превращая углерод и кислород в никель



5 За несколько секунд карлик полностью разрушается. Затем еще несколько недель радиоактивный никель распадается, вызывая свечение остатков звезды

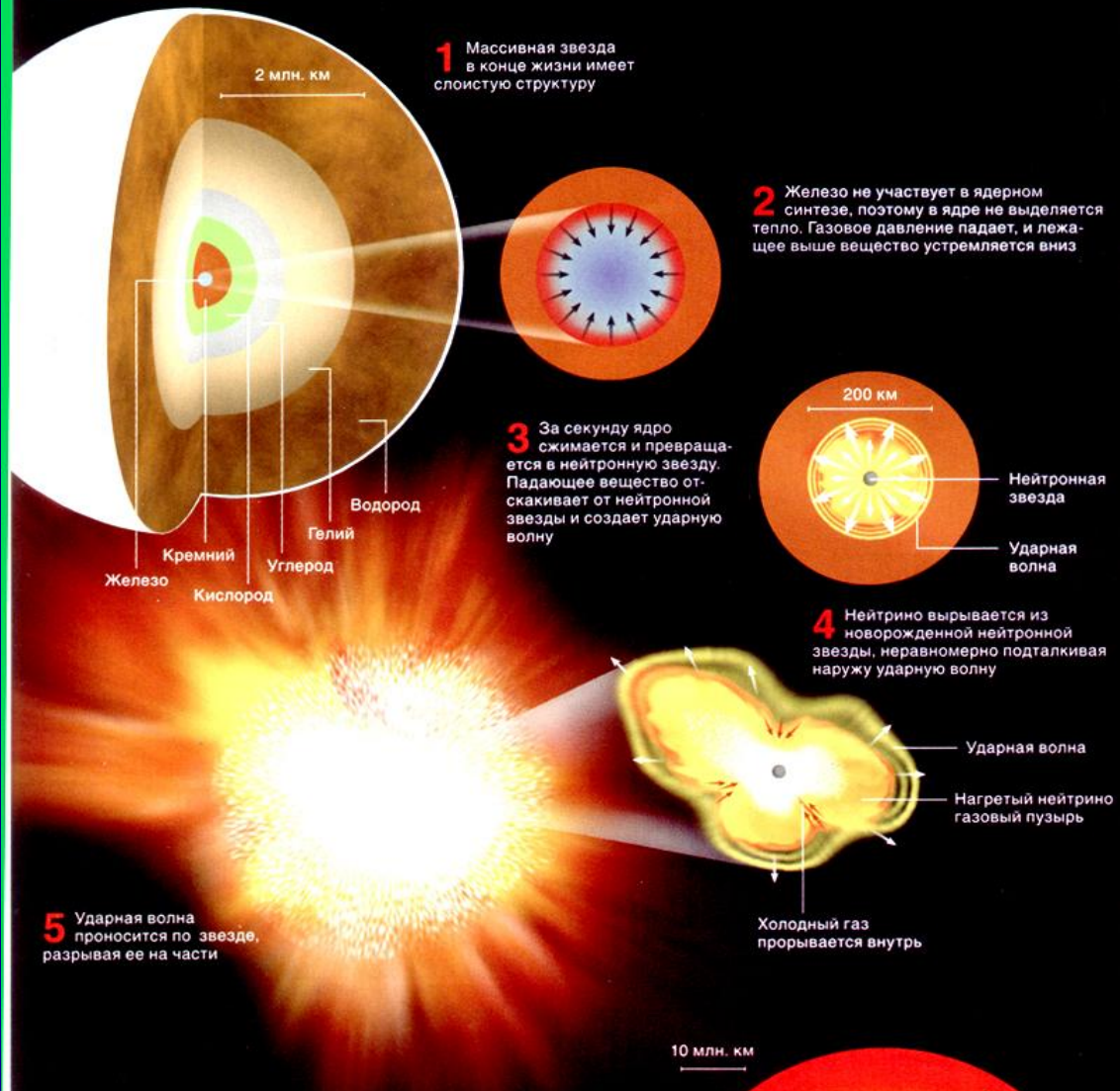


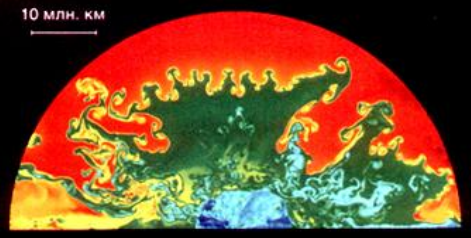


Прорыв в моделировании сверхновых позволил исследовать турбулентность. Здесь показано, что произойдет через 0,6 с после воспламенения. Фронт ядерного горения имеет турбулентную, пузырчатую структуру (*голубой*). Турбулентность служит причиной быстрого продвижения фронта и подавления стабилизирующих механизмов звезды

