

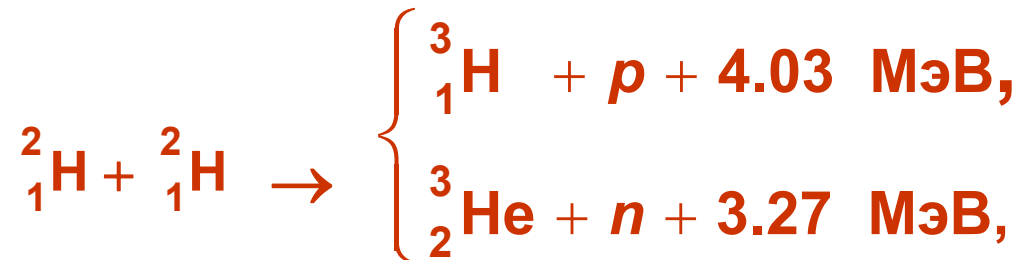
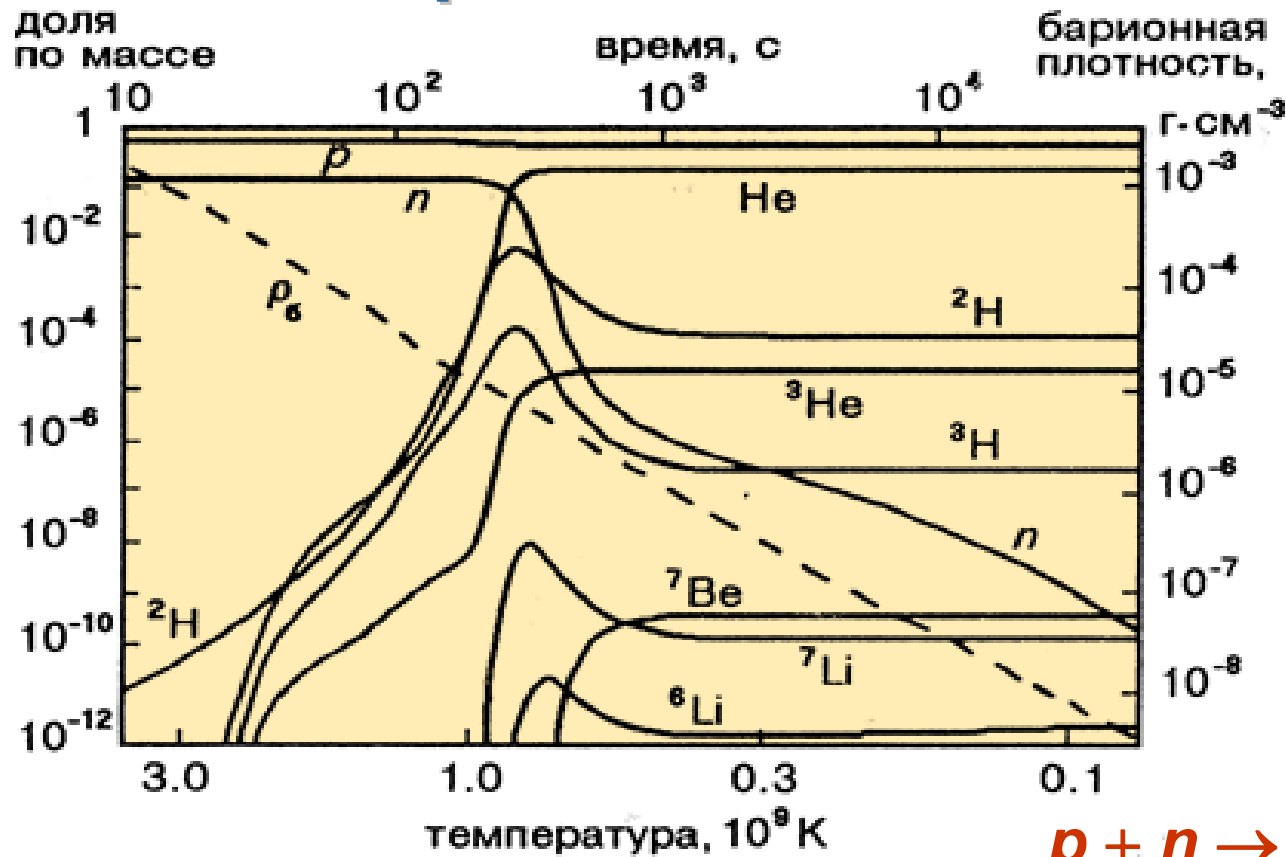
Рождение и жизнь атомных ядер

ЗВЕЗДНЫЙ НУКЛЕОСИНТЕЗ

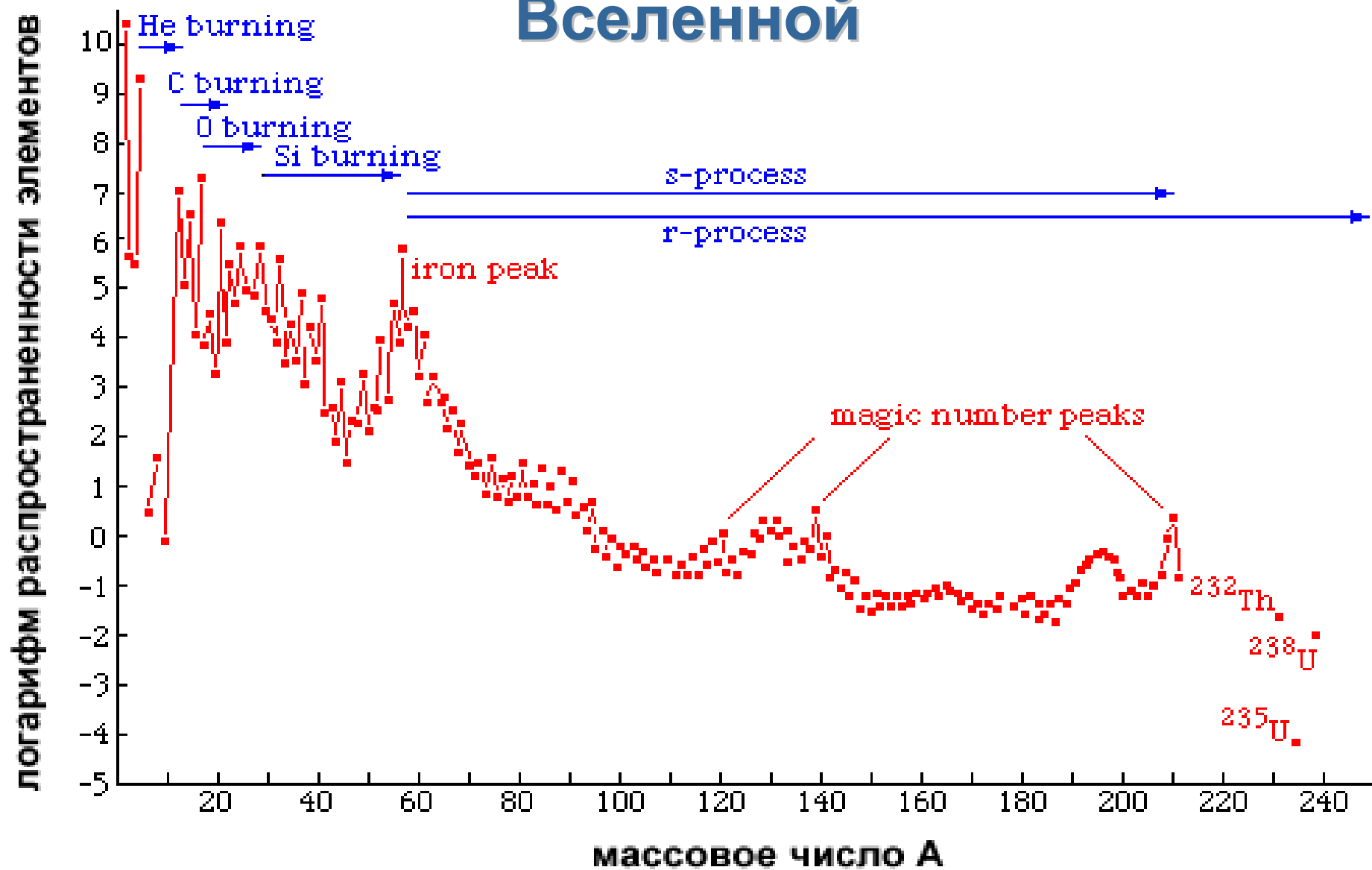
Характеристики Вселенной

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 = $4.6 \cdot 10^{-34}$ 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%

Образование легчайших ядер



Распространенность нуклидов во Вселенной



Распространенность Si принята равной 10^6 .

