

Тайны атомных ядер

2017

ЗВЕЗДНЫЙ НУКЛЕОСИНТЕЗ

Синтез ядер легче группы железа

Характеристики Вселенной

Возраст t_0	13,7 млрд. лет	
Радиус наблюдаемой части Вселенной (<i>горизонт видимости</i>) $R_0 = ct_0$	10^{28} см	
Полное количество вещества и энергии	10^{56} г	
Средняя плотность вещества и энергии	10^{-29} г/см ³	
Полное барионное число (число нуклонов)	10^{78}	
Доля антивещества	$< 10^{-4}$	
Постоянная Хаббла H	71±4 км/с·Мпк	
Температура реликтового (фонового) излучения	2.73 К	
Плотность реликтовых фотонов	411 см ⁻³	
Энергетическая плотность реликтовых фотонов	0.26 эВ/см ³ = 4.6·10 ⁻³⁴ г/см ³	
Отношение числа реликтовых фотонов к числу барионов n_γ/n_b	(10 ⁹ –10 ¹⁰):1	
Распространённость ядер:	по числу	по массе
водород	91%	70.7%
гелий	8.9%	27.4%
остальные ядра	<0.2%	1.9%

Распространенность нуклидов во Вселенной



Распространенность Si принята равной 10^6 .

Эволюция Вселенной

$t = 0$

Большой взрыв. Рождение Вселенной

$$\rho(\text{г/см}^3) = \frac{5 \cdot 10^5}{t^2(\text{с})}, \quad T(\text{К}) = \frac{10^{10}}{\sqrt{t(\text{с})}}$$

$t = 10^{-43}$ с

Эра квантовой гравитации. Струны

$$\rho = 10^{90} \text{ г/см}^3, \quad T = 10^{32} \text{ К}$$

$t = 10^{-35}$ с

Кварк-глюонная среда

$$\rho = 10^{75} \text{ г/см}^3, \quad T = 10^{28} \text{ К}$$

$t = 1$ мкс

Кварки объединяются в нейтроны и протоны

$$\rho = 10^{17} \text{ г/см}^3, \quad T = 6 \cdot 10^{12} \text{ К}$$

$t = 100$ с

Образование дозвездного ${}^4\text{He}$

$$\rho = 50 \text{ г/см}^3, \quad T = 10^9 \text{ К}$$

$t = 380$ тыс. лет

Образование нейтральных атомов

$$\rho = 0,5 \cdot 10^{-20} \text{ г/см}^3, \quad T = 3 \cdot 10^3 \text{ К}$$

Гравитационная энергия типичных астрономических объектов

Астрономический объект	Гравитационная энергия, эрг
Луна	$1.3 \cdot 10^{36}$
Земля	$2.0 \cdot 10^{39}$
Солнце	$2.0 \cdot 10^{48}$
Белый карлик	$2.4 \cdot 10^{50}$
Нейтронная звезда	$1.0 \cdot 10^{53}$
Наша Галактика	$5.0 \cdot 10^{59}$

Гравитационная энергия

$$E_{\text{гравит}} = \frac{3}{5} \frac{GM^2}{R}$$

Звезда медленно сжимается и излучает энергию во внешнее пространство.

Если светимость звезды L , то за счет гравитационного сжатия звезда может излучать в течение времени

$$T_{\text{гравит}} = \frac{3}{5} \frac{GM^2}{RL}$$

Для Солнца можно рассчитать энергию $E_{\text{гравит}}$, которую оно излучило, сжимаясь до настоящего состояния ($R_{\odot} = 7 \cdot 10^{10}$ см, $M_{\odot} = 2 \cdot 10^{33}$ г):

$$(E_{\text{гравит}})_{\odot} = \frac{3}{5} \frac{GM^2}{R} = 2.0 \cdot 10^{48} \text{ эрг}$$

В настоящее время светимость Солнца $L_{\odot} \sim 4 \cdot 10^{33}$ эрг/с. Считая её постоянной, можно оценить время излучения Солнца за счет гравитационного сжатия:

$$(T_{\text{гравит}})_{\odot} = \frac{2 \cdot 10^{48}}{4 \cdot 10^{33}} = 17 \text{ млн. лет.}$$

Это означает, что если бы высвобождающаяся за счет гравитационного сжатия энергия была единственным источником энергии Солнца, то время его существования исчислялось бы десятками млн лет. Однако это противоречит данным геологии. Палеонтологические данные указывают на наличие на Земле примитивных форм жизни по крайней мере 3 млрд лет назад. Следовательно, должен существовать другой механизм выделения энергии в звездах. Таким механизмом является синтез легких ядер.

Дозвездный нуклеосинтез

Протоны и нейтроны ранней Вселенной явились тем материалом, из которого в дальнейшем возникли атомные ядра различных химических элементов.

$T \gg 10^{10}$ К :



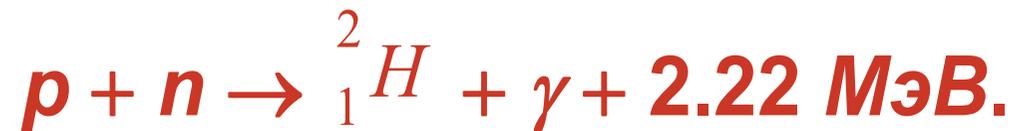
$$W = Ae^{-E/kt}$$

В условиях термодинамического равновесия соотношение между числом нейтронов и протонов будет определяться разностью масс нейтрона и протона:

$$\frac{n_n}{n_p} = \frac{e^{-E_n/kT}}{e^{-E_p/kT}} = e^{-(m_n - m_p)c^2/kT} = \frac{1}{6}$$

Образование дейтерия

Стартовой реакцией первичного нуклеосинтеза является реакция образования дейтерия

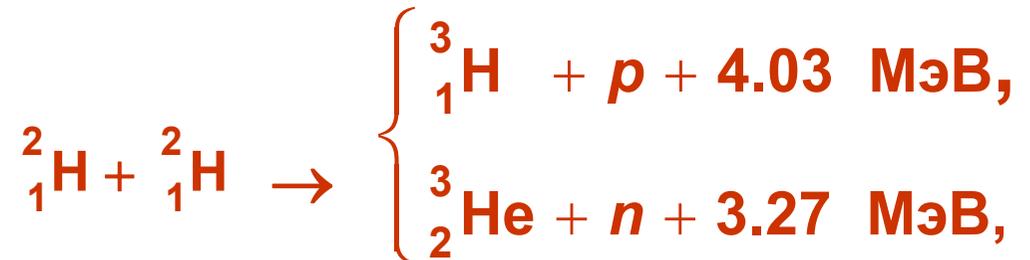
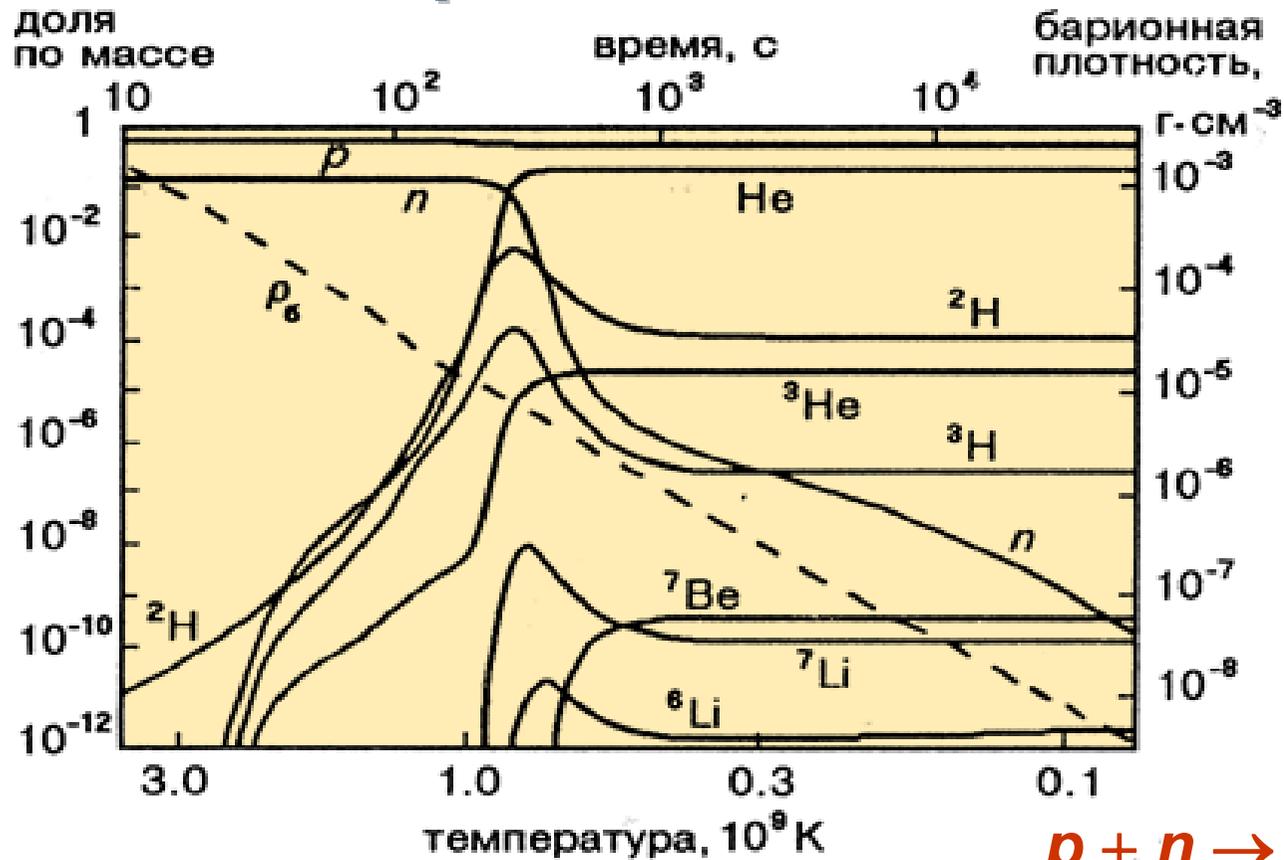


Накоплению дейтерия за счёт этой реакции на первых порах препятствует интенсивное разрушение дейтерия фотонами в обратном процессе фотодиссоциации. Отношение числа фотонов n_γ к числу барионов n_b :

$$n_\gamma / n_b \approx 10^9 \div 10^{10}.$$

Поэтому начало синтеза дейтерия и всей цепочки первичного нуклеосинтеза задерживается примерно до 100-й секунды после Большого Взрыва, когда средняя кинетическая энергия частиц уменьшается до 0.1 МэВ. Вселенная к этому времени остывает до 10^9 К.

