

Микромир и Вселенная 2019

ОБРАЗОВАНИЕ АТОМНЫХ ЯДЕР

$t \approx 1$ с: начало нуклеосинтеза

$t \approx 1$ с: $T \approx 10^{10}$ К; $E \approx 1$ МэВ

- Реакция слияния с образованием дейтронов:



→ распад дейтронов под действием фотонов $E \geq 2.23 \text{ MeV}$

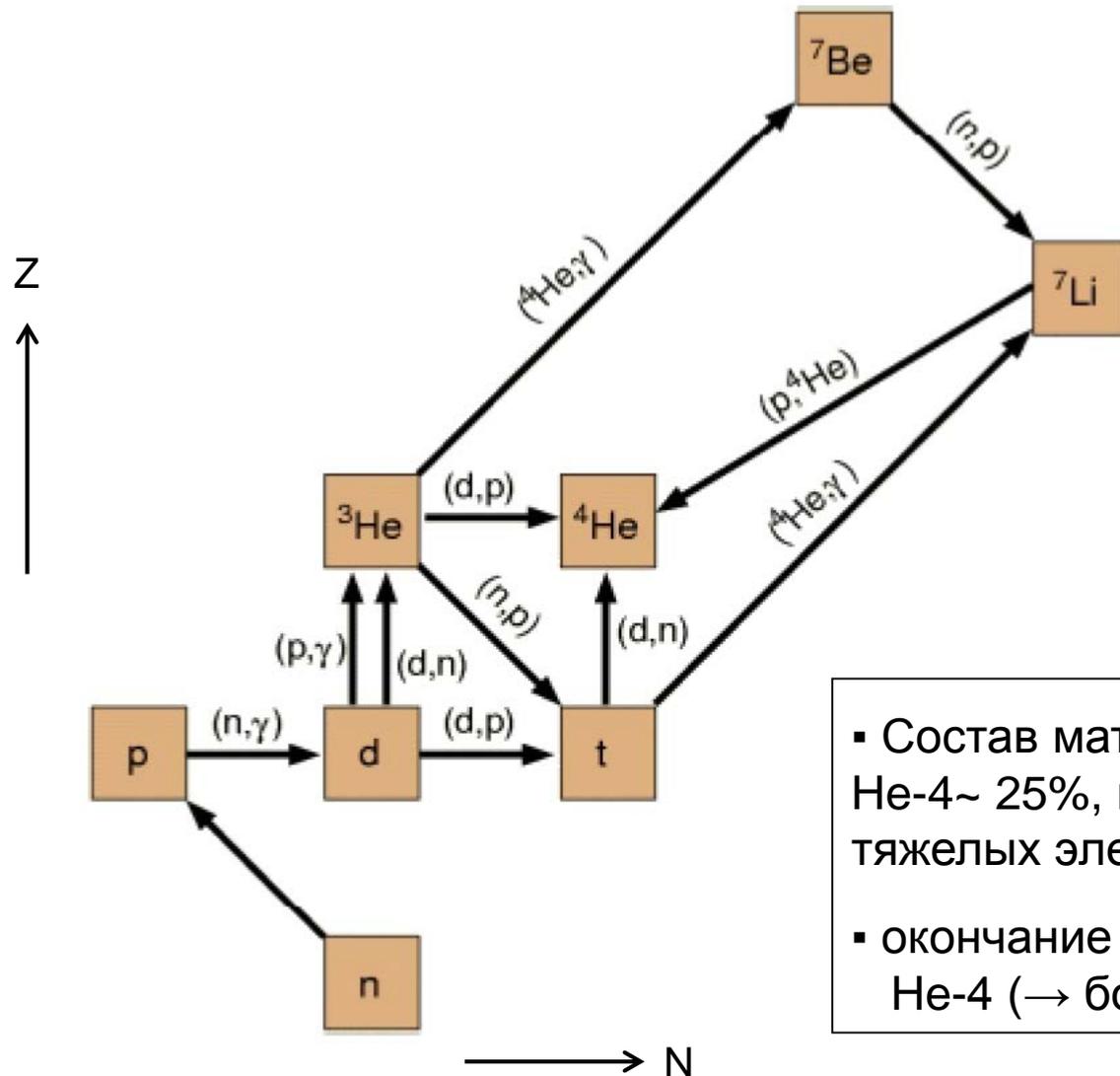
$t \approx (1 - 400)$ с; $T \sim 10^9$ К; $E \sim 0.1$ МэВ

- в процессе расширения и охлаждения Вселенной число фотонов $E > 2 \text{ MeV}$ уменьшается, процесс распада дейтронов прекращается

→ скорость расширения ранней Вселенной является важным параметром для Начальной стадии нуклеосинтеза („первичный нуклеосинтез“)

- При значительном уменьшении числа высокоэнергетичных фотонов становится возможен синтез ядер с $A > 2$ в результате реакций слияния

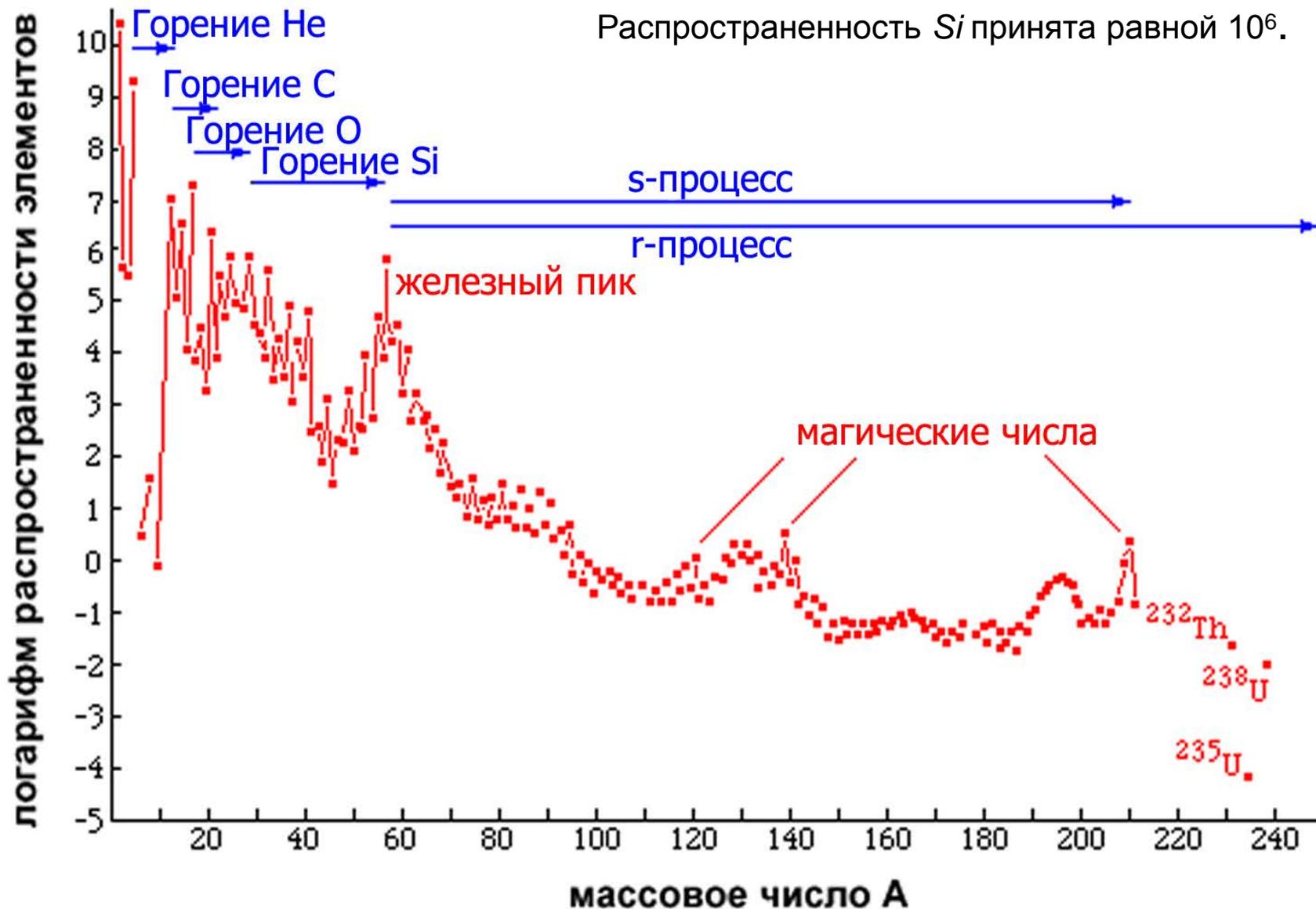
$t \approx 5$ минут: окончание первичного нуклеосинтеза



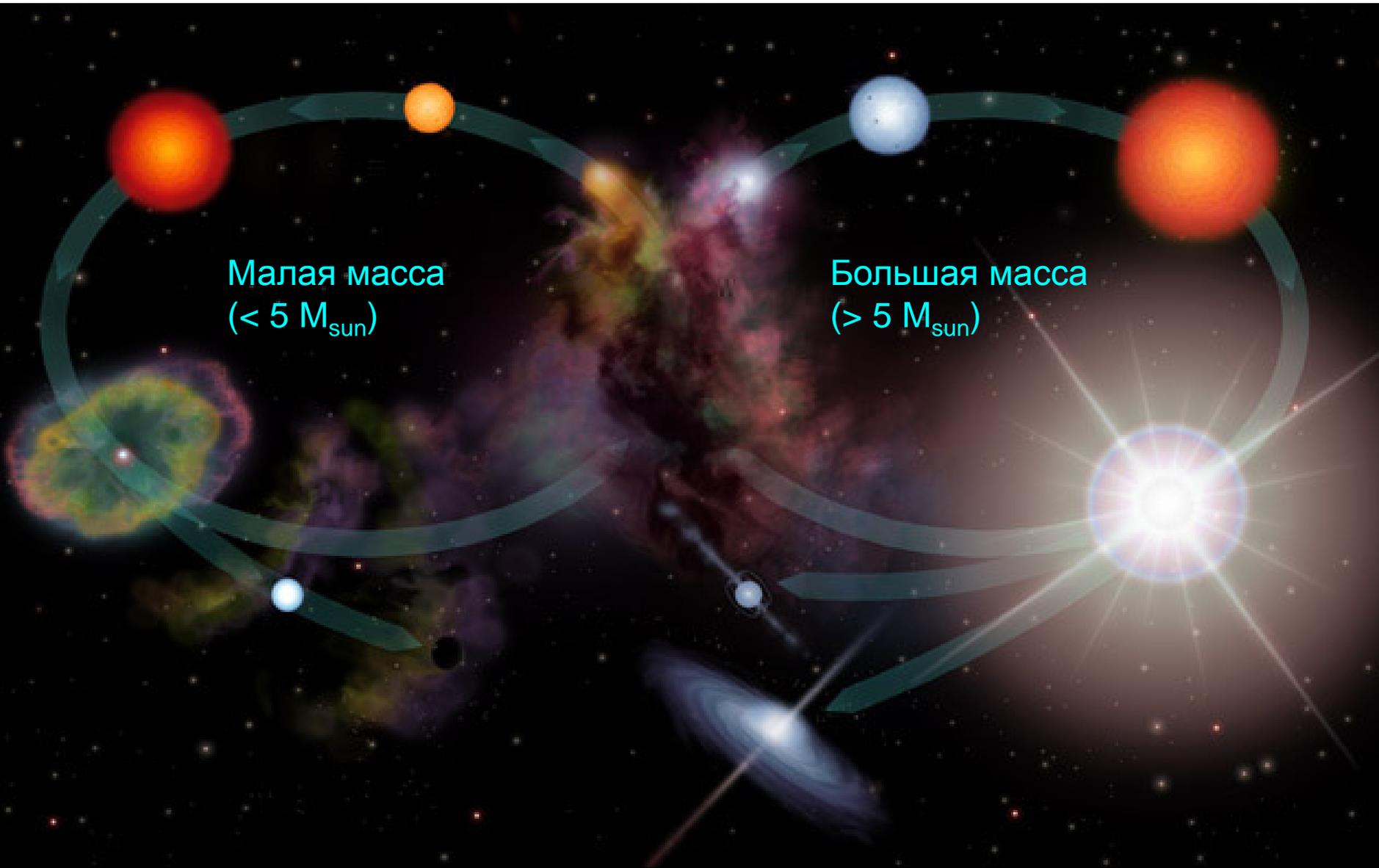
- Состав материи:
He-4 ~ 25%, протоны ~ 75%; следы более тяжелых элементов
- окончание всех ядерных реакций:
He-4 (\rightarrow большая энергия связи)

Распространенность нуклидов во Вселенной

Распространенность Si принята равной 10^6 .