Звезды

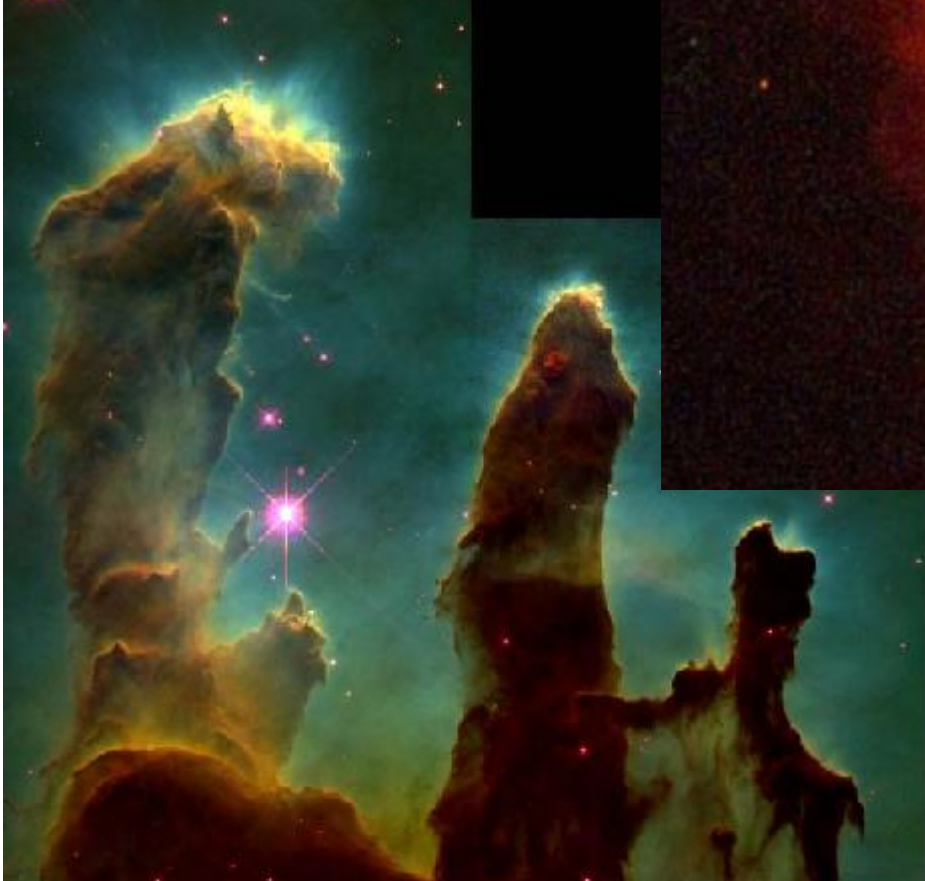
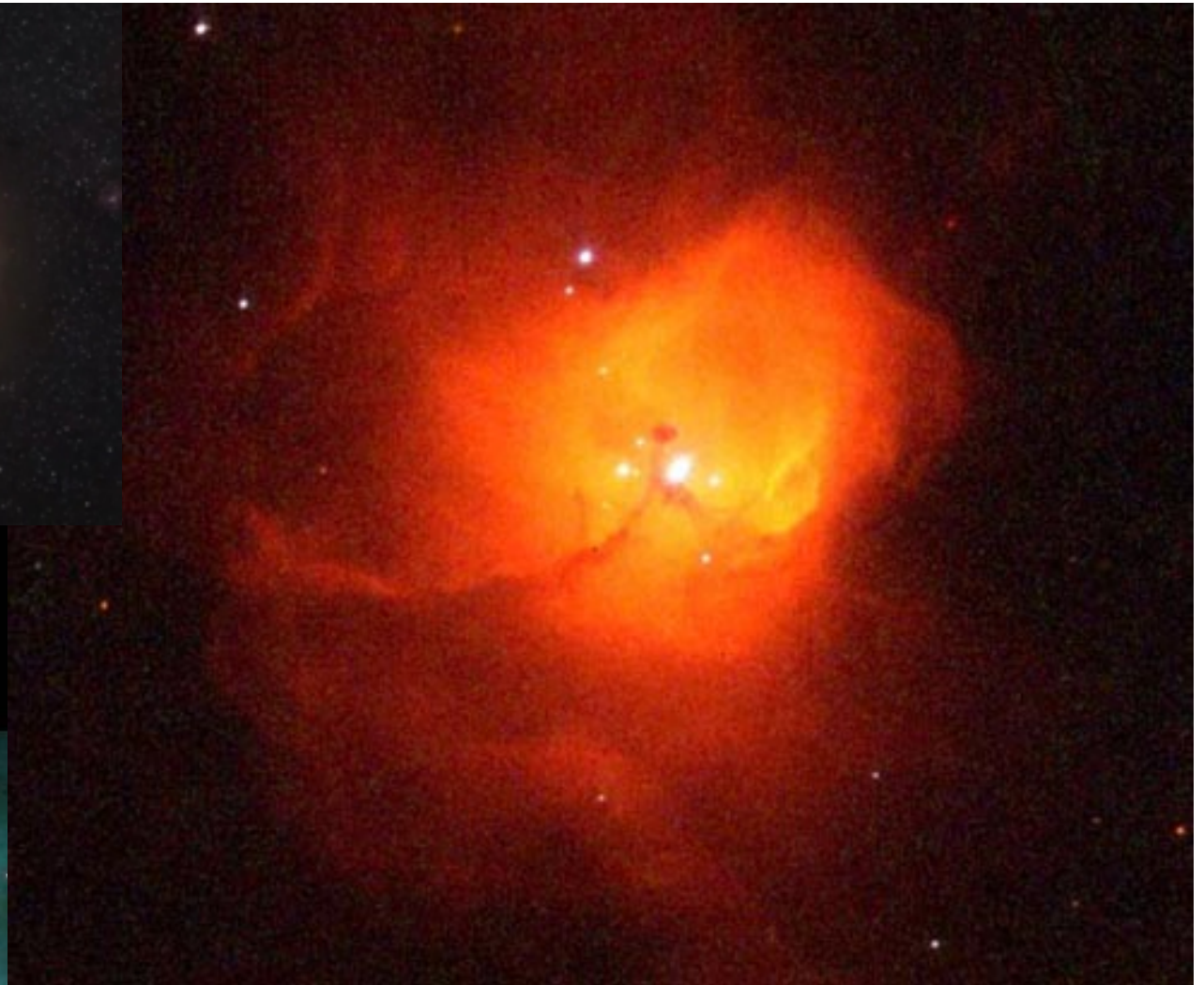
Пределы изменения характеристик различных звезд

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

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

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

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



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



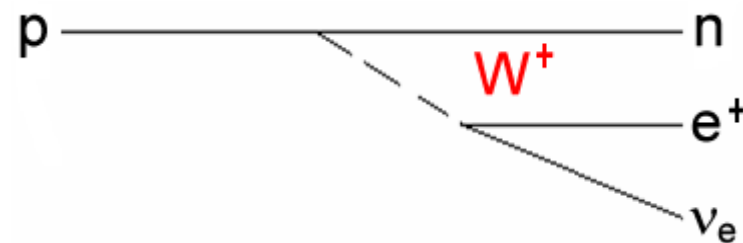
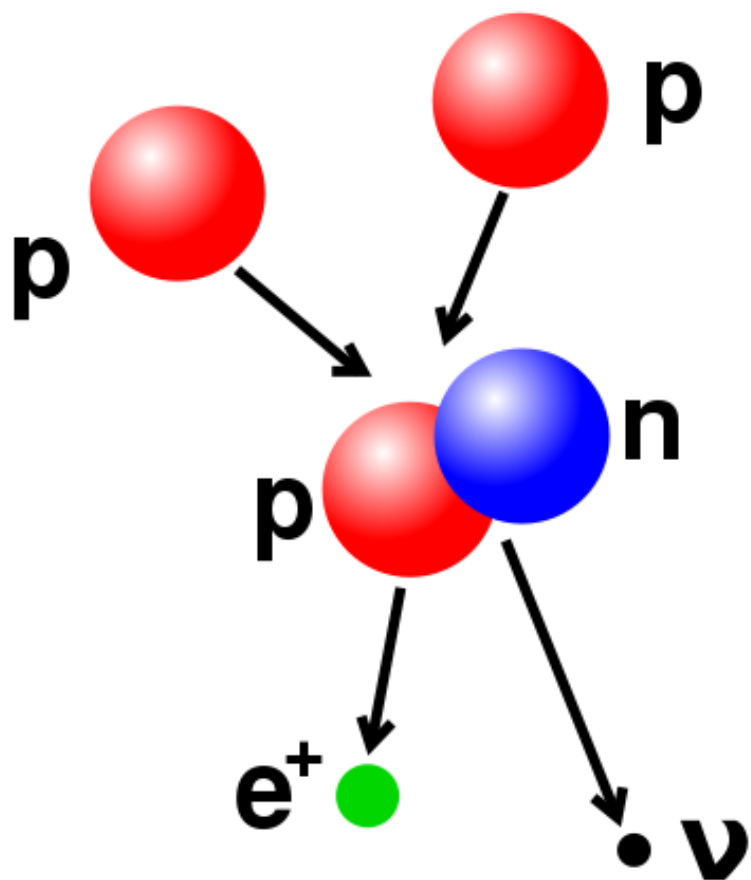
требует более высокой температуры (≈ 10 млн. К). Температура же в центре протозвезды составляет всего 1 млн. К. При такой температуре эффективно протекает реакция слияния ядра дейтерия



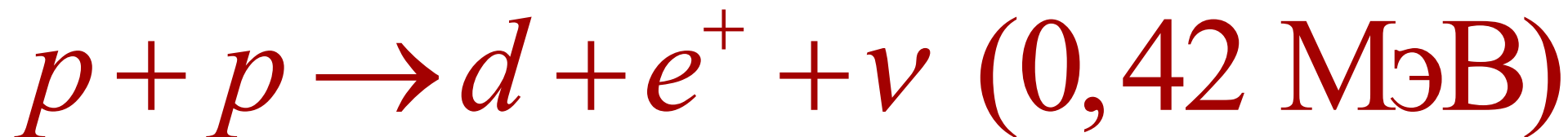
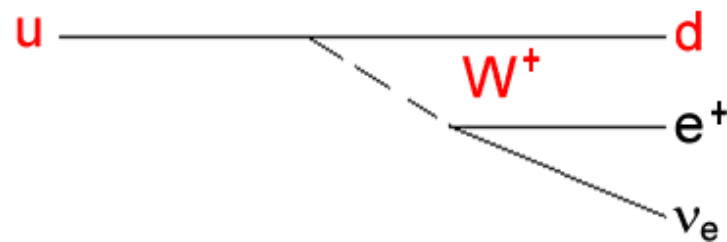
Дейтерий, как и ${}^4\text{He}$, образуется на дозвёздной стадии эволюции Вселенной и его содержание в протозвезде 10^{-4} - 10^{-5} от содержания протонов. Однако этого количества дейтерия достаточно для появления в центре протозвезды эффективного источника энергии.

Горение водорода

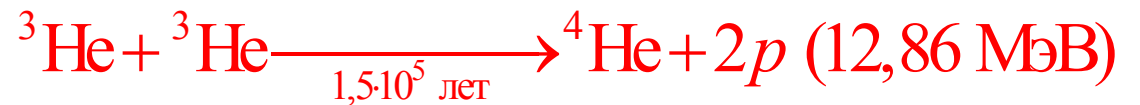
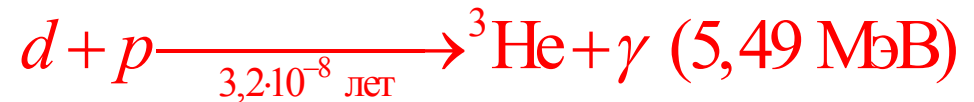
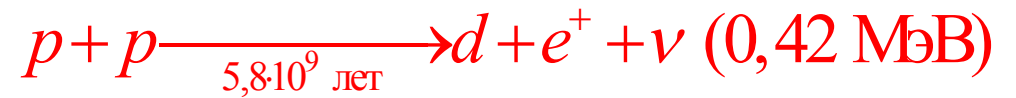
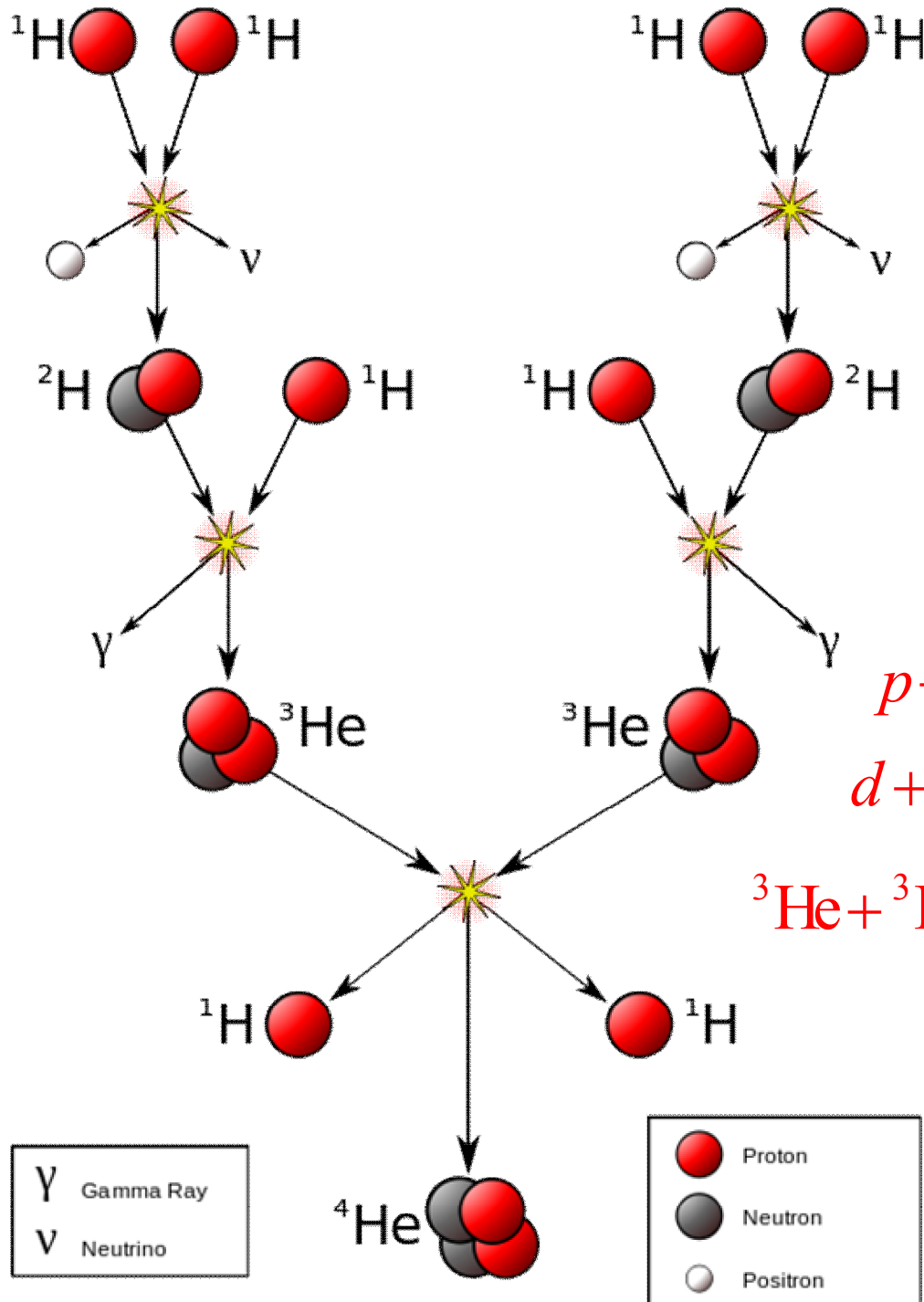
Горение водорода