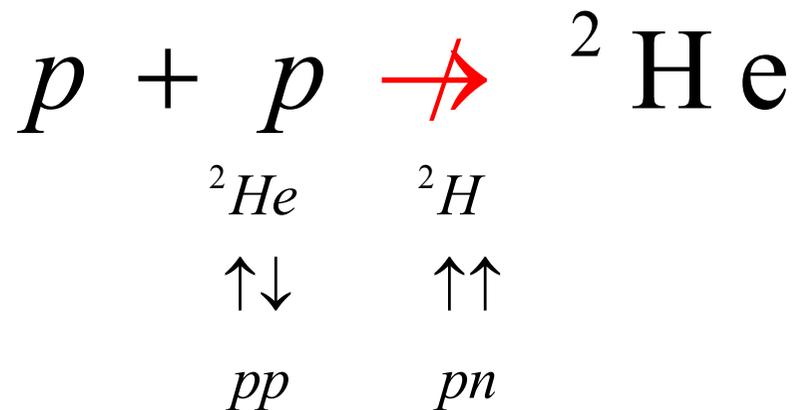
Образование легчайших ядер



Первичный нуклеосинтез

Модель Гамова

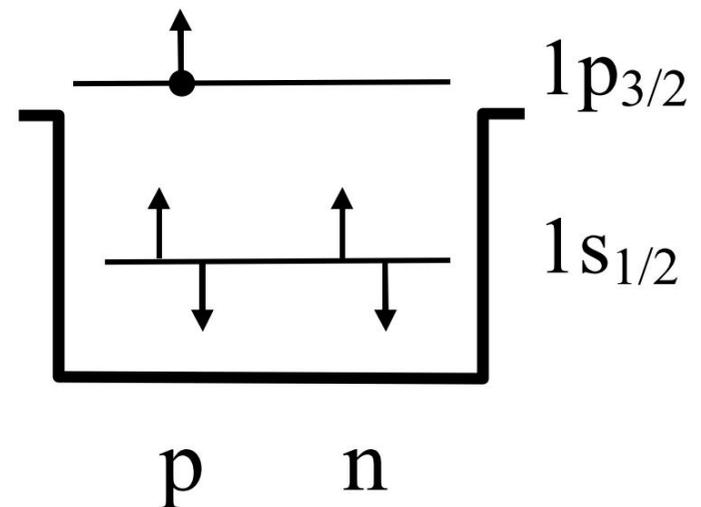
Все химические элементы образуются в момент Большого взрыва.



$$T_{1/2}({}^8\text{Be}) = 0,7 \cdot 10^{-16} \text{ c}$$



Г. Гамов
(1904-1968)



Звезды

Пределы изменения характеристик различных звезд

$$10^{-1} M_{\odot} < M < 100 M_{\odot}$$

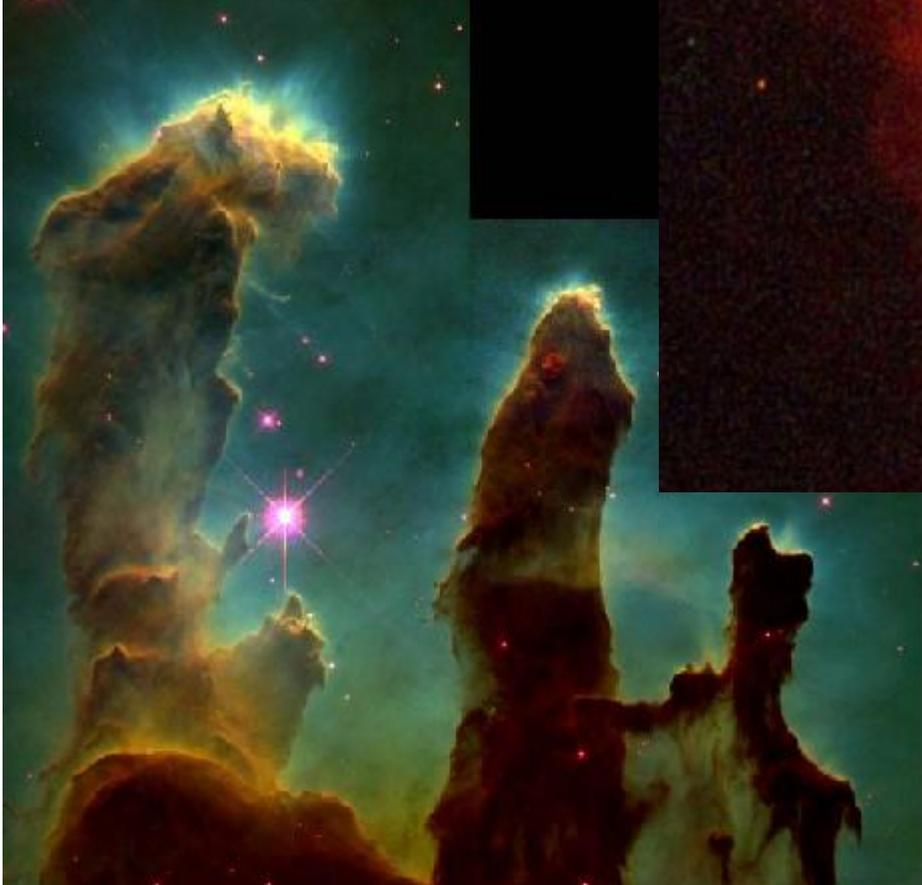
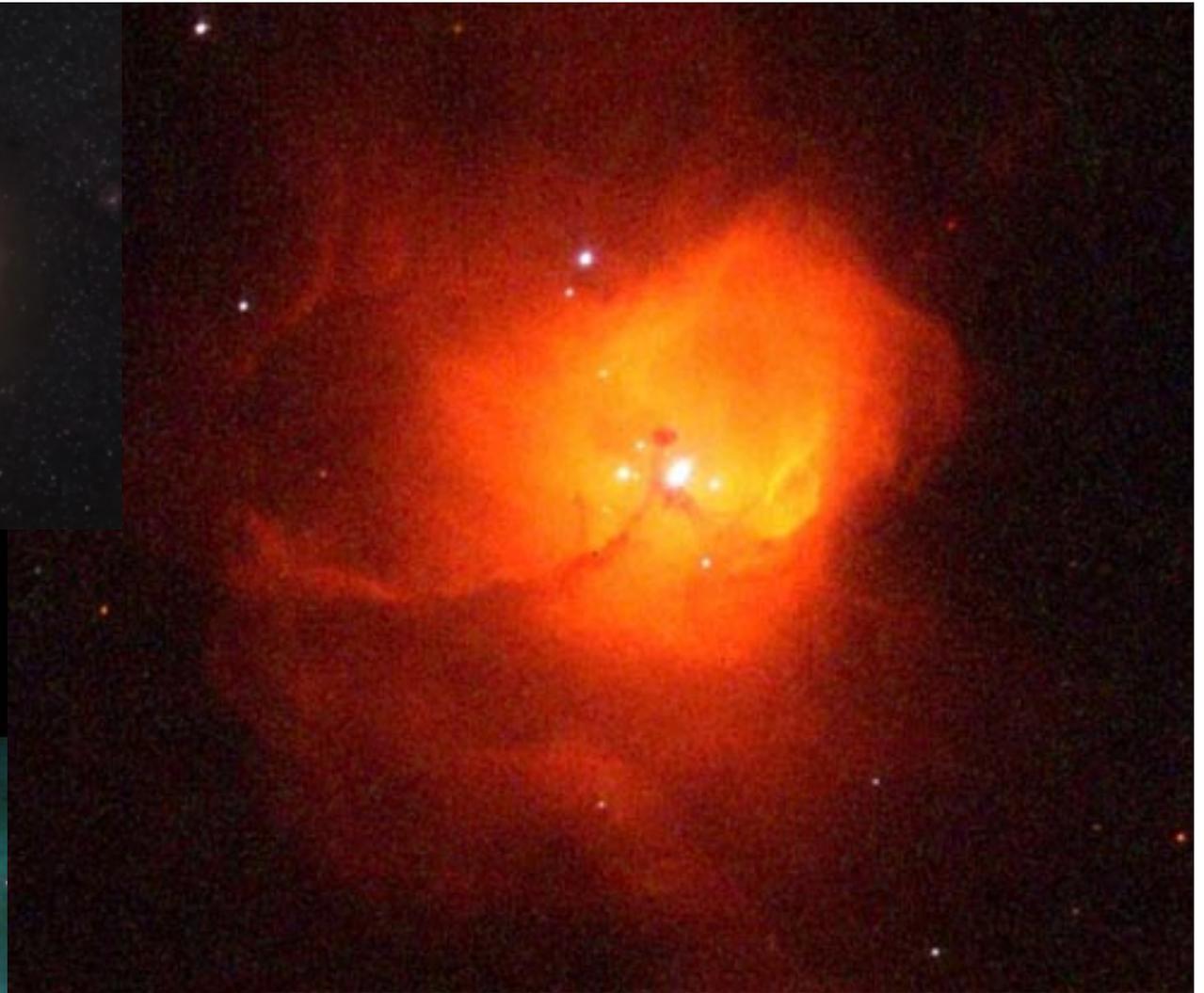
$$10^{-4} L_{\odot} < L < 10^6 L_{\odot}$$

$$10^{-2} R_{\odot} < R < 10^3 R_{\odot}$$

$$2 \cdot 10^3 \text{ K} < T < 10^5 \text{ K}$$

**Время достижения главной
последовательности и время жизни на главной
последовательности звезд различной массы**

M/M_{\odot}	Время достижения, лет	Время жизни, 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	$2.5 \cdot 10^6$	$2.3 \cdot 10^8$
2.25	$5.9 \cdot 10^6$	$5.0 \cdot 10^8$
1.5	$1.8 \cdot 10^7$	$1.7 \cdot 10^9$
1.25	$2.9 \cdot 10^7$	$3.0 \cdot 10^9$
1.0	$5.0 \cdot 10^7$	$8.2 \cdot 10^9$
0.5	$1.5 \cdot 10^8$	$5.0 \cdot 10^{10}$

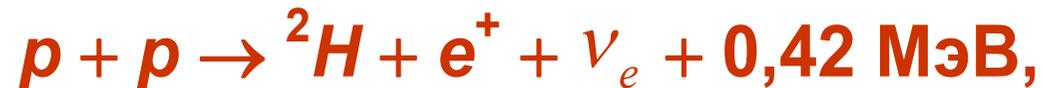


Рождение звезд

Звезды первого поколения

Горение дейтерия

Когда масса вещества звезды в результате аккреции достигает 0.1 массы Солнца, температура в центре звезды возрастает до 1 млн. К и в жизни протозвезды начинается новый этап – **реакции термоядерного синтеза**. Однако эти термоядерные реакции отличаются от реакций, протекающих в звёздах, находящихся в стационарном состоянии, типа Солнца. Протекающая на Солнце реакция синтеза



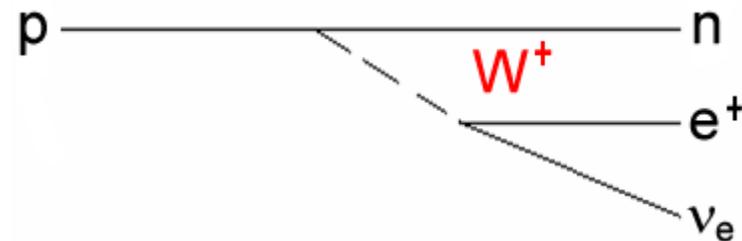
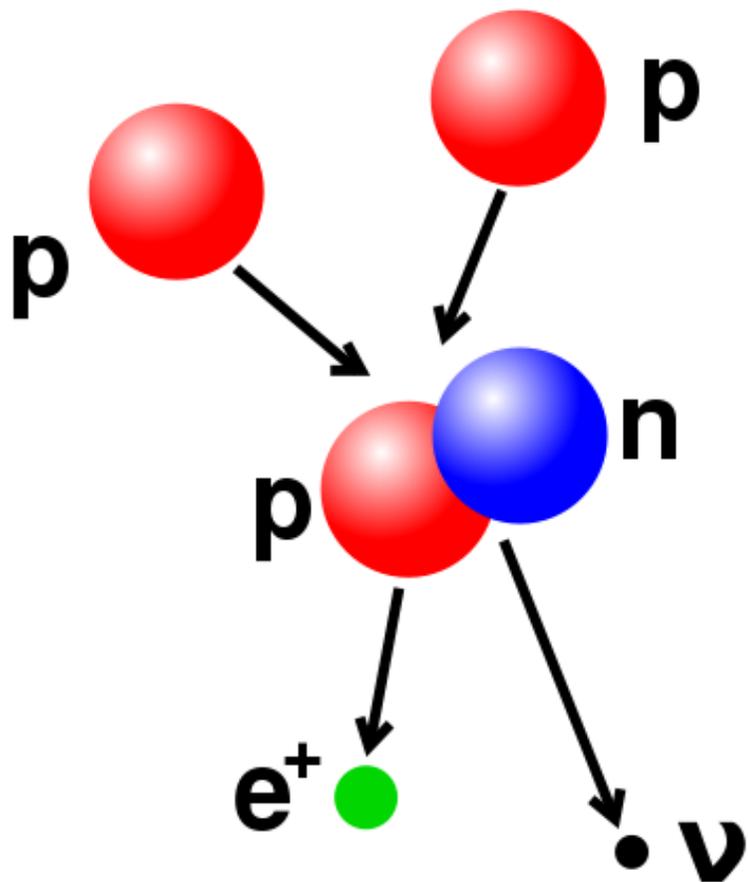
требует более высокой температуры (≈ 10 млн. К). Температура же в центре протозвезды составляет всего 1 млн. К. При такой температуре эффективно протекает реакция слияния ядра дейтерия



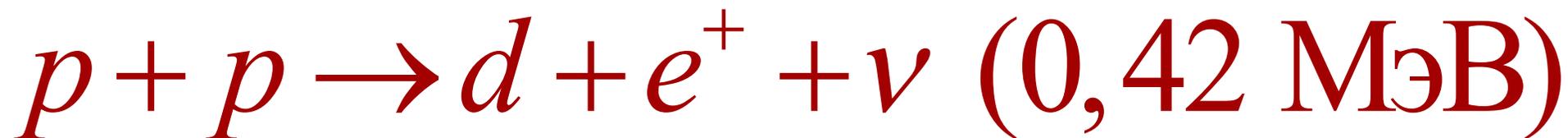
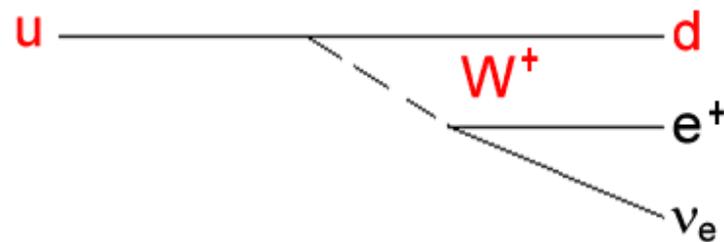
Дейтерий, как и ${}^4\text{He}$, образуется на дозвёздной стадии эволюции Вселенной и его содержание в протозвезде 10^{-4} - 10^{-5} от содержания протонов. Однако этого количества дейтерия достаточно для появления в центре протозвезды эффективного источника энергии.