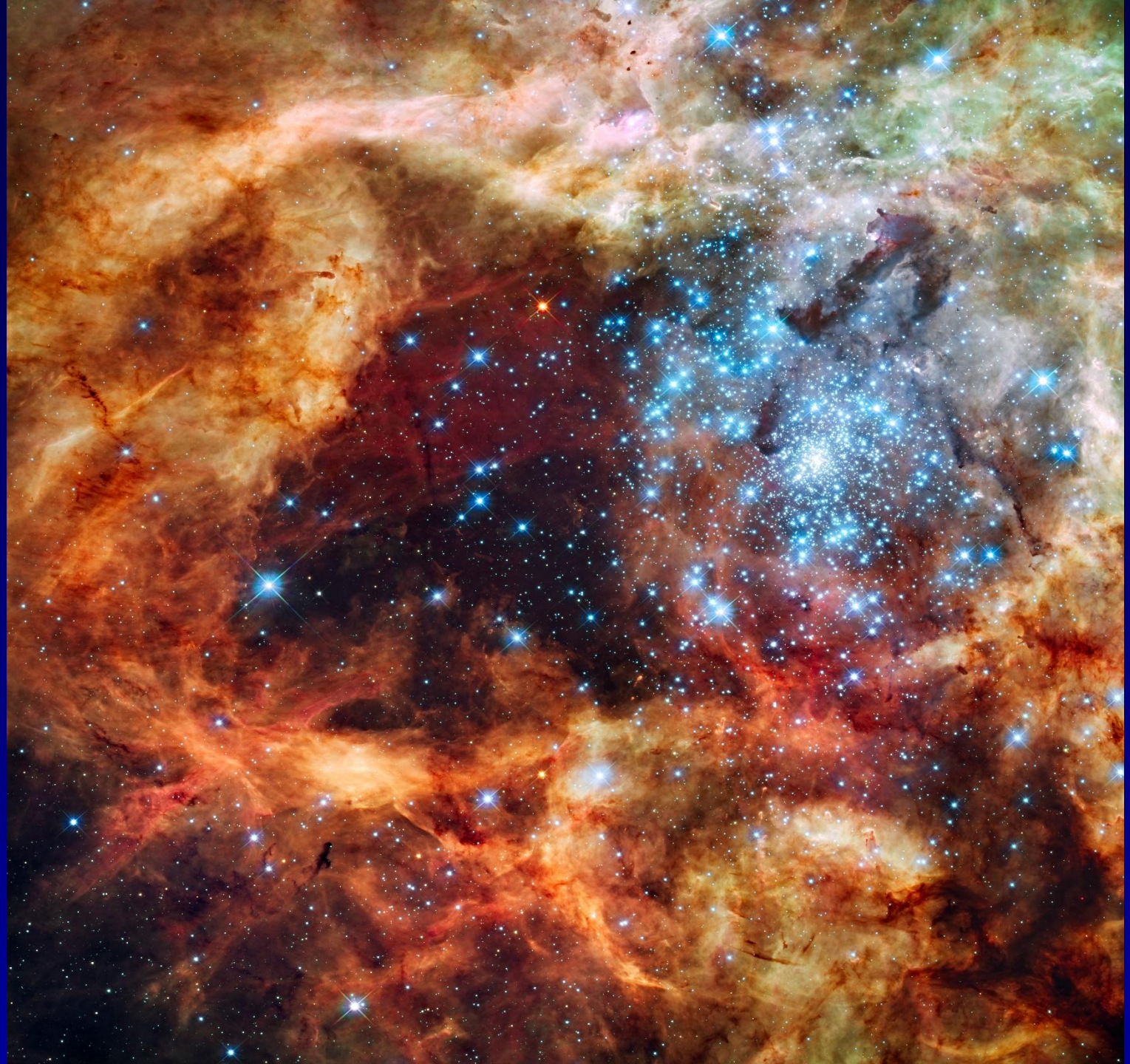
СВЕРХНОВАЯ С КОЛЛАПСОМ ЯДРА

Сверхновые другого рода образуются при сжатии звезд с массами более 8 масс Солнца. Они относятся к типам *Ib*, *Ic* или *II*, в зависимости от наблюдаемых особенностей





Современные модели способны детально проследить хаотические движения в процессе взрыва. Здесь показана внутренность звезды через 5,5 ч после начала взрыва. Движущиеся вверх крупные пузыри поддерживают ударную волну до расстояния 300 млн. км. Нейтрино, вообще-то очень слабо взаимодействующие частицы, устремляются наружу в таком количестве и с такой энергией, что начинают играть главную роль. Турбулентность перемешивает углерод, кислород, кремний и железо из глубоких слоев (*голубой, бирюзовый*) с лежащими выше гелием (*зеленый*) и водородом (*красный*)



Туманности