слабое взаимодействие



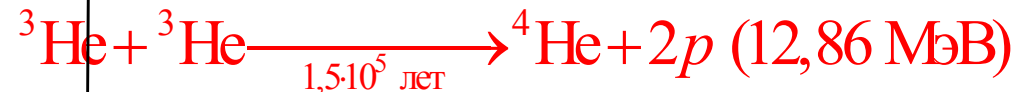
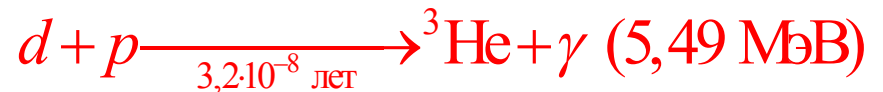
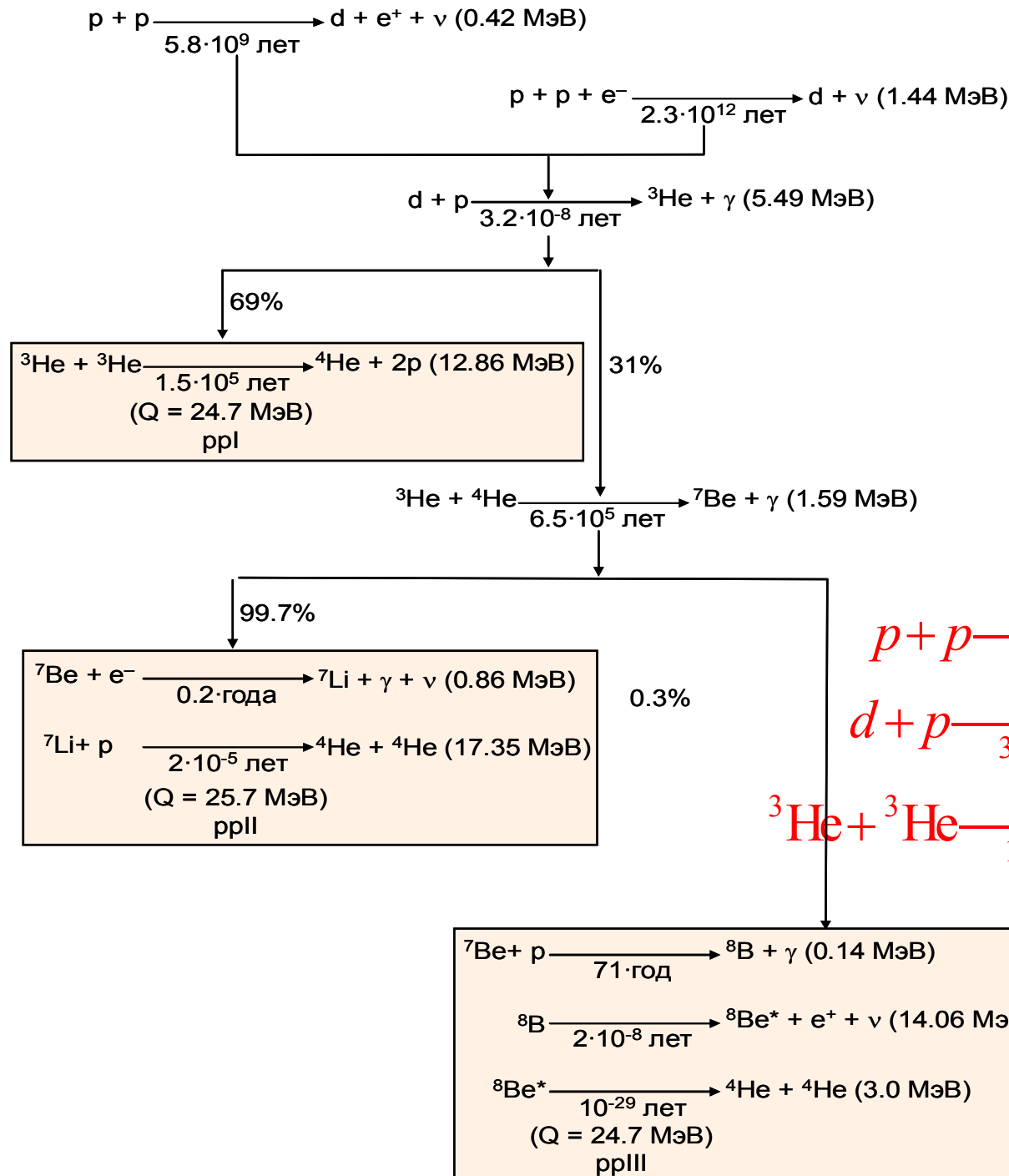
Горение водорода



γ Gamma Ray
 ν Neutrino

 Proton
 Neutron
 Positron

Горение водорода



Горение гелия и более тяжелых ядер

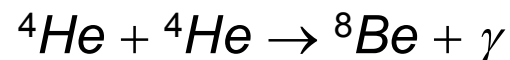
Горение гелия

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.

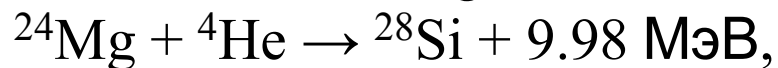
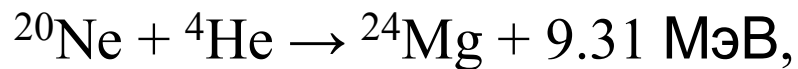
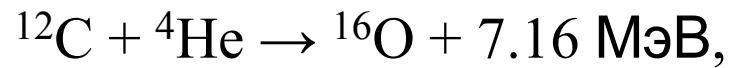
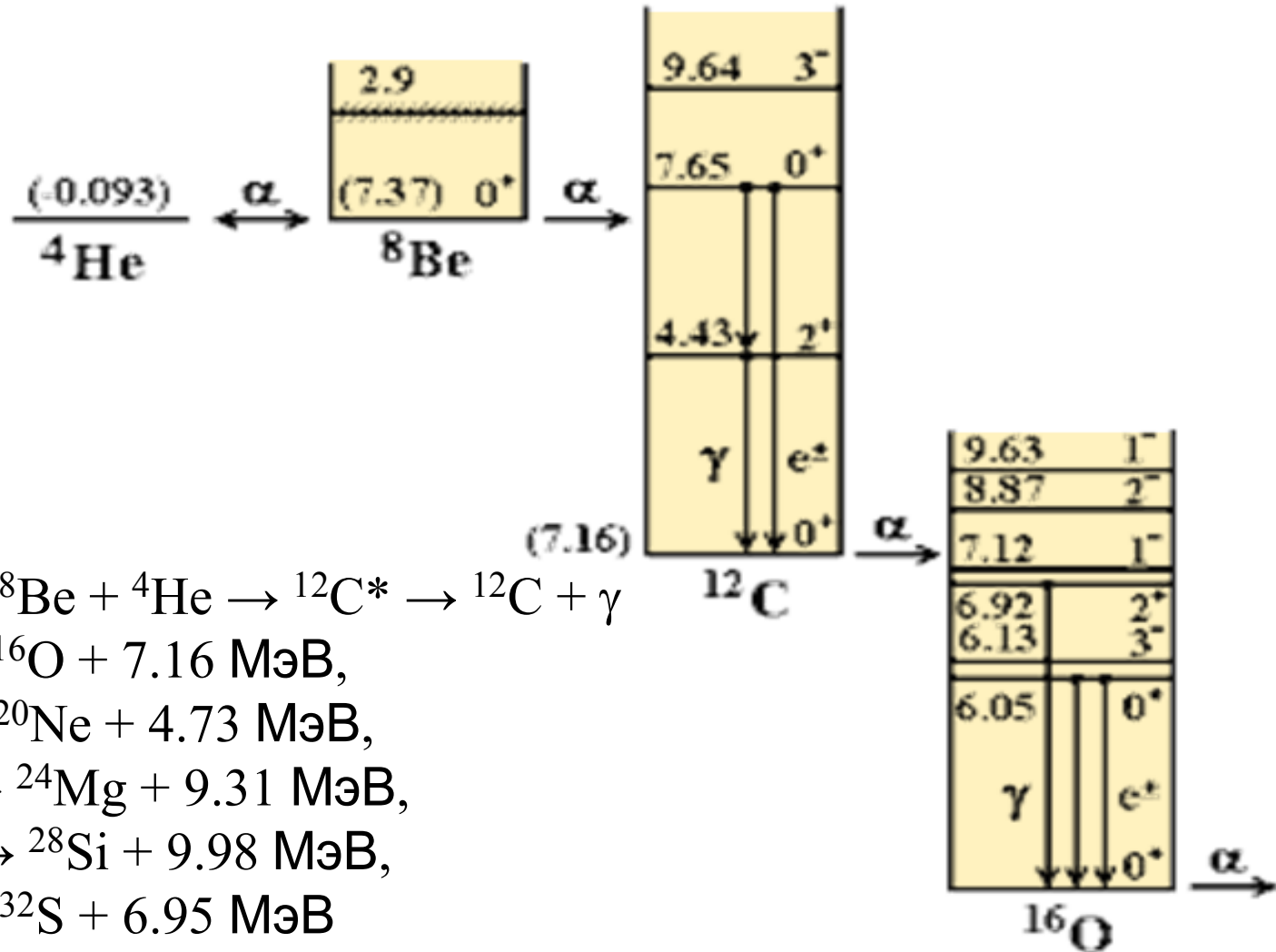
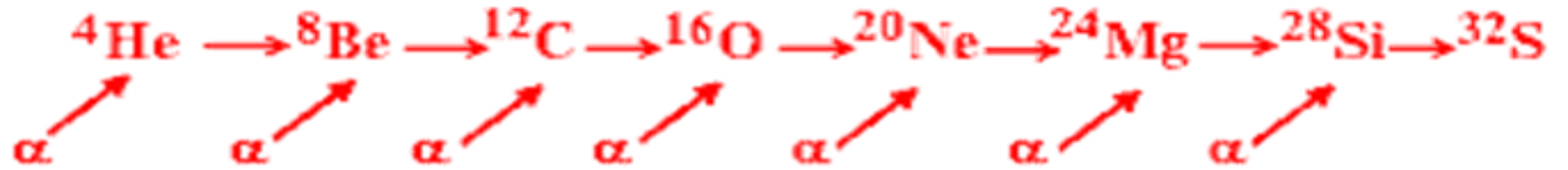
Кинетическая энергия сталкивающихся ядер гелия увеличивается и достигает в массивной звезде величины, достаточной для преодоления сил кулоновского отталкивания ядер гелия.