Жизненный цикл звезды



Жизненный цикл звезды



Жизненный цикл звезды

Звездный нуклеосинтез

2. Главная последовательность

3. Красный гигант /
Супергигант

1 & 6.
Газопылевое
облако

Большая
масса ($>5 M_{\text{sun}}$)

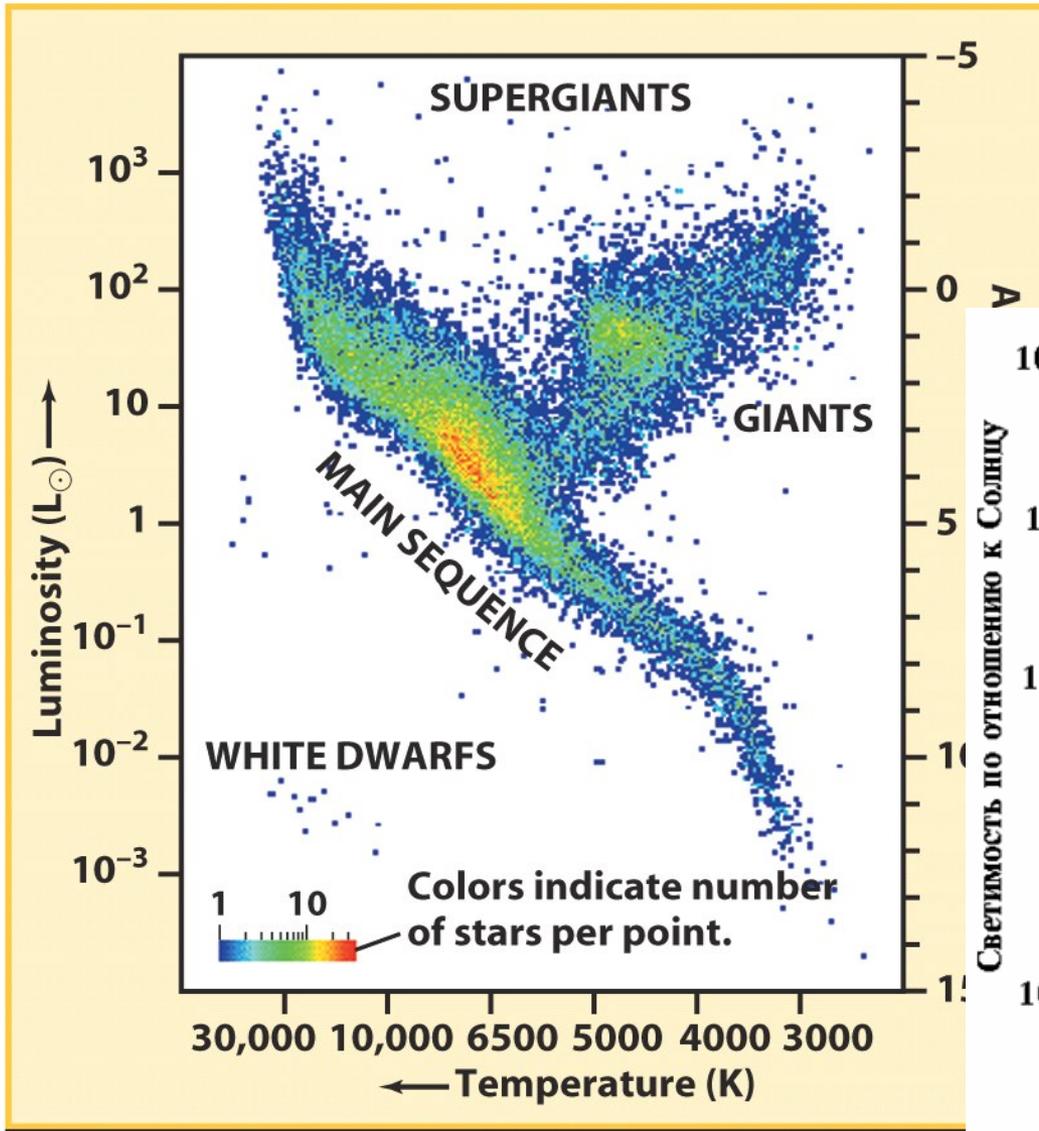
5. Нейтронная
звезда

4. Сверхновая

5. Черная дыра

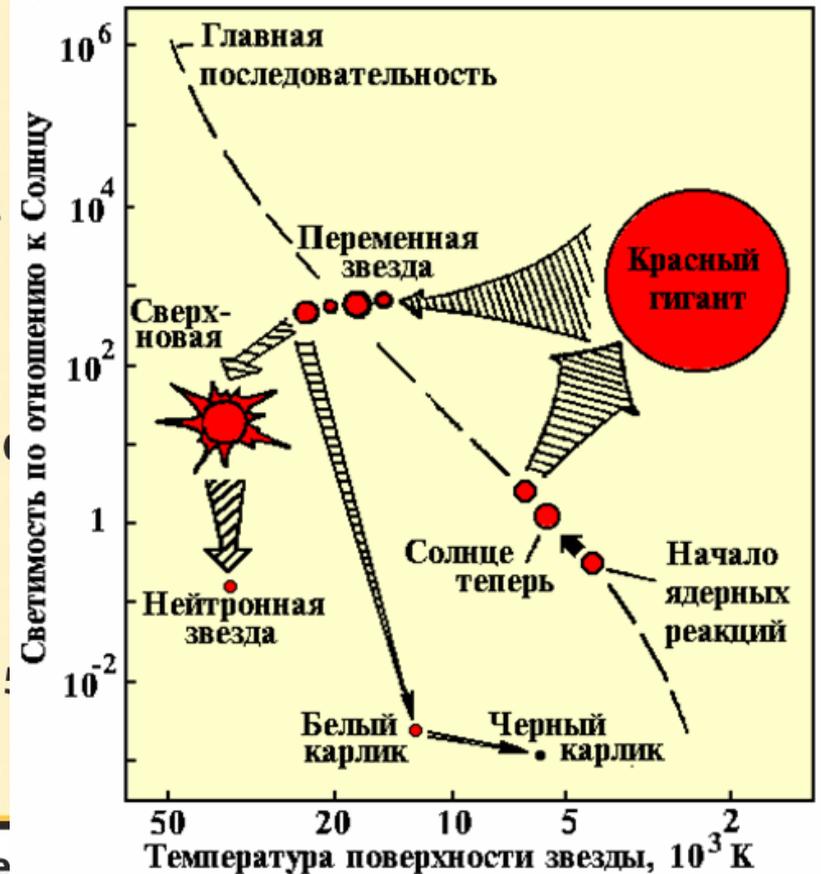


Диаграмма Герцшпрунга-Рассела



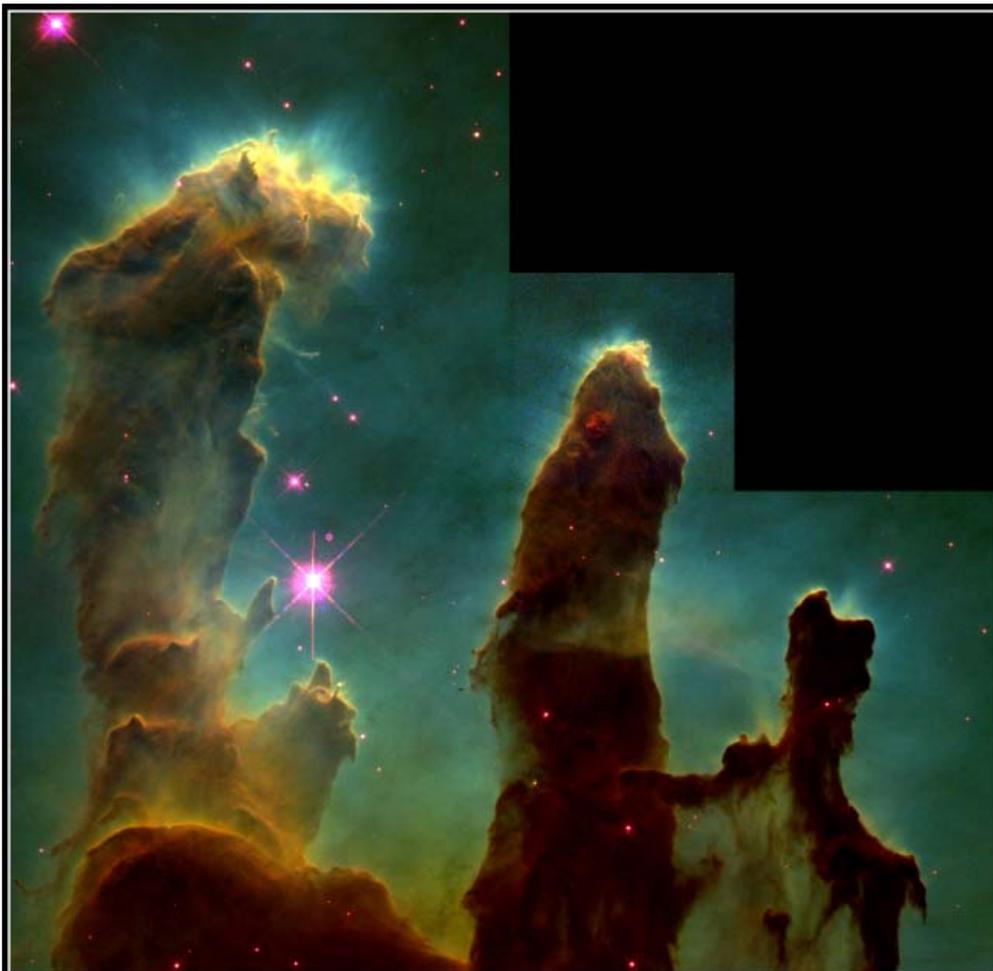
H-R diagram of 20,853 stars—note the width of the main sequence

$$L \sim M^{3.5}$$



Температура поверхности звезды, 10^3 К

Звездная пыль: где все начинается



Gaseous Pillars · M16

HST · WFPC2

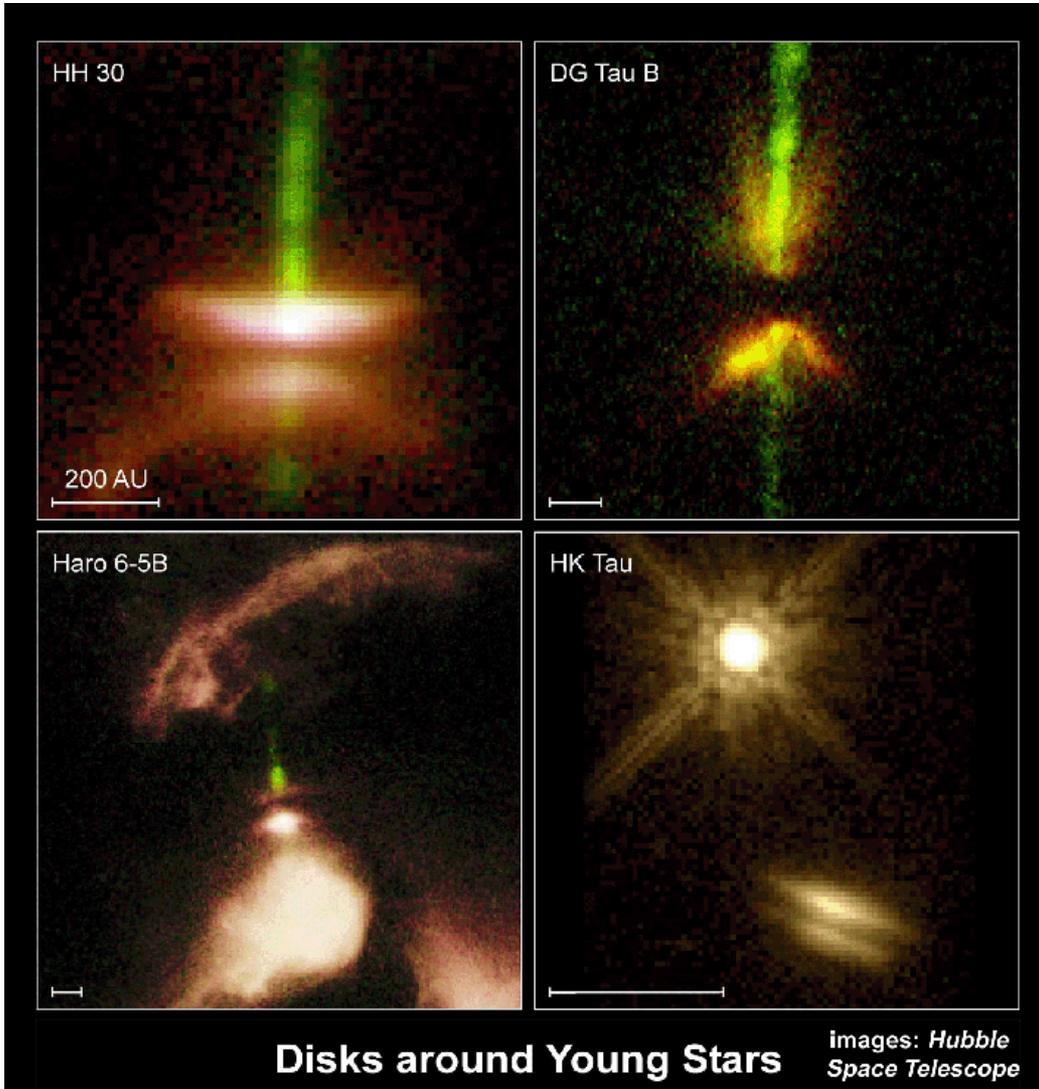
PRC95-44a · ST ScI OPO · November 2, 1995
J. Hester and P. Scowen (AZ State Univ.), NASA



