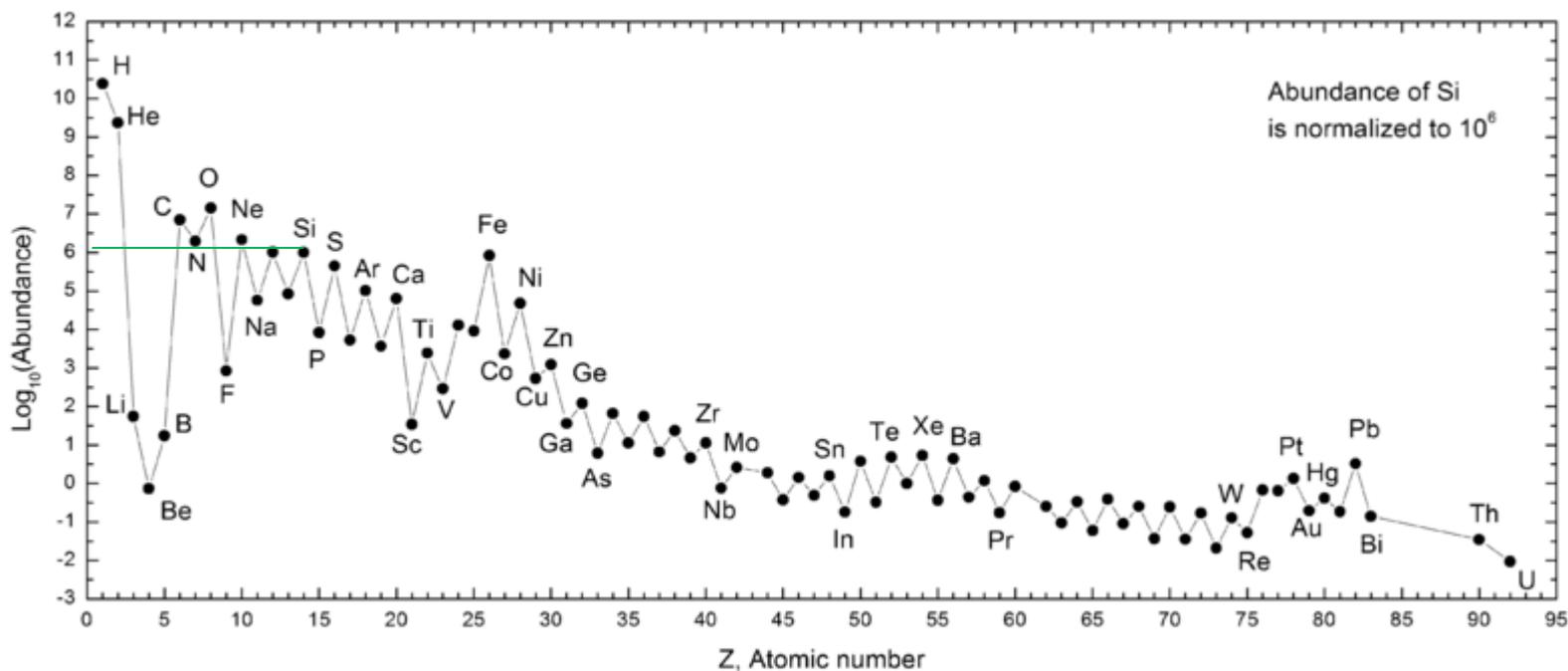




Микромир и Вселенная 2018

НУКЛЕОСИНТЕЗ

Распространенность нуклидов во Вселенной



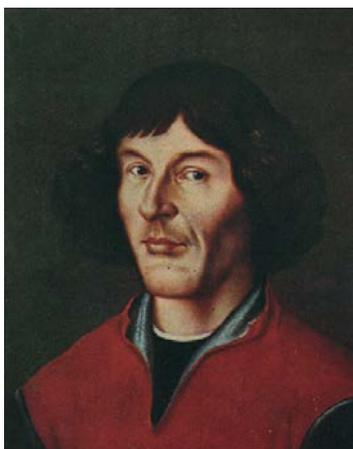
Геоцентрическая система Вселенной



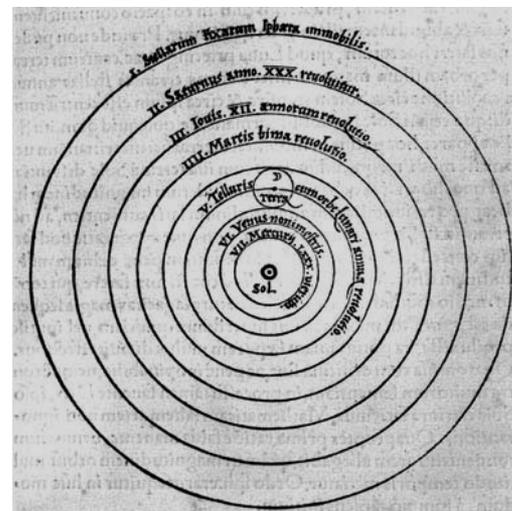
Птолемей
(87 - 150)



Гелиоцентрическая система Вселенной



Николай Коперник
(1473 - 1543)



Стационарная Вселенная



Законы Кеплера

Иоганн Кеплер
1571 – 1630

1. Движение планет происходит по эллипсам в одном из фокусов которых находится Солнце.
 2. Линия, соединяющая планету и Солнце, «заметает» равные площади за равные интервалы времени.
 3. Период обращения планеты T и её расстояние от Солнца R связаны соотношением $R^3/T^2 = Const$
- постоянная $const$ имеет одно и то же значение для всех планет.



Закон всемирного тяготения

Исаак Ньютон
1643 - 1727

Две материальные частицы притягивают друг друга с силой F , прямо пропорциональной их массам и обратно пропорциональной расстоянию между ними.

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

Фотометрический парадокс



Генрих Ольберс
1758 - 1840

Вселенная равномерно заполнена звездами, имеющими одинаковую среднюю светимость l .

$\frac{l}{4\pi r^2}$ — светимость звезды, удаленной от наблюдателя на расстояние r .

n — средняя плотность звезд в единице объема.

$4\pi n r^2 dr$ — число звезд в шаровом слое .

L — световой поток на Землю **от всех звезд**.