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 ${}^{12}\text{C}$.

α-процесс в звездах



Горение углерода, кислорода, кремния

$$T = 10^9 - 10^{10} \text{ К}$$

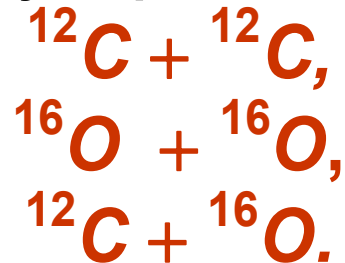
$$\rho = 10^5 - 10^7 \text{ г/см}^3$$



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



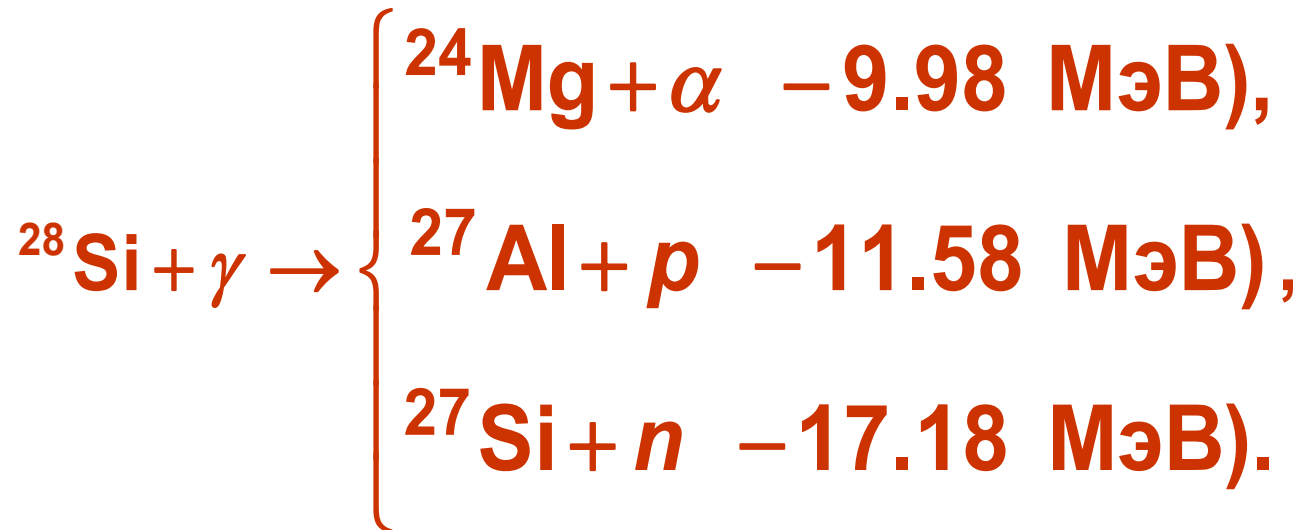
и реакции слияния углерода и кислорода



Фотоядерные реакции в звездах

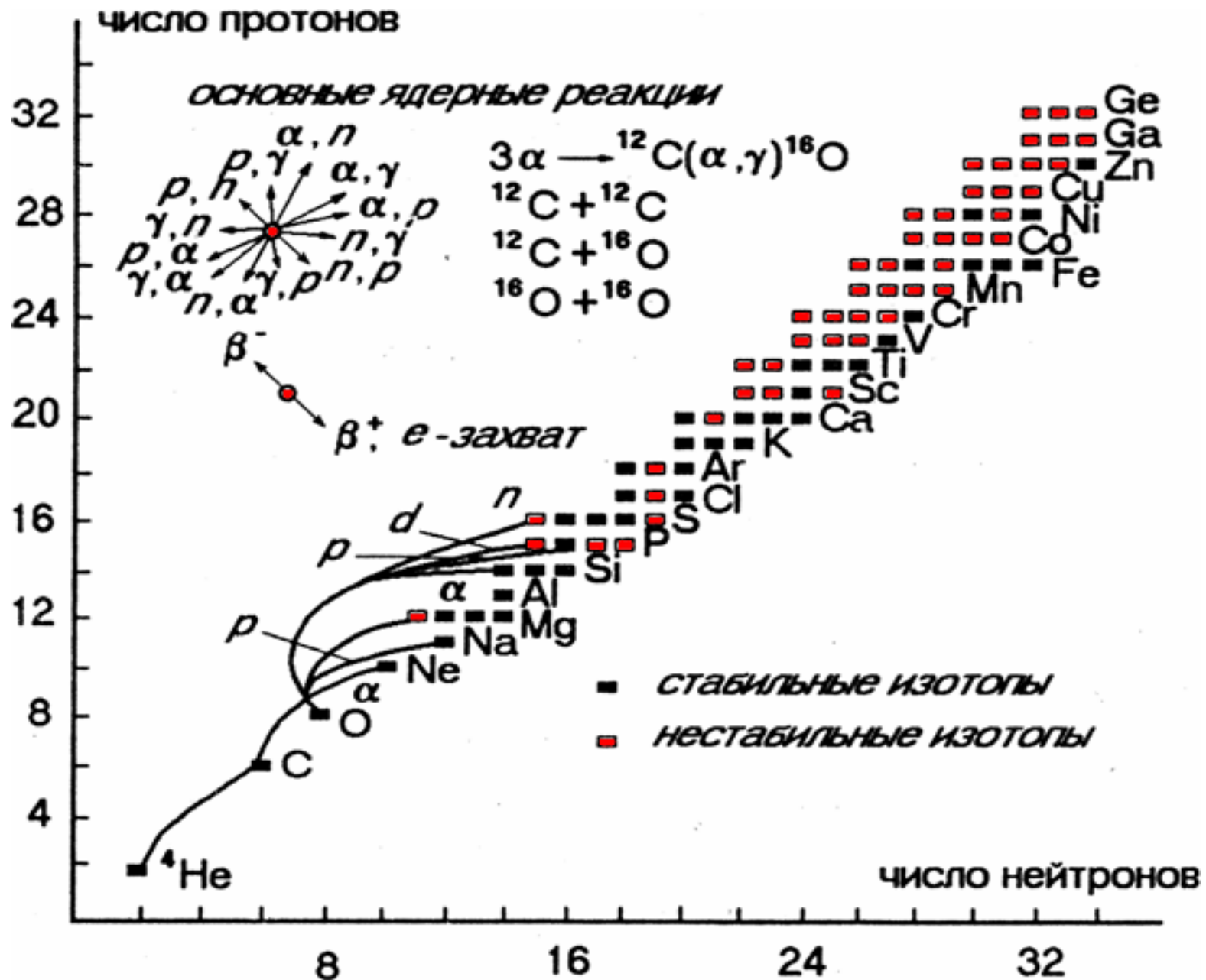
$T \sim 10^9$ К. Существенную роль начинают играть электромагнитные процессы – реакции под действием γ -квантов и электронов. Наряду с ростом энергии фотонов с увеличением температуры ($E_\gamma \sim T$) растёт их число ($N_\gamma \sim T^4$).

Реакции фоторасщепления кремния:

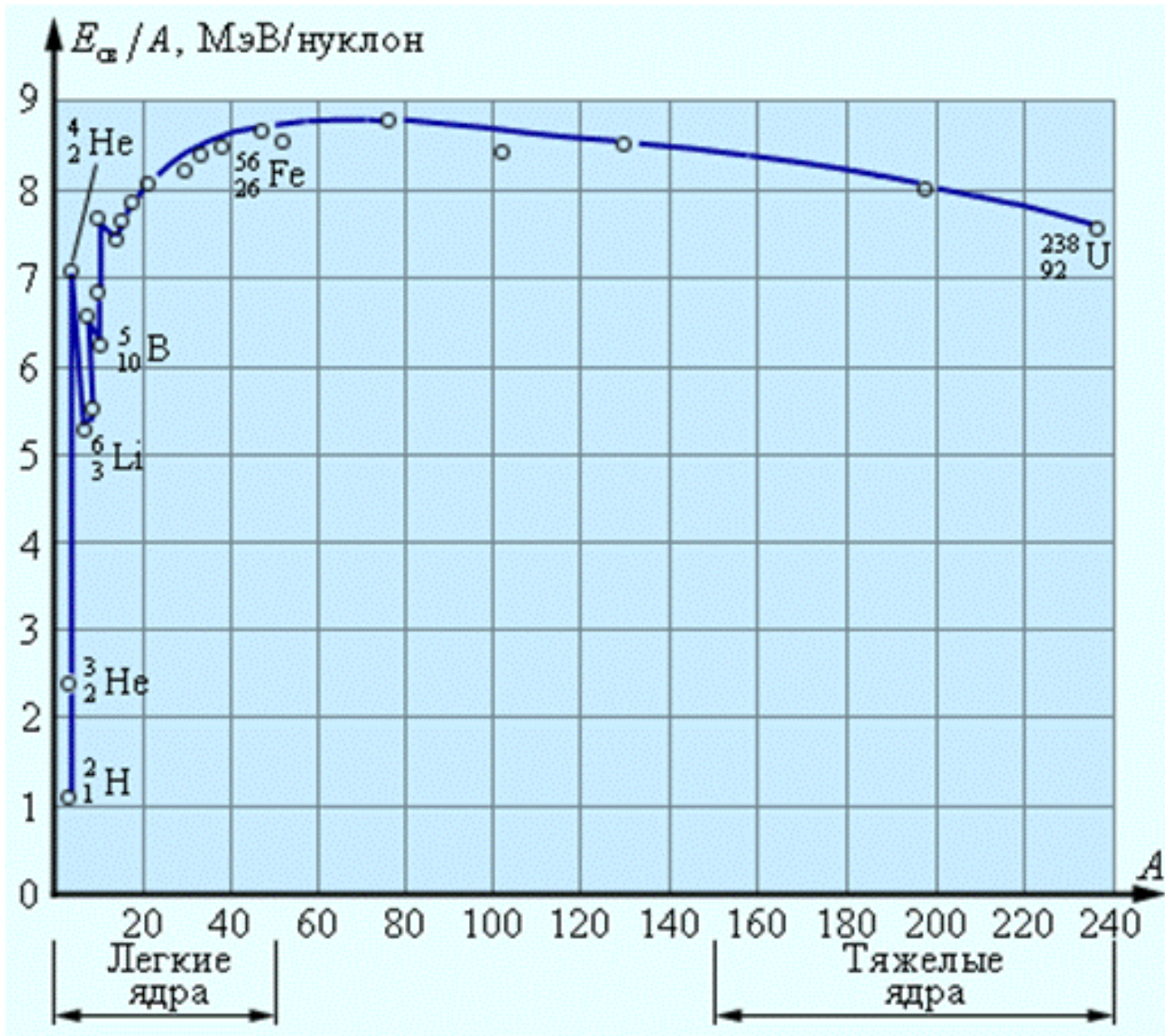


В результате появляется большое количество n , p и α -частиц и их роль в горении кремния увеличивается. ${}^{28}\text{Si}$ и образующиеся продукты с большим Z , облучаясь в потоках n , p , α и γ , в термодинамическом равновесии формируют большинство элементов в районе железного максимума.