Горение водорода

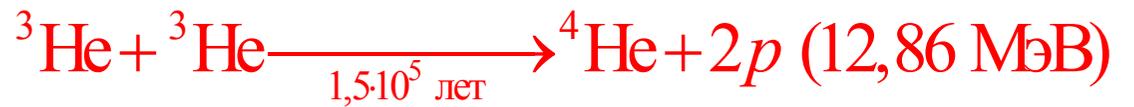
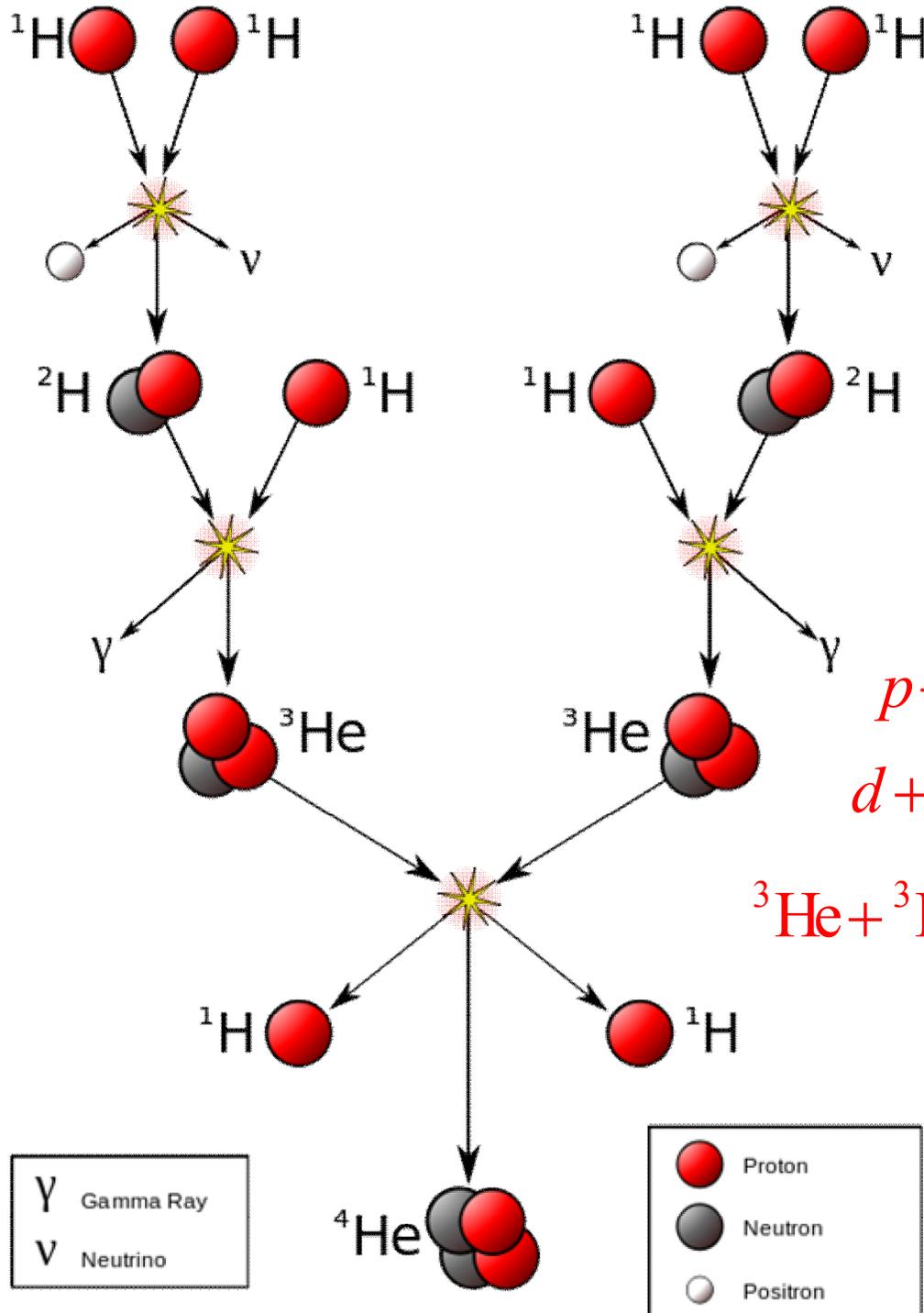
Горение водорода



слабое взаимодействие



Горение водорода



Горение водорода

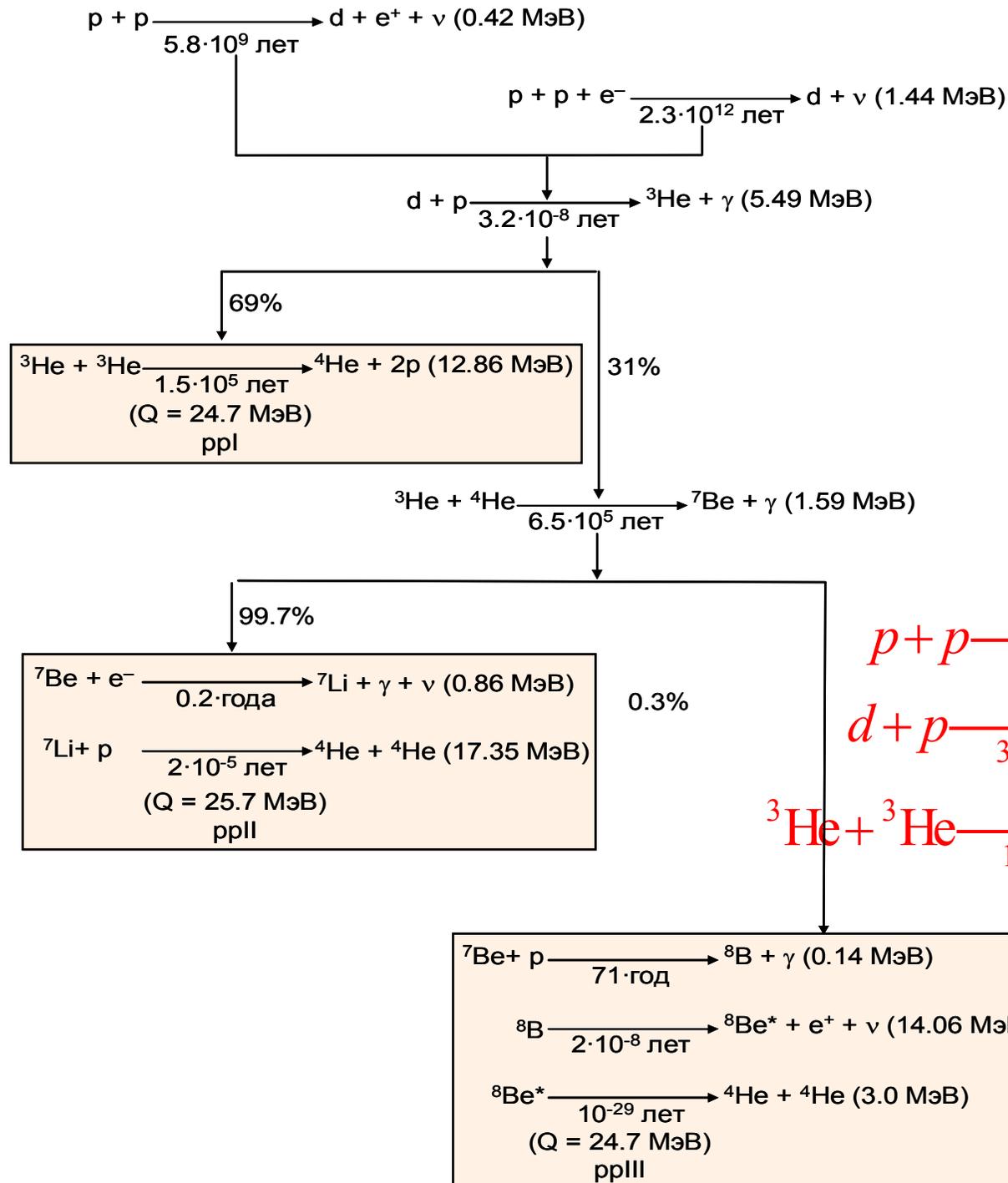


Диаграмма Герцшпрунга-Рассела

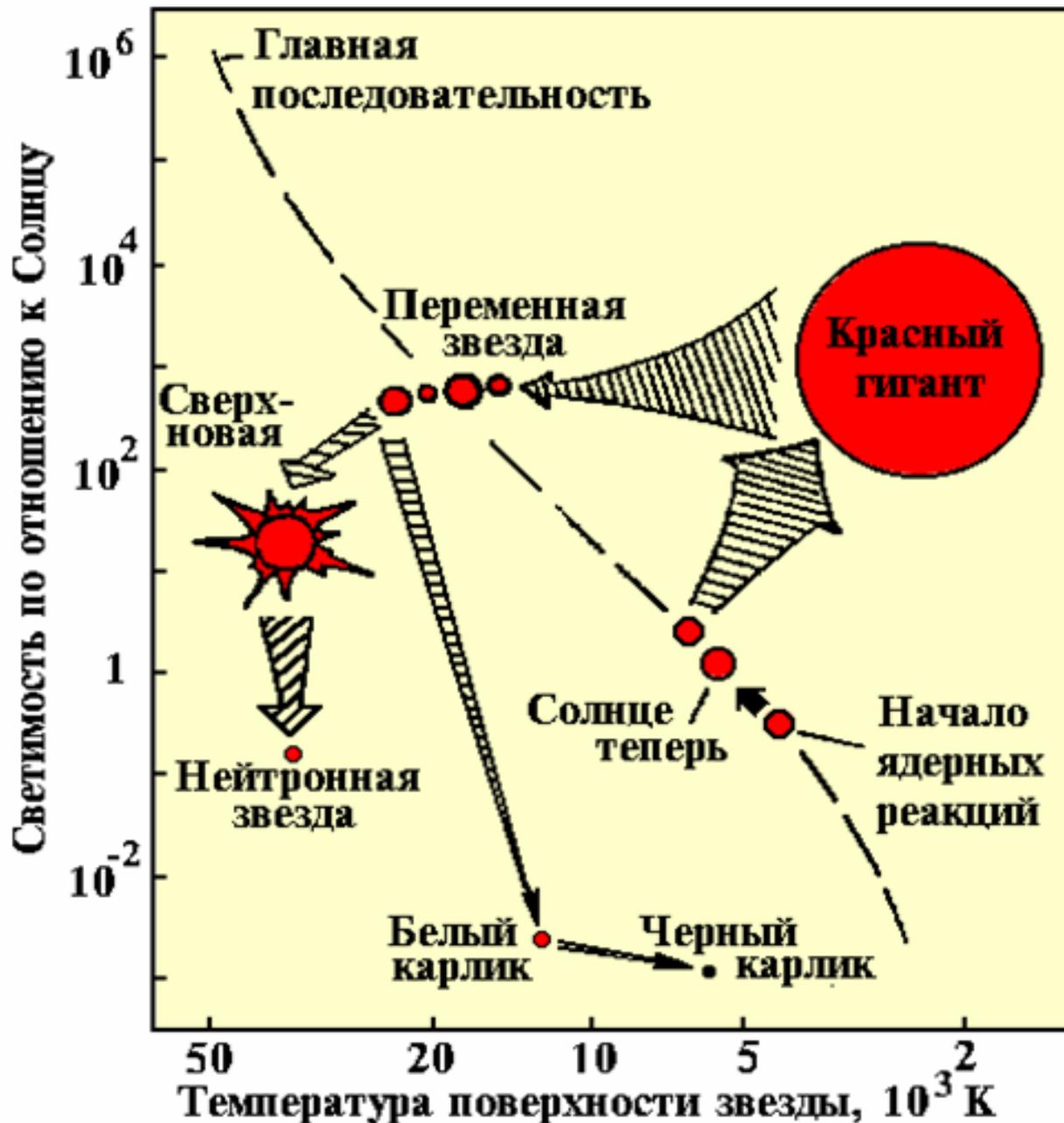


диаграмма
эволюции
звезд

**Горение гелия
и более
тяжелых ядер**

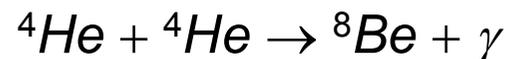
Горение гелия

По мере того, как в центральной части звезды сгорает водород, его запасы там истощаются, и накапливается гелий. В центре звезды формируется гелиевое ядро. После того, как водород в центре звезды выгорит, выделение энергии за счёт термоядерной реакции горения водорода прекращается.

