Микромир и Вселенная 2018

ОБРАЗОВАНИЕ АТОМНЫХ ЯДЕР

$t \approx 1$ с: начало нуклеосинтеза

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

- Реакция слияния с образованием дейтронов:

$$n + p \rightarrow d + \gamma \qquad (E_\gamma = E_B = 2.23 \text{ МэВ})$$

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

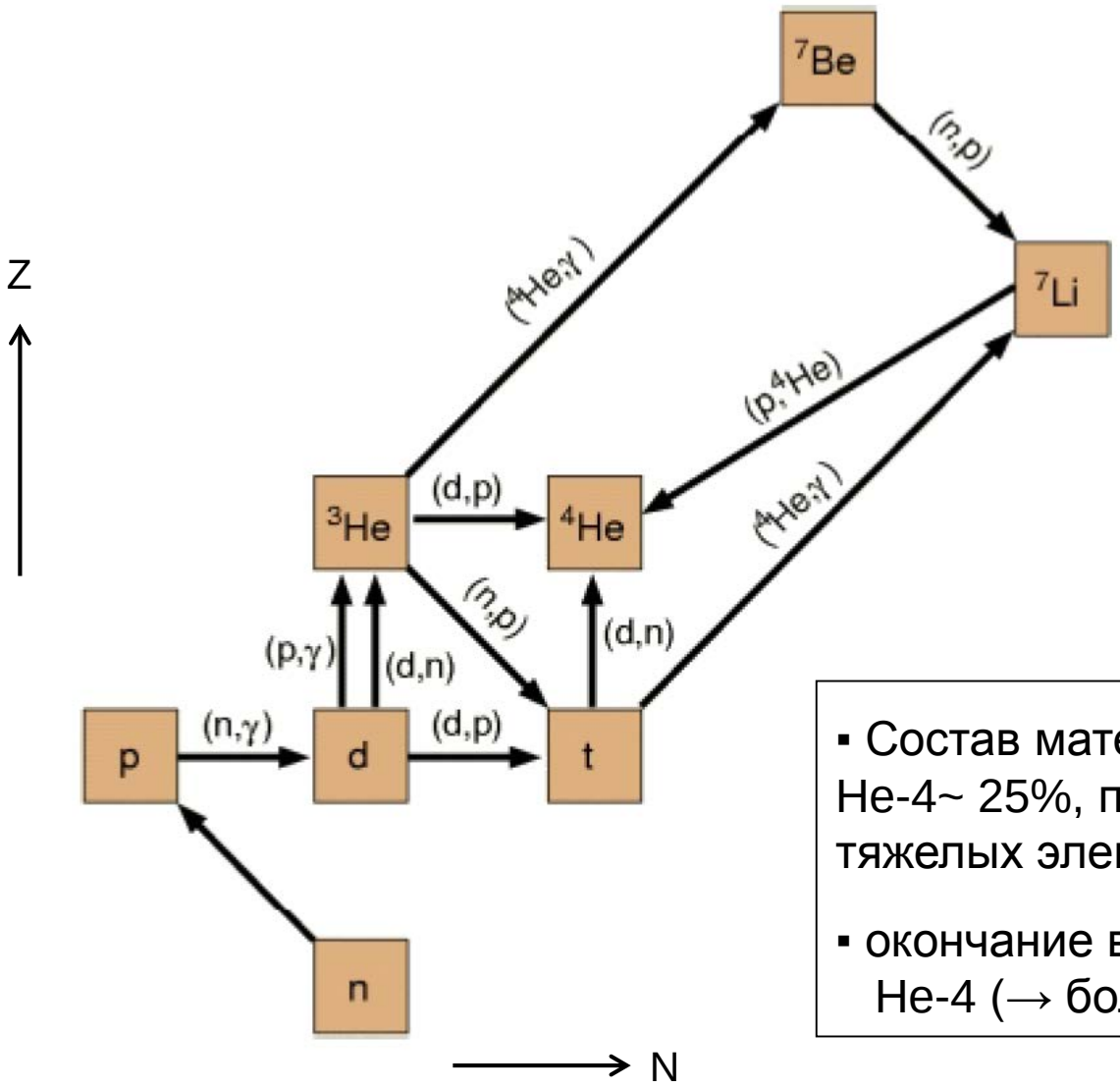
$t \approx (1 - 400)$ с; $T \sim 10^9$ K; $E \sim 0.1$ МэВ

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

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

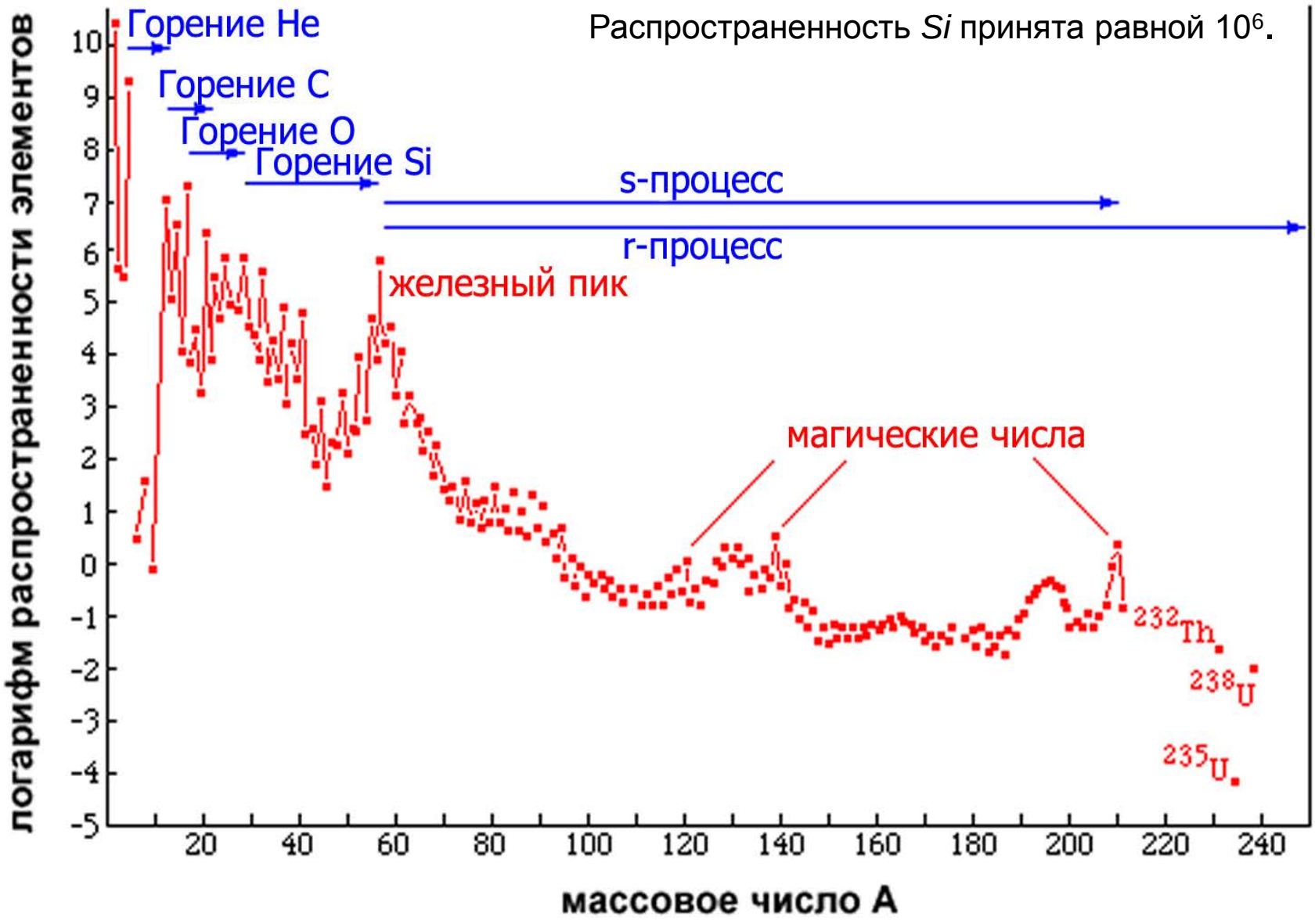
- При значительном уменьшении числа высокоэнергетичных фотонов становится возможен синтез ядер с $A > 2$ в результате реакций слияния

t ≈ 5 минут: окончание первичного нуклеосинтеза

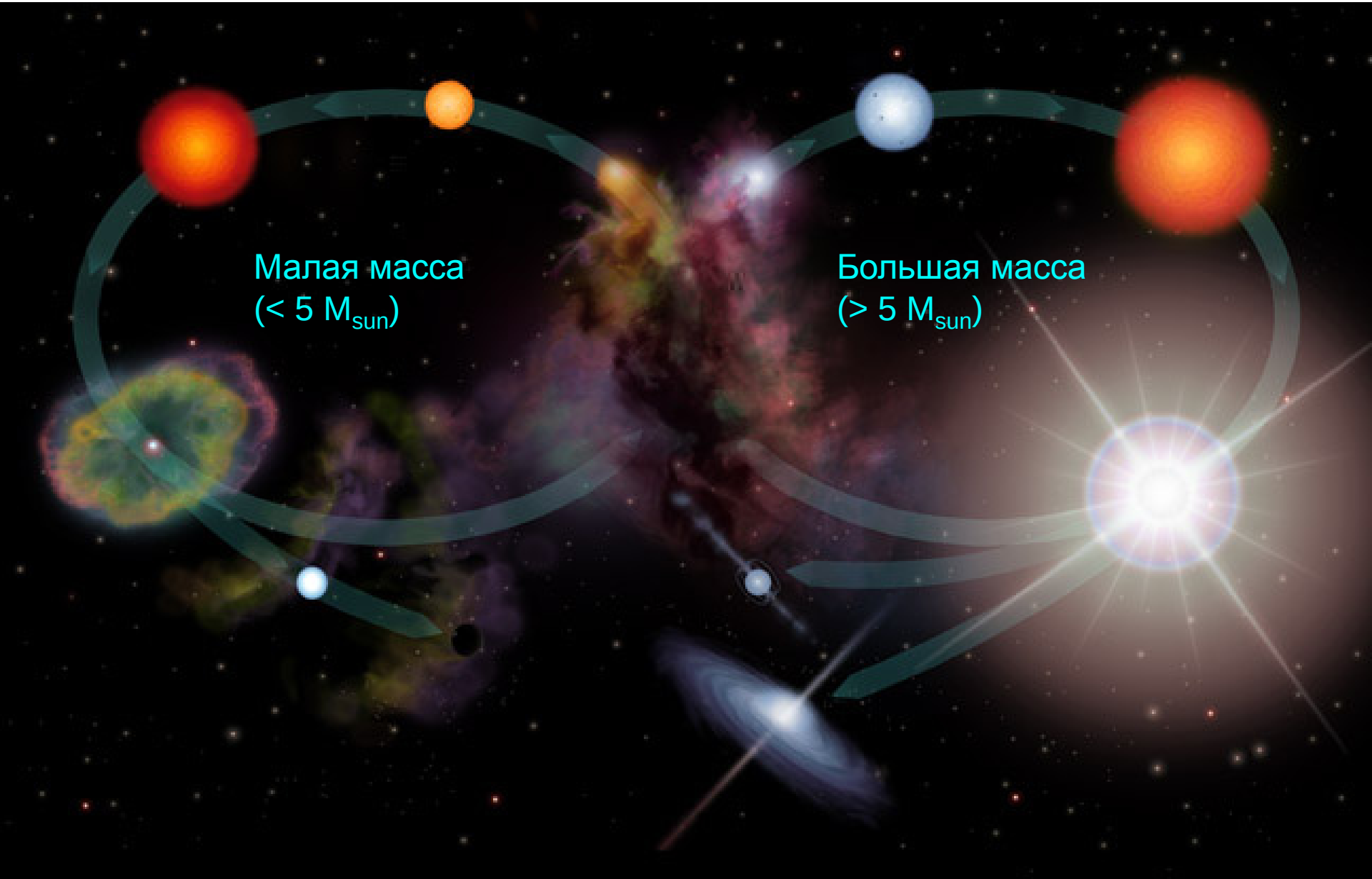


- Состав материи:
  He-4~ 25%, протоны~ 75%; следы более тяжелых элементов
- окончание всех ядерных реакций:
  He-4 (→ большая энергия связи)