Синтез элементов He.....Ge



Предел термоядерного синтеза

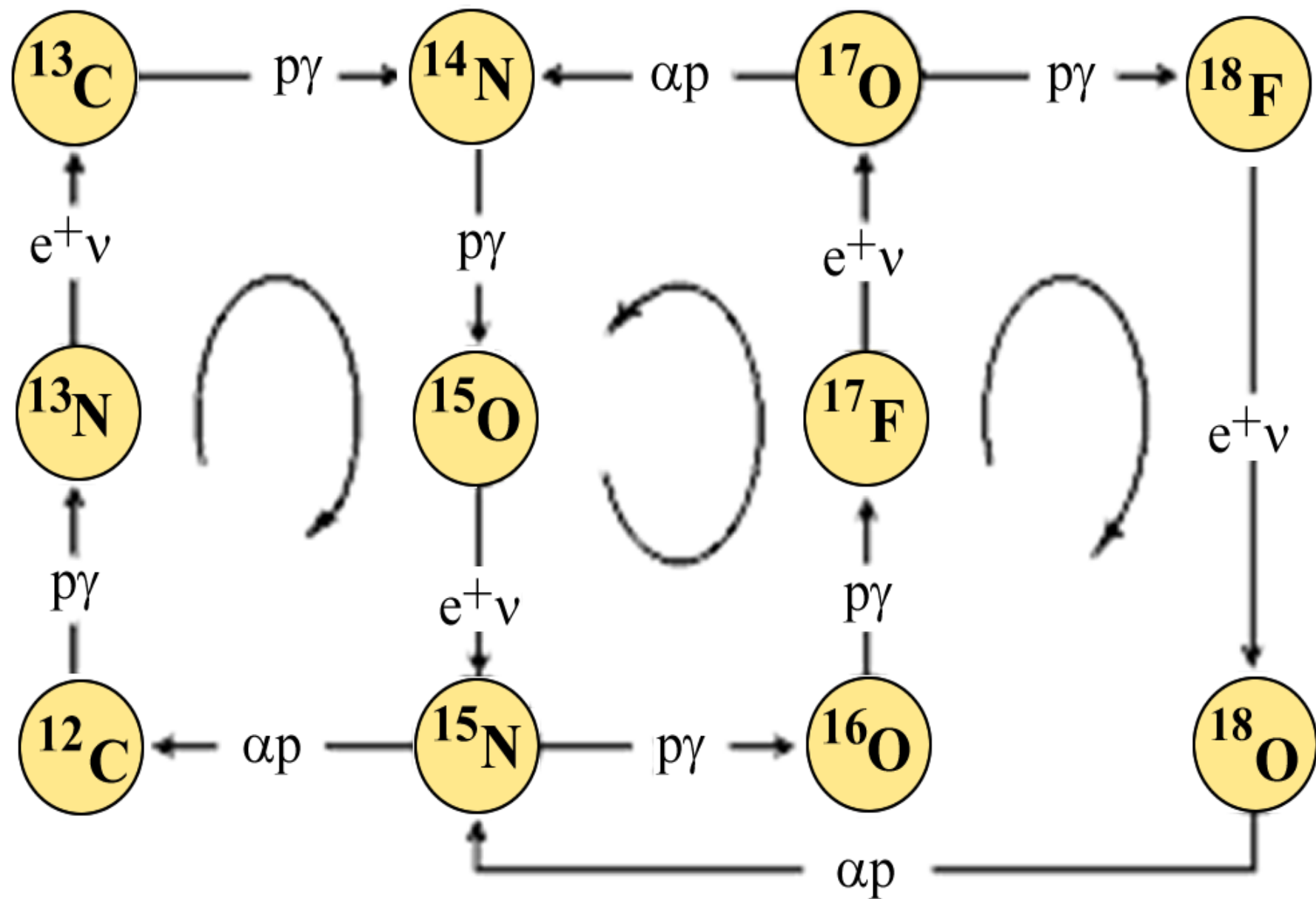


удельная
энергия
связи
атомных
ядер

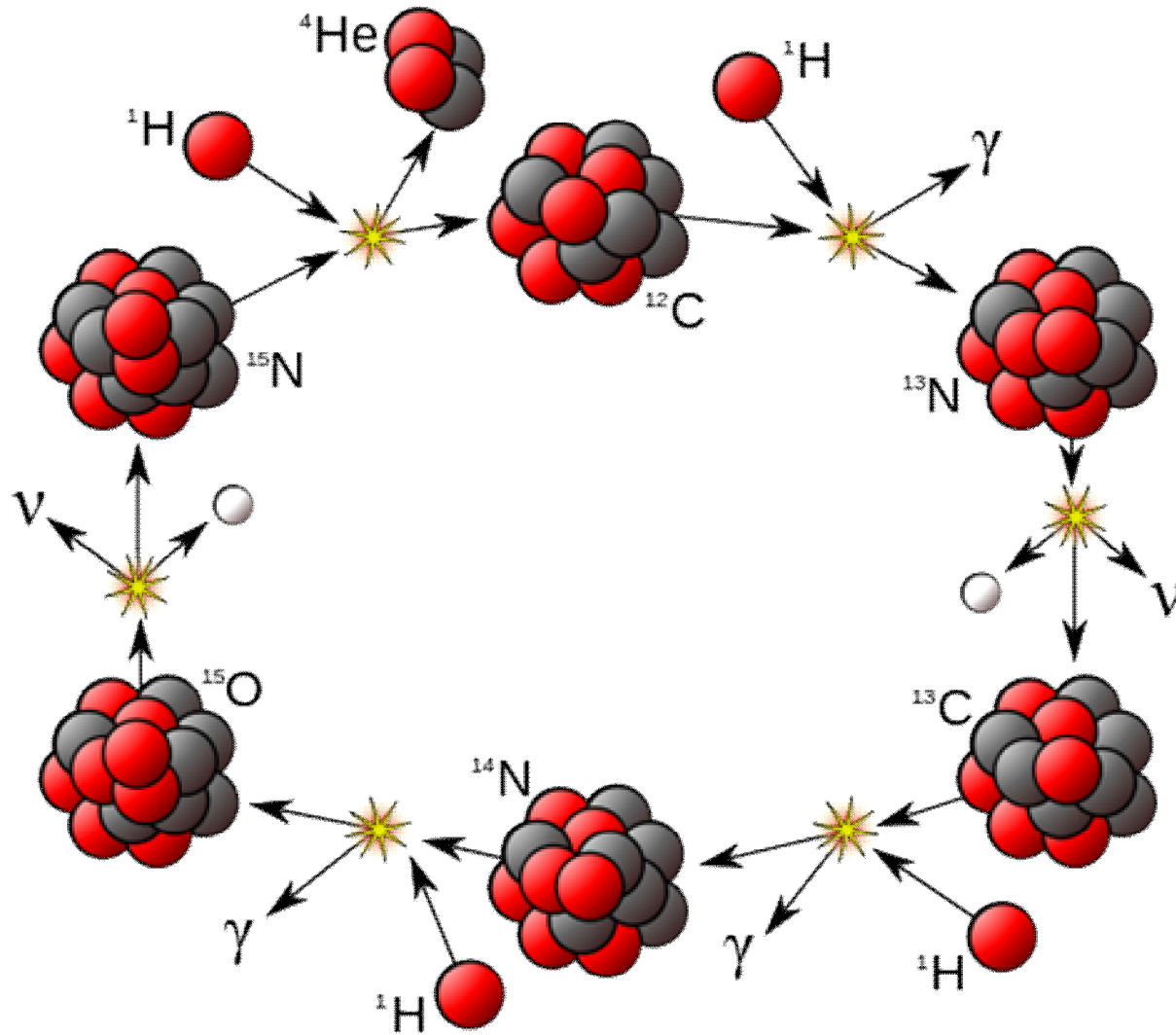
Звезды второго поколения




**CNO-цикл
и солнечные нейтрино**

CNO - цикл



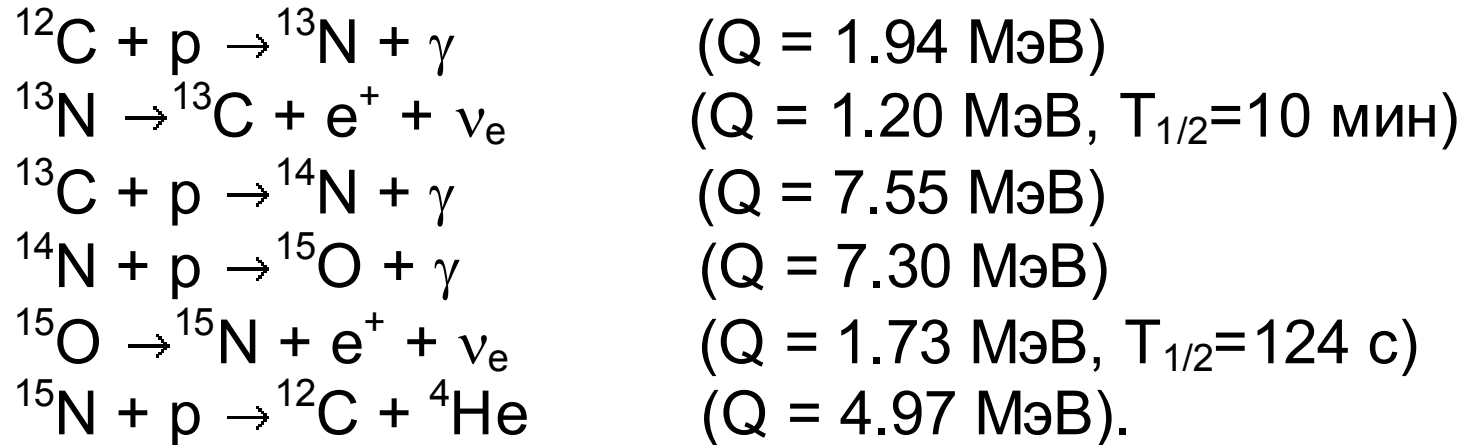
CNO - ЦИКЛ



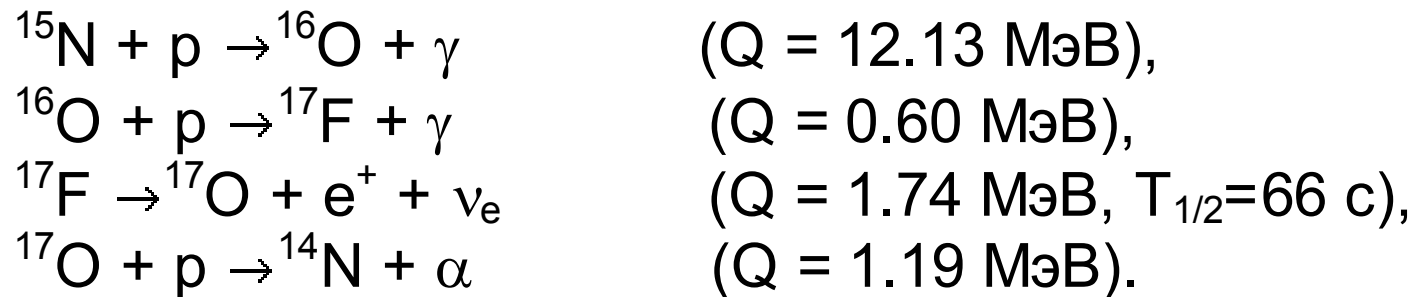
	Proton	γ	Gamma Ray
	Neutron	ν	Neutrino
	Positron		

CNO - цикл

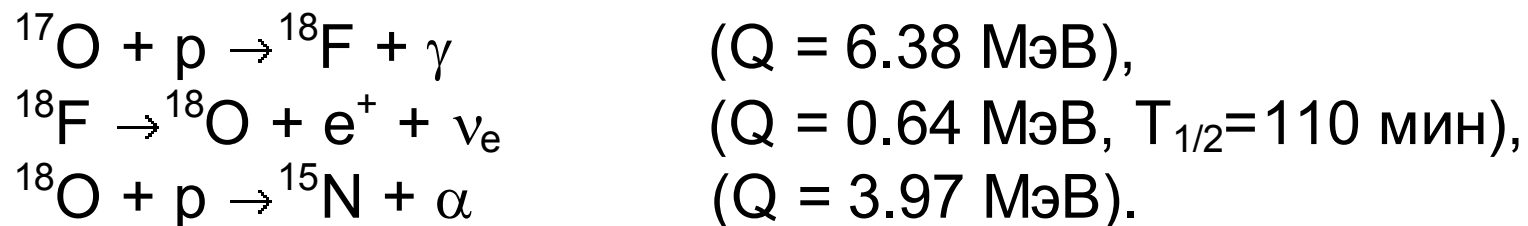
Цепочка реакций I



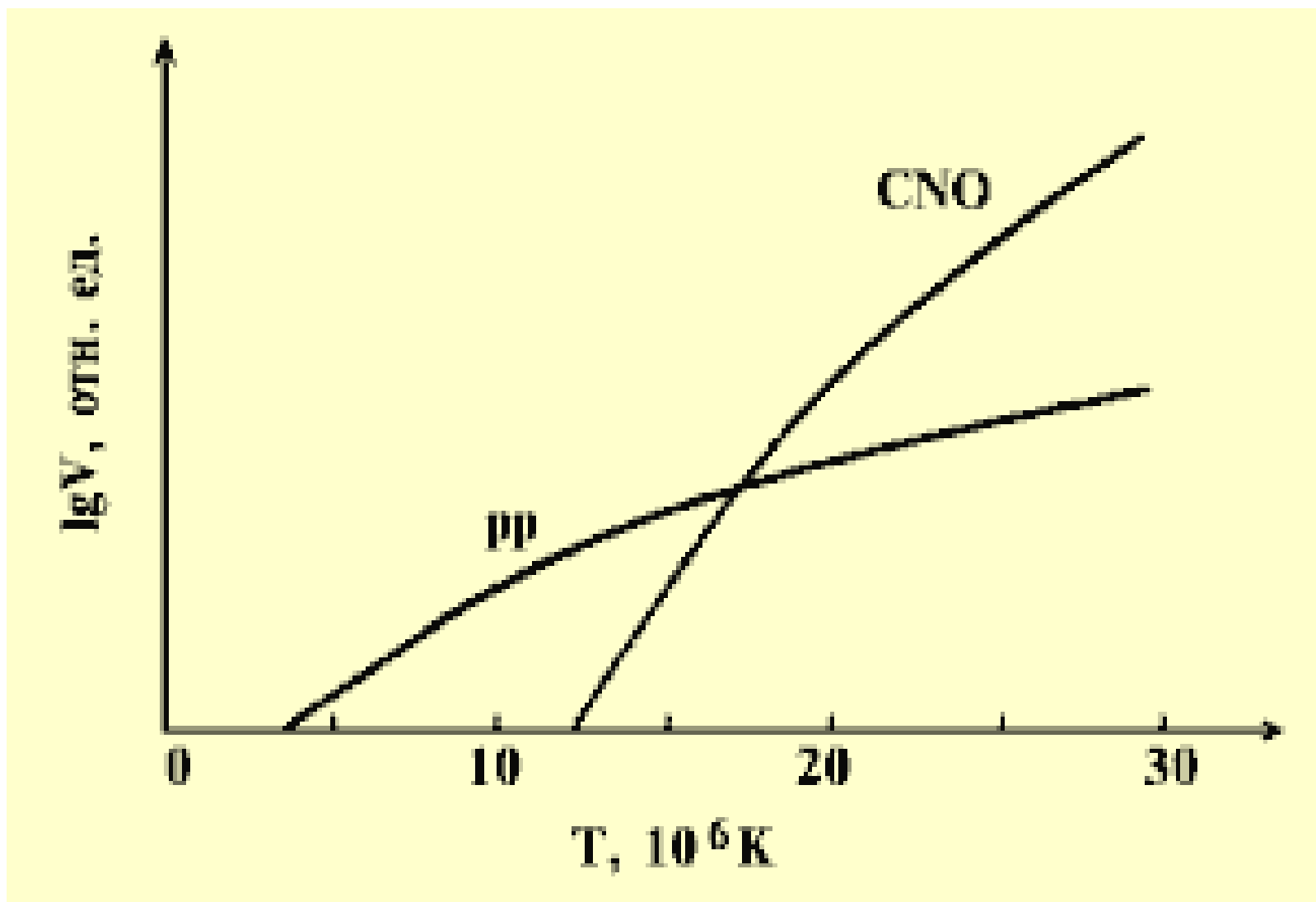
Цепочка реакций II



Цепочка реакций III