Тепловое давление, препятствующее гравитационному сжатию, ослабевает, и гелиевое ядро начинает сжиматься. Сжимаясь, ядро звезды нагревается, и температура в центре звезды продолжает расти.

Кинетическая энергия сталкивающихся ядер гелия увеличивается и достигает в массивной звезде величины, достаточной для преодоления сил кулоновского отталкивания ядер гелия.

Особенностью горения гелия является то, что реакция

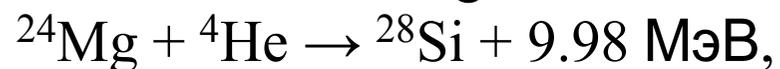
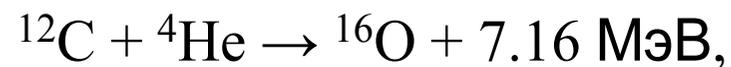
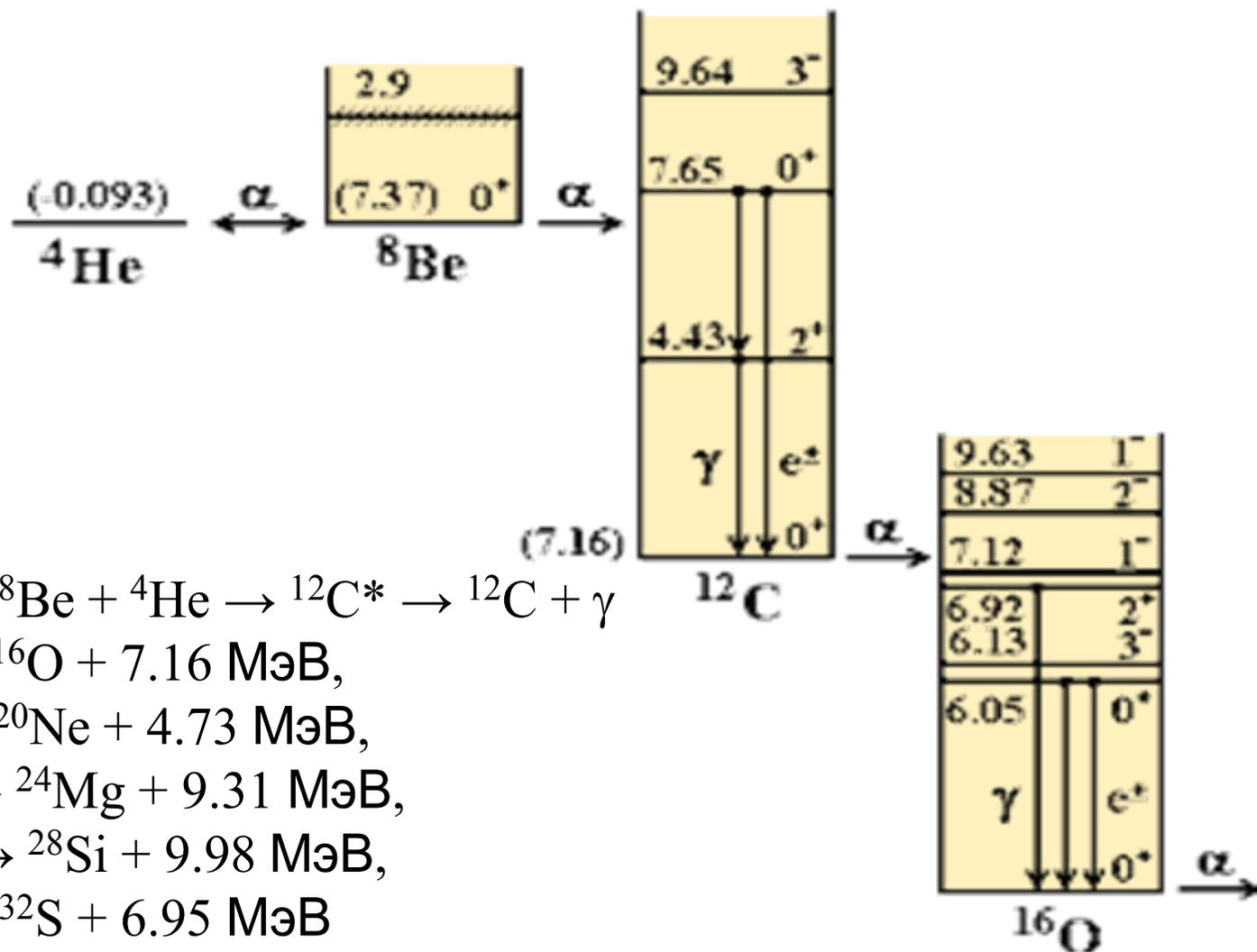
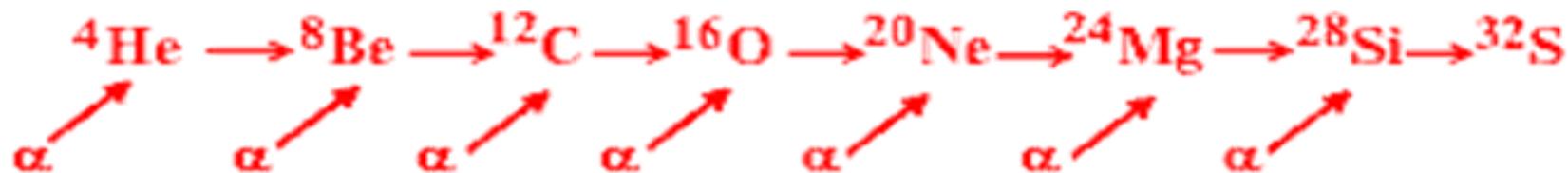


приводит к образованию нестабильного ядра ${}^8\text{Be}$, время жизни которого около 10^{-16} с. Однако из-за высокой плотности ядер ${}^4\text{He}$ оказывается, что прежде, чем ядро ${}^8\text{Be}$ снова распадается на две α -частицы, оно успевает провзаимодействовать ещё с одним ядром ${}^4\text{He}$. В результате образуется стабильное ядро ${}^{12}\text{C}$.

Эволюция звезды массы $5M_{\odot}$



α-процесс в звездах



Горение углерода, кислорода, кремния

$$T = 10^9 - 10^{10} \text{ К}$$

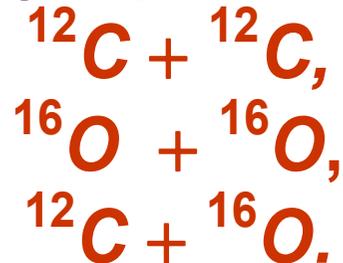
$$\rho = 10^5 - 10^7 \text{ г/см}^3$$



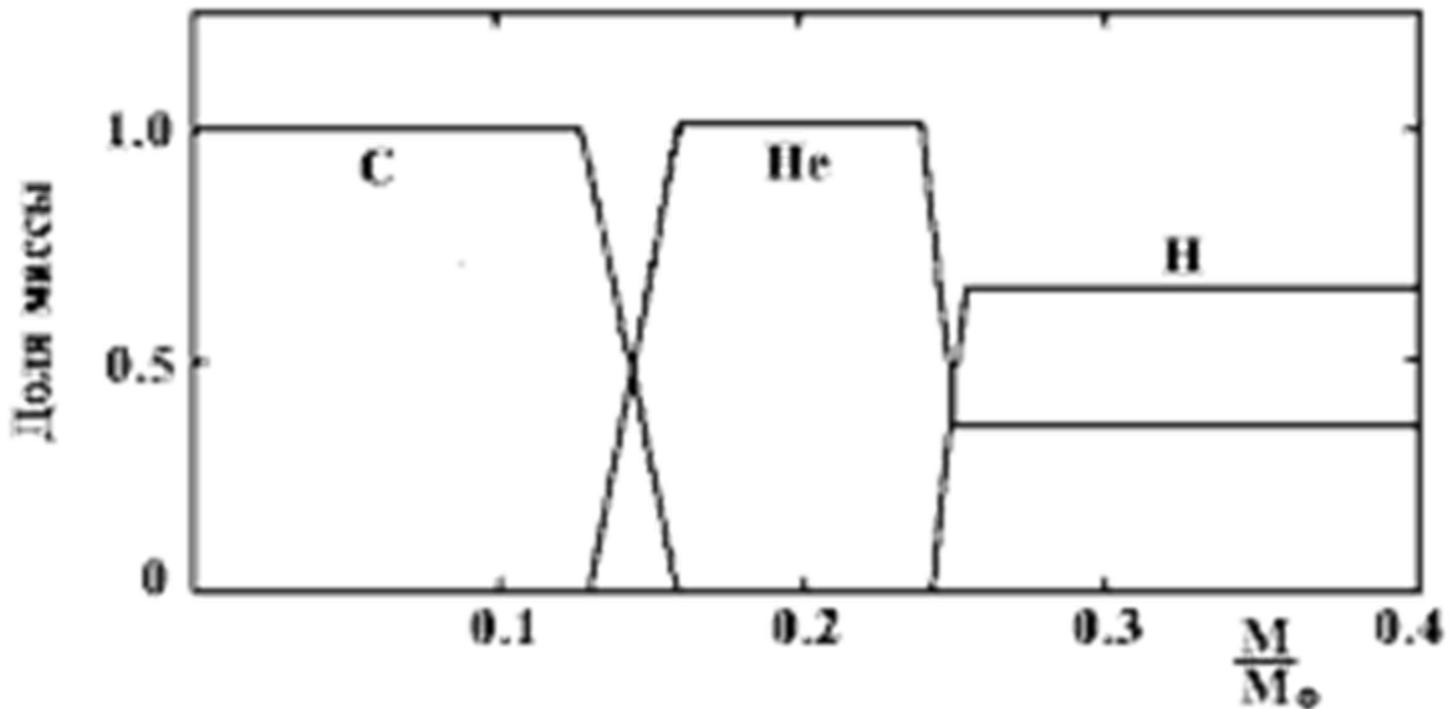
Если звезда массивная ($> 10M_{\odot}$), то в результате термоядерного горения в ней последовательно образуются всё более тяжелые ядра в результате последовательного захвата ядер гелия с образованием α -кратных ядер