Распространенность нуклидов во Вселенной



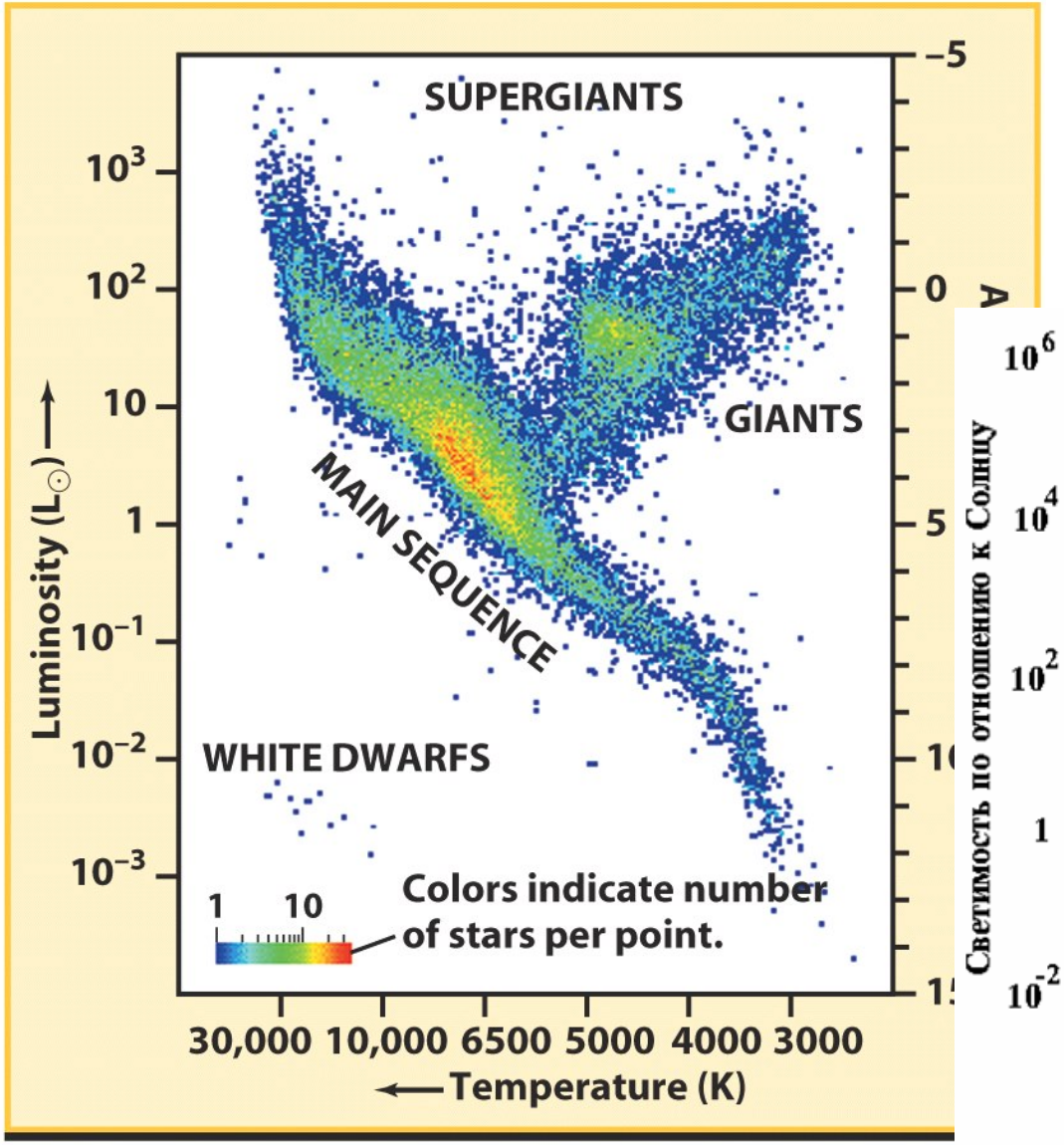
Жизненный цикл звезды



Жизненный цикл звезды

Жизненный цикл звезды

Диаграмма Герцшпрунга -Рассела

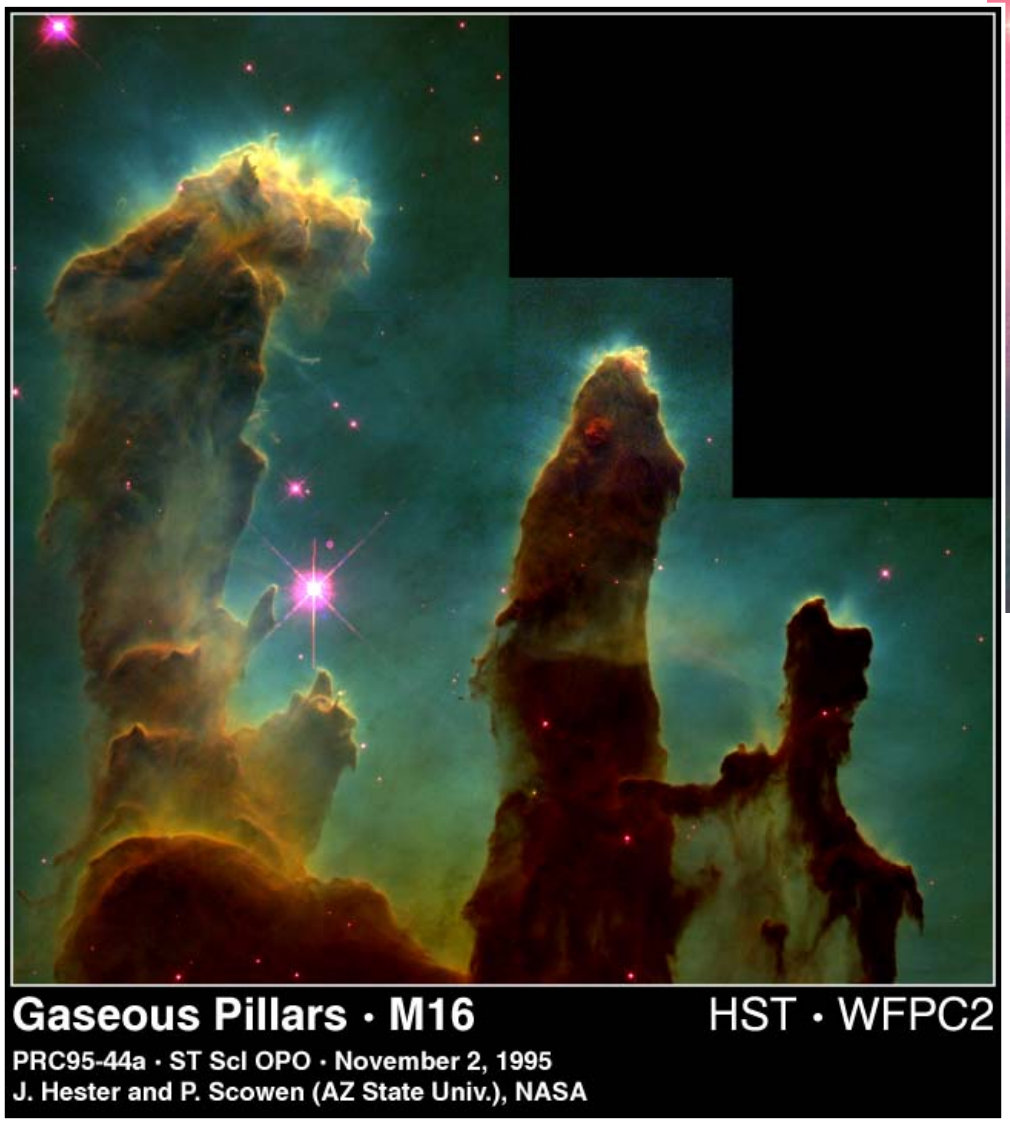


H-R diagram of 20,853 stars—note the width of the main sequence

$L \sim M^{3.5}$

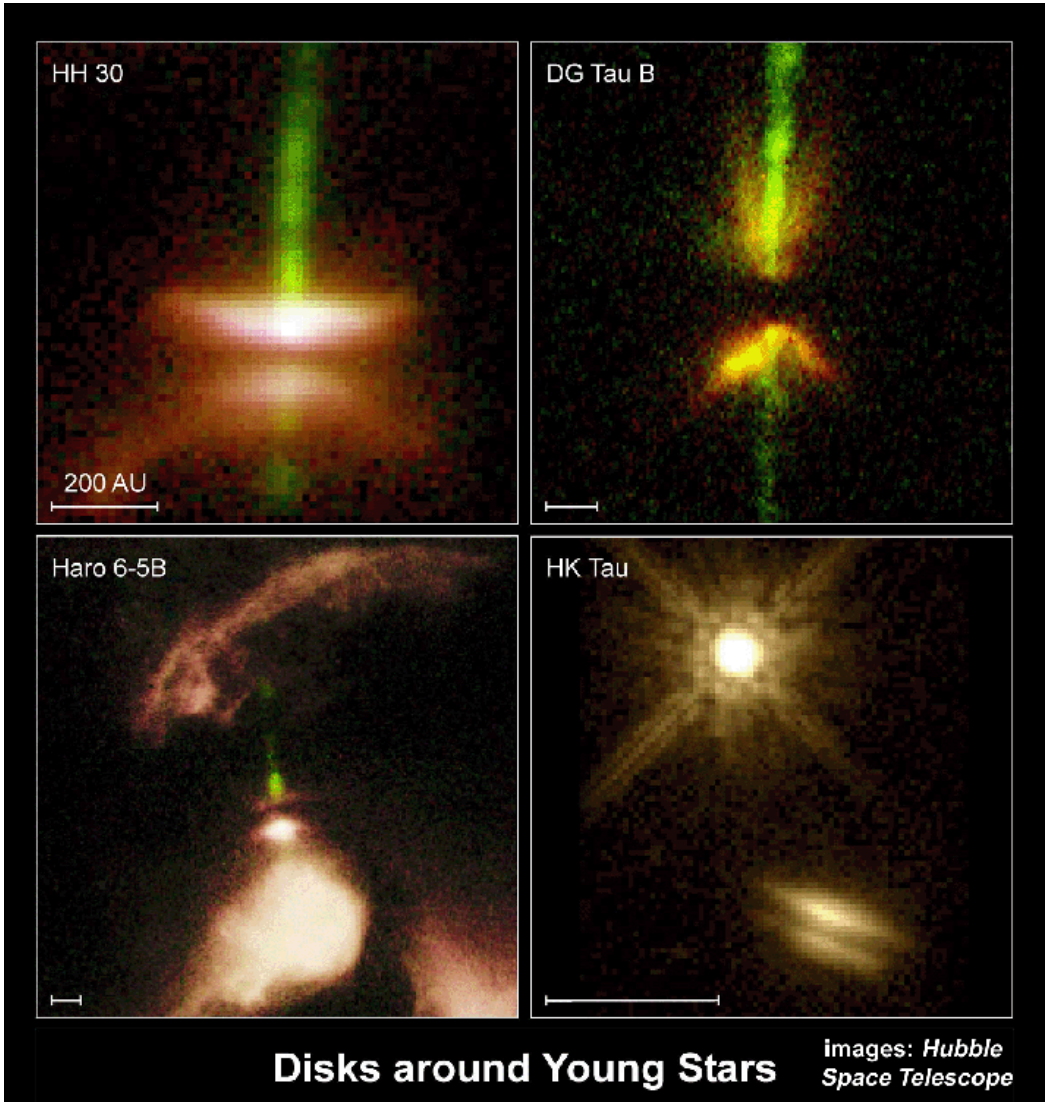
Звездная пыль:
где все начинается

Созвездие Ориона.
Туманность Голова лошади



Созвездие Змеи.
Туманность Орел.
Столпы творения

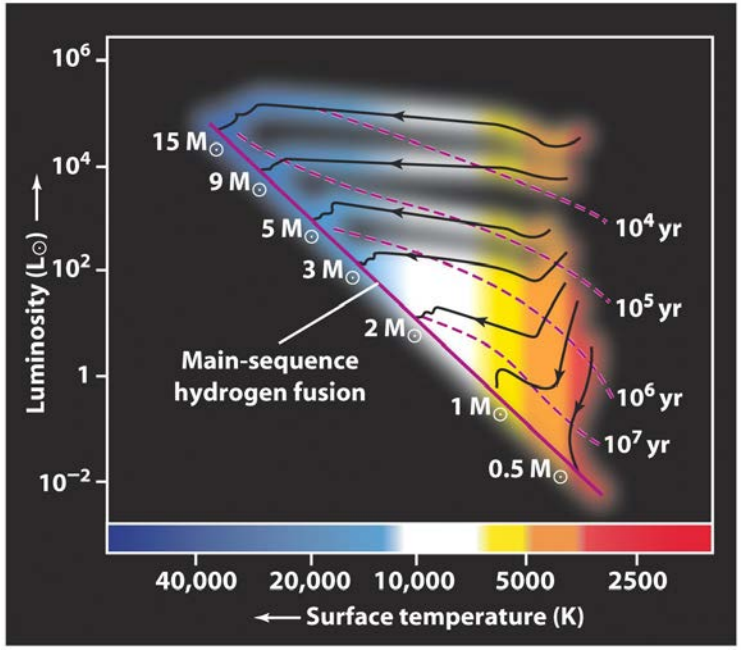
Протопланетный диск. Протозвезда