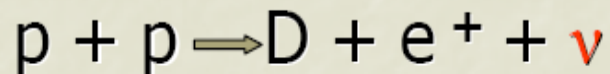
PP и CNO-циклы



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

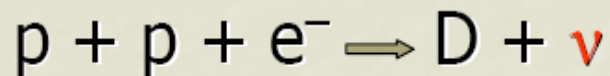
Источники солнечных нейтрино

Водородный цикл

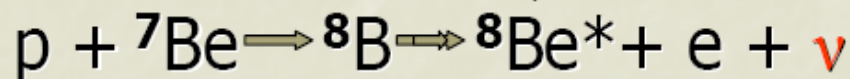
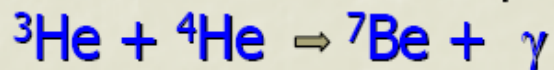
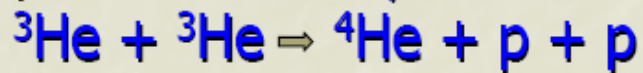
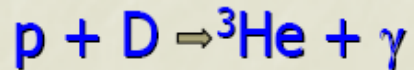


E_ν (МэВ) Поток ($\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$)

0 – 0.42 $6 \cdot 10^{10}$



1.44 $1.4 \cdot 10^8$

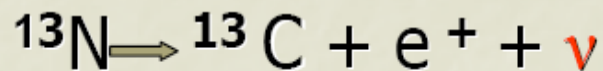
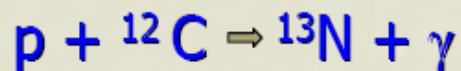