и реакции слияния углерода и кислорода

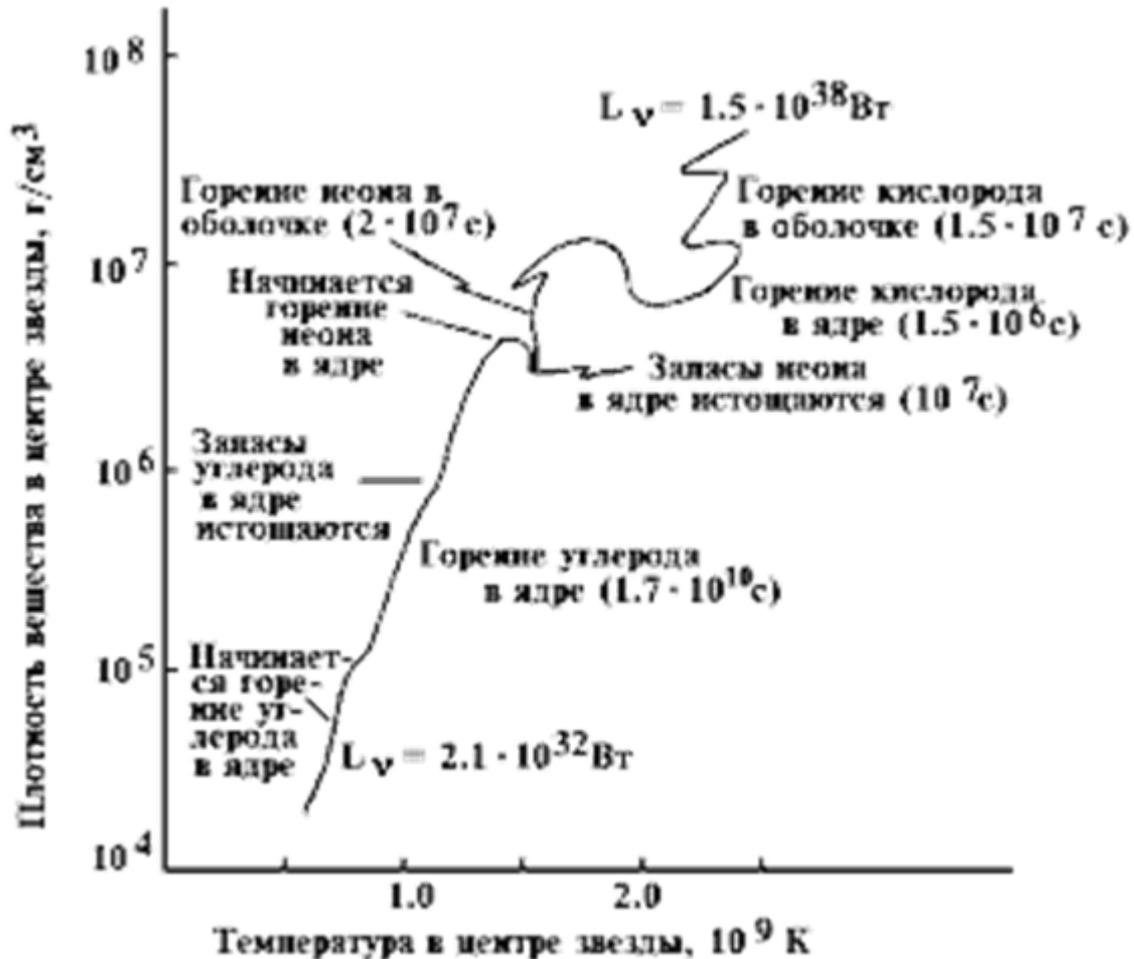


Химический состав звезды массы $5M_{\odot}$ в начале горения углерода



Приведено количество С, He и H в долях общей массы во внутренних областях звезды

Зависимость плотности в центре звезды массы $25M_{\odot}$ от температуры в процессе её эволюции

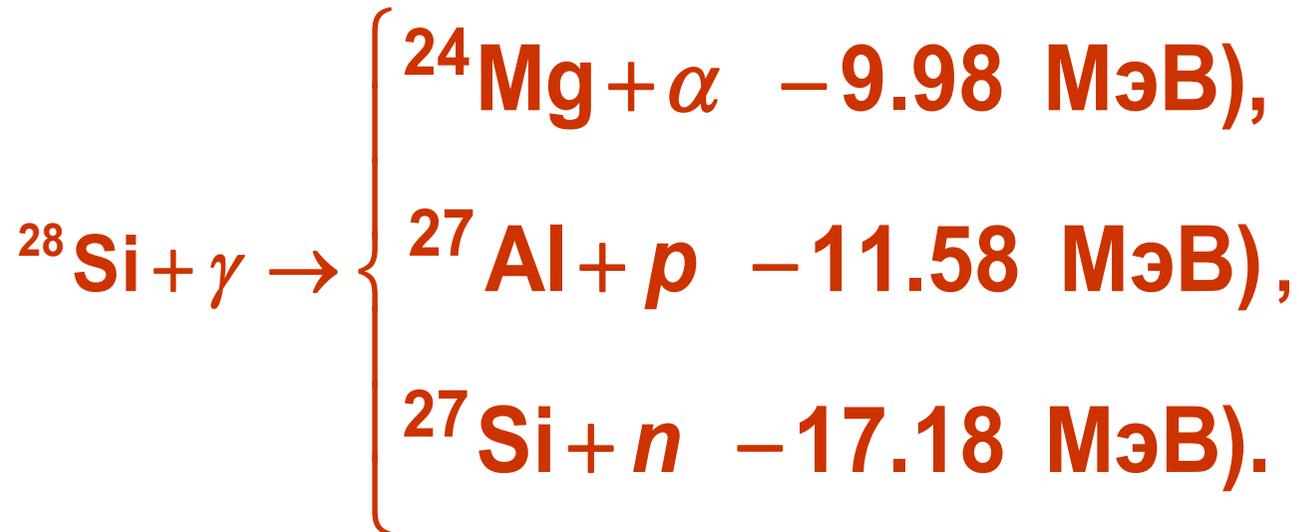


Указаны времена выгорания различных элементов и нейтринная светимость L_{ν} звезды

Фотоядерные реакции в звездах

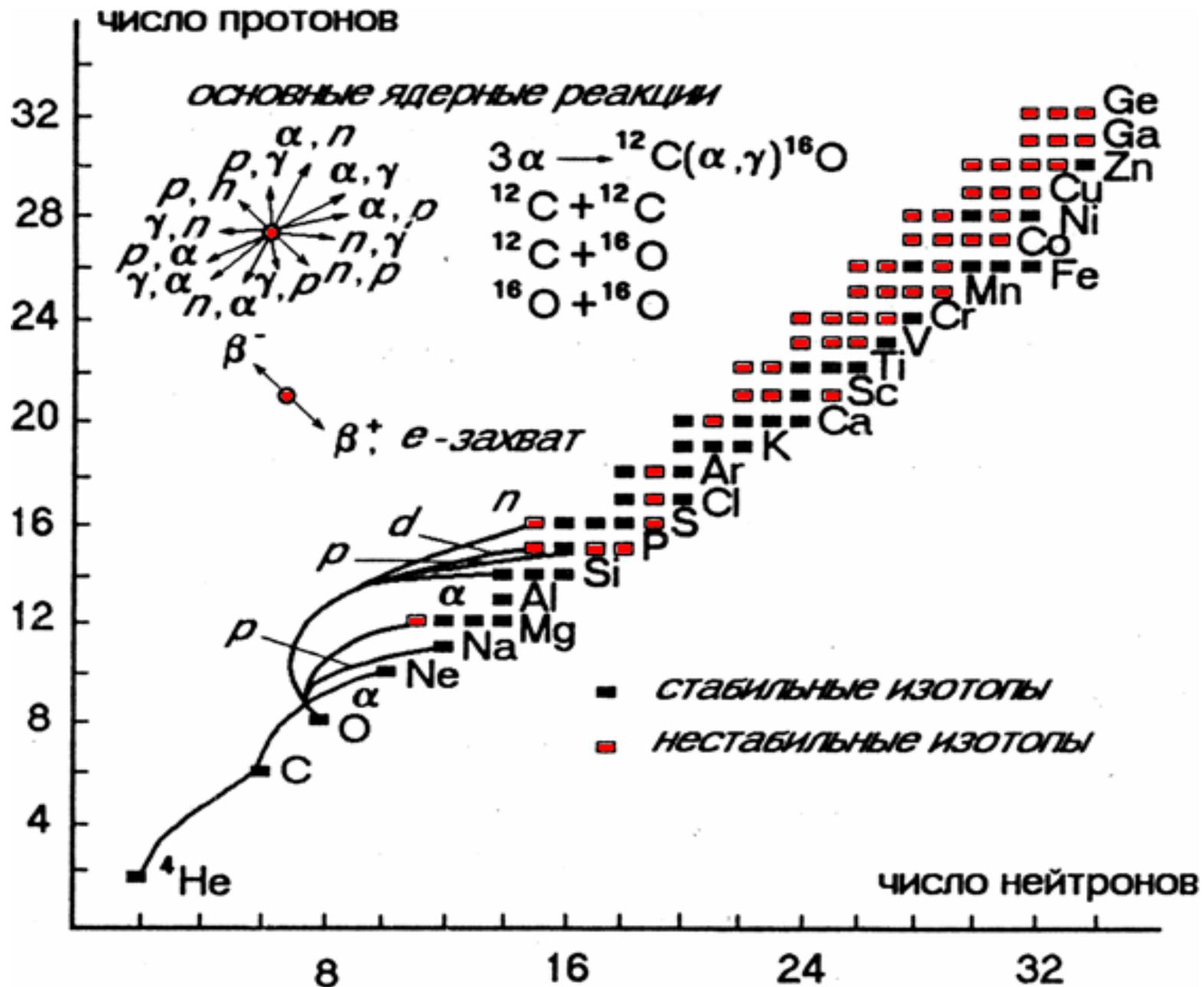
$T \sim 10^9$ К. Существенную роль начинают играть электромагнитные процессы – реакции под действием γ -квантов и электронов. Наряду с ростом энергии фотонов с увеличением температуры ($E_\gamma \sim T$) растёт их число ($N_\gamma \sim T^4$).

Реакции фоторасщепления кремния:

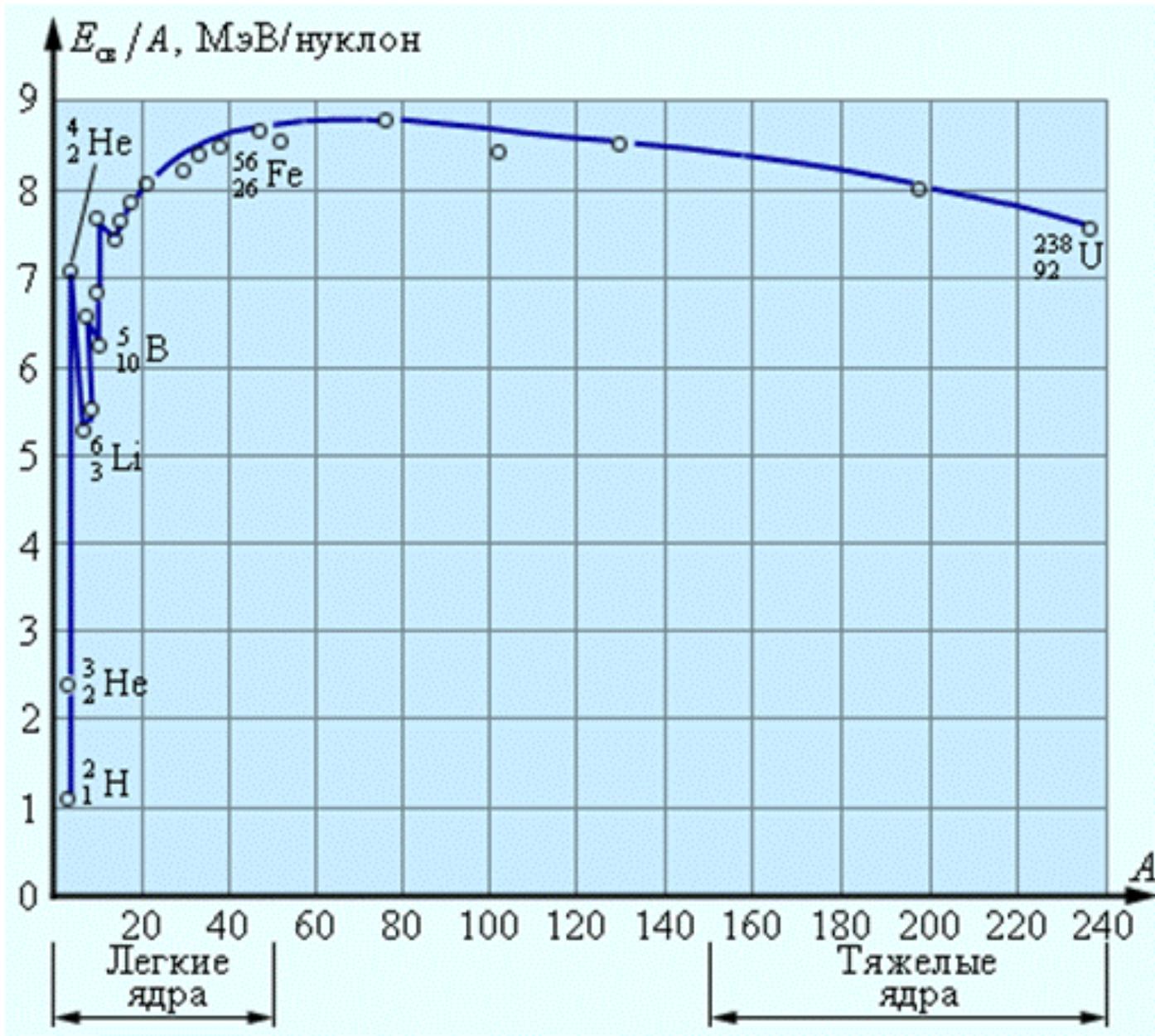


В результате появляется большое количество n , p и α -частиц и их роль в горении кремния увеличивается. ${}^{28}\text{Si}$ и образующиеся продукты с большим Z , облучаясь в потоках n , p , α и γ , в термодинамическом равновесии формируют большинство элементов в районе железного максимума.