Созвездие Ориона.
Туманность Голова лошади

Созвездие Змеи.
Туманность Орел.
Столпы творения

Протопланетный диск. Протозвезда

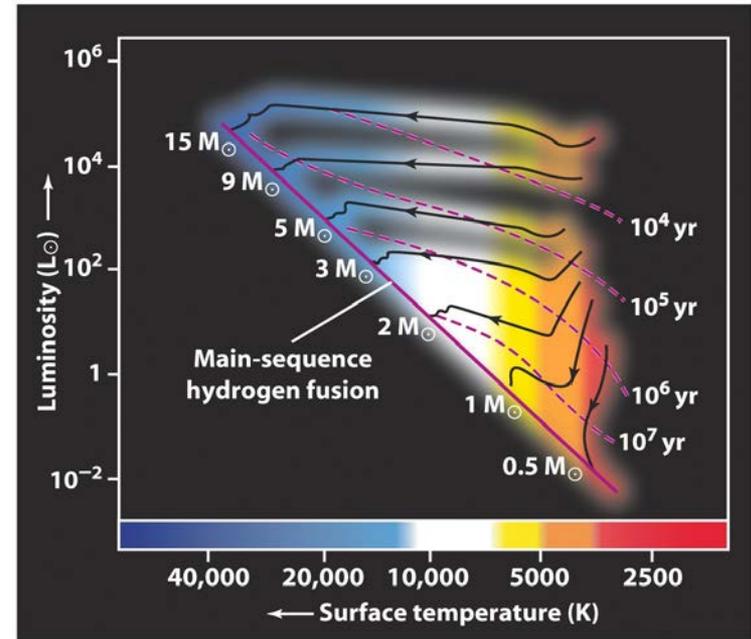


Коллапс фрагментов
газопылевого облака

$\sim 10^5$ до 10^7 лет,

В зависимости от массы

Стадия протозвезды $\sim 10^6$ лет

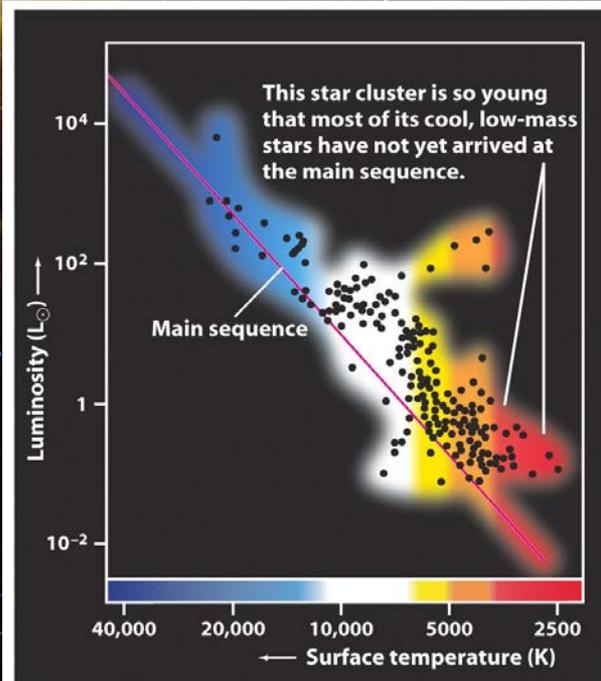




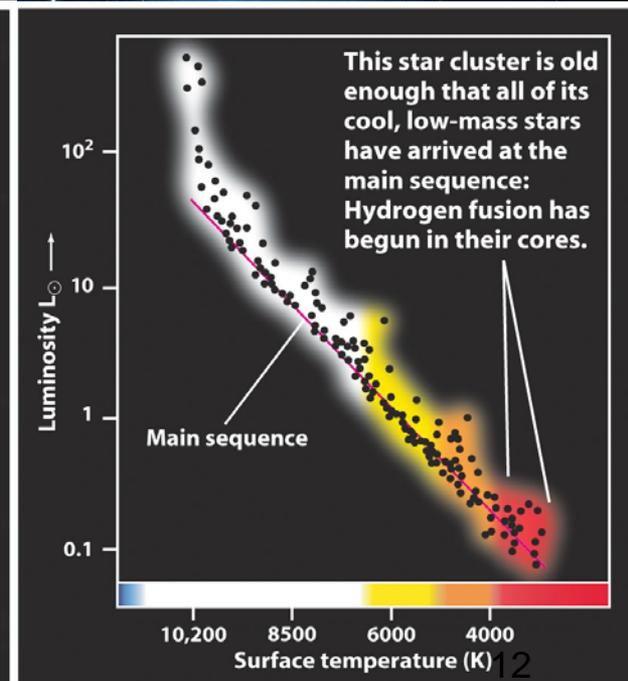
Созвездие Тельца Плеяды



Созвездие Единорога Скопление Снежинки

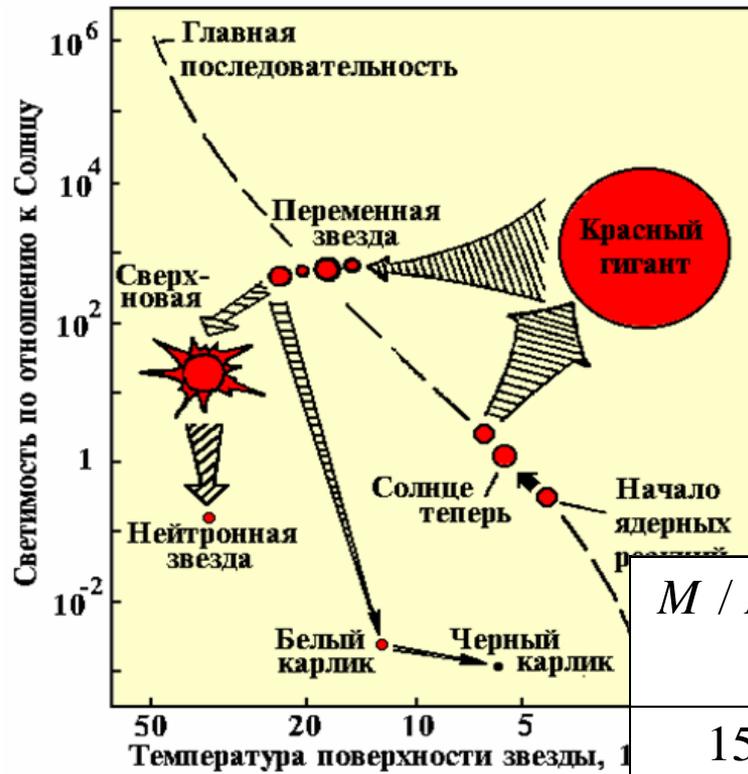


An H-R diagram of the stars in NGC 2264



An H-R diagram of the stars in the Pleiades

Диаграмма Герцшпрунга-Рассела



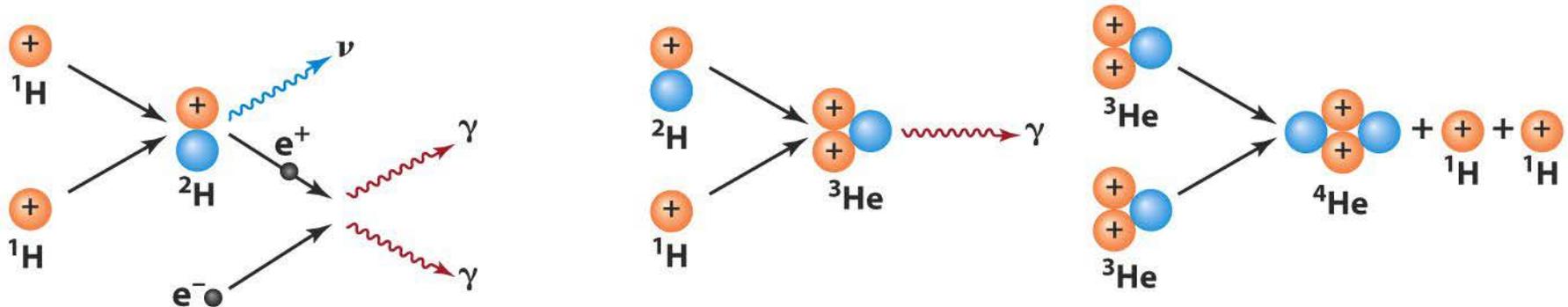
$$L \sim M^{3.5}$$

M / M_{\odot}	Время достижения главной последовательности, лет	Время жизни на главной последовательности, лет
15	$6,2 \cdot 10^4$	$1,0 \cdot 10^7$
9	$1,5 \cdot 10^5$	$2,2 \cdot 10^7$
5	$5,8 \cdot 10^5$	$6,8 \cdot 10^7$
3	$2,5 \cdot 10^6$	$2,3 \cdot 10^8$
1,5	$1,8 \cdot 10^7$	$1,7 \cdot 10^9$
1,0	$5,0 \cdot 10^7$	$8,2 \cdot 10^9$
0,5	$1,5 \cdot 10^8$	$5,0 \cdot 10^{10}$

Главная последовательность

Звезды «зажигаются» с началом реакций термоядерного синтеза

На главной последовательности – только pp-цикл или CNO цикл ($M > 1.1 M_{\text{Sun}}$)



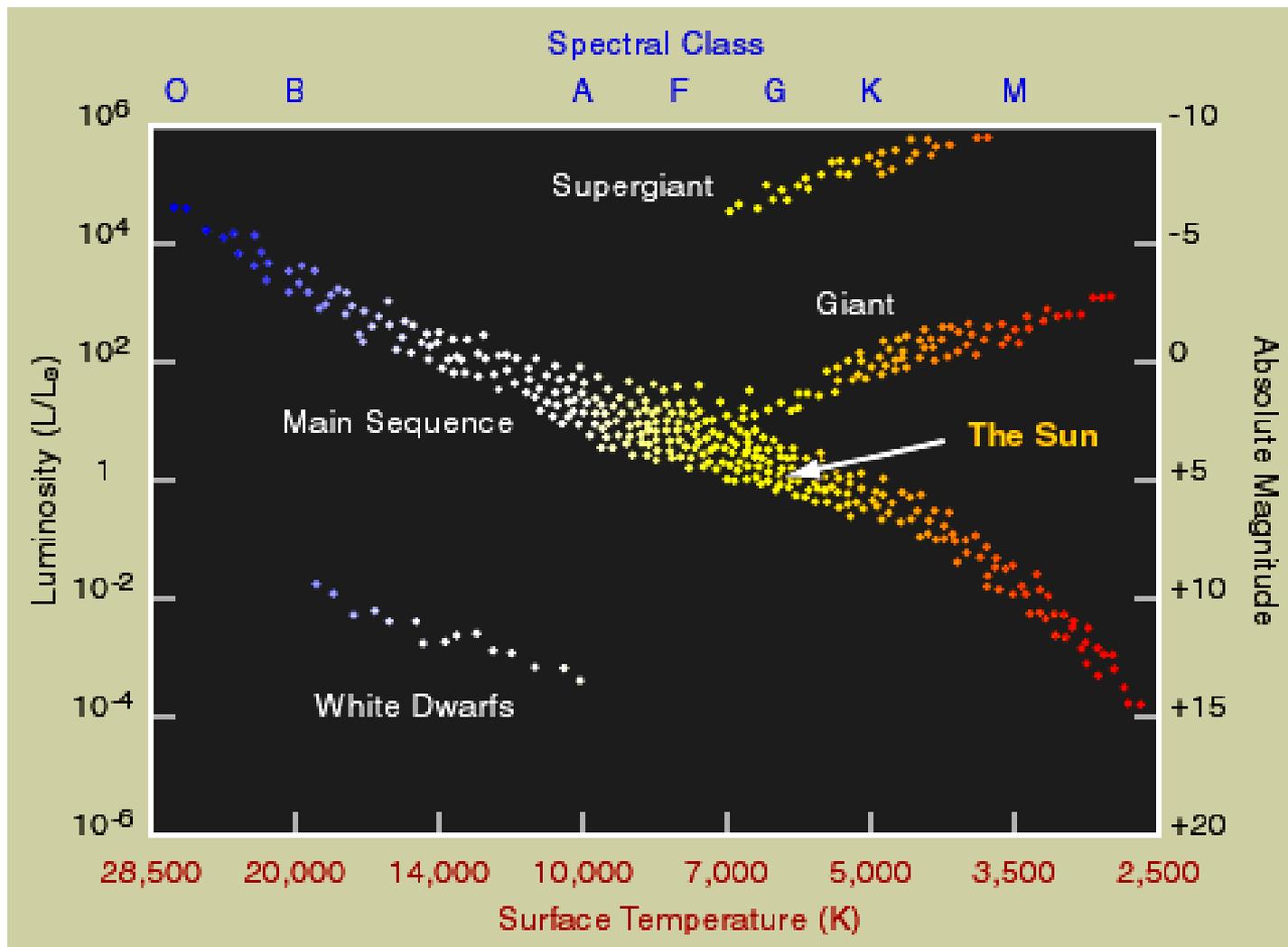
Время жизни на главной последовательности =
= горючее / скорость выгорания $\sim M / L \sim M / M^{3.5}$