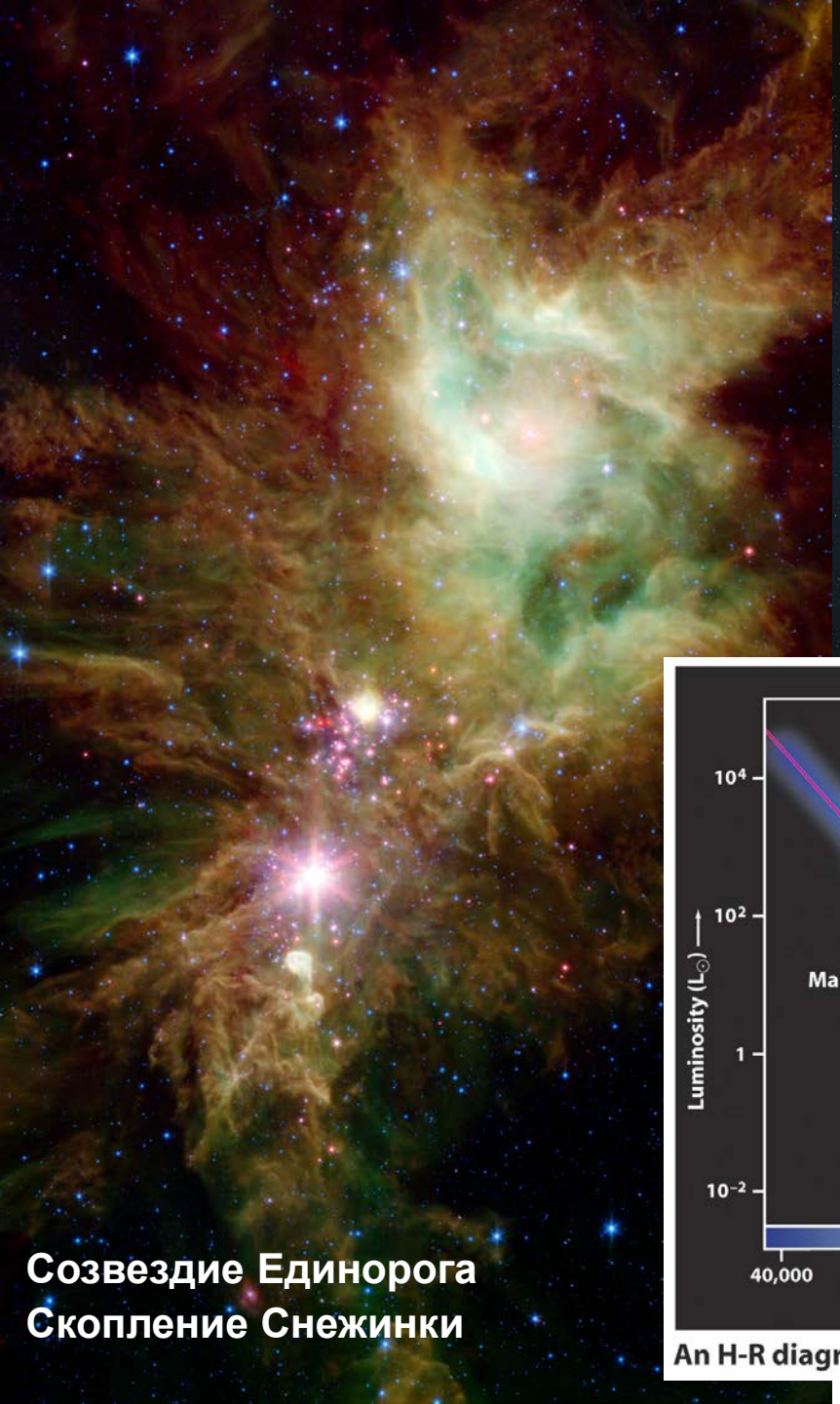


Коллапс фрагментов газопылевого облака

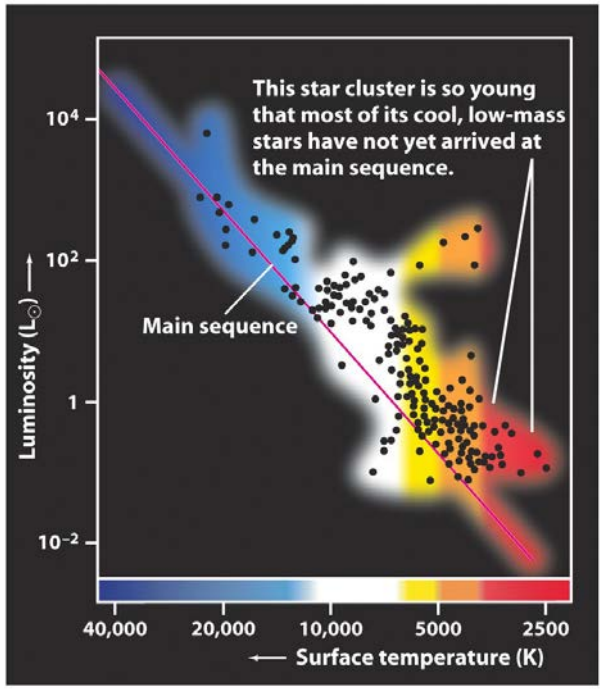
~10^5 до 10^7 лет,
В зависимости от массы

Стадия протозвезды ~10^6 лет

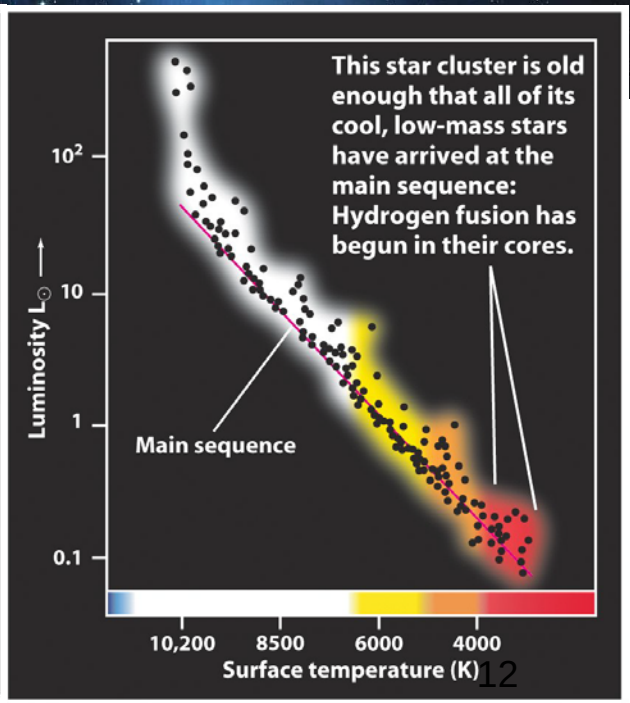




Созвездие Единорога
Скопление Снежинки

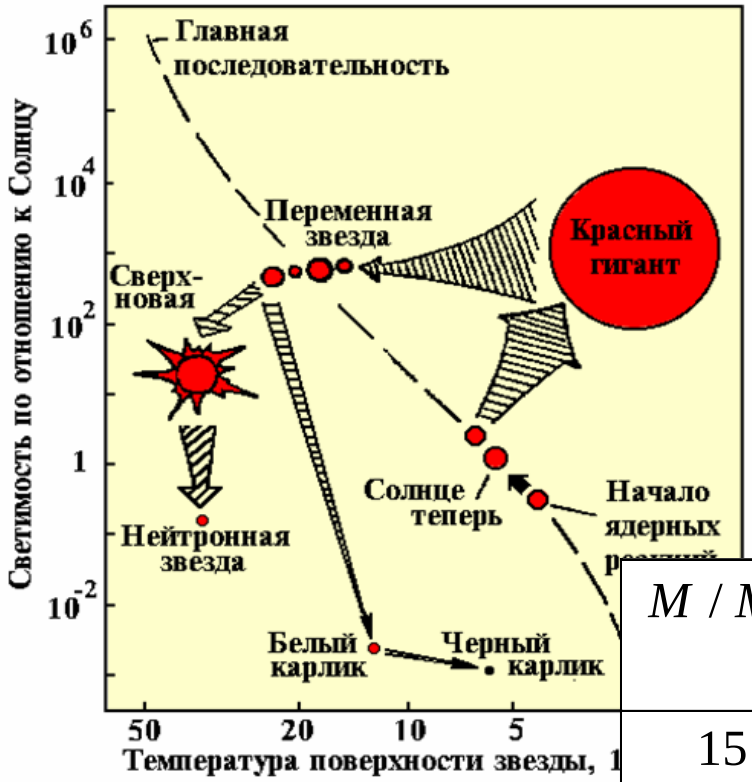


An H-R diagram of the stars in NGC 2264



An H-R diagram of the stars in the Pleiades

Диаграмма Герцшпрунга-Рассела



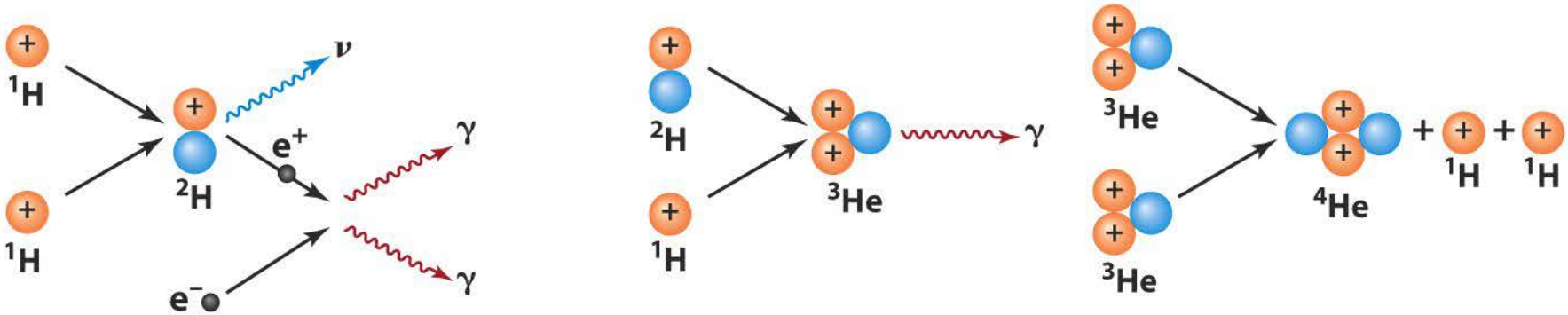
$L \sim M^{3.5}$

$M / M_\odot$	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 ($M > 1.1\ M_{Sun}$)