Синтез элементов He.....Ge

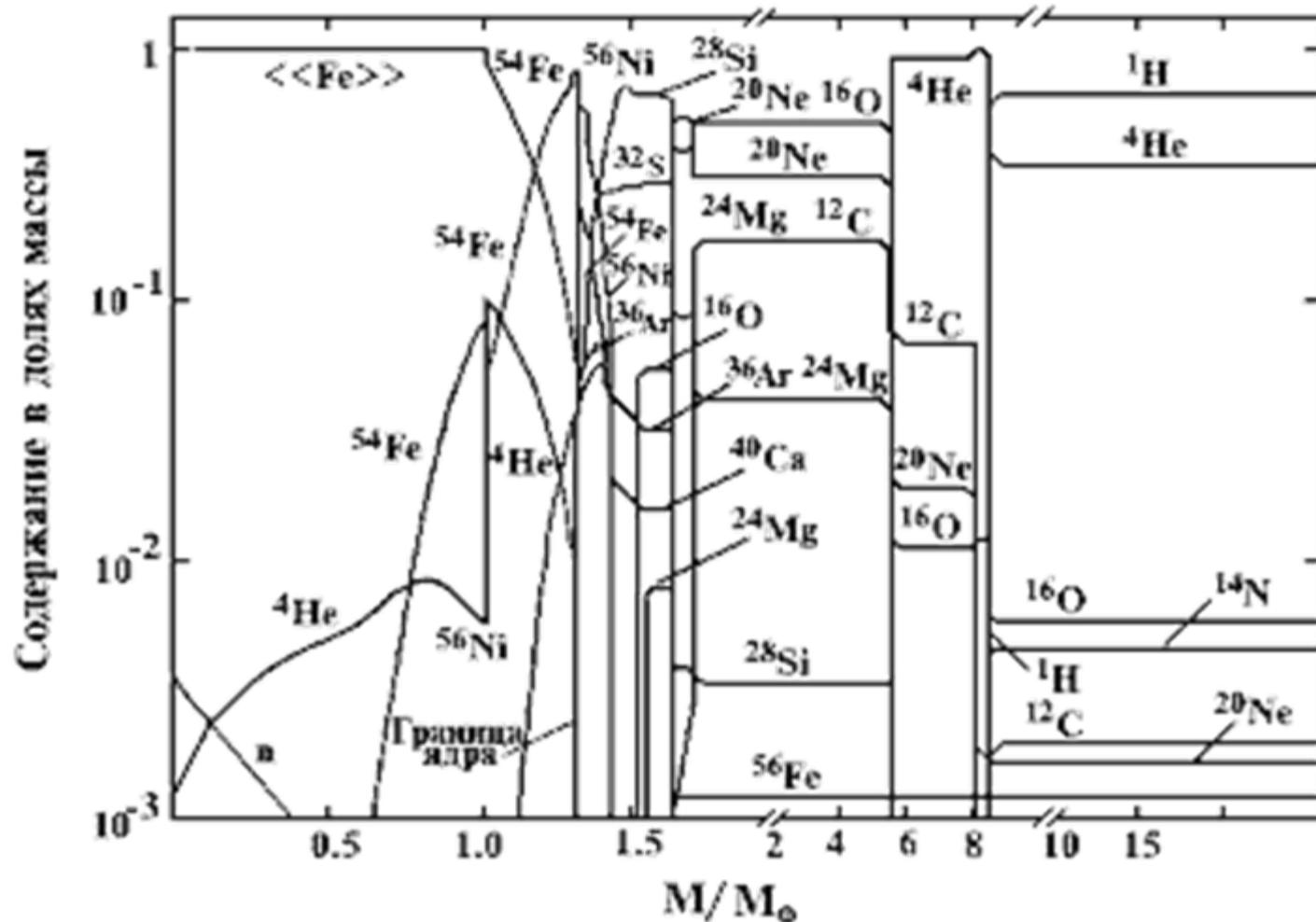


Предел термоядерного синтеза



удельная
энергия
связи
атомных
ядер

Содержание элементов в звезде массы $25M_{\odot}$ в зависимости от массы внутренней области