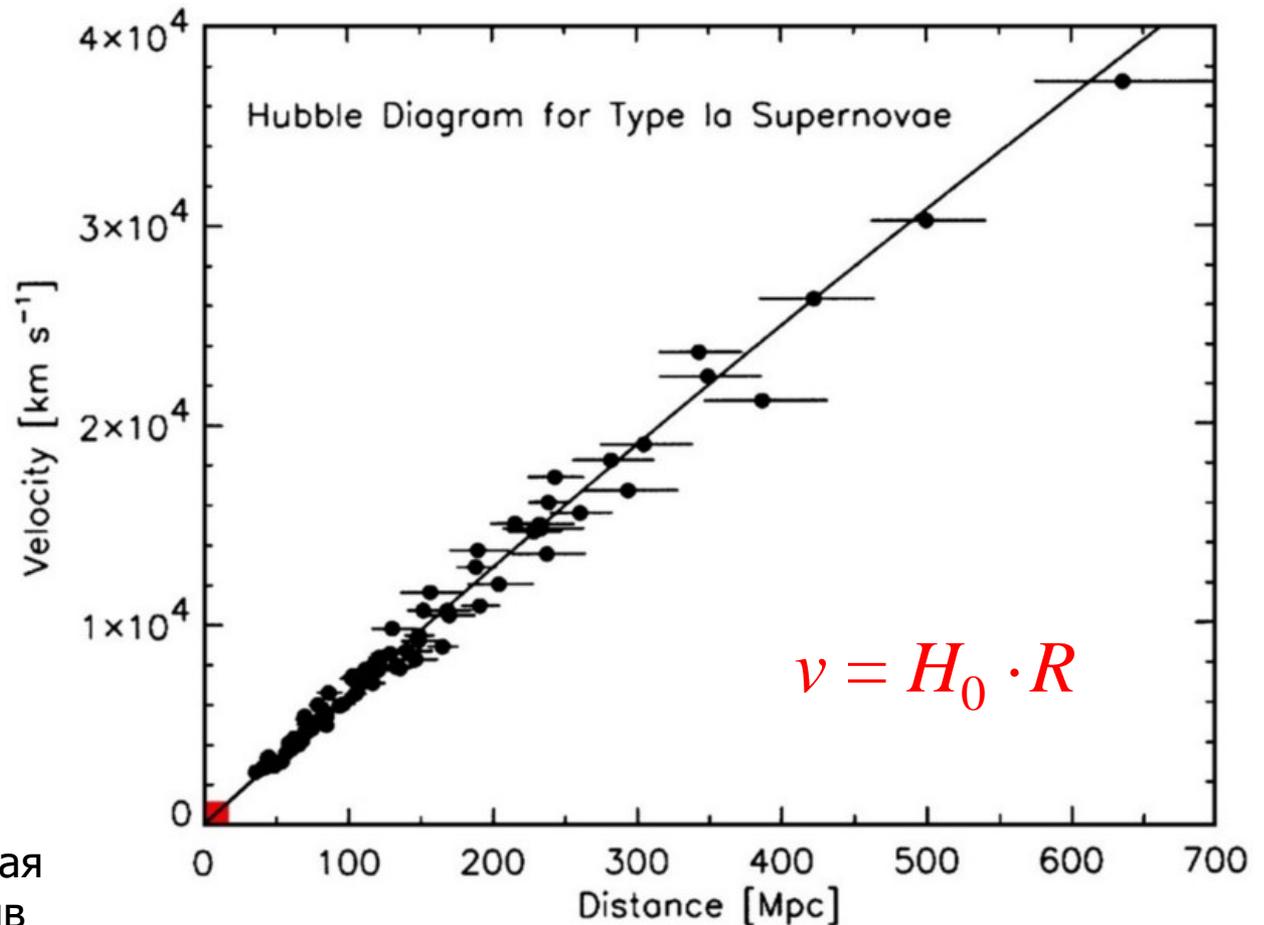
$$L = \int_0^{\infty} \left(\frac{l}{4\pi r^2} \right) 4\pi n r^2 dr = nl \int_0^{\infty} dr = \infty$$

Расширение Вселенной



Эдвин Хаббл
1889 - 1953

В 1929 г. Э. Хаббл установил, что Вселенная расширяется, обнаружив красное смещение видимого излучения галактик за счет эффекта Доплера.



$$H_0 = 67,80 \pm 0,77 \frac{\text{км}}{\text{сек} \cdot \text{Мпарсек}}$$

Теория Большого Взрыва

Первые мгновения жизни Вселенной

Планковский момент $t_{Pl} \sim 10^{-43}$ с.

Вплоть до этого момента все четыре фундаментальных взаимодействия (гравитационное, слабое, электромагнитное и сильное) объединены в единое универсальное суперсимметричное взаимодействие. Планковский момент является комбинацией трех фундаментальных констант — G (гравитационная постоянная), \hbar (постоянная Планка) и c (скорость света):

$$t_{Pl} = \sqrt{G\hbar/c^5} \approx 10^{-43} \text{ с.}$$

Планковскому моменту соответствует планковский масштаб расстояний (планковская длина)