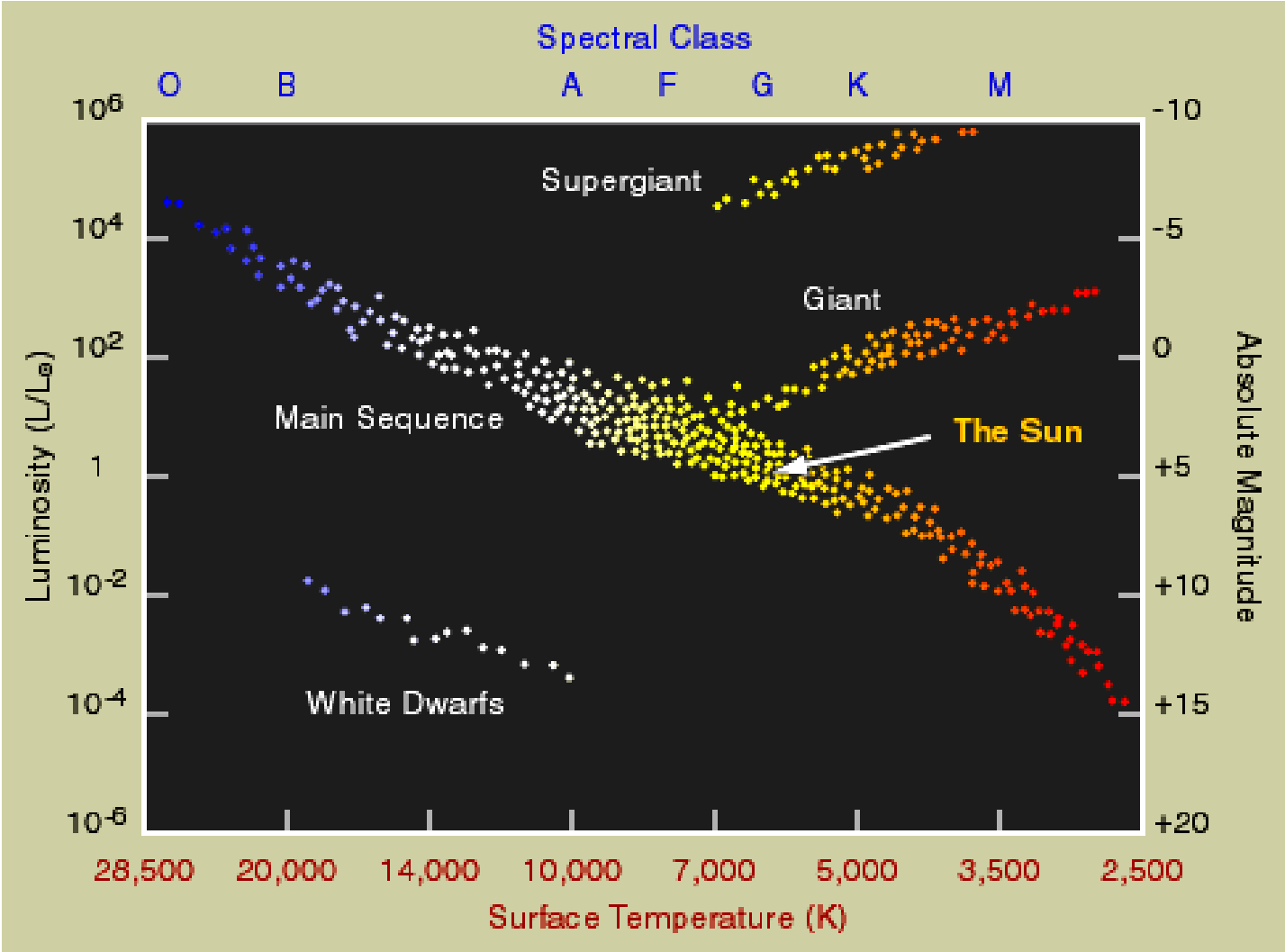


Время жизни на главной последовательности =
= горючее / скорость выгорания $\sim M / L \sim M / M^{3.5}$

время жизни $\sim 1/M^{2.5}$

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

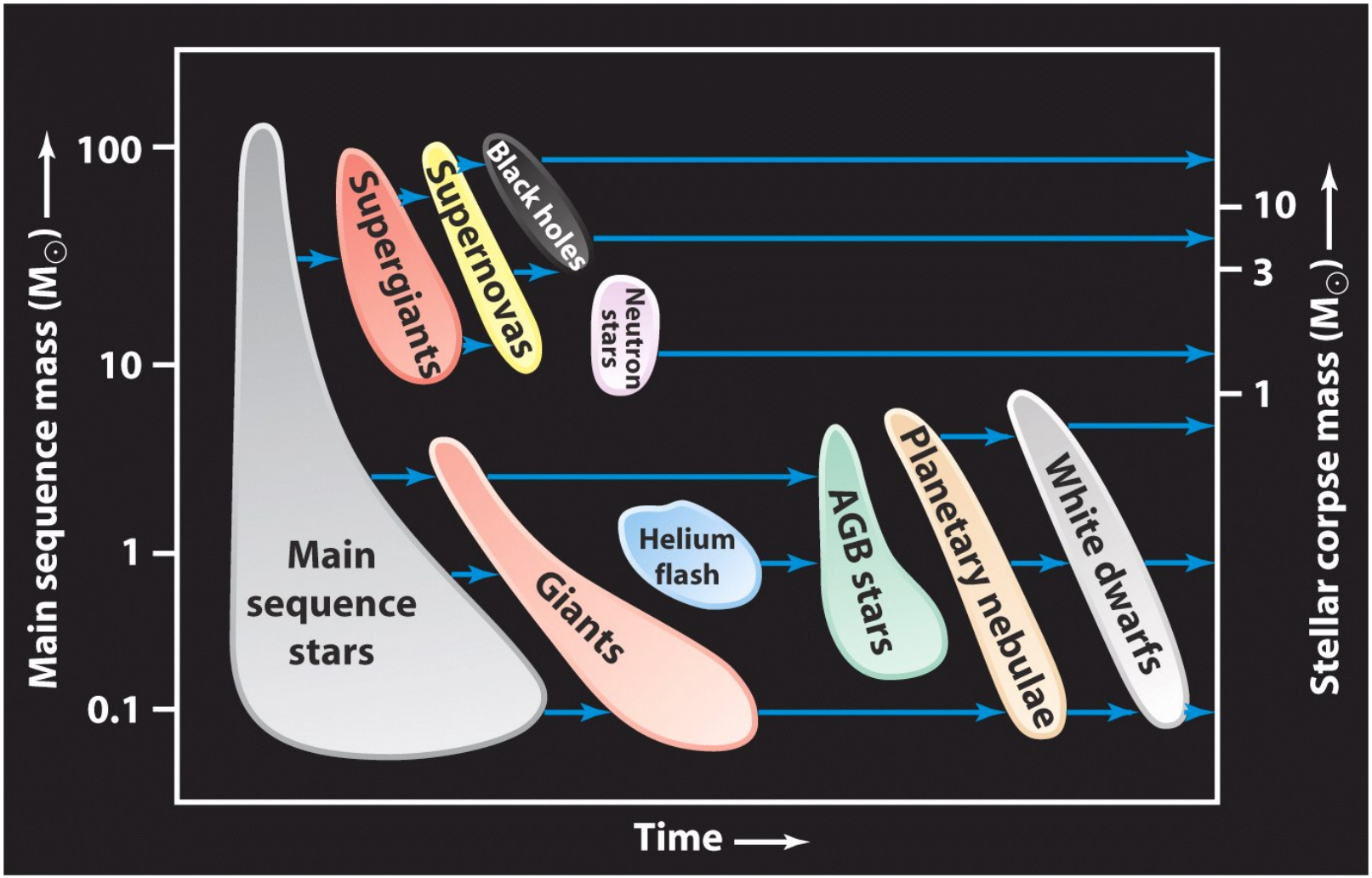
Диаграмма Герцшпрунга-Рассела
Главная последовательность



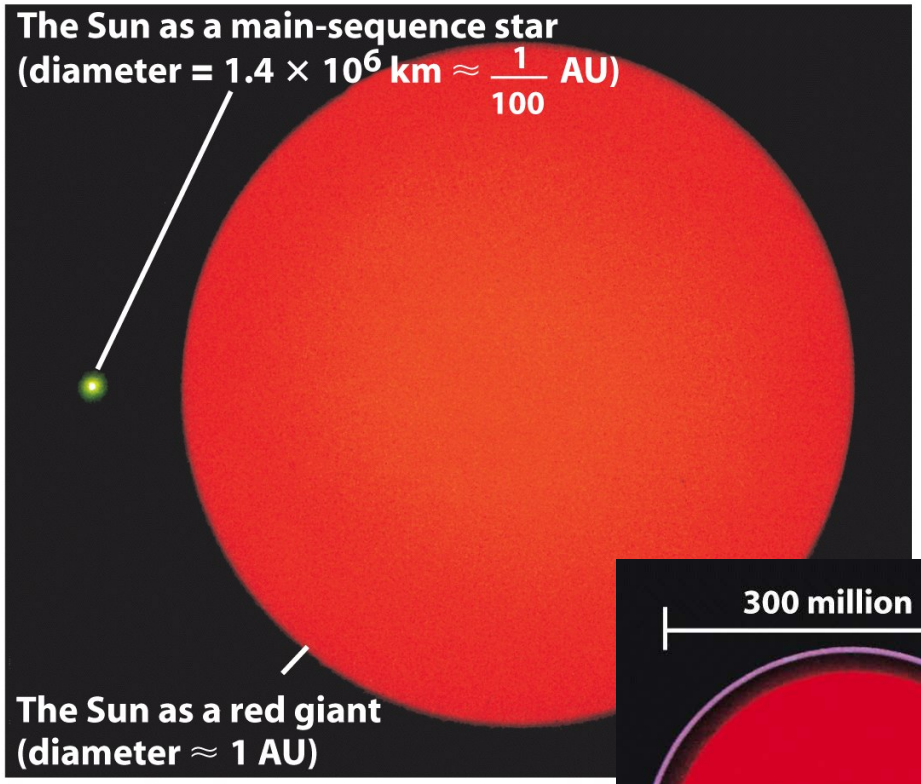
Спектральные классы звезд

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

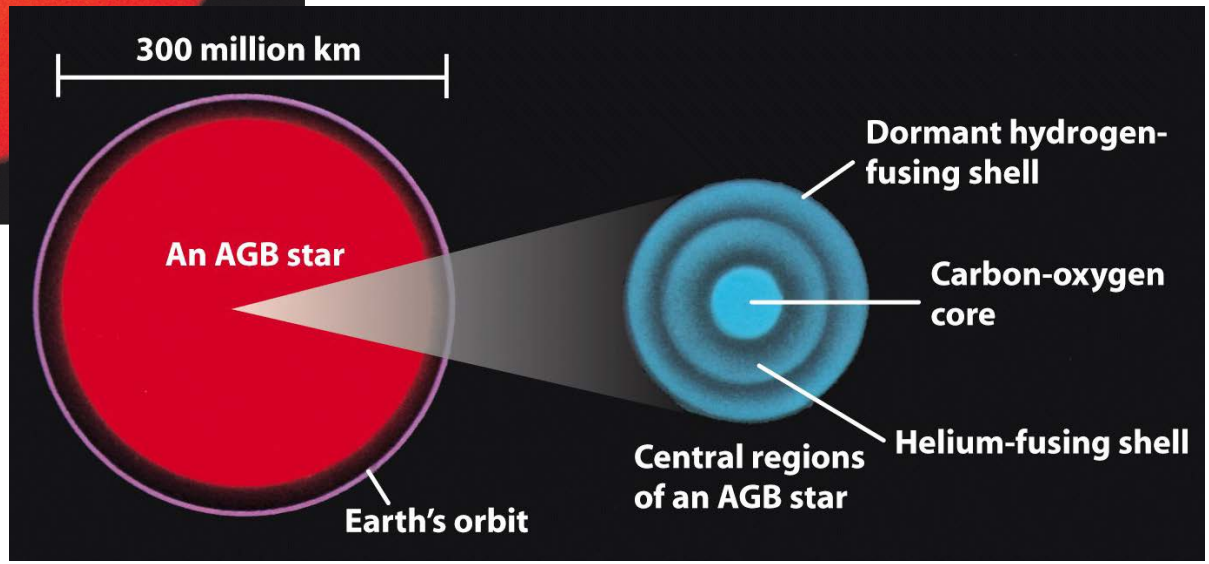


Звезды малой массы $M < 5M_{Sun}$



Отличаются положением на диаграмме Герцшпрунга-Рассела и внутренней структурой

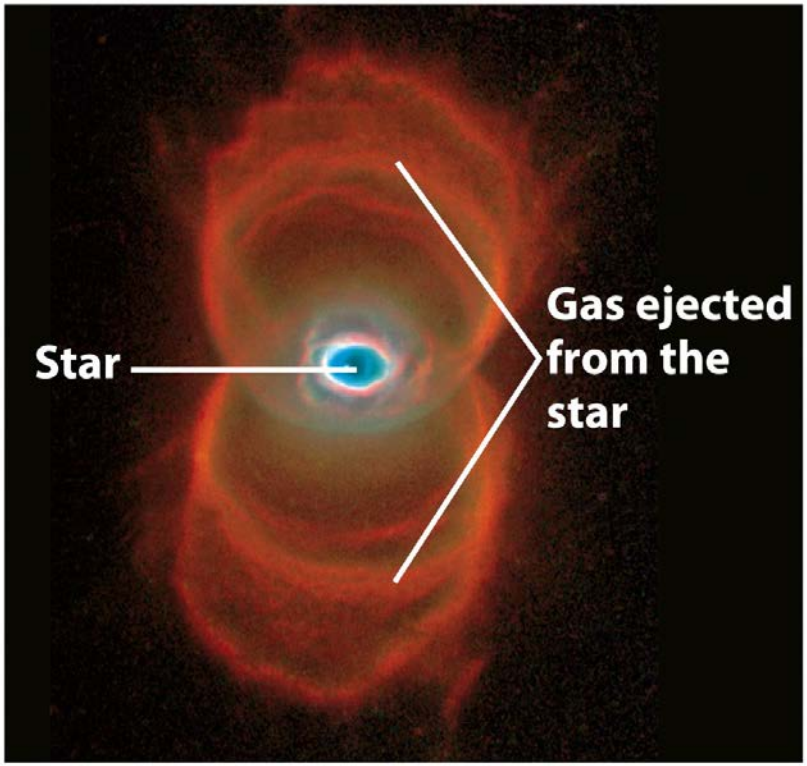
Солнце сегодня и на стадии Красного гиганта
Кор He и оболочка H (горение p)