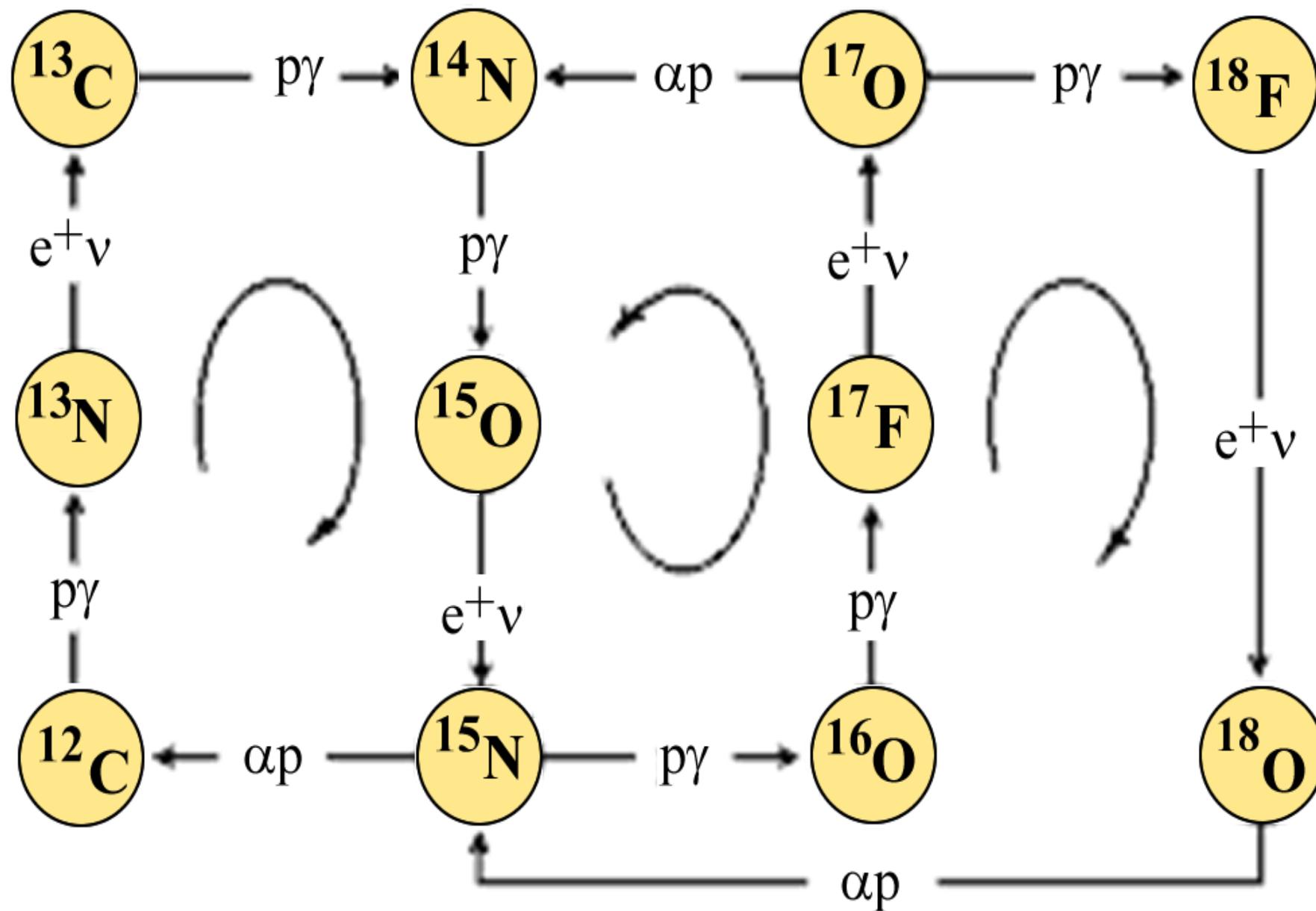
Звезды второго поколения

**CNO-цикл
и солнечные нейтрино**

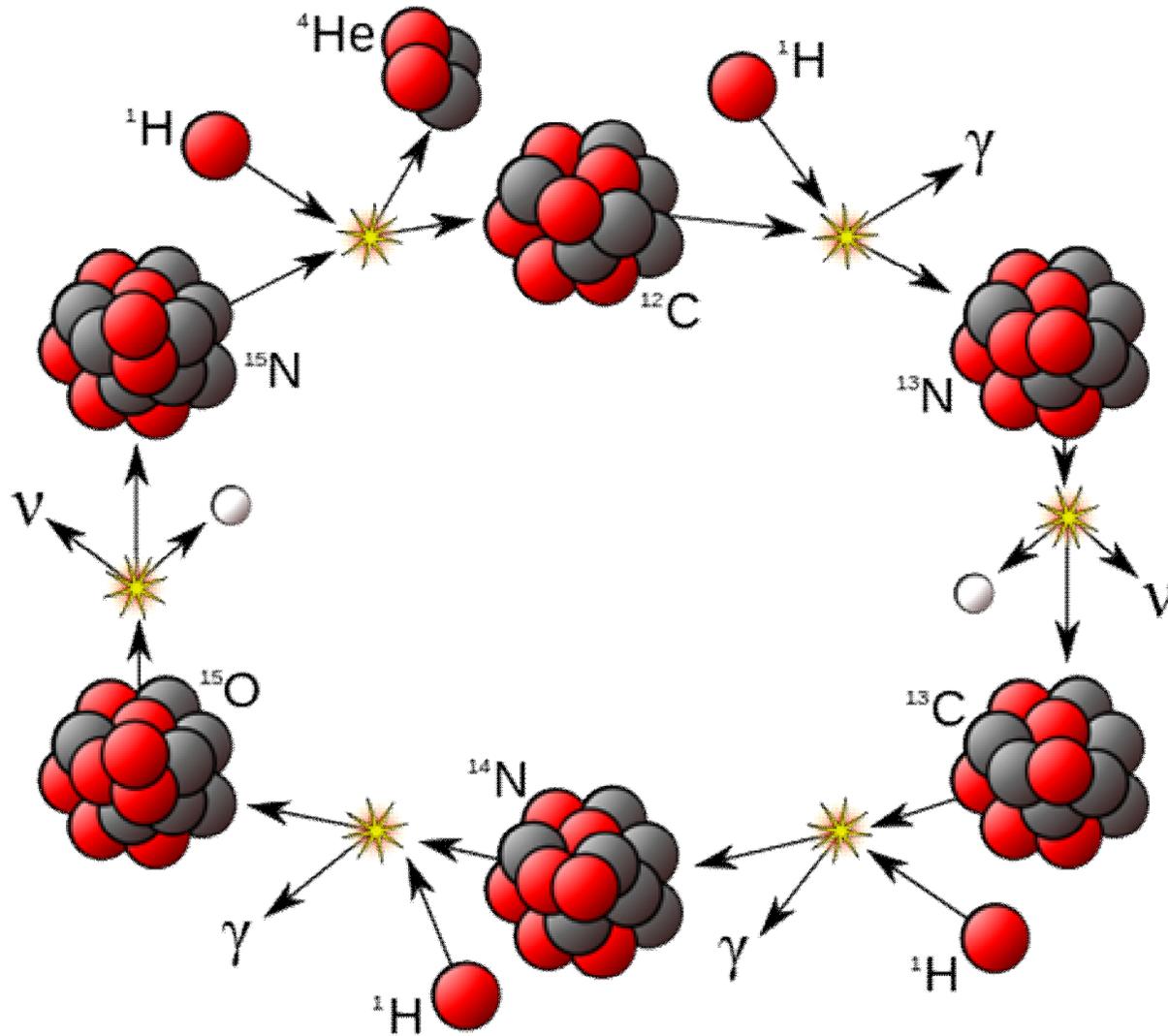
Основные характеристики Солнца

Масса M_{\odot}	$2 \cdot 10^{33}$ г
Радиус R_{\odot}	$7 \cdot 10^{10}$ см
Светимость L_{\odot}	$3.83 \cdot 10^{33}$ эрг/с ($2.4 \cdot 10^{39}$ МэВ/с)
Поток излучения с единицы поверхности	$6.3 \cdot 10^7$ Вт/м ²
Средняя плотность вещества	1.4 г/см ³
Плотность в центре	~ 100 г/см ³
Температура поверхности	$6 \cdot 10^3$ К
Температура в центре	$1.5 \cdot 10^7$ К
Химический состав:	
водород	74%
гелий	23%
углерод, азот, кислород, неон и др.	3%
Возраст	$5 \cdot 10^9$ лет
Ускорение свободного падения на поверхности	$2.7 \cdot 10^4$ см/с ²
Шварцшильдовский радиус - $2GM_{\odot}/c^2$ (c - скорость света)	2.95 км
Период вращения относительно неподвижных звезд	25.4 суток
Расстояние до центра Галактики	$2.6 \cdot 10^{17}$ км
Скорость вращения вокруг центра Галактики	220 км/с

CNO - цикл



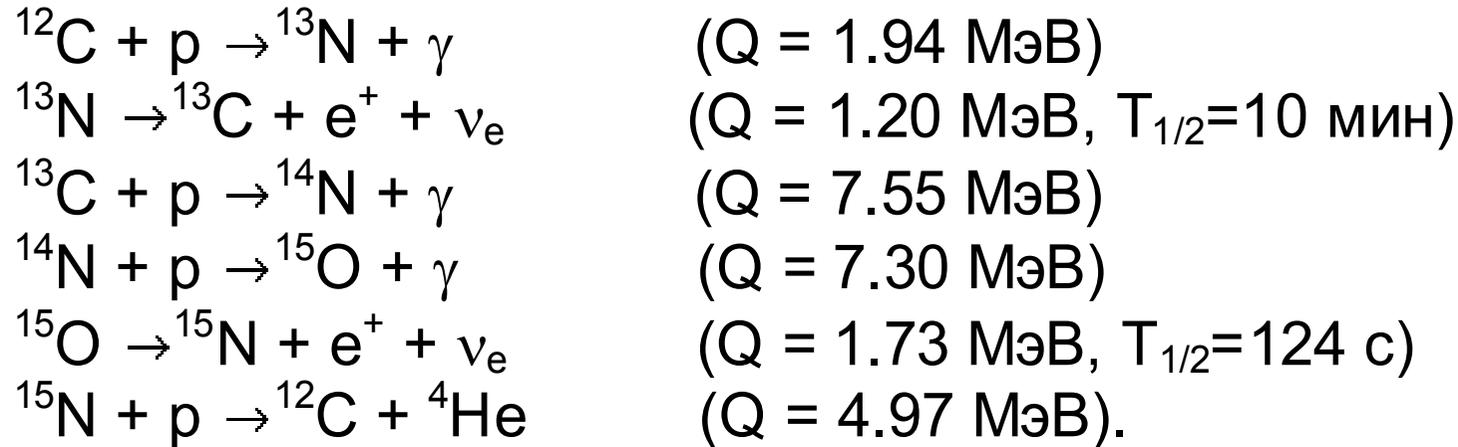
CNO - ЦИКЛ



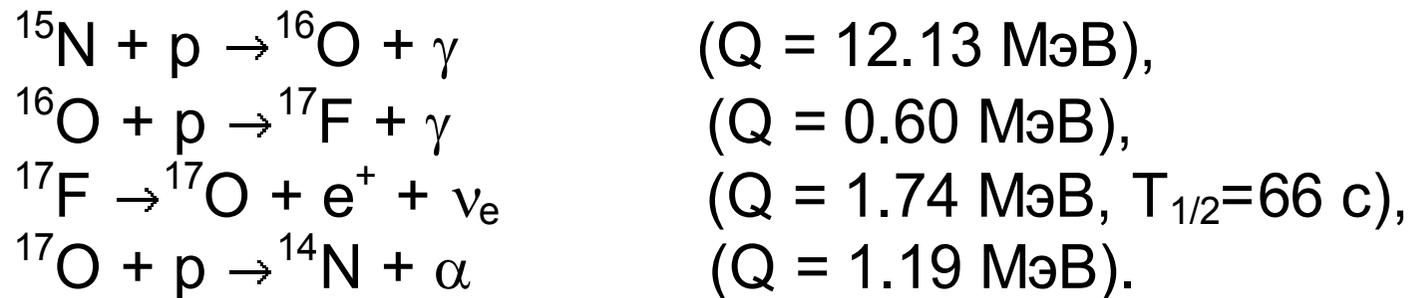
	Proton	γ	Gamma Ray
	Neutron	ν	Neutrino
	Positron		

CNO - цикл

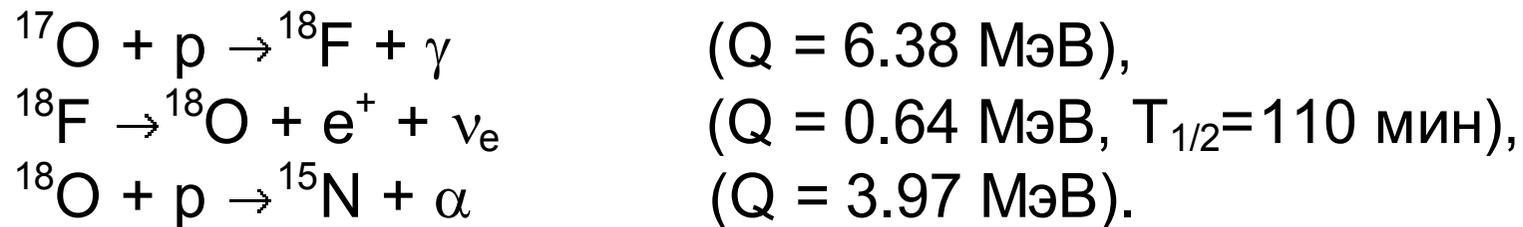
Цепочка реакций I



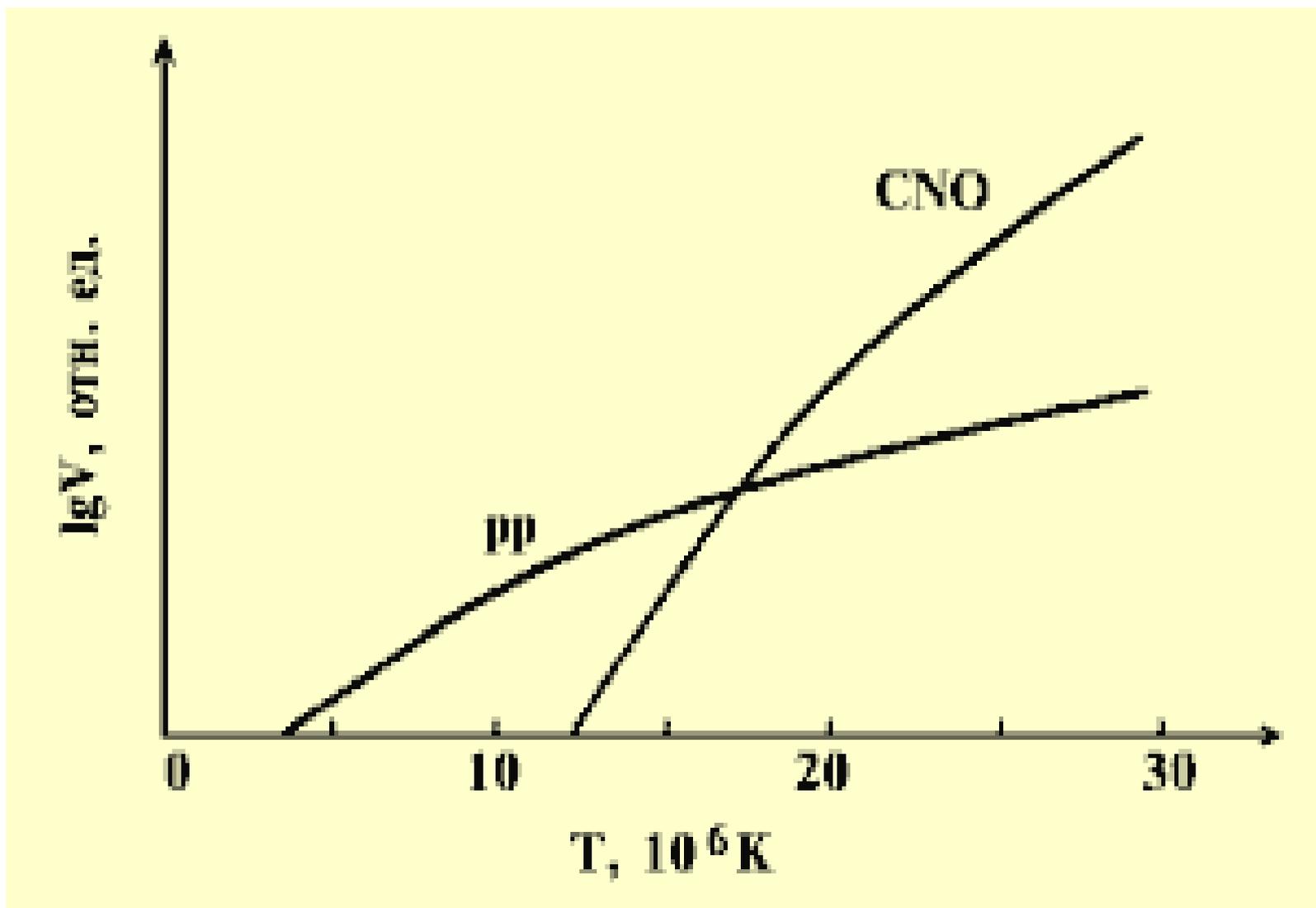
Цепочка реакций II



Цепочка реакций III



PP и CNO-циклы



Температура в недрах Солнца $\sim 13 \cdot 10^6$ К, поэтому оно светит в основном за счет энергии, выделяющейся в водородном цикле.