$$L_{Pl} = \sqrt{G/c^3} \approx 10^{-33} \text{ см,}$$

планковская энергия

$$E_{Pl} = \sqrt{c^5/G} \approx 10^{19} \text{ ГэВ,}$$

и температура

$$T_{Pl} \approx 10^{32} \text{ К.}$$

Первые секунды жизни Вселенной

Время после Большого Взрыва, с	Характерные температуры, К	Характерные расстояния, см	Этап/Событие
$< 10^{-43}$	$> 10^{32}$	$< 10^{-33}$	Квантовый хаос. Суперсимметрия (объединение всех взаимодействий)
10^{-43}	10^{32}	10^{-33}	Планковский момент. Отделение гравитационного взаимодействия
$10^{-43} - 10^{-36}$	$10^{32} - 10^{28}$	$10^{-33} - 10^{-29}$	Великое объединение электрослабого и сильного взаимодействий
10^{-36}	10^{28}	10^{-29}	Конец Великого объединения. Разделение сильного и электрослабого взаимодействий
10^{-10}	10^{15}	10^{-16}	Конец электрослабого объединения

Лептонная эра

Время после Большого Взрыва, с	Характерные температуры, К	Характерные расстояния, см	Событие
$10^{-10} - 10^{-4}$	$10^{15} - 10^{12}$	$10^{-16} - 10^{-13}$	Адронная эра. Рождение и аннигиляция адронов и лептонов
$10^{-4} - 10$	$10^{12} - 10^{10}$	$10^{-13} - 10^{-10}$	Лептонная эра. Рождение и аннигиляция лептонов
0.1 - 1	$2 \cdot 10^{10}$	10^{-11}	Отделение нейтрино. Вселенная становится прозрачной для нейтрино (антинейтрино)

Радиационная эра

Время после Большого взрыва	Характерные температуры (К)	Характерные расстояния (см)	Основные события
10 с	10^{10}	10^{-10}	Окончание лептонной эры.
10 с - 10^4 лет	$10^{10} - 10^4$	$10^{-10} - 10^{-5}$	Радиационная эра. Доминирование излучения над веществом.
10^4 лет	10^4	10^{-5}	Начало эры Вещества. Вещество начинает доминировать над излучением.
300 000 лет	$3 \cdot 10^3$	10^{-4}	Разделение вещества и излучения. Вселенная становится прозрачной для излучения.

ЛЕПТОНЫ + АНТИЛЕПТОНЫ => γ -КВАНТЫ.

Вселенная из состояния, когда плотность массивных частиц была близка к плотности фотонов, перешла к состоянию, в котором плотность фотонов на много порядков превосходила плотность массивных частиц. Вселенная практически полностью стала состоять из фотонов и нейтрино.

В начале радиационной эры излучение интенсивно взаимодействовало с заряженными частицами (протонами, электронами), входившими в состав Вселенной. За счет расширения Вселенной происходило её охлаждение, в том числе и фотонов. Фотоны охлаждались за счет эффекта Допплера при отражении от удаляющихся частиц. Увеличение длины волны фотонов $\Delta\lambda$ связано с увеличением расстояния ΔR между удаляющимися при расширении Вселенной частицами соотношением:

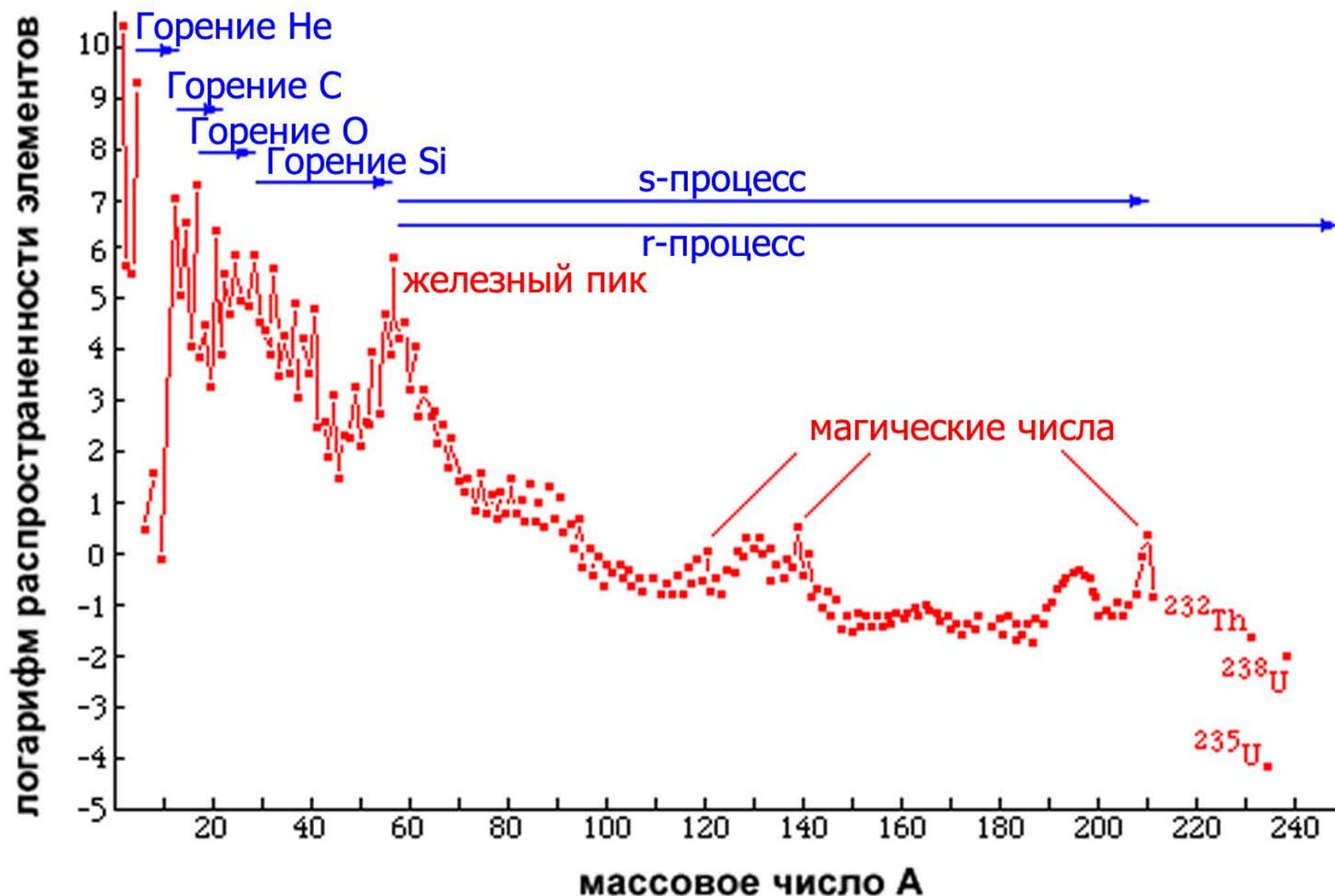
$$\Delta\lambda / \lambda = \Delta R / R.$$

Эра вещества

Время после Большого взрыва	Характерные температуры (К)	Характерные расстояния (см)	Основные события
10 с	10^{10}	10^{-10}	Окончание лептонной эры.
10 с - 10^4 лет	$10^{10} - 10^4$	$10^{-10} - 10^{-5}$	Радиационная эра. Доминирование излучения над веществом.
10^4 лет	10^4	10^{-5}	Начало эры Вещества. Вещество начинает доминировать над излучением.
300 000 лет	$3 \cdot 10^3$	10^{-4}	Разделение вещества и излучения. Вселенная становится прозрачной для излучения.

Нуклеосинтез

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 ^4He

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

$t = 380$ тыс. лет

Образование нейтральных атомов

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

Дозвездный нуклеосинтез

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

$$T > 10^{10} \text{ К:}$$



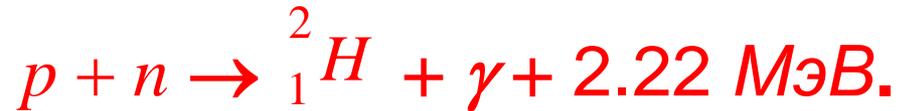
$$W = Ae^{-E/kT}$$

В условиях термодинамического равновесия соотношение между числом нейтронов и протонов будет определяться температурой среды T , разностью масс нейтрона и протона $m_n - m_p$:

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

Образование дейтерия. $T = 10^9$ К

Стартовой реакцией первичного нуклеосинтеза является реакция образования дейтерия

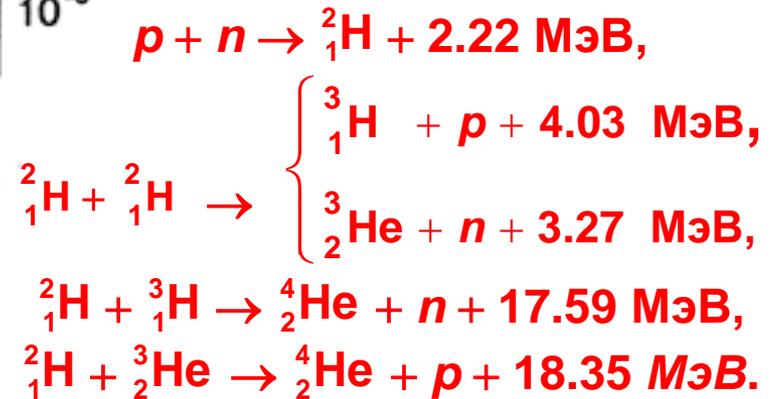
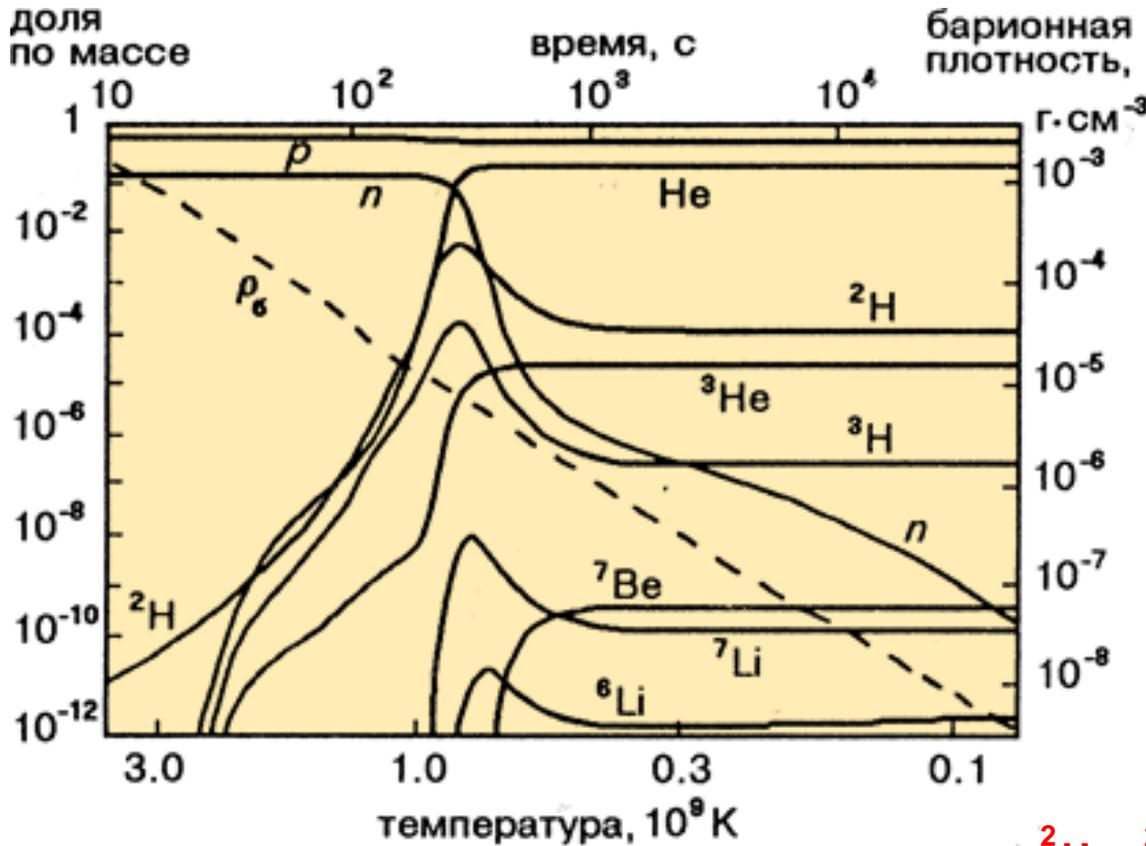