Звезды малой массы $M < 5M_{Sun}$

Планетарная туманность –> белый карлик

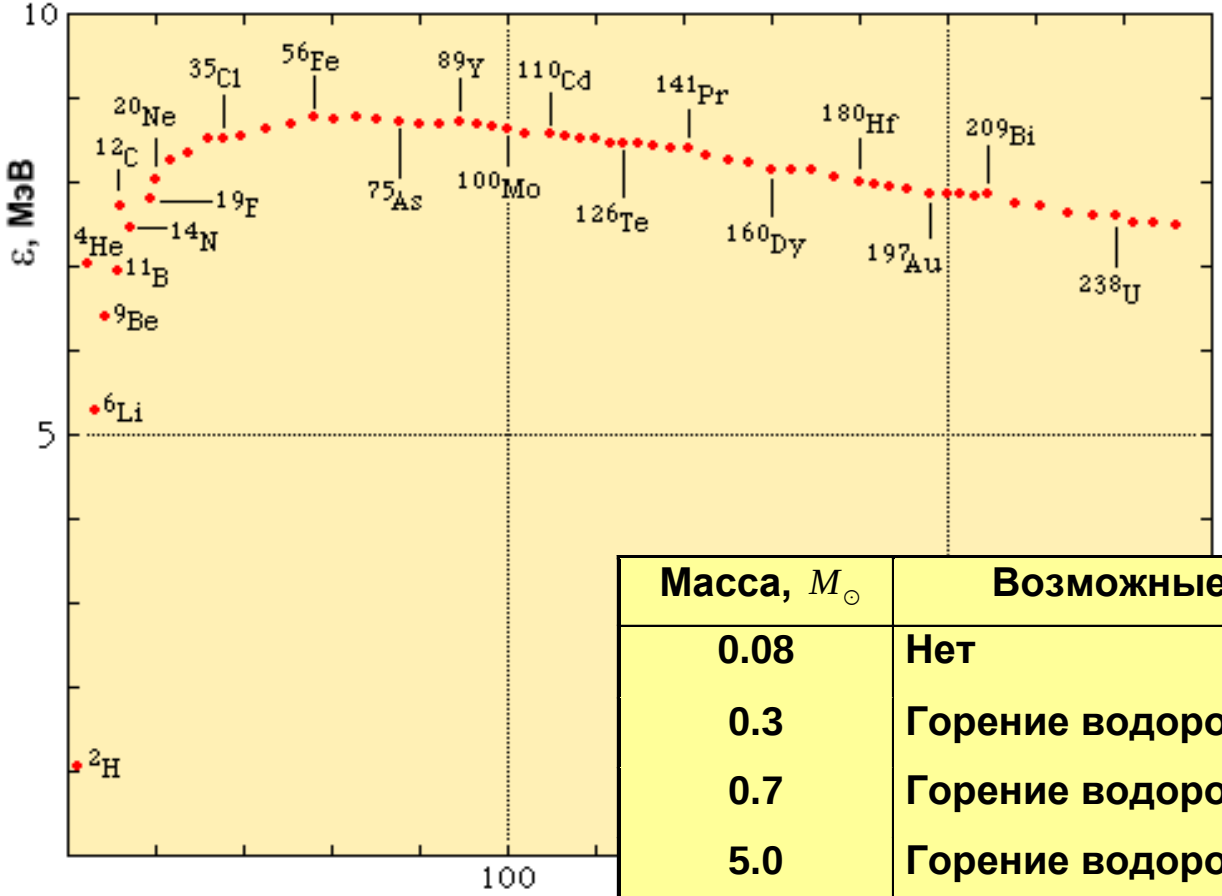
Созвездие Водолея.
Туманность Улитка.



Созвездие Муха.
Туманность Песочные часы.

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

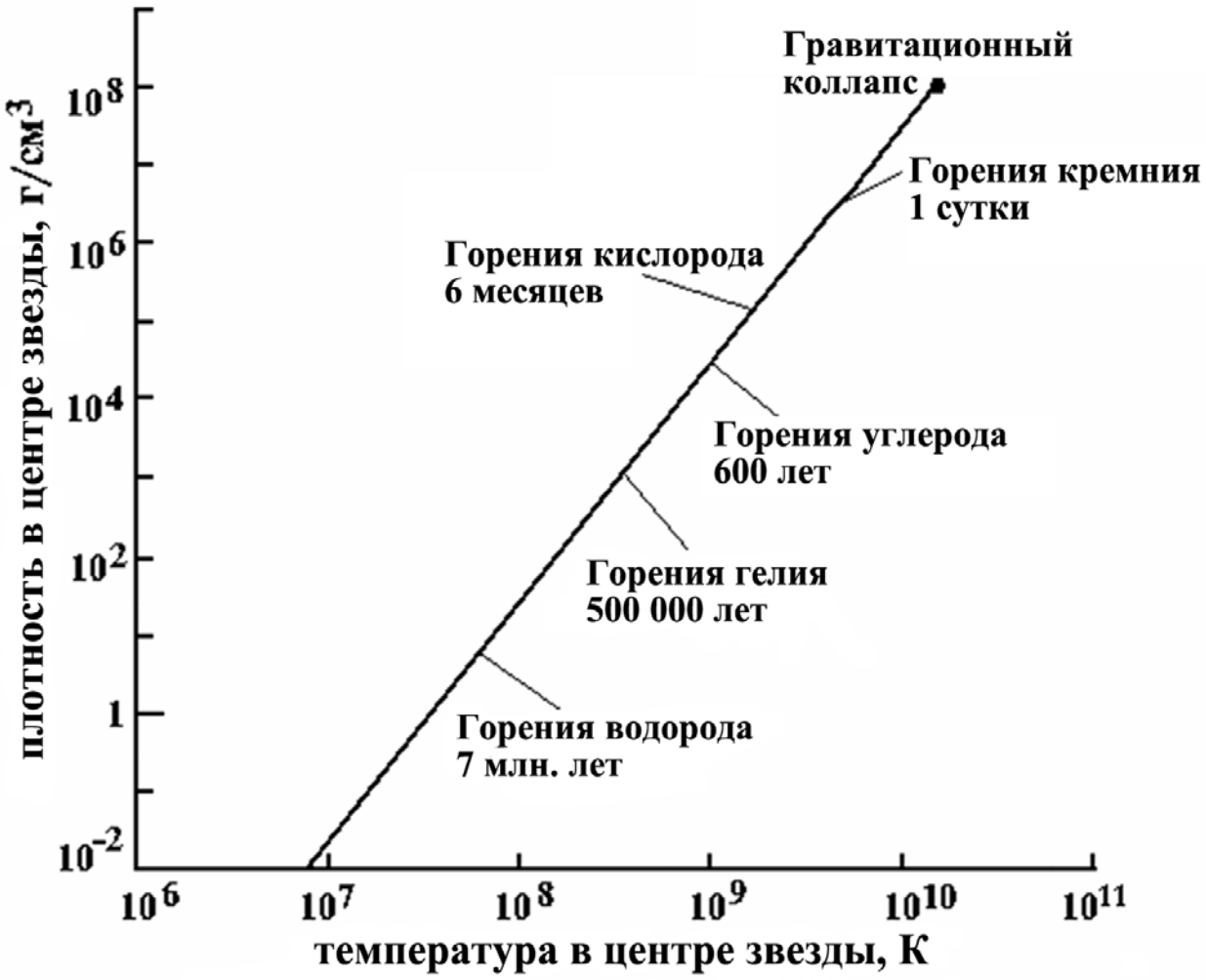
Удельная энергия связи ядра ε(A,Z)



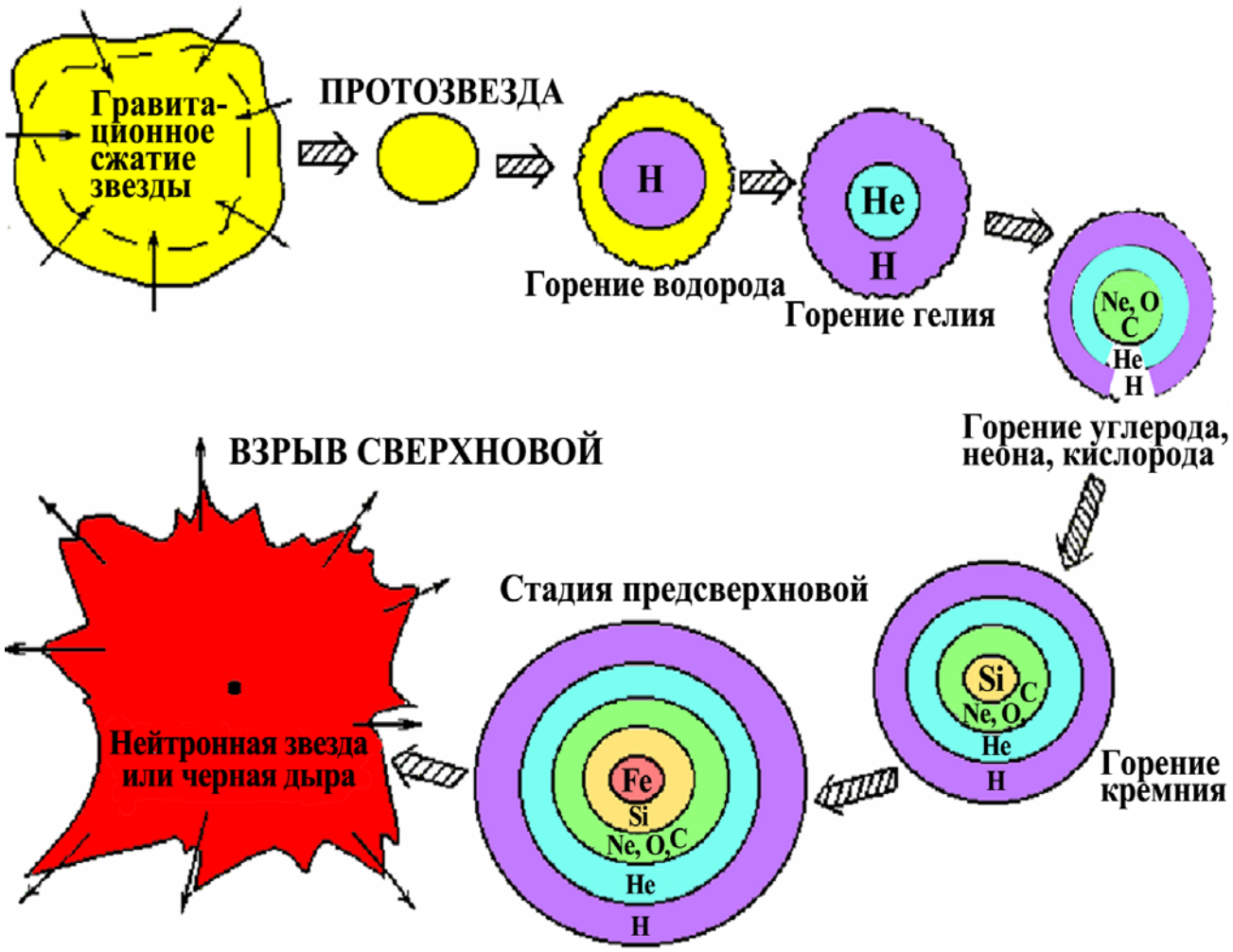
Масса, $M_\odot$	Возможные ядерные реакции
0.08	Нет
0.3	Горение водорода
0.7	Горение водорода и гелия
5.0	Горение водорода, гелия, углерода
25.0	Все реакции синтеза с выделением энергии