Источники солнечных нейтрино

Водородный цикл

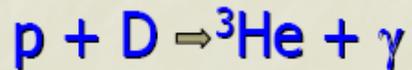


E_ν (МэВ) Поток ($\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$)

0 – 0.42 $6 \cdot 10^{10}$



1.44 $1.4 \cdot 10^8$

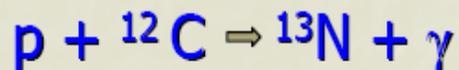


0 – 15 $5.8 \cdot 10^6$



0.83 $4.7 \cdot 10^9$

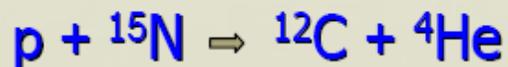
CNO цикл



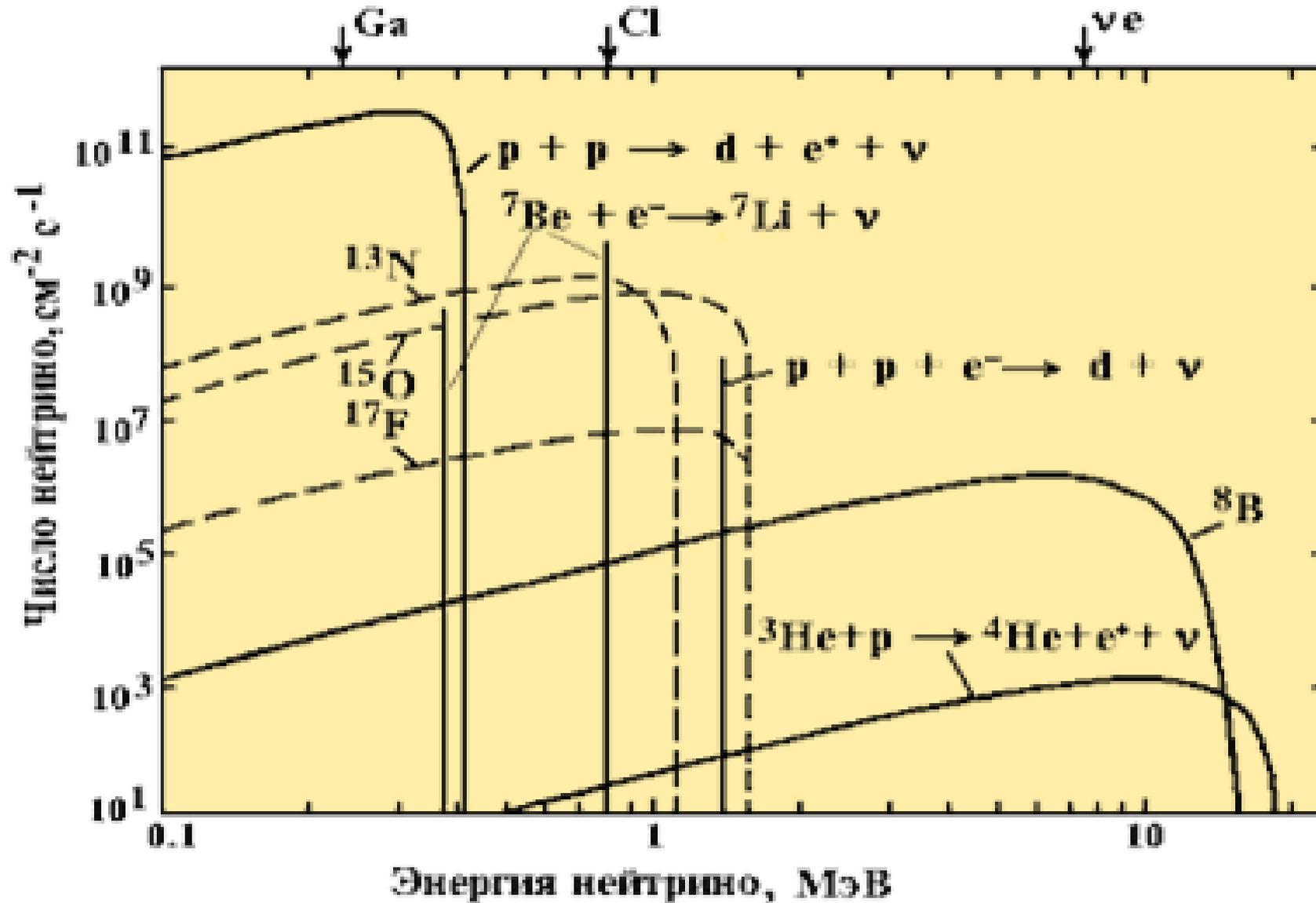
0 – 1.199 $6 \cdot 10^8$



0 – 1.732 $5 \cdot 10^8$

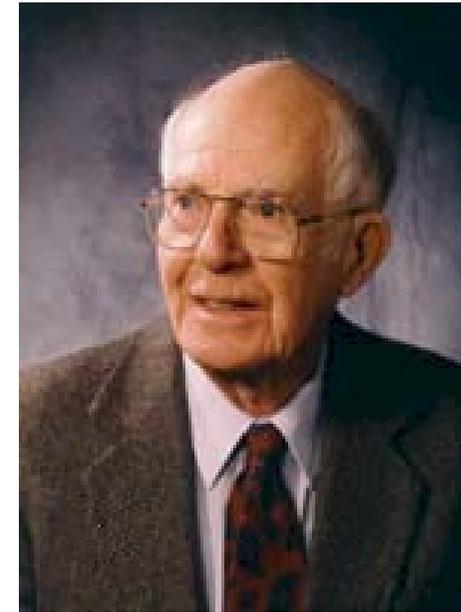


Солнечные нейтрино

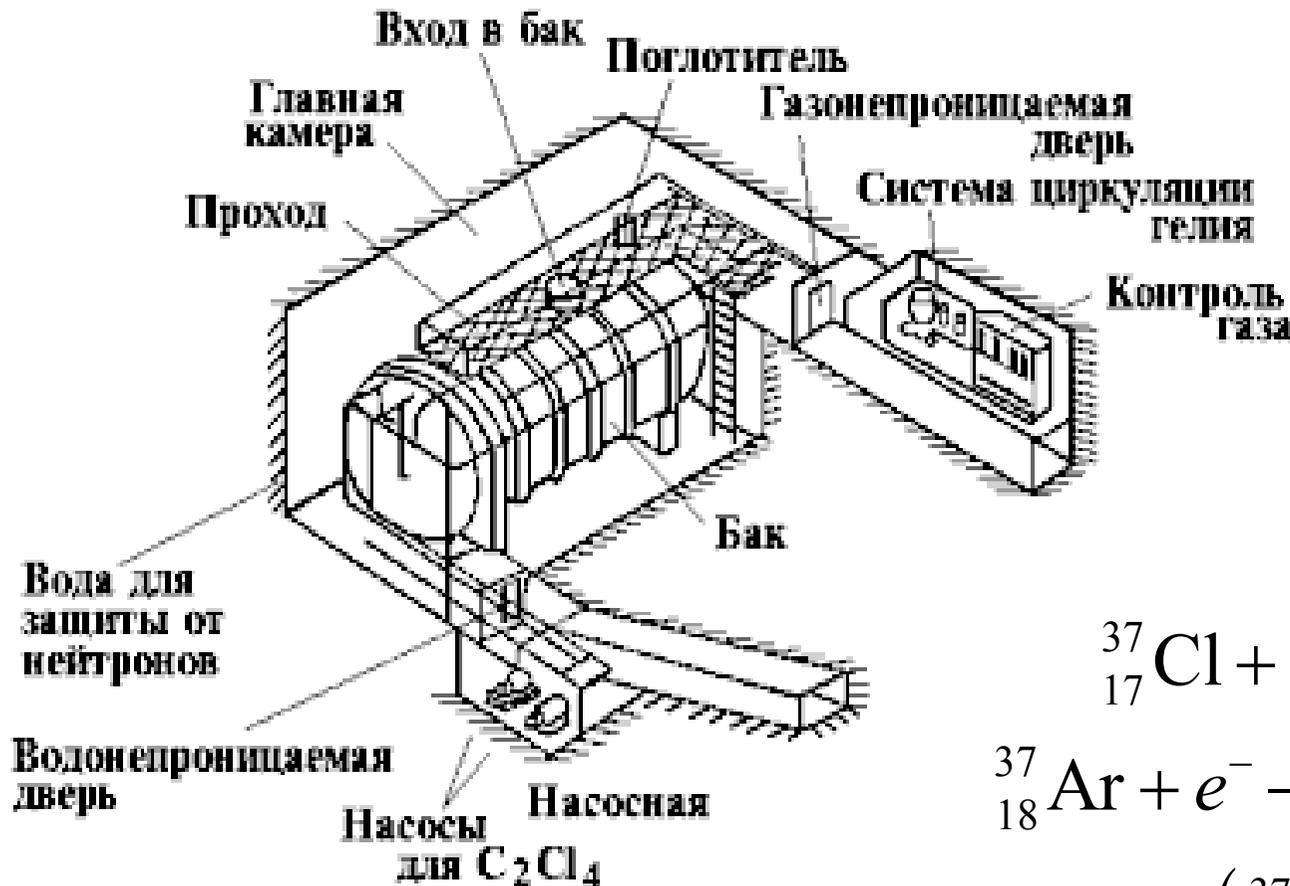


Спектр нейтрино, образующихся на Солнце в результате горения водорода в реакции $4p \rightarrow \alpha$ и в CNO-цикле.

Детектор Дэвиса



Р. Дэвис
1914-2006



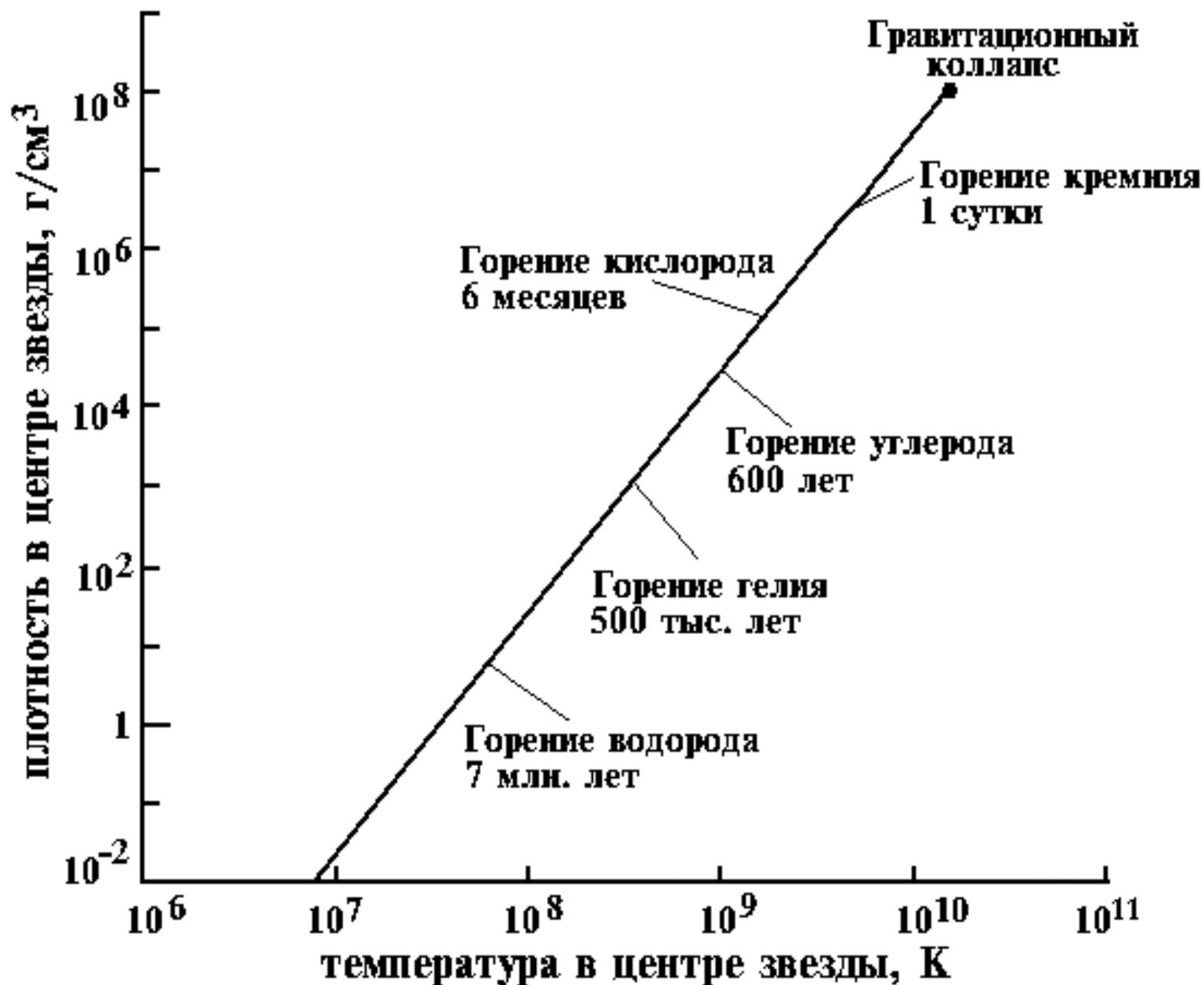
$$T_{1/2} \left({}_{18}^{37}\text{Ar} \right) = 35 \text{ дней}$$

Для регистрации солнечных нейтрино Дэвисом был сконструирован детектор, содержащий 615 тонн тетрахлорэтилена.

Ядерные реакции синтеза в звёздах различной массы

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

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



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