время жизни $\sim 1/M^{2.5}$

Звезда в 4 раза тяжелее Солнца проведет на главной последовательности времени в 32 раза меньше

Диаграмма Герцшпрунга-Рассела

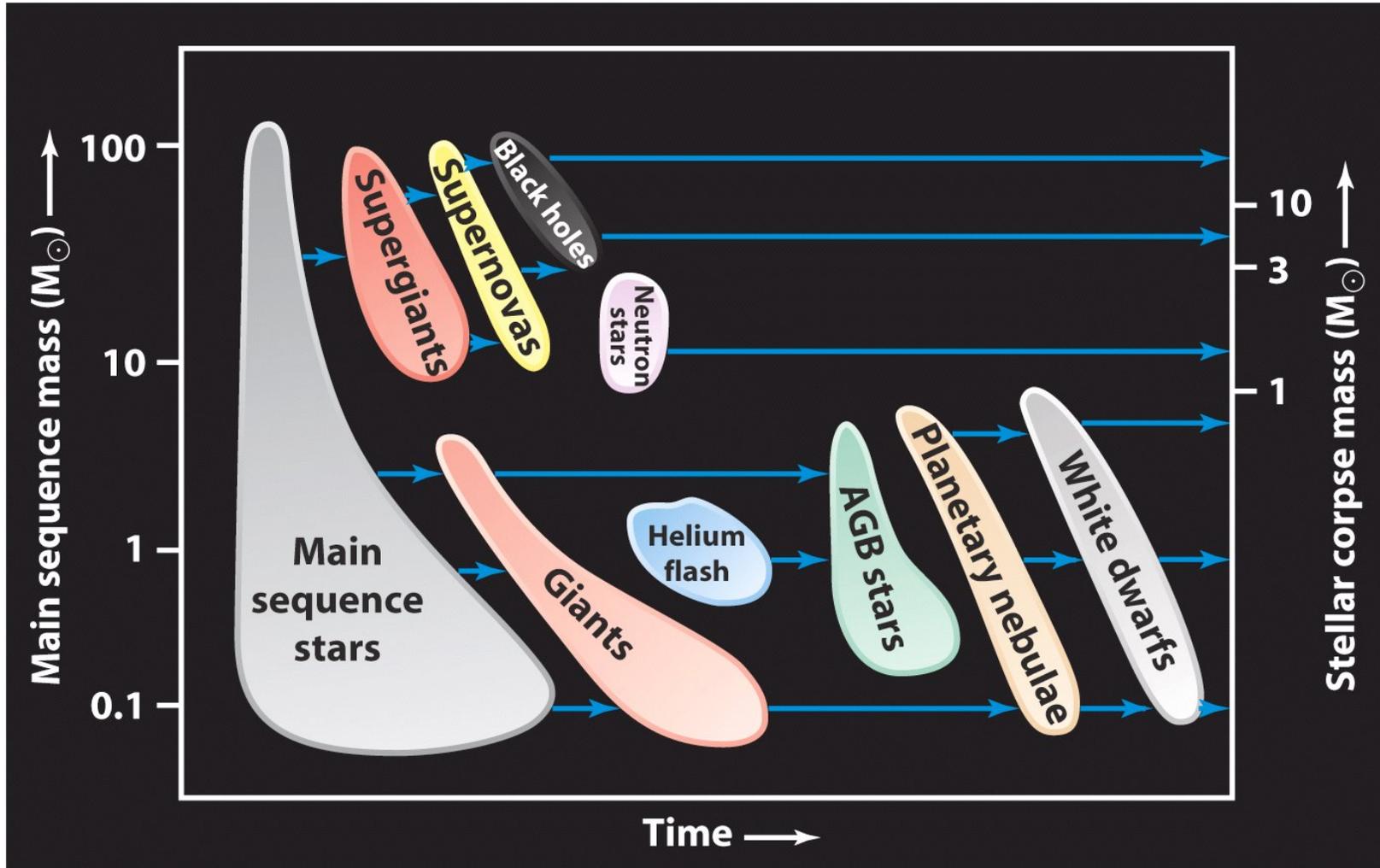
Главная последовательность



Спектральные классы звезд

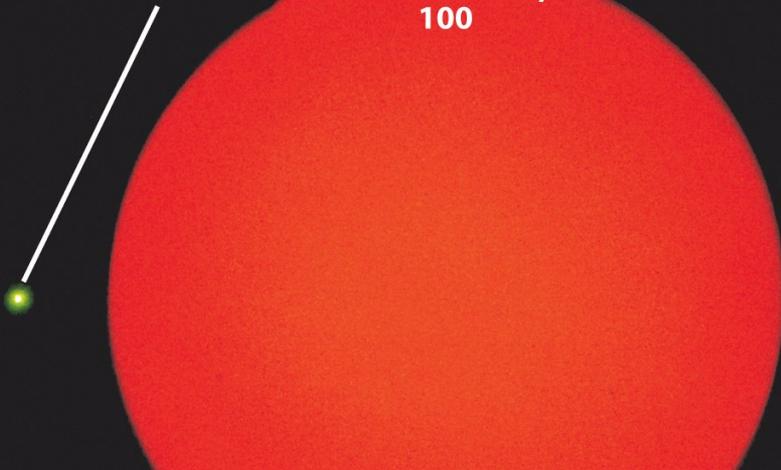
Обозначение класса звезд	Характерный признак спектральных линий	Температура поверхности, К
O	Ионизованный гелий	> 30 000
B	Нейтральный гелий	11 000 - 30 000
A	Водород	7 200 - 11 000
F	Ионизованный кальций	6 000 - 7 200
G	Ионизованный кальций, нейтральные металлы	5 200 - 6 000
K	Нейтральные металлы	3 500 - 5200
M	Нейтральные металлы, полосы поглощения молекул	< 3 500
R	Полосы поглощения циана (CN) ₂	< 3 500
N	Углерод	< 3 500

Что будет дальше – зависит от массы звезды



Звезды малой массы $M < 5M_{\text{Sun}}$

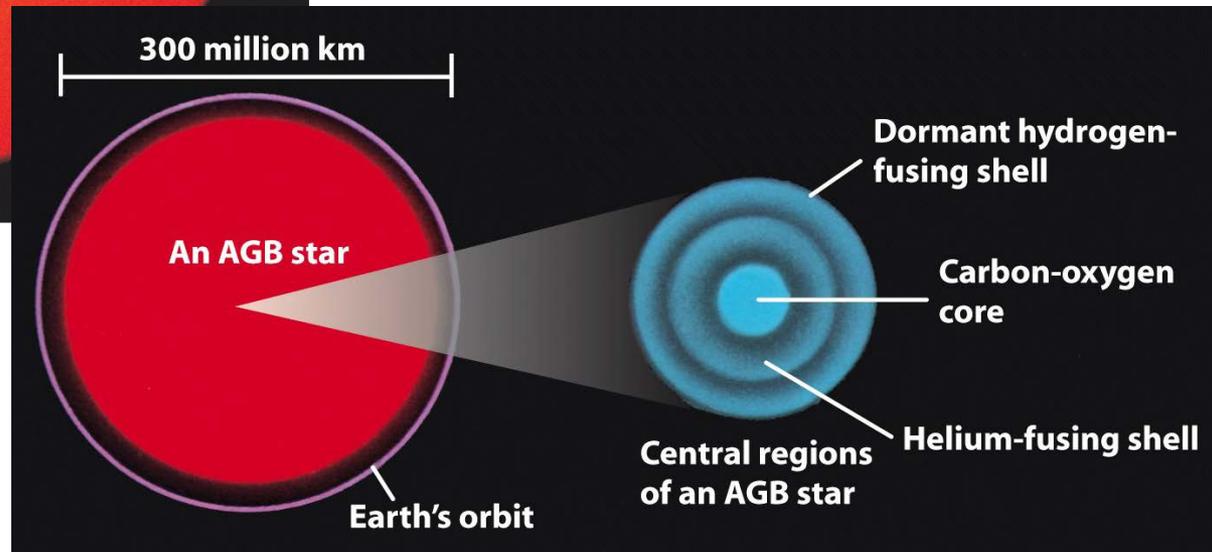
The Sun as a main-sequence star
(diameter = 1.4×10^6 km $\approx \frac{1}{100}$ AU)



The Sun as a red giant
(diameter ≈ 1 AU)

Солнце сегодня и на стадии
Красного гиганта
Кор He и оболочка H (горение p)