0 – 15 $5.8 \cdot 10^6$



0.83 $4.7 \cdot 10^9$

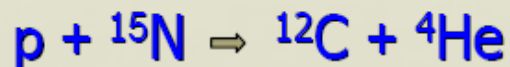
CNO цикл



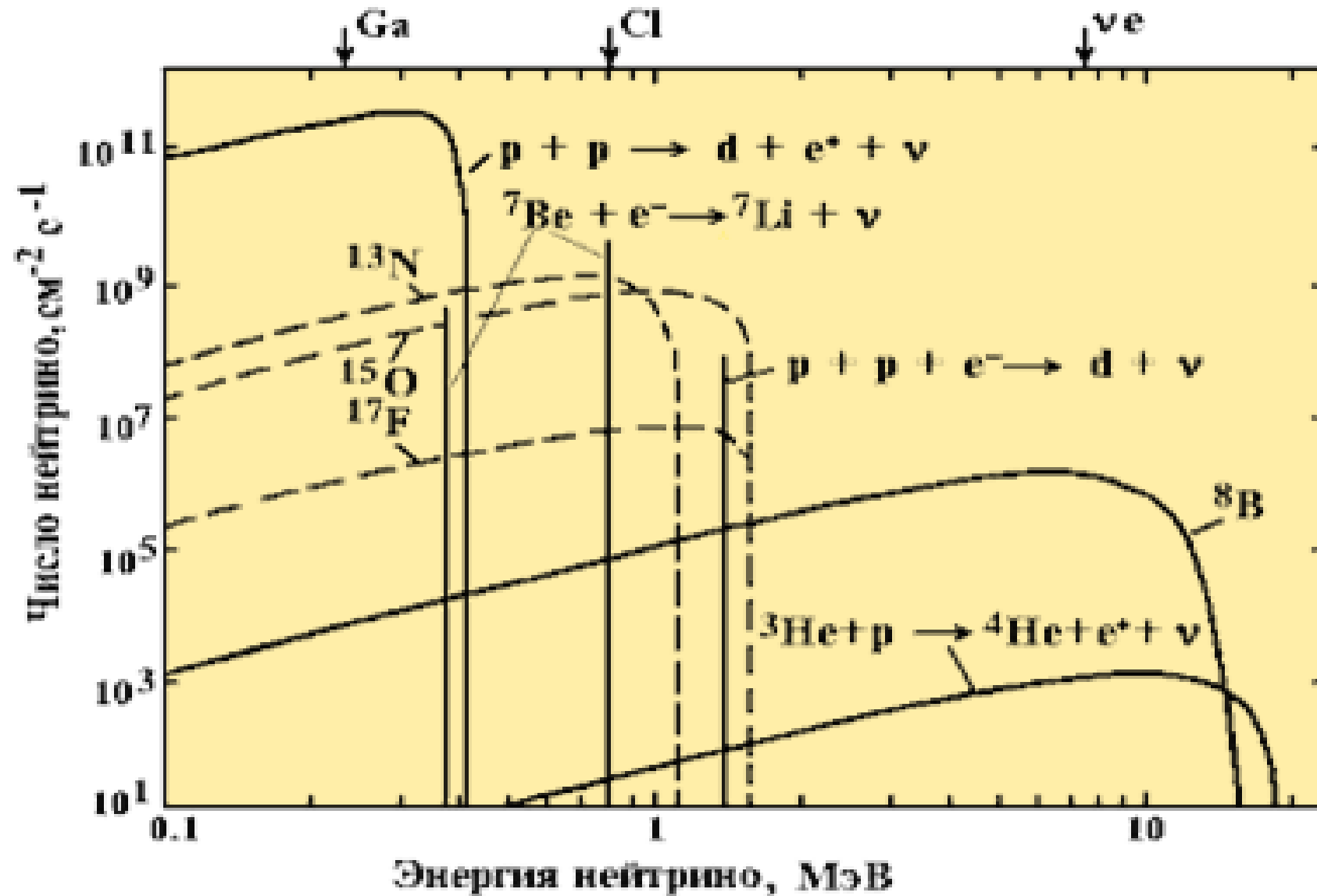
0 – 1.199 $6 \cdot 10^8$



0 – 1.732 $5 \cdot 10^8$

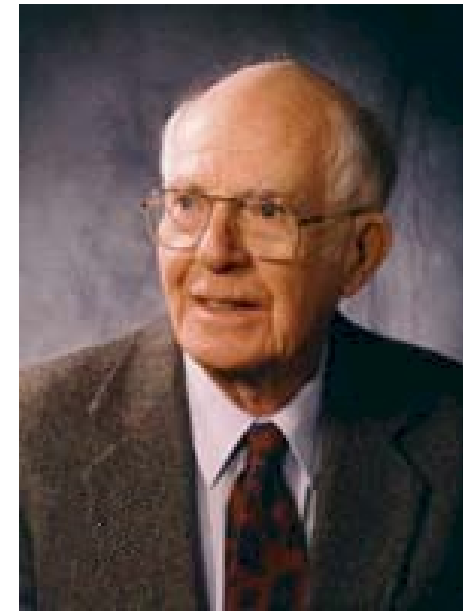
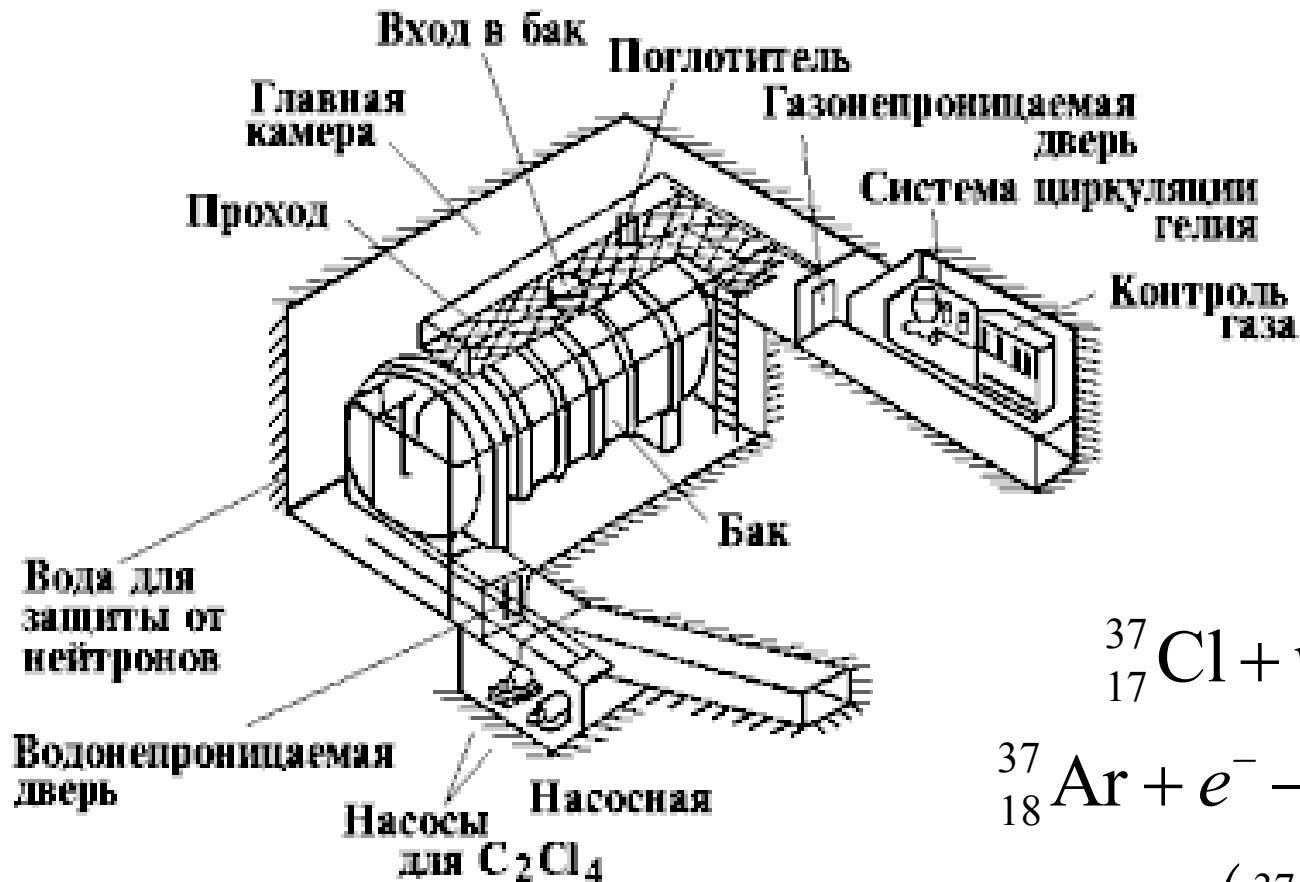