Накоплению дейтерия за счёт этой реакции на первых порах препятствует интенсивное разрушение дейтерия фотонами в обратном процессе фотодиссоциации. Отношение числа фотонов n_γ к числу барионов n_b :

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

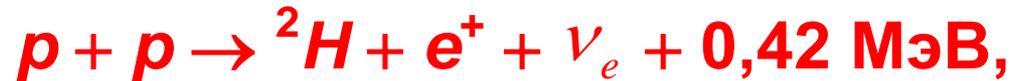
Поэтому начало синтеза дейтерия и всей цепочки первичного нуклеосинтеза задерживается примерно до 100-й секунды после Большого Взрыва, когда средняя кинетическая энергия частиц уменьшается до 0.1 МэВ. Вселенная к этому времени остывает до 10^9 К.

Дозвездный нуклеосинтез Образование легчайших ядер



Протозвезда. Горение дейтерия. $T = 10^6$ К

Когда масса вещества протозвезды в результате аккреции достигает 0.1 массы Солнца, температура в центре протозвезды возрастает до 1 млн. К, 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.

Эволюция Вселенной

$$t = 0$$

Большой взрыв. Рождение Вселенной

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

$$t = 10^{-43} \text{ с}$$

Эра квантовой гравитации. Струны

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

$$t = 10^{-36} \text{ с}$$

Кварк-глюонная среда