Ядерные реакции синтеза
в звёздах различной массы

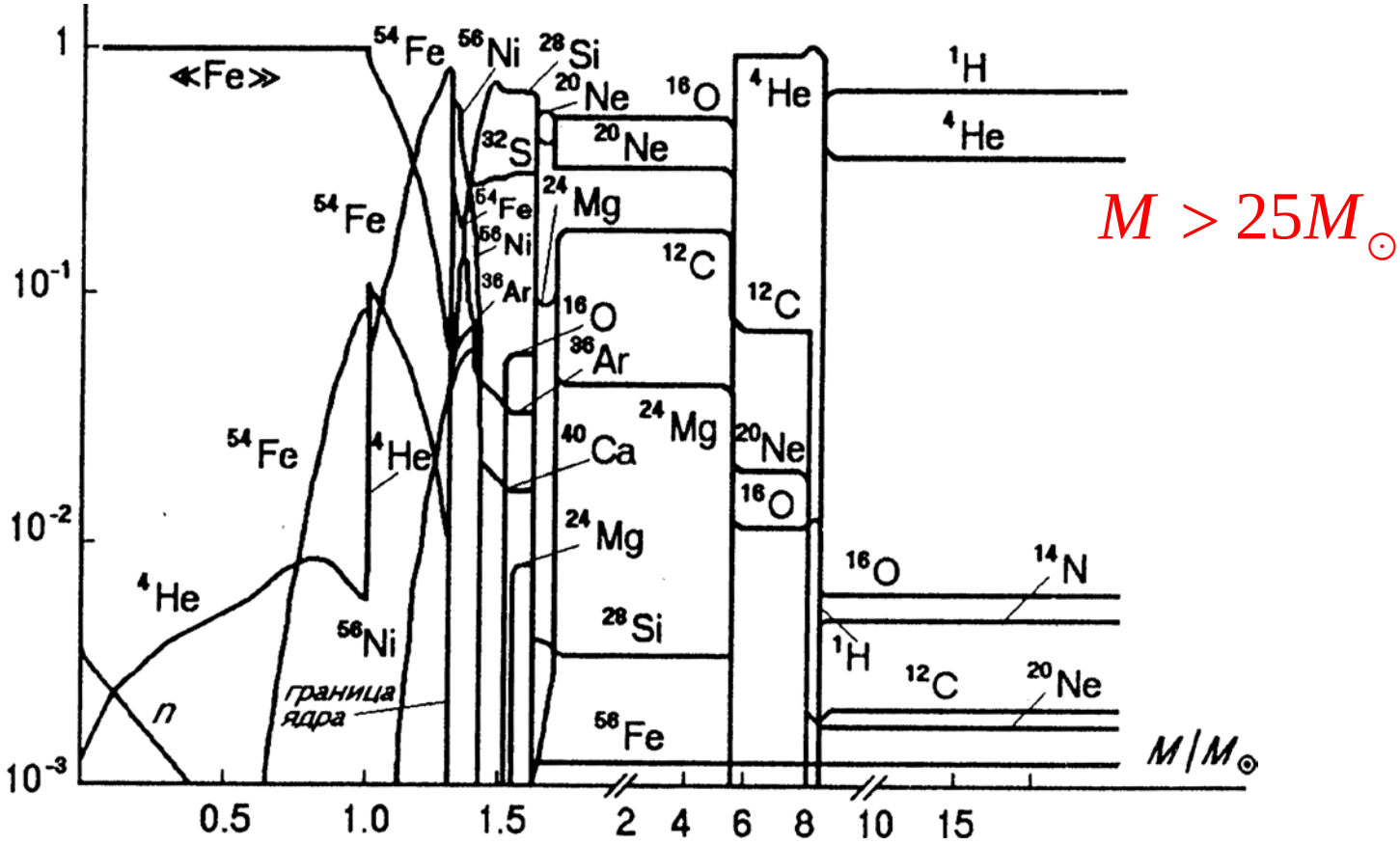
Эволюция массивной звезды $M > 25M_{\odot}$



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.

$$^{56}\mathrm{Fe} \rightarrow 13\,^{4}\mathrm{He} + 4n - 124{,}4\ \text{МэВ}$$

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:

$$(A, Z) + e^- \rightarrow (A, Z-1) + \nu_e$$

$$p + e^- \rightarrow n + \nu_e$$

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

t > ~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/(см^{2}с)

→ **окончание (A ≈ 270 ?)**

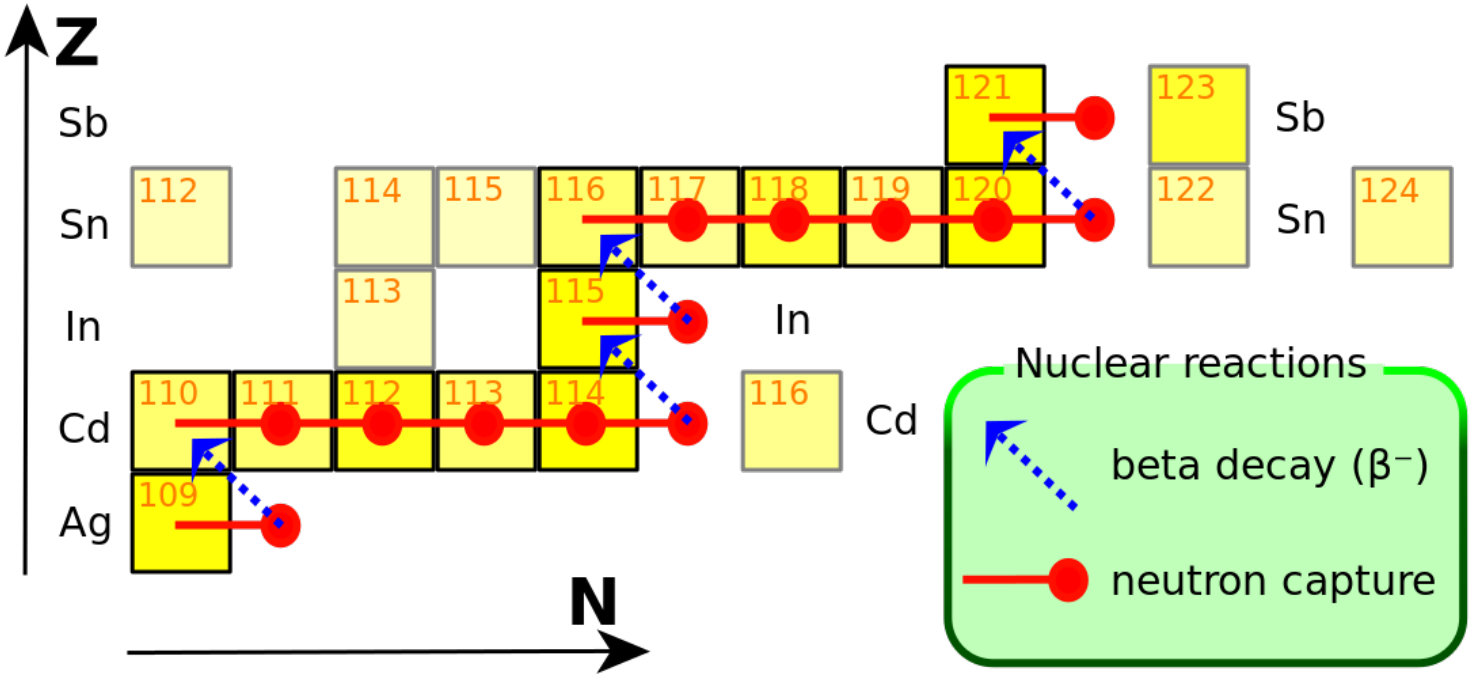
Синтез

- до Z ~ 26 (Fe)

(наибольшая удельная энергия связи)

S (slow) – процесс

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



Захват нейтронов:

$$(A, Z) + n \rightarrow (A+1, Z) + \gamma$$

β^--распад:

$$(A+1, Z) \rightarrow (A+1, Z+1) + e^- + \nu_e.$$

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

$\tau_{n\gamma}$ — 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

$$^{13}C + \alpha \rightarrow {}^{16}O + n \quad \text{и} \quad {}^{22}Ne + \alpha \rightarrow {}^{25}Mg + n.$$

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:

$$^{12}C + p \rightarrow {}^{13}N + 1.94 \text{ МэВ},$$

$$^{13}N \rightarrow {}^{13}C + e^{+} + \nu_e + 1.20 \text{ МэВ } (T_{1/2} = 10 \text{ мин}),$$

$$^{13}C + \alpha \rightarrow {}^{16}O + n + 2.22 \text{ МэВ}.$$

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

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

$$^{14}\mathrm{N} + \alpha \rightarrow {}^{18}\mathrm{F} + 4,4 \text{ МэВ}$$

$$^{18}\mathrm{F} + \alpha \rightarrow {}^{22}\mathrm{Na} + 8,5 \text{ МэВ}$$

$$^{22}\mathrm{Na} \rightarrow {}^{22}\mathrm{Ne} + e^{+} + \nu \ (T_{1/2} = 2,6 \text{ лет})$$

$$^{22}\mathrm{Ne} + \alpha \rightarrow {}^{25}\mathrm{Mg} + n + 0,1 \text{ МэВ}$$

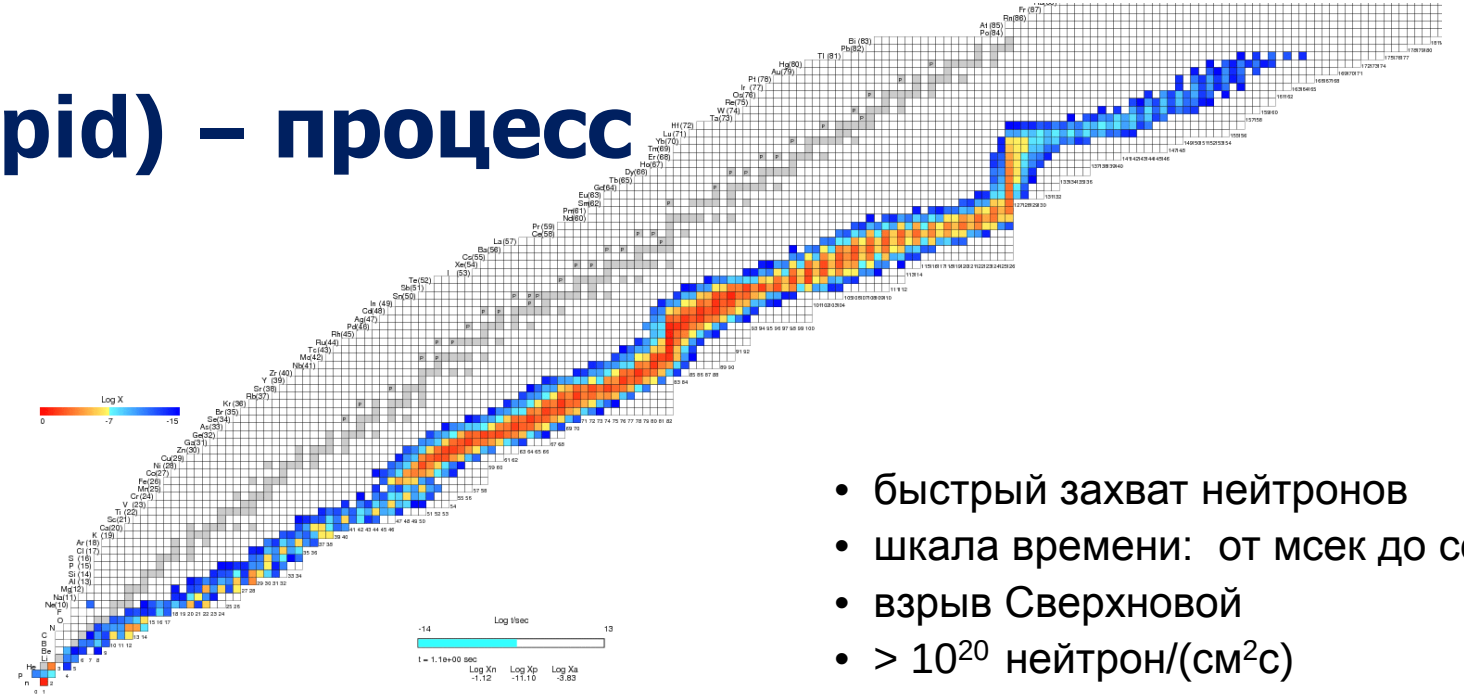
Ещё одним источником нейтронов с необходимой плотностью при $T \approx 10^8$ К могут быть фотонейтронные реакции:

$$^{13}C + \gamma \rightarrow {}^{12}C + n - 4.95 \text{ МэВ},$$

$$^{13}N + \gamma \rightarrow {}^{12}N + n - 10.55 \text{ МэВ}.$$

Роль фотонейтронных реакций растет с увеличением температуры.