Отличаются положением на
диаграмме Герцшпрунга-Рассела
и внутренней структурой

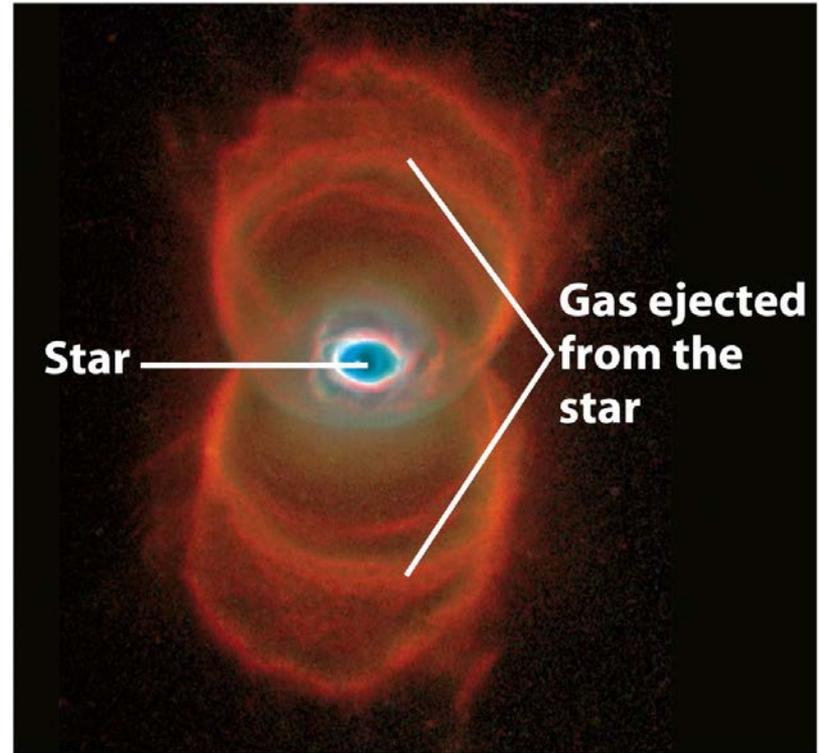


Звезды малой массы $M < 5M_{\text{Sun}}$

Планетарная туманность → белый карлик



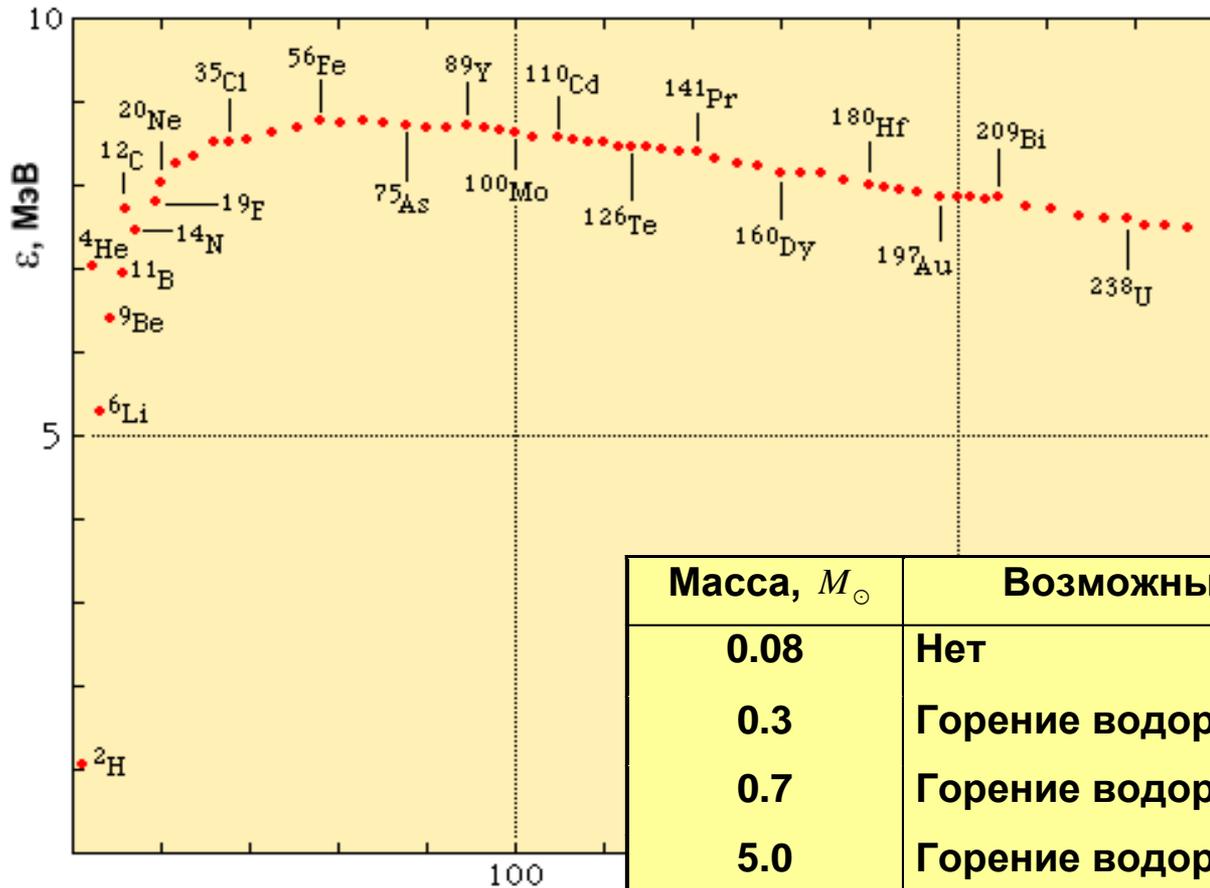
Созвездие Водолея.
Туманность Улитка.



Созвездие Муха.
Туманность Песочные часы.

Важно: планетарная туманность (У. Гершель, 1780 г) не имеет отношения к планетам ☺

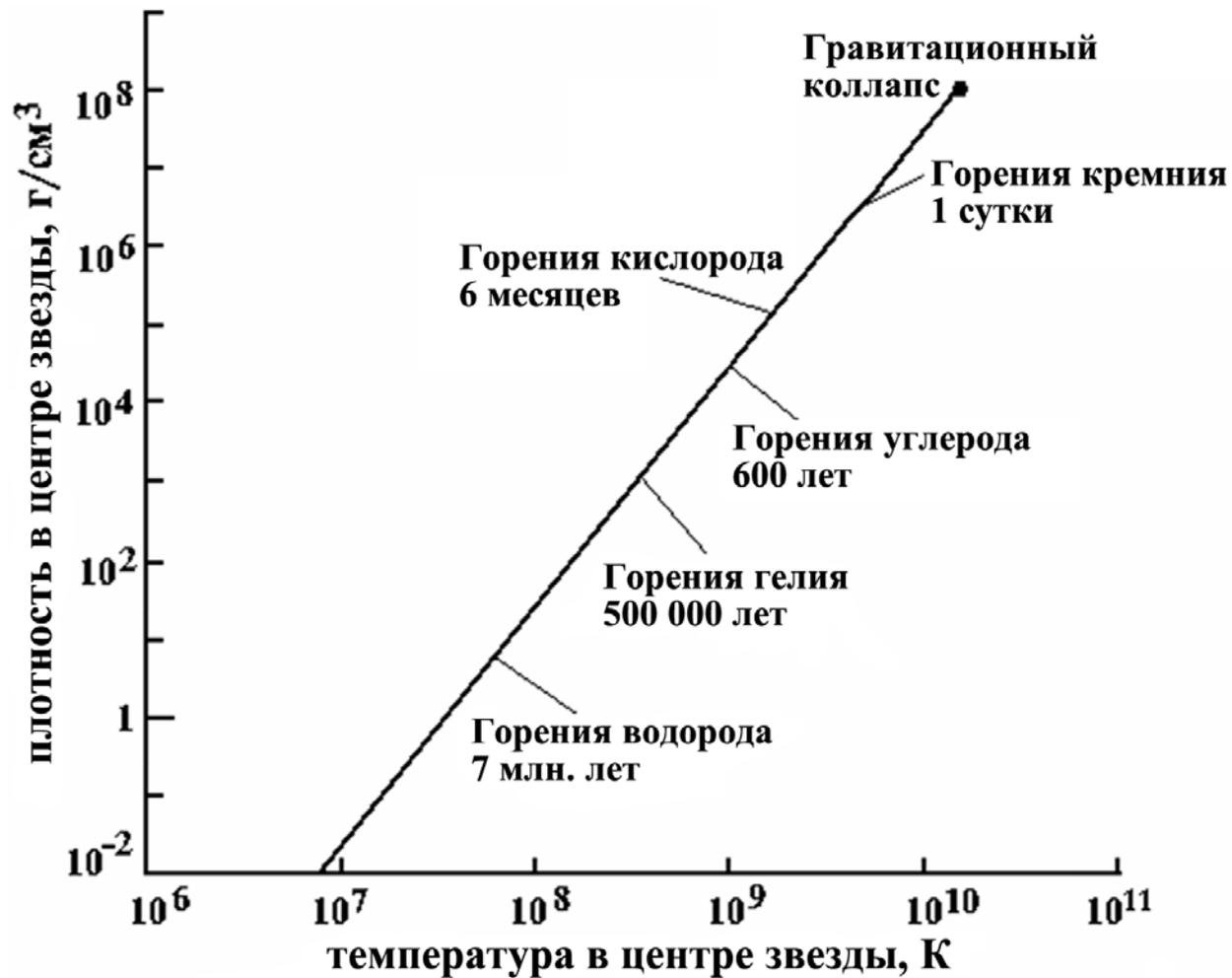
Удельная энергия связи ядра $\epsilon(A,Z)$



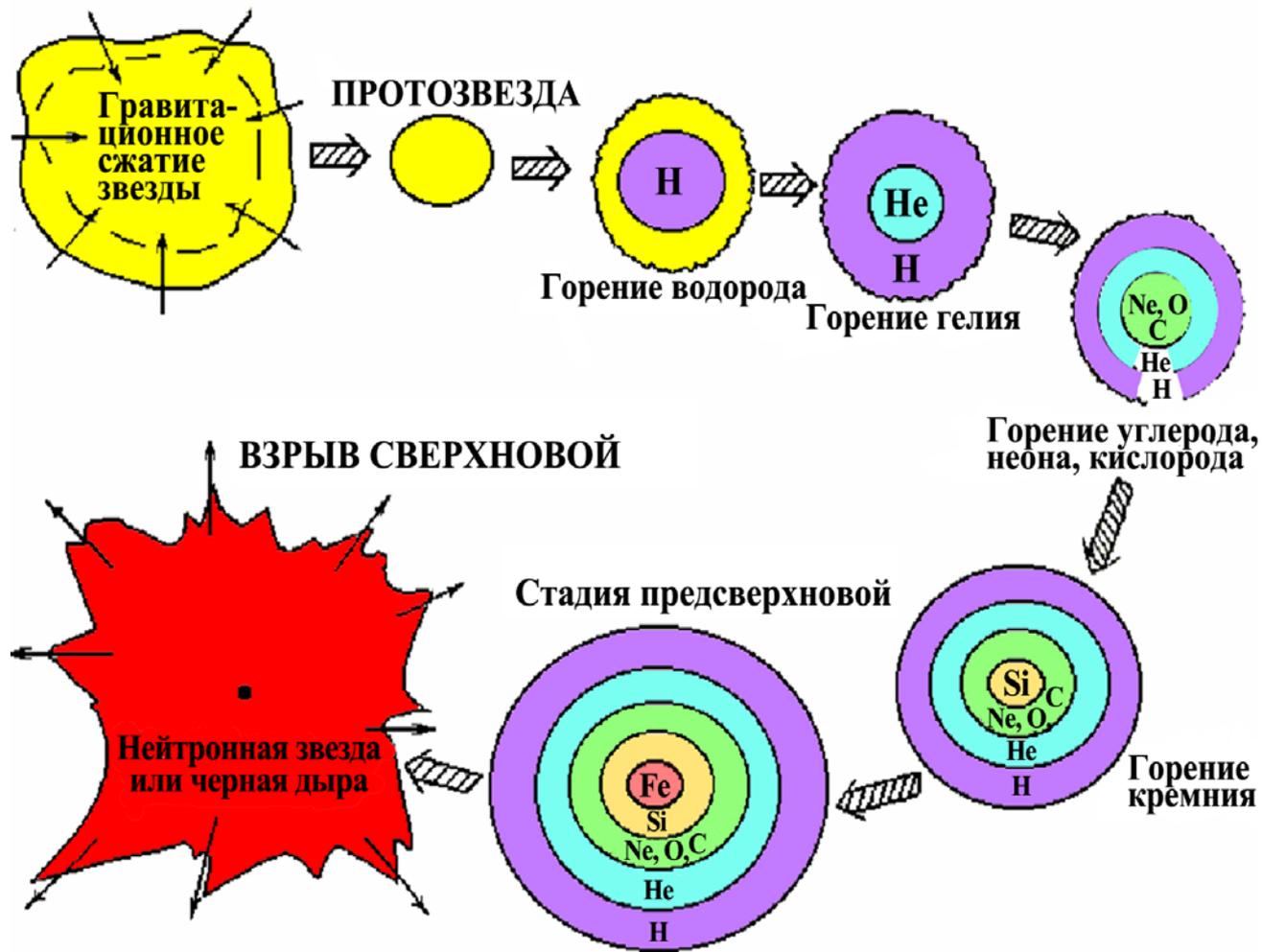
Масса, M_{\odot}	Возможные ядерные реакции
0.08	Нет
0.3	Горение водорода
0.7	Горение водорода и гелия
5.0	Горение водорода, гелия, углерода
25.0	Все реакции синтеза с выделением энергии

Ядерные реакции синтеза
в звёздах различной массы

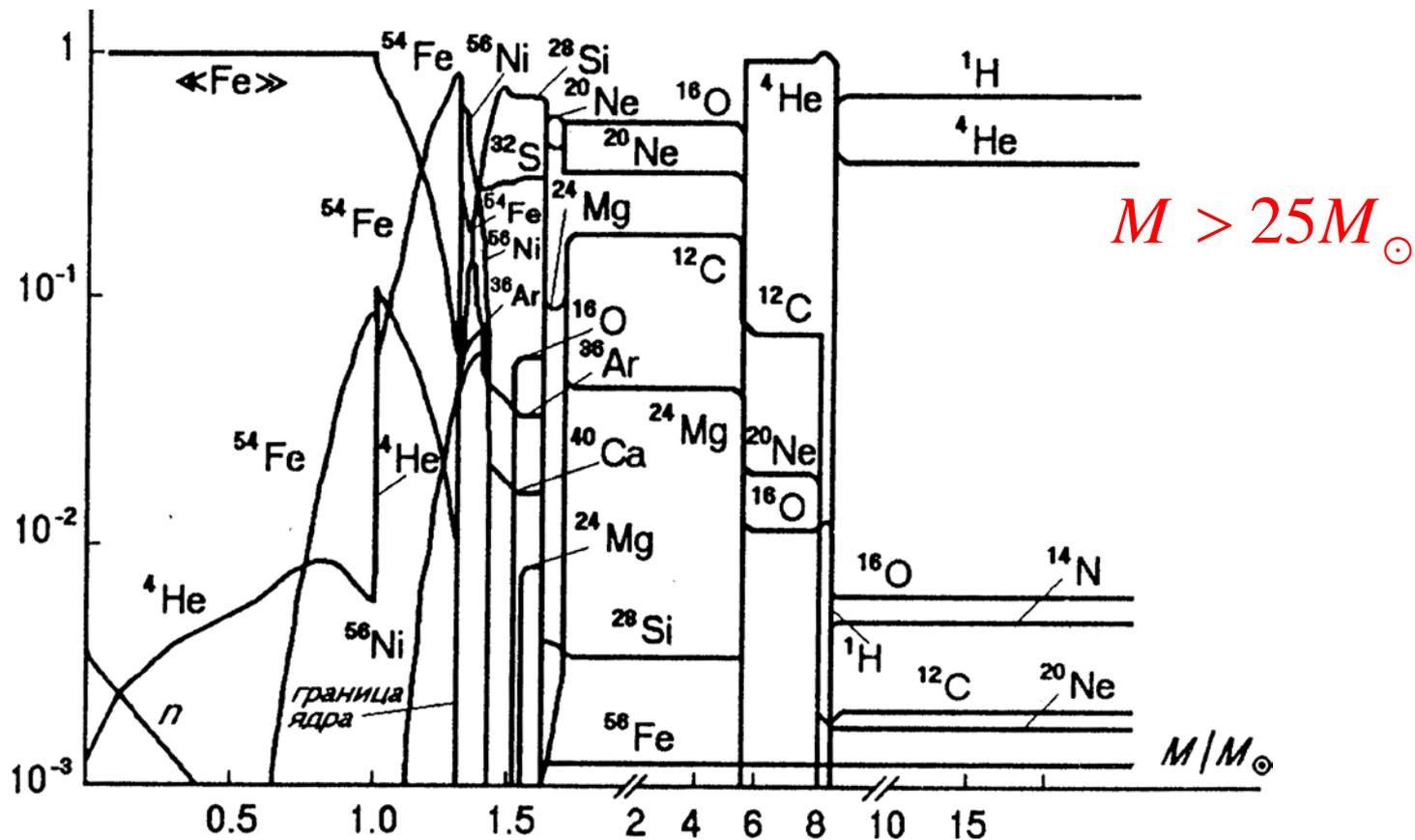
Эволюция массивной звезды $M > 25M_{\odot}$



Эволюция массивной звезды $M > 25M_{\odot}$



Содержание элементов в предсверхновой



Распределение элементов соответствует стадии предсверхновой, когда с фоторасщепления железа под действием γ -квантов начинается охлаждение и сжатие центральной части звезды с последующим взрывом сверхновой.

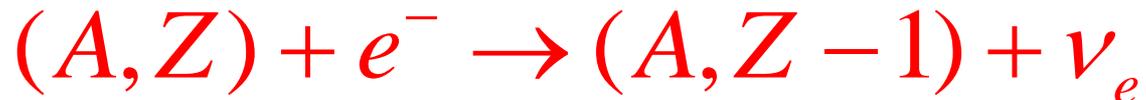
Фоторасщепление железа

При температуре $5 \cdot 10^9$ К существенную роль начинают играть реакции фоторасщепления железа на нейтроны, протоны и ядра гелия. Эти реакции протекают с поглощением энергии. Начинается охлаждение центральной части звезды.



Нейтронизация вещества

Наряду с процессом фоторасщепления железа существенную роль начинают играть процессы, происходящие в результате слабого взаимодействия, которые также приводят к охлаждению центральной части звезды. Энергию из центральной части звезды уносят **нейтрино**:



Происходит обогащение элементов центральной части звезды нейтронами. Этот процесс называется нейтронизацией вещества.

$t > \sim 10^9$ лет: Синтез тяжелых элементов

Реакции нуклеосинтеза

- Слияние
- n-захват, p-захват

s – Process (окончание ^{209}Bi)

- медленный захват нейтронов
- шкала времени: годы
- Красные гиганты

rp – Process

Быстрый захват протонов



r – Process

- быстрый захват нейтронов
- шкала времени: от мсек до сек
- взрыв Сверхновой
- $> 10^{20}$ нейтрон/(см²с)

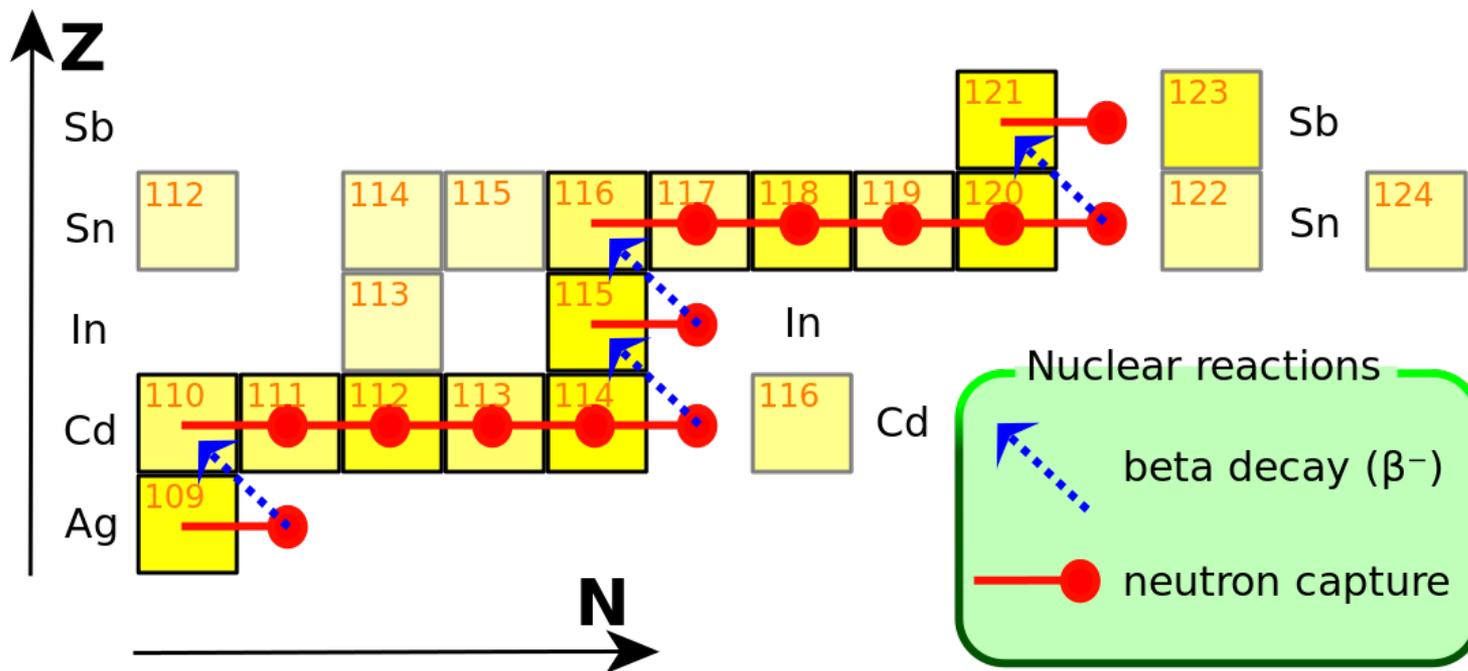
→ окончание ($A \approx 270$?)

Синтез

- до $Z \sim 26$ (Fe)
(наибольшая удельная энергия связи)

S (slow) – процесс

- медленный захват нейтронов
- шкала времени: годы
- Красные гиганты



Захват нейтронов:



β^- -распад:



$$\tau_{n\gamma} \gg \tau_{\beta},$$

$\tau_{n\gamma}$ — время жизни ядра до захвата нейтрона.

Нейтроны для s - процесса

Подходящие условия для образования ядер в s-процессе существуют в красных гигантах. Источником нейтронов для s-процесса являются реакции



Для первой реакции требуются условия, при которых происходит совместное горение водорода и гелия. В качестве механизма, создающего такие условия, рассматривается соприкосновение конвективной оболочки звезды, в которой происходит горение гелия, с богатой водородом внешней оболочкой. Образование нейтронов происходит в следующей цепочке реакций:



Реакция $^{13}\text{C} + \alpha \rightarrow ^{16}\text{O} + n$ эффективно происходит при $T > 10^8$ К.

Образование нейтронов в реакции $^{22}\text{Ne} + \alpha \rightarrow ^{25}\text{Mg} + n$ ($Q = -0.48$ МэВ) зависит от наличия ^{14}N в зоне горения гелия. Источником ядер ^{14}N является CNO-цикл.

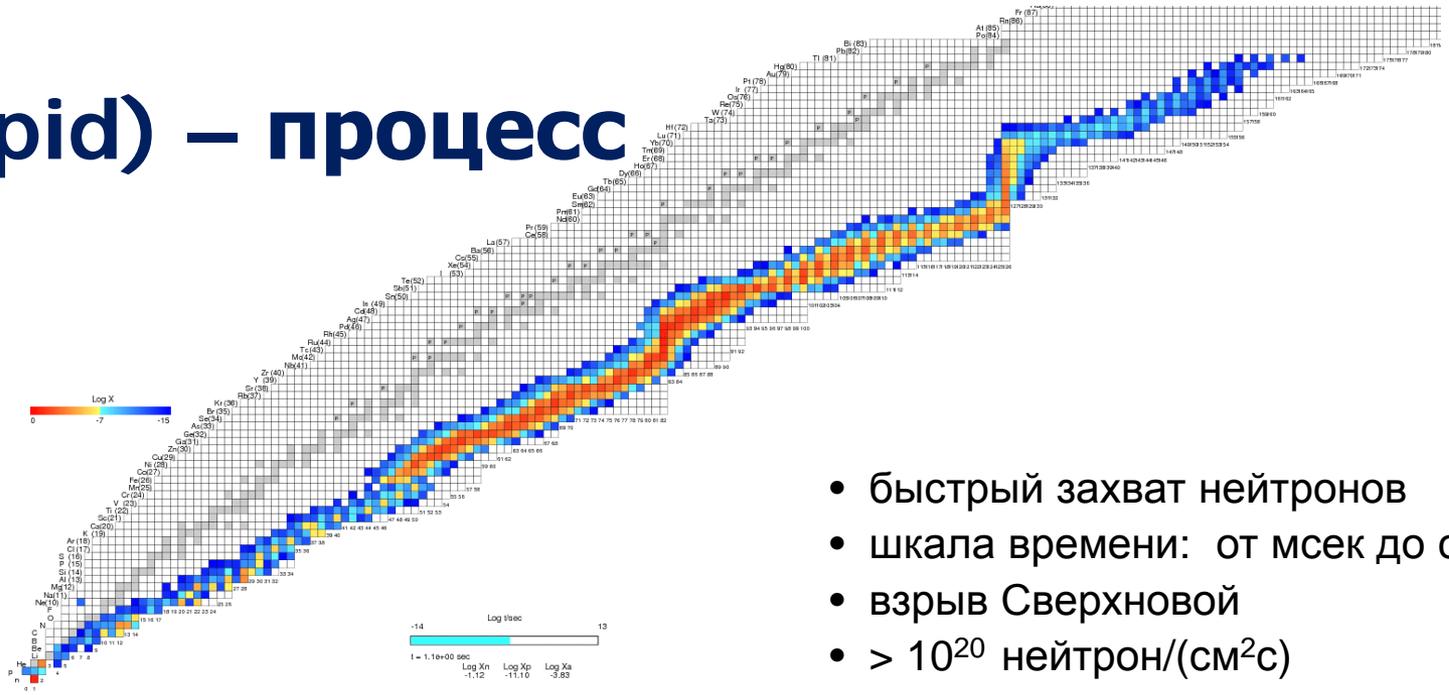


Ещё одним источником нейтронов с необходимой плотностью при $T \approx 10^8$ К могут быть фотонейтронные реакции:



Роль фотонейтронных реакций растет с увеличением температуры.

R (rapid) – процесс



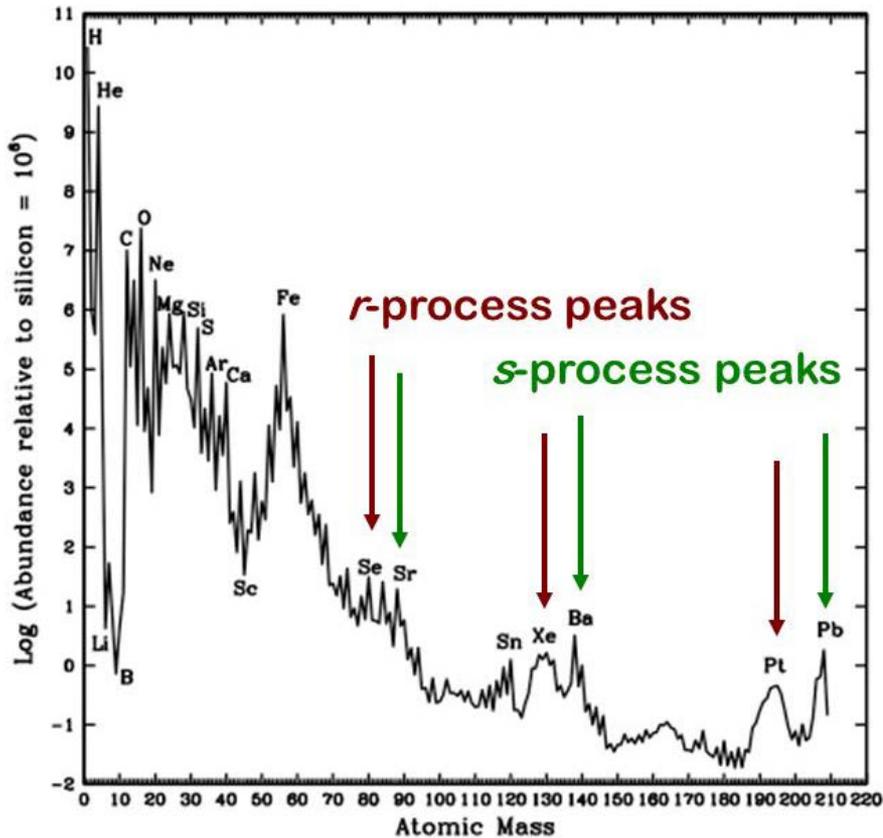
- быстрый захват нейтронов
- шкала времени: от мсек до сек
- взрыв Сверхновой
- $> 10^{20}$ нейтрон/(см²с)

Когда плотность нейтронов ρ_n достигает значения 10^{19} - 10^{20} см⁻³, время жизни ядра до захвата нейтрона $\tau_{n\gamma}$ снижается до $\approx 10^{-3}$ с

$$1/\tau_{n\gamma} = \rho_n \cdot v_n \cdot \sigma_{n\gamma} \quad \tau_{n\gamma} \ll \tau_{\beta}$$

Скорость захвата ядром нейтрона во много раз превышает скорость его β -распада. Ядро успевает захватить 10-20 нейтронов прежде чем испытает β -распад.

r - процесс



Пики s-процесса соответствуют **стабильным** ядрам с $N = 50, 82, 126$

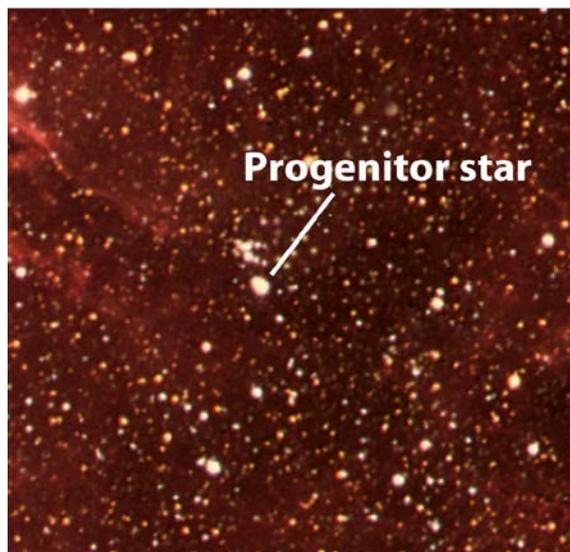
Пики r-процесса соответствуют **нестабильным** ядрам с $N = 50, 82, 126$

Необходимые для r-процесса плотности нейтронов возникают при взрывах Сверхновых. Расходящаяся ударная волна примерно за 0.5 с создаёт в оболочке горения гелия условия для интенсивного протекания реакции генерации нейтронов $^{22}\text{Ne}(\alpha, n)^{25}\text{Mg}$ и тем самым запускает r-процесс. Этот механизм образования элементов называют **взрывным нуклеосинтезом**. r-процесс может протекать и в насыщенных нейтронами ядрах Сверхновых. В этом случае вынос образованных элементов в поверхностные слои звезды, осуществляется за счёт разогретых нейтрино участков звезды.

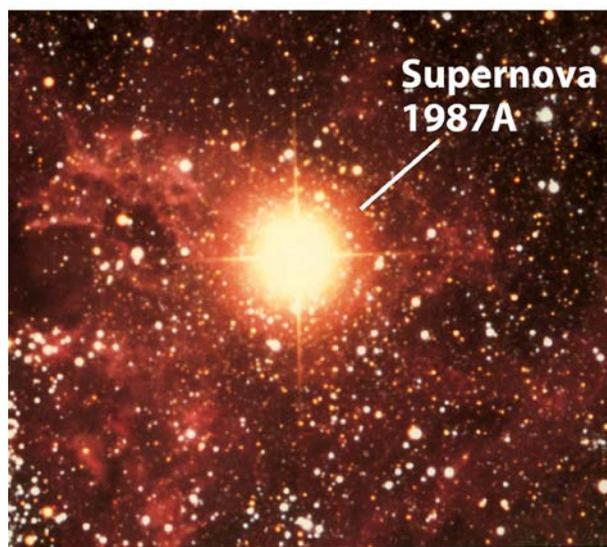
Конец для звезды с большой массой приходит, когда она пытается превратить сердцевину Fe в более тяжелые элементы – и тут оказывается, что это на это нужна энергия

КОЛЛАПС ЗВЕЗДЫ & ВЗРЫВ СВЕРХНОВОЙ

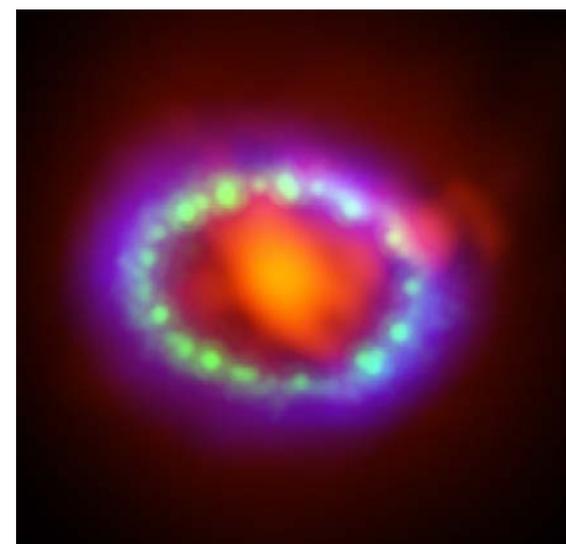
Большое Магелланово облако, туманность Тарантул



Голубой сверхгигант $M \approx 17 M_{\text{Sun}}$

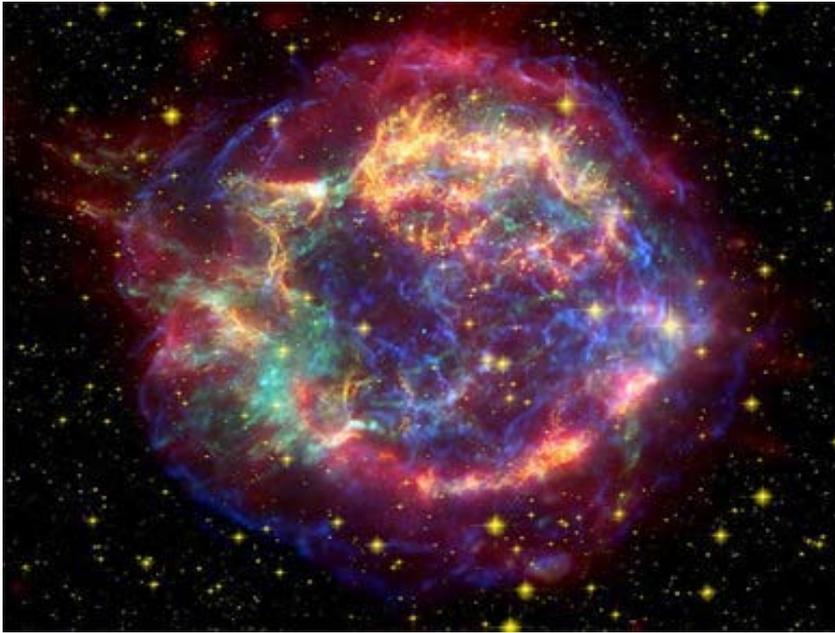


23.02.1987

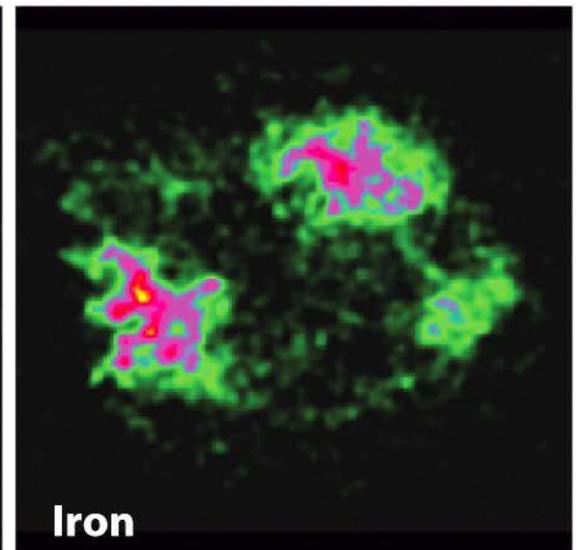
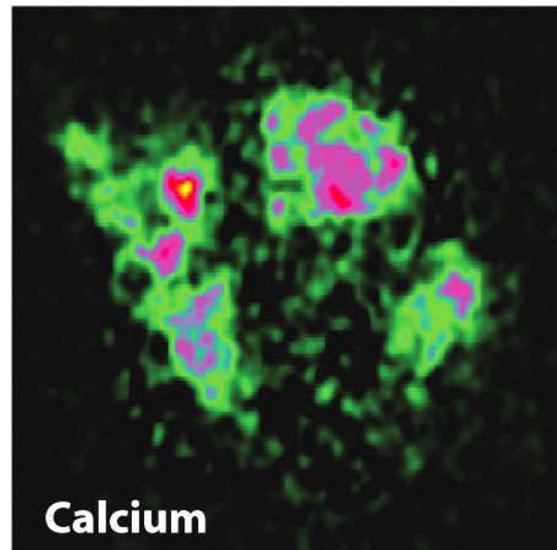
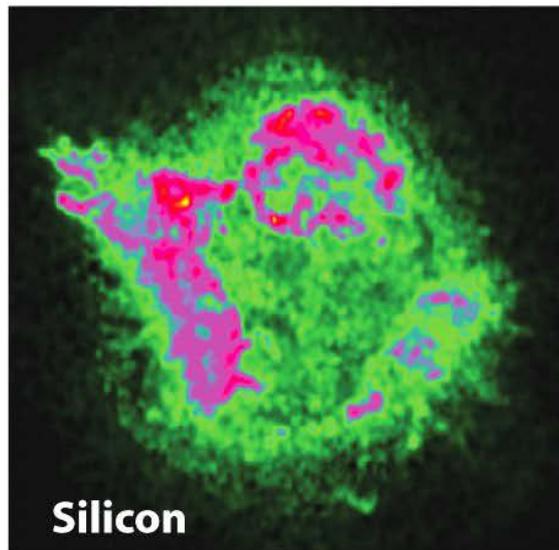


6.01.2014

Сверхновая



Инфракрасный снимок остатка вспышки сверхновой в созвездии Кассиопея, которая произошла приблизительно 50 лет назад. Это самый молодой остаток от взрыва Сверхновой, известный в нашей галактике.