Солнечные нейтрино



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

Детектор Дэвиса



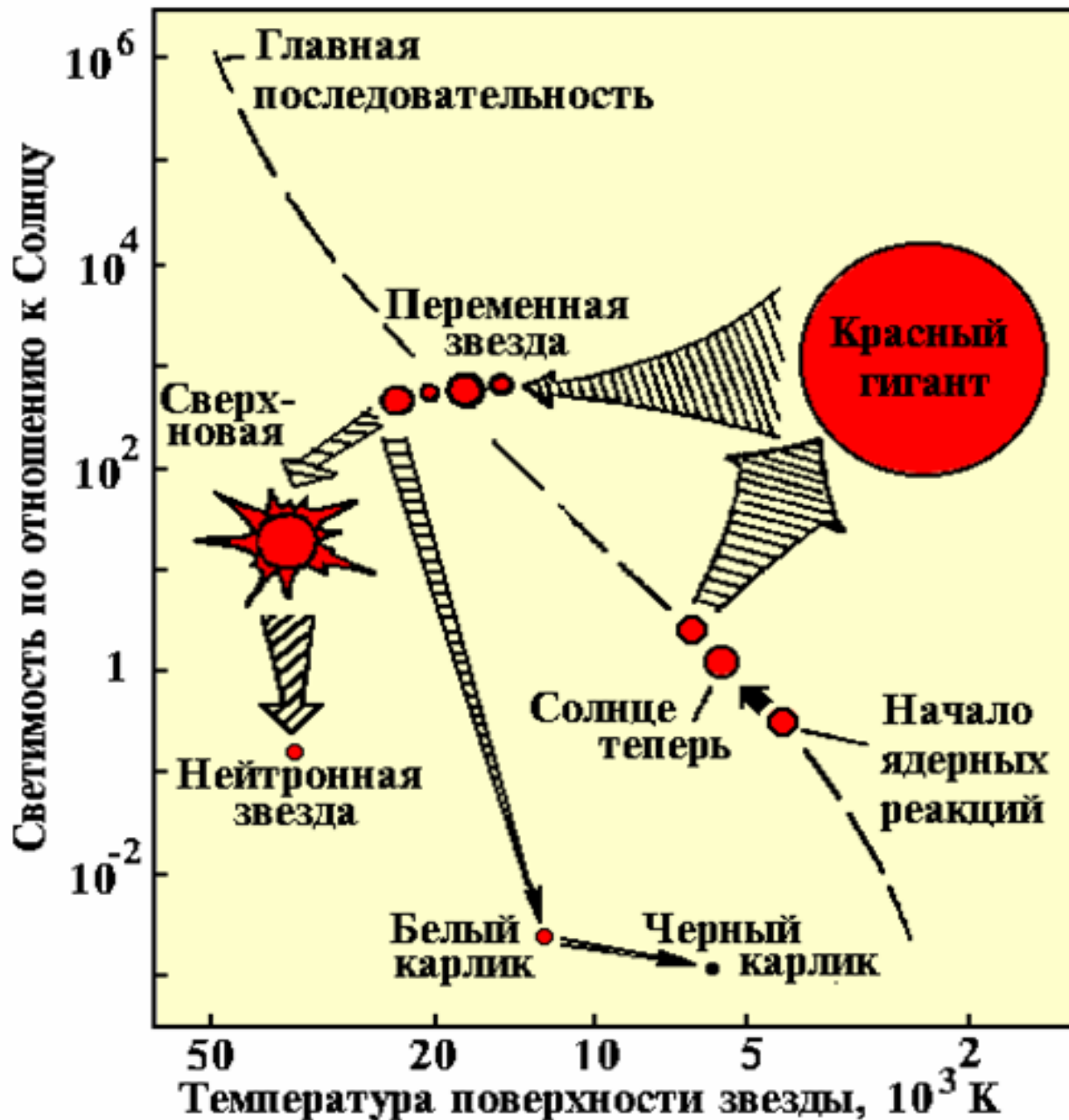
Р. Дэвис
1914-2006



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

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

Диаграмма Герцшпрунга-Рассела



**диаграмма
эволюции
звезд**

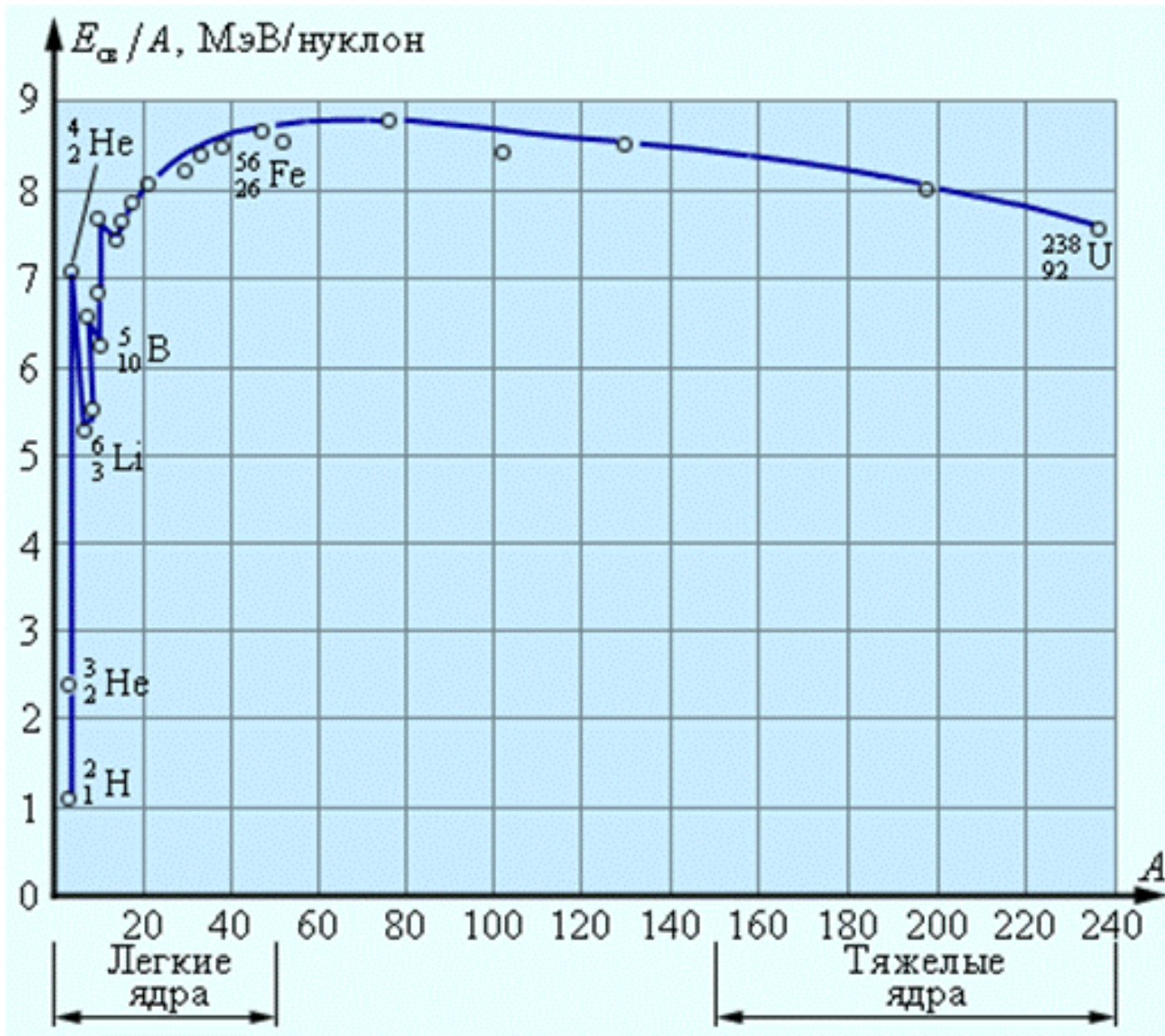
Диаграмма Герцшпрунга-Рассела

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	$1,5 \cdot 10^8$	$5,0 \cdot 10^{10}$

Ядерные реакции синтеза в звёздах различной массы

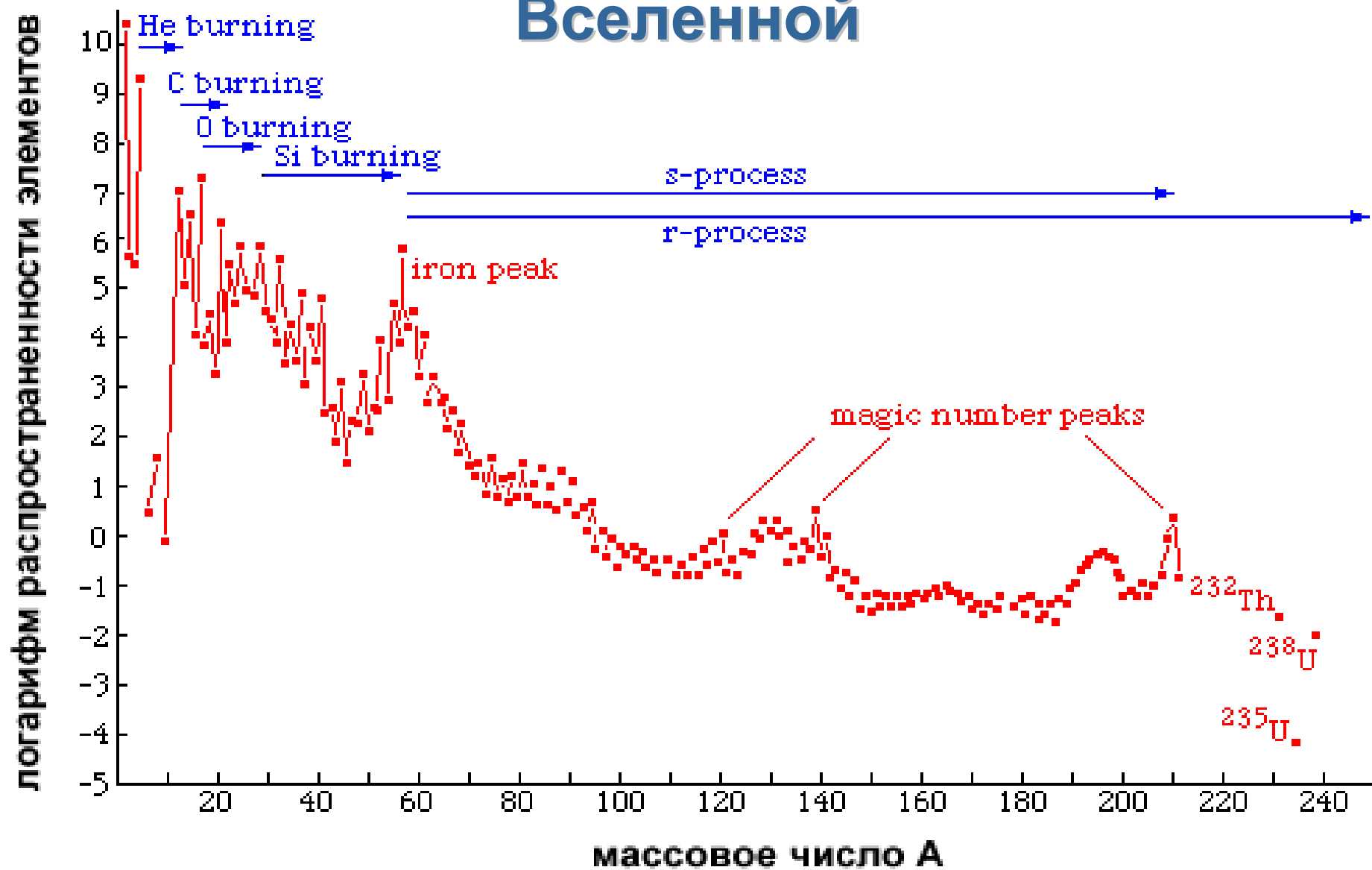
Масса, M_{\odot}	Возможные ядерные реакции
0.08	Нет
0.3	Горение водорода
0.7	Горение водорода и гелия
5.0	Горение водорода, гелия, углерода
25.0	Все реакции синтеза с выделением энергии

Предел термоядерного синтеза



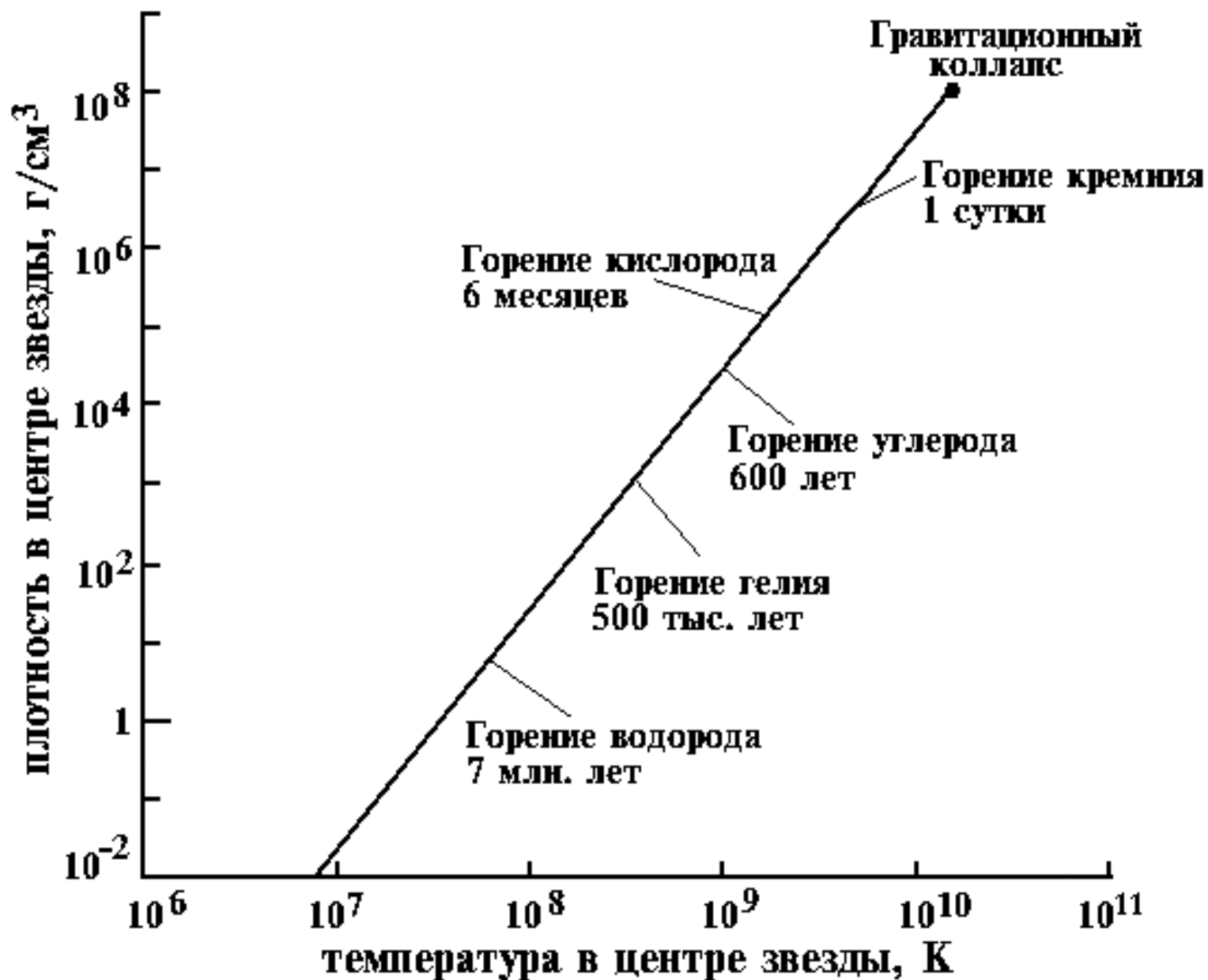
удельная
энергия
связи
атомных
ядер

Распространенность нуклидов во Вселенной



Распространенность Si принята равной 10^6 .

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



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