R (rapid) – процесс



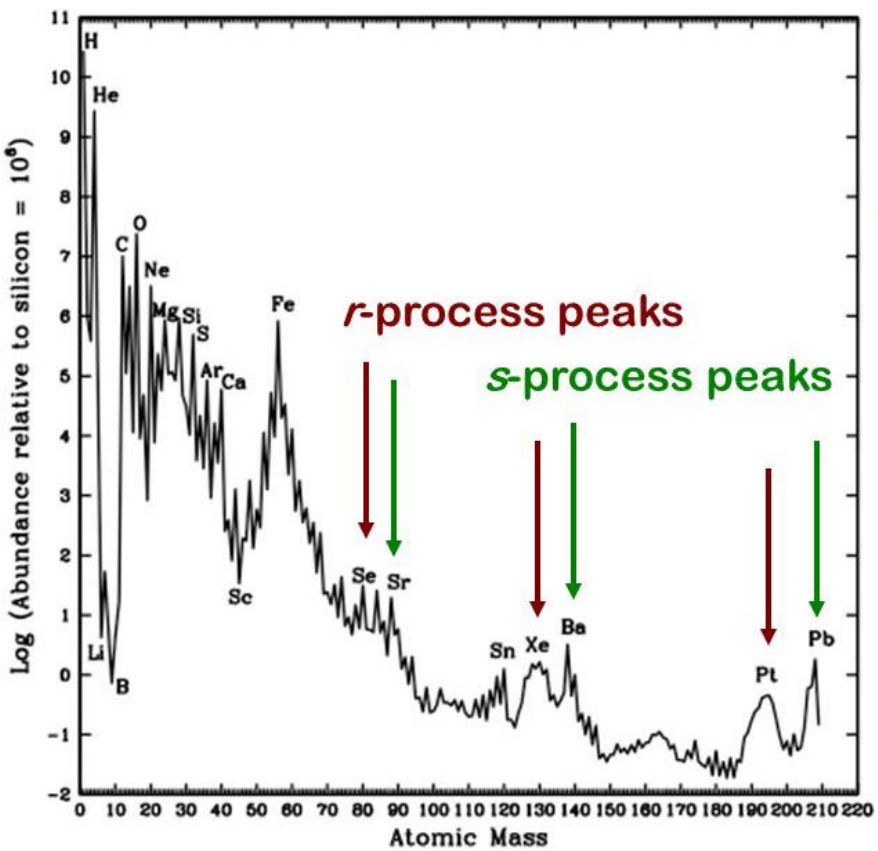
- быстрый захват нейтронов
- шкала времени: от мсек до сек
- взрыв Сверхновой
- > 10^{20} нейтрон/(см^{2}с)

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

$$1/\tau_{n\gamma} = \rho_n \cdot \upsilon_n \cdot \sigma_{n\gamma} \qquad \tau_{n\gamma} \ll \tau_\beta$$

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

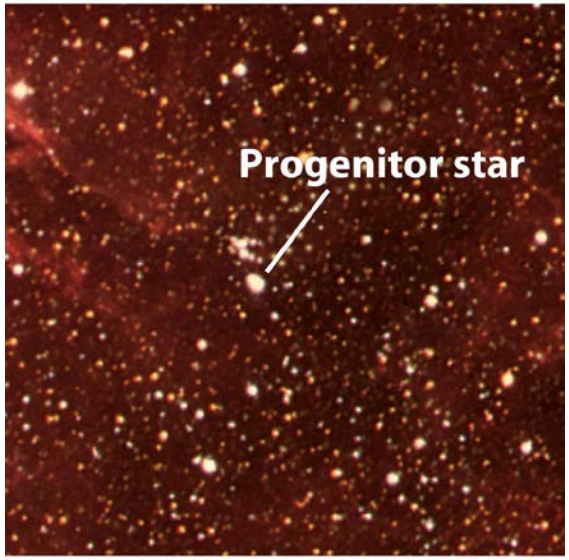
Пики r-процесса соответствуют **нестабильным** ядрам с N = 50, 82, 126

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 $^{22}Ne(\alpha,n)^{25}Mg$ 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.

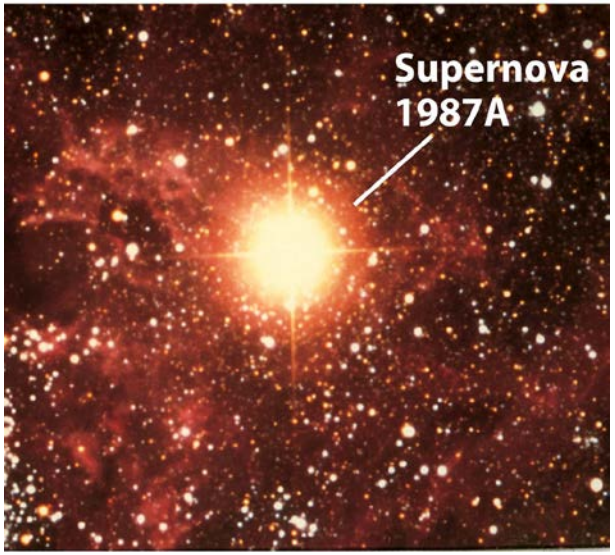
Конец для звезды с большой массой приходит,
когда она пытается превратить сердцевину Fe в более тяжелые элементы –
и тут оказывается, что это на это нужна энергия

КОЛЛАПС ЗВЕЗДЫ & ВЗРЫВ СВЕРХНОВОЙ

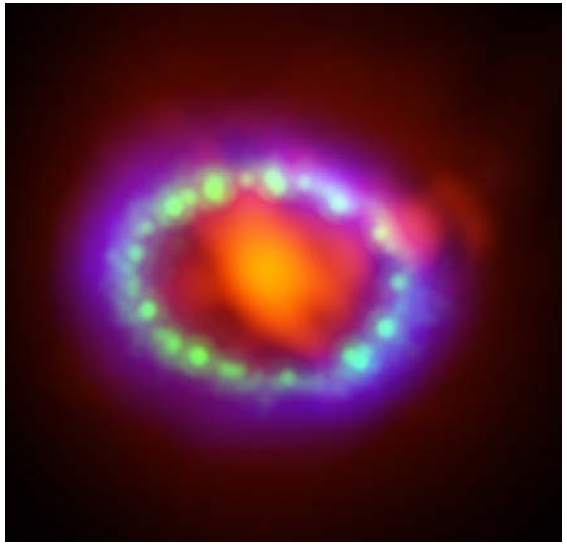
Большое Магелланово облако, туманность Тарантул



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

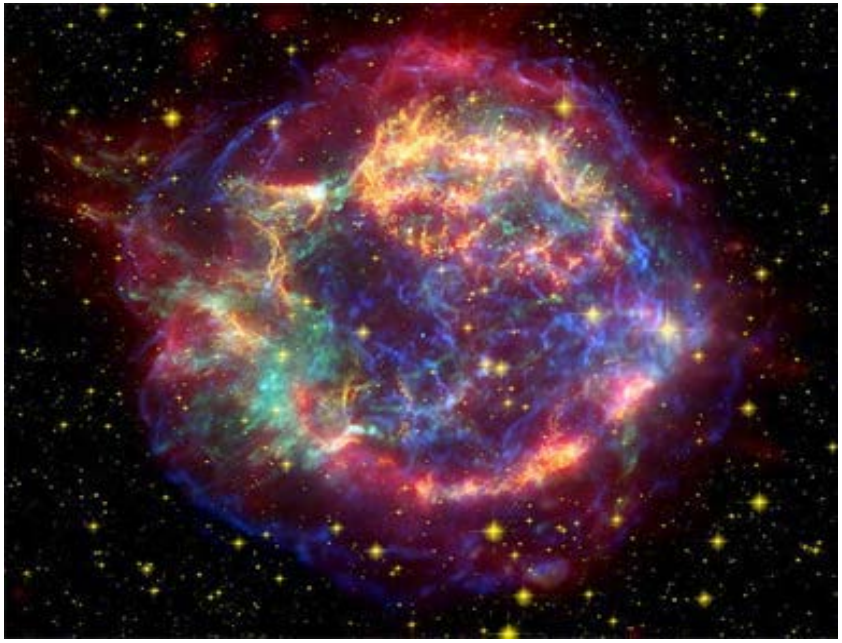


23.02.1987

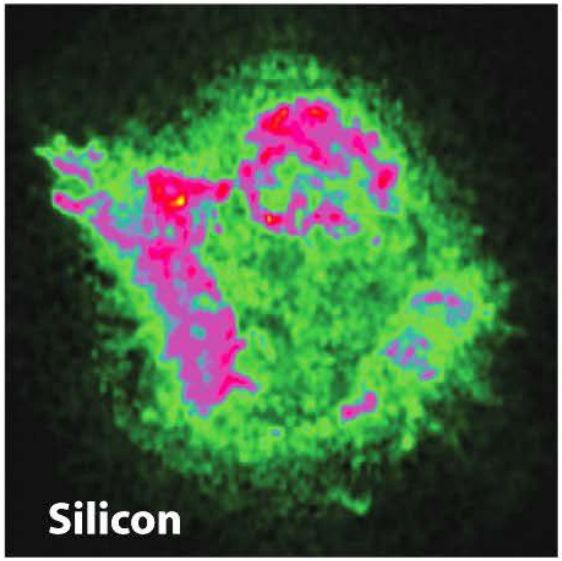


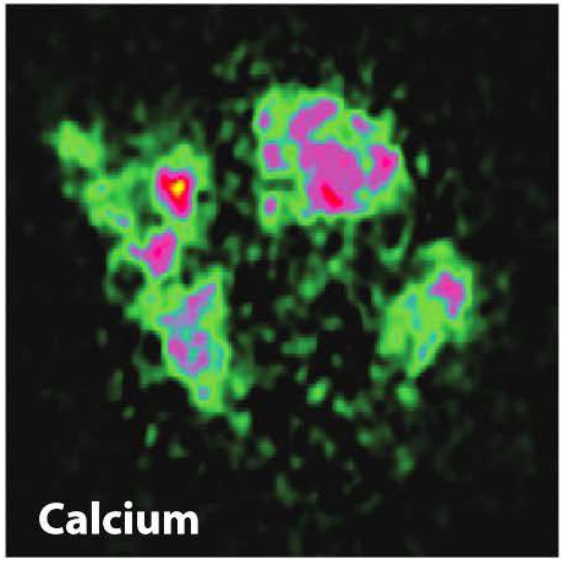
6.01.2014

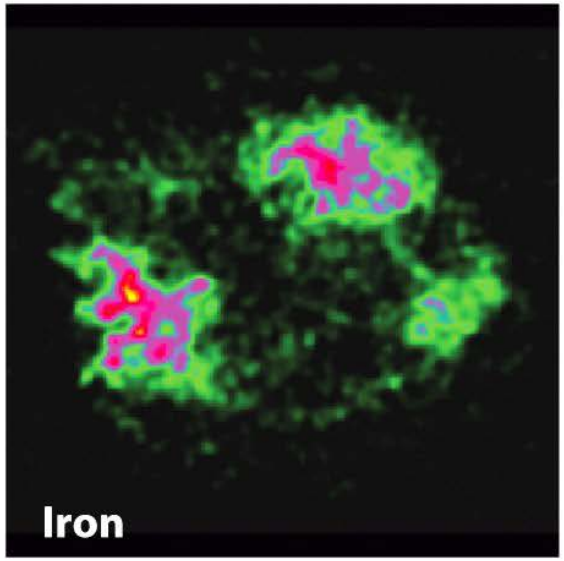
Сверхновая



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.