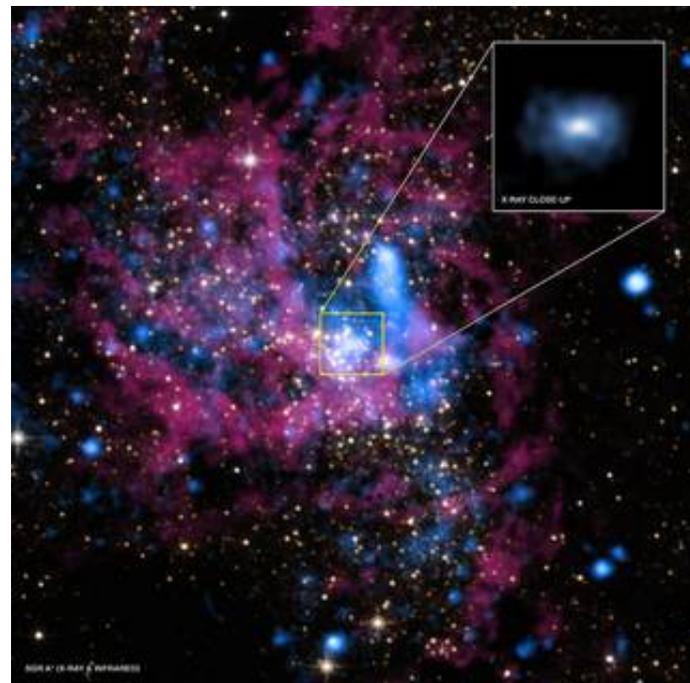


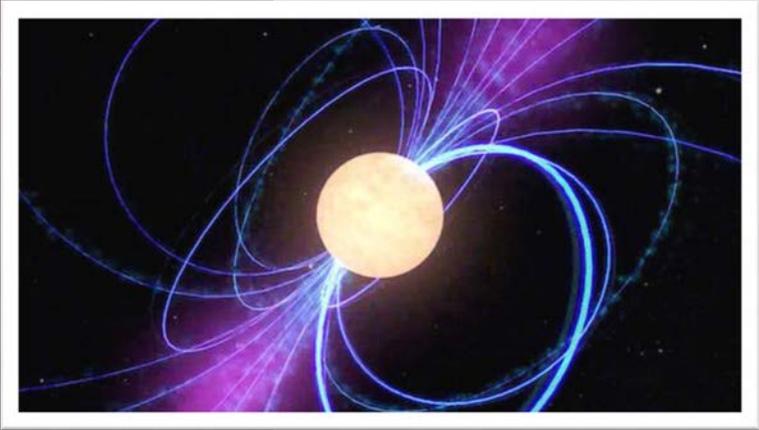
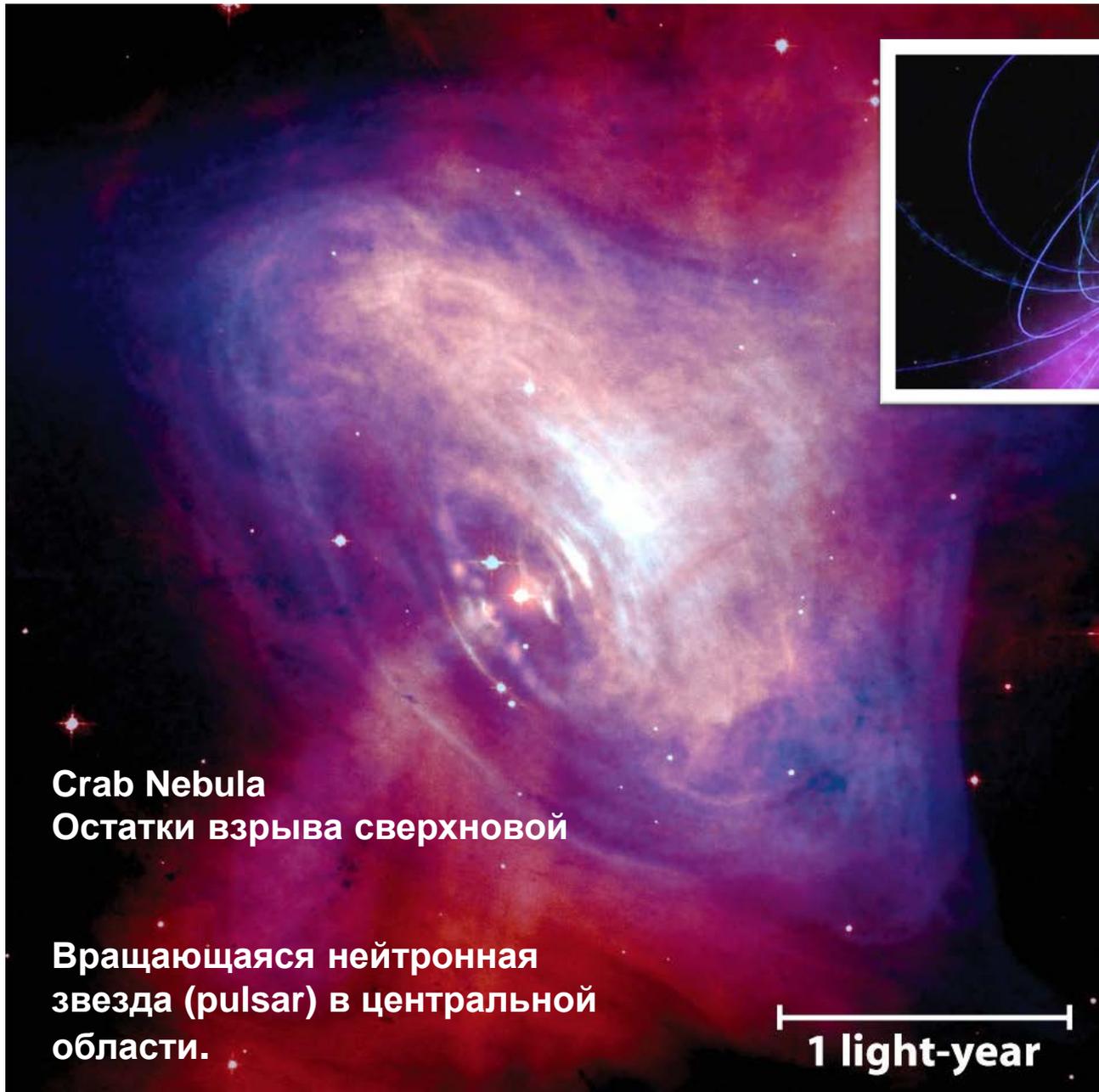
Конечные этапы эволюции звезд

Белый карлик	Нейтронная звезда	Черная дыра
$R = 5 \cdot 10^3$ км	$R \approx 10$ км	$R \approx 30$ км
Предел Чандрасекара $M < 1,4M_{\odot}$ Электронный газ	$1,4M_{\odot} < M < 3M_{\odot}$ Нейтронный газ	$M > 3M_{\odot}$
$\rho \sim 5$ тонн/см ³	$\rho = 10^9$ тонн/см ³	Горизонт событий $r_g = 2GM/c^2$



Черная дыра в центре галактики Млечный путь





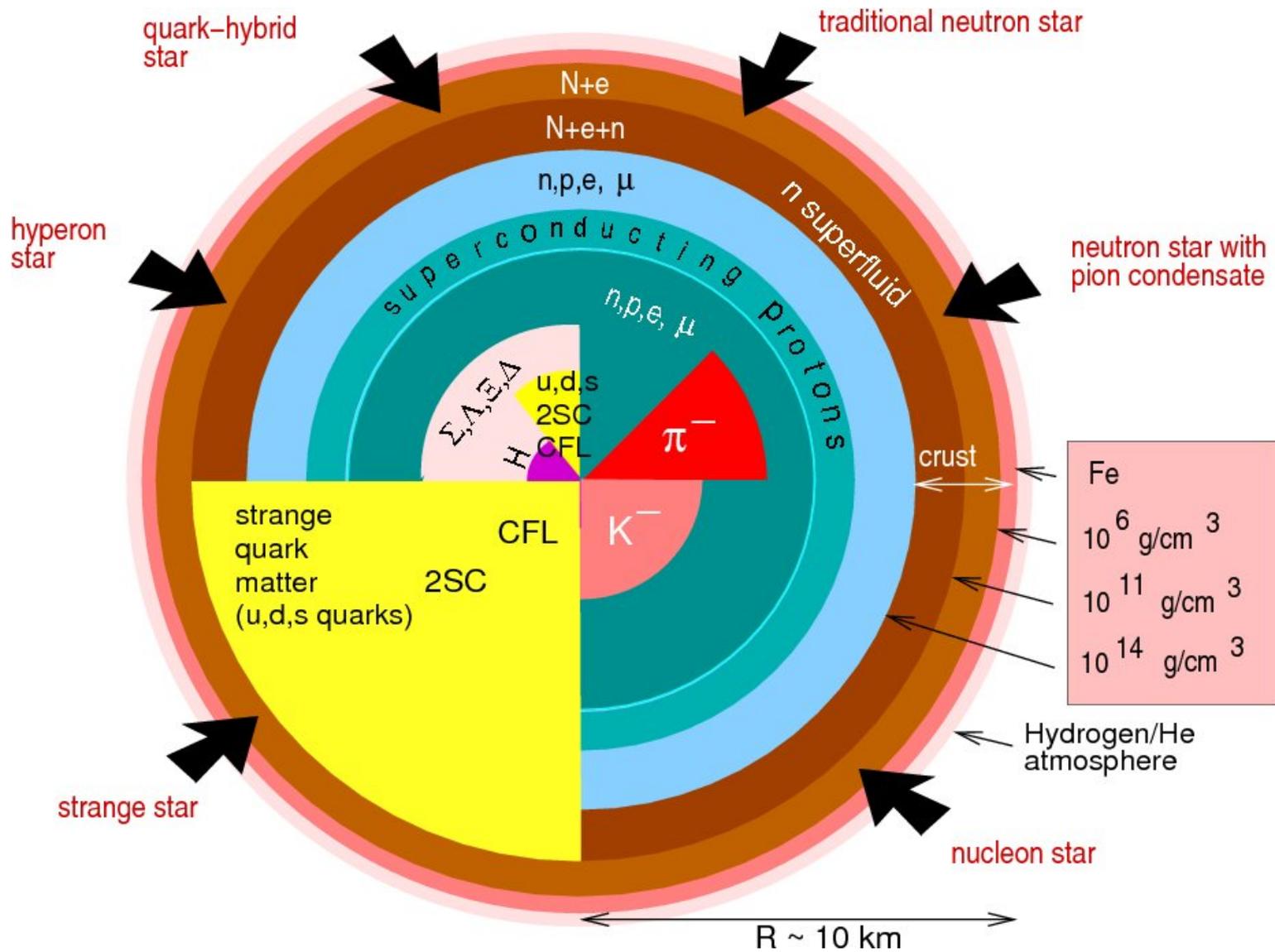
Crab Nebula
Остатки взрыва сверхновой

Вращающаяся нейтронная звезда (pulsar) в центральной области.

1 light-year

Сохранение углового момента и магнитного поля при коллапсе сверхновой и образовании нейтронной звезды приводит к рождению быстро вращающихся пульсаров с магнитным полем $\sim 10^{10}$ - 10^{14} Гс

Нейтронная звезда



Космический нуклеосинтез

1 H																	2 He																												
3 Li	4 Be																	5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne																						
11 Na	12 Mg																	13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar																						
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr																												
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe																												
55 Cs	56 Ba	57 La	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn																												
87 Fr	88 Ra	89 Ac	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	--	--	--	114 --	116 --	118 --																															
<table border="1"> <tr> <td>58 Ce</td> <td>59 Pr</td> <td>60 Nd</td> <td>61 Pm</td> <td>62 Sm</td> <td>63 Eu</td> <td>64 Gd</td> <td>65 Tb</td> <td>66 Dy</td> <td>67 Ho</td> <td>68 Er</td> <td>69 Tm</td> <td>70 Yb</td> <td>71 Lu</td> </tr> <tr> <td>90 Th</td> <td>91 Pa</td> <td>92 U</td> <td>93 Np</td> <td>94 Pu</td> <td>95 Am</td> <td>96 Cm</td> <td>97 Bk</td> <td>98 Cf</td> <td>99 Es</td> <td>100 Fm</td> <td>101 Md</td> <td>102 No</td> <td>103 Lr</td> </tr> </table>																		58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr
58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu																																
90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr																																

■ – Большой Взрыв

■ - Космические лучи

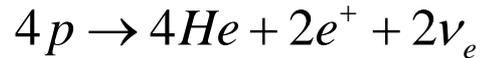
■ - Малые звезды

■ - Массивные звезды

■ - Сверхновая

Ядерные реакции в звездах

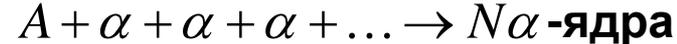
- Горение водорода. CNO-цикл



- Горение гелия.

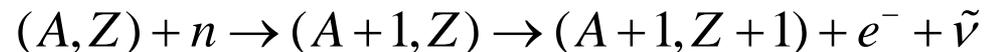


- α -процесс. Образование α -частичных ядер

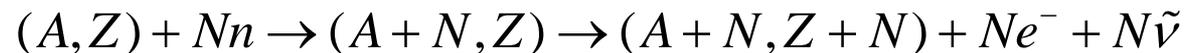


- E-процесс. Образование ядер в районе железного максимума в условиях термодинамического равновесия.

- s-процесс. Захват нейтронов происходит медленнее (slow), чем β -распад в последовательности процессов



- r-процесс. . Захват нейтронов происходит быстрее (rapid), чем β -распад в последовательности процессов



- p-процесс. Реакции образования лёгких изотопов химического элемента в реакциях (p, n) (p, γ) (γ, n) $(\gamma, 2n)$

- x-процесс. Реакции под действием космических лучей. Образование изотопов Li, Be, B.