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

$$t = 10^{-6} \text{ с}$$

Кварки объединяются в нейтроны и протоны

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

$$t = 100 \text{ с}$$

Образование дозвездного ^4He

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

$$t = 380 \text{ тыс. лет}$$

Образование нейтральных атомов

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

$$t = 10^8 \text{ лет}$$

Горение водорода в звездах

$$\rho = 10^2 \text{ г/см}^3, T = 2 \cdot 10^6 \text{ К}$$

Горение гелия в звездах

$$\rho = 10^3 \text{ г/см}^3, T = 2 \cdot 10^8 \text{ К}$$

Горение углерода в звездах

$$\rho = 10^5 \text{ г/см}^3, T = 8 \cdot 10^8 \text{ К}$$

Горение кислорода в звездах

$$\rho = 10^5 \div 10^6 \text{ г/см}^3, T = 2 \cdot 10^9 \text{ К}$$

Горение кремния в звездах

$$\rho = 10^6 \text{ г/см}^3, T = (3 \div 5) \cdot 10^9 \text{ К}$$

$$t = 13,7 \text{ млрд. лет}$$

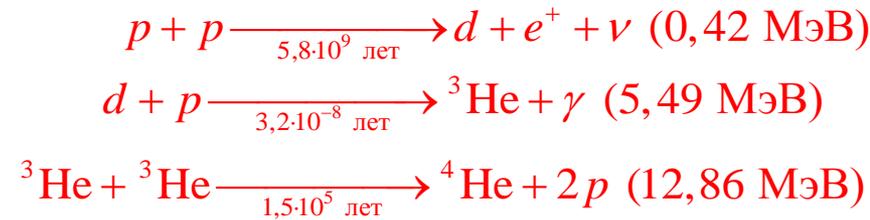
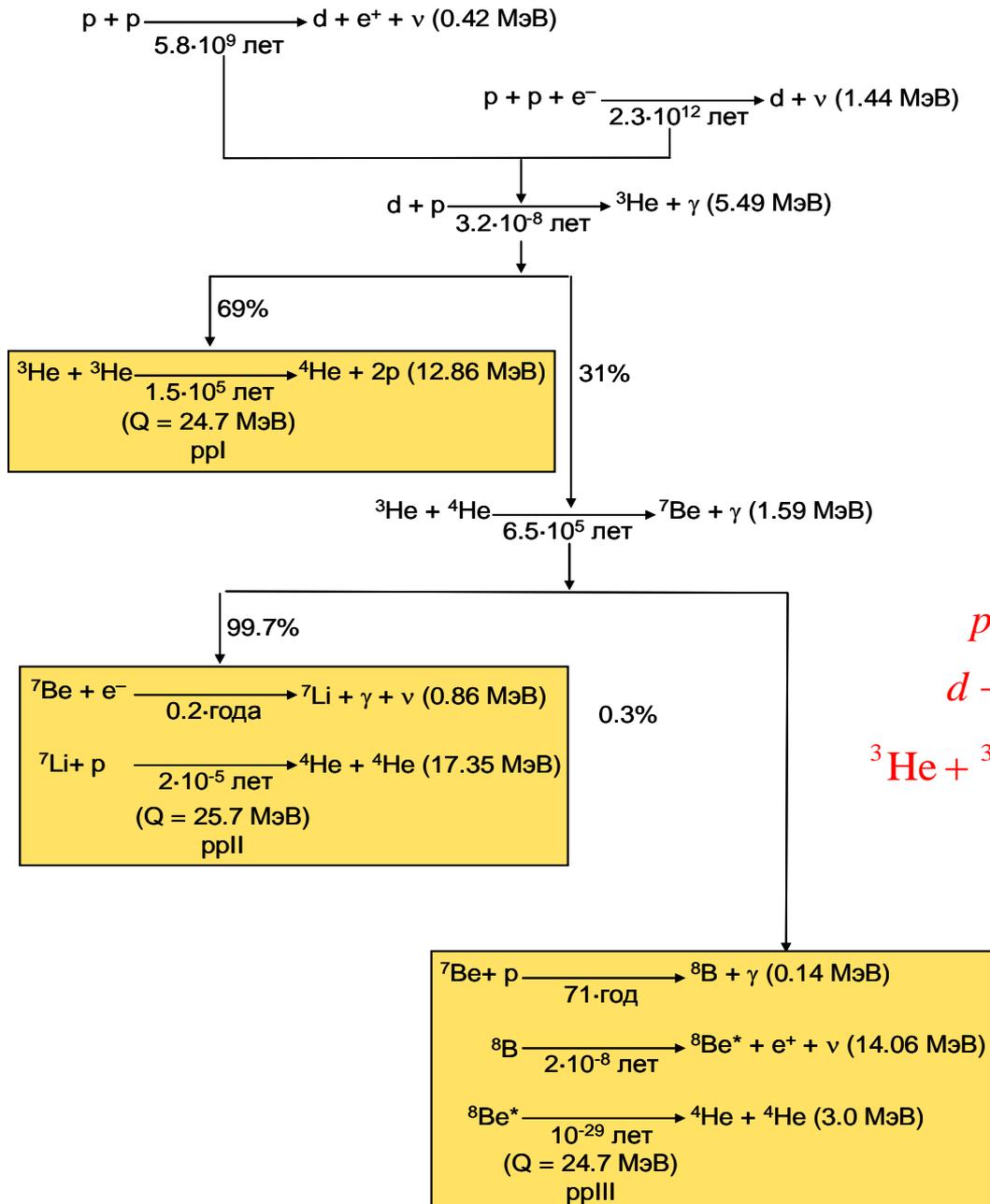
Современная Вселенная

$$\rho = 10^{-30} \text{ г/см}^3, T = 2,73 \text{ К}$$

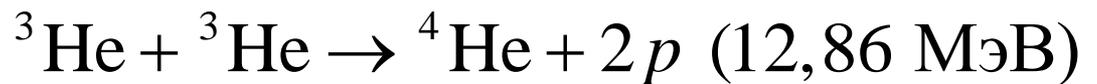