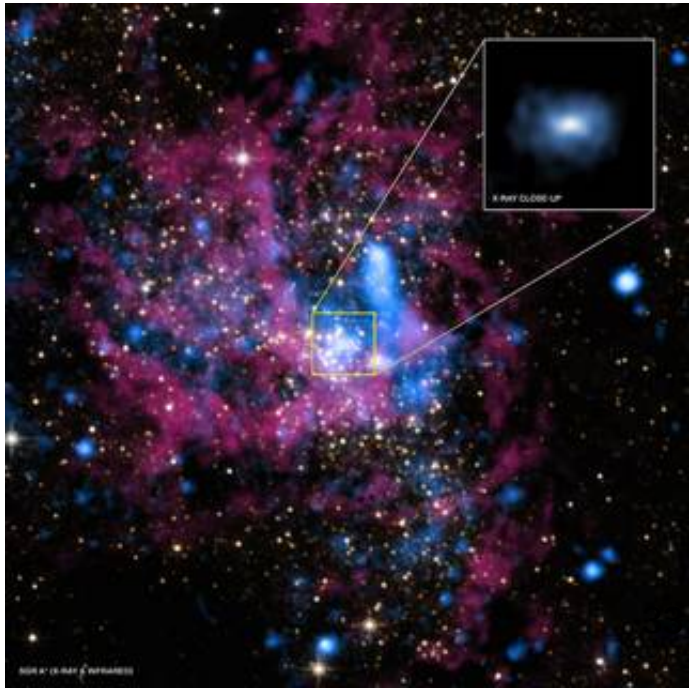


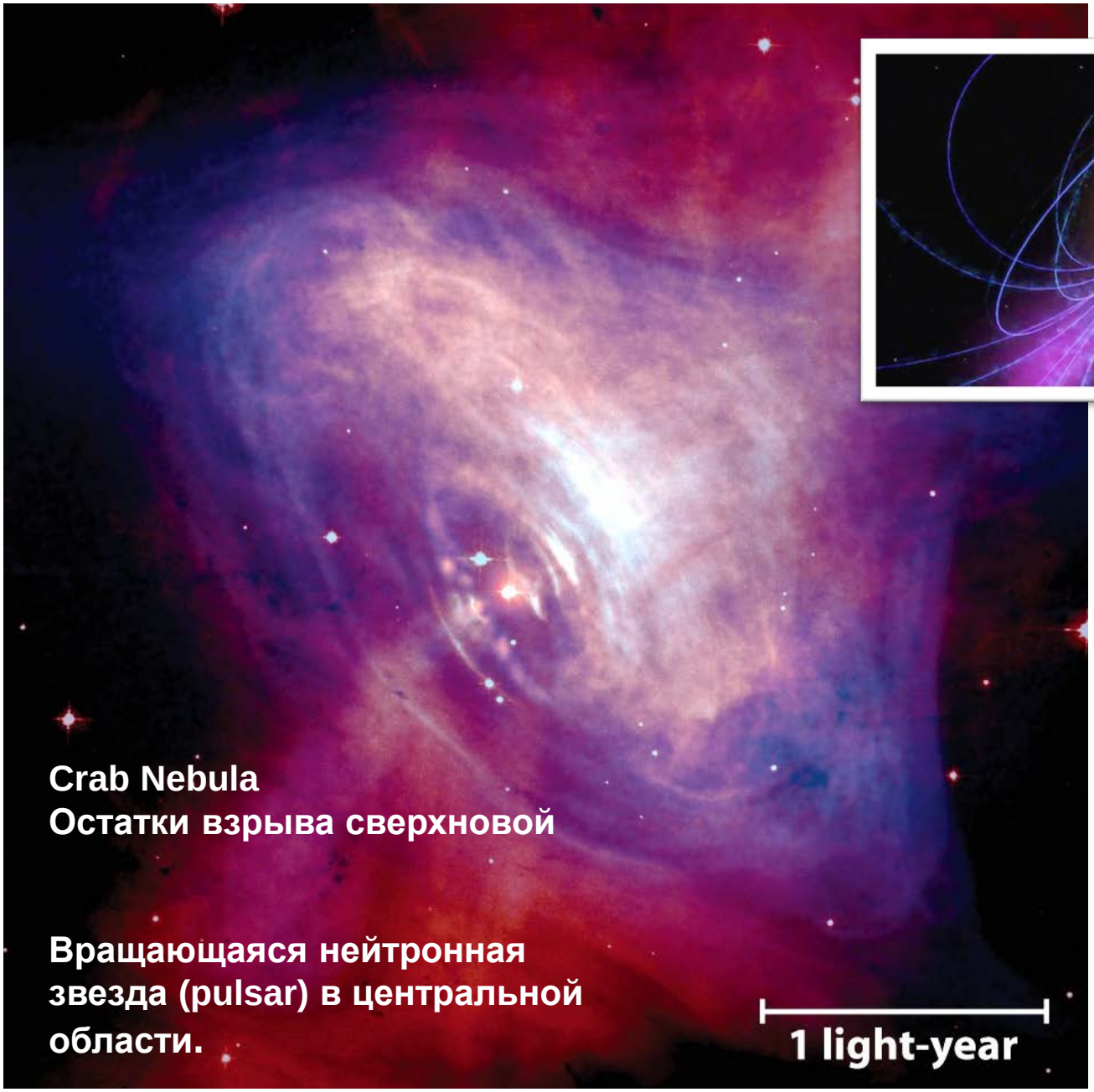


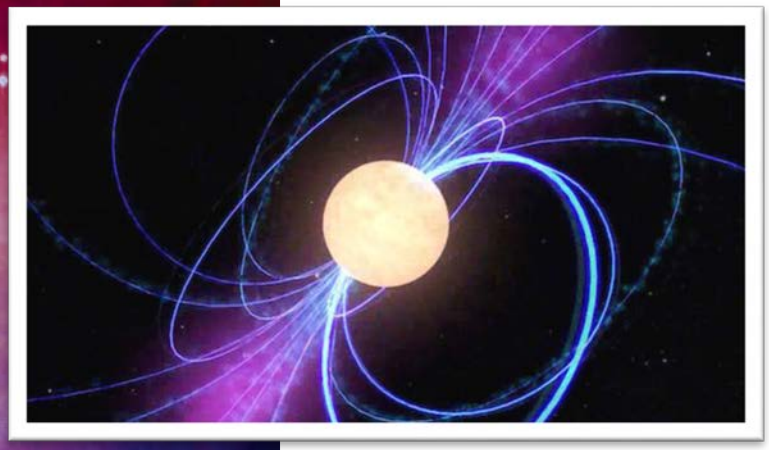
Конечные этапы эволюции звезд

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

Черная дыра в центре галактики Млечный путь

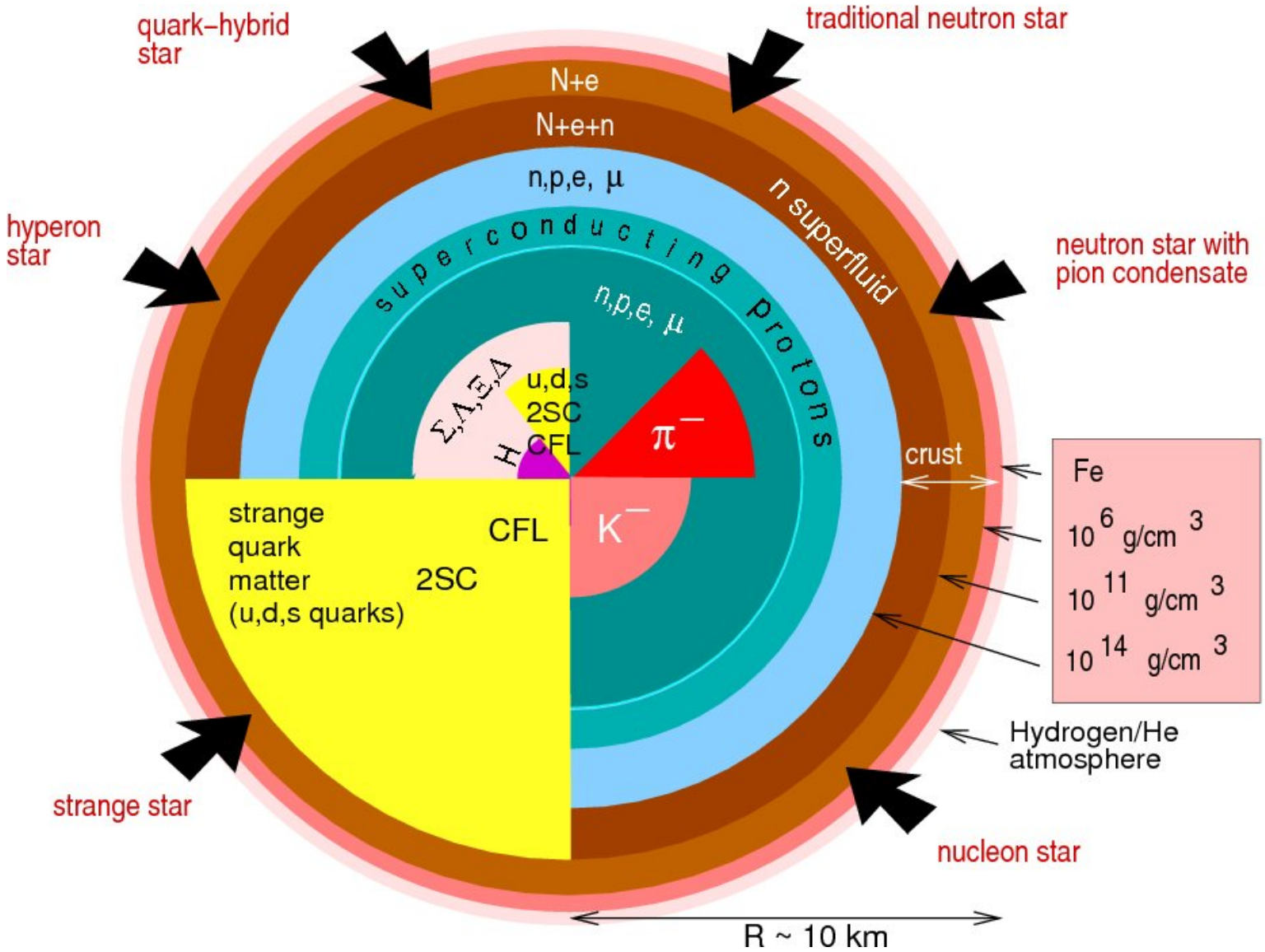






Сохранение углового момента и магнитного поля при коллапсе сверхновой и образовании нейтронной звезды приводит к рождению быстро вращающихся пульсаров с магнитным полем ~10^{10}-10^{14} Гс

Нейтронная звезда



Космический нуклеосинтез

■ – Большой Взрыв

■ - Малые звезды

■ - Космические лучи

■ - Массивные звезды

■ - Сверхновая

Ядерные реакции в звездах

- **Горение водорода. CNO-цикл**
  $4p \to 4He + 2e^{+} + 2\nu_e$
- **Горение гелия.**
  $3\alpha \to {}^{12}\mathrm{C}$
- **α-процесс. Образование α-частичных ядер**
  $A + \alpha + \alpha + \alpha + \ldots \to N\alpha$ **-ядра**
- **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**
  $(A,Z) + n \to (A+1,Z) \to (A+1,Z+1) + e^{-} + \tilde{\nu}$
- **r-процесс. . Захват нейтронов происходит быстрее (rapid), чем β-распад в последовательности процессов**
  $(A,Z) + Nn \to (A+N,Z) \to (A+N,Z+N) + Ne^{-} + N\tilde{\nu}$
- **p-процесс. Реакции образования лёгких изотопов химического элемента в реакциях** $(p,n)\,(p,\gamma)\,(\gamma,n)\,(\gamma,2n)$
- **x-процесс. Реакции под действием космических лучей. Образование изотопов Li, Be, B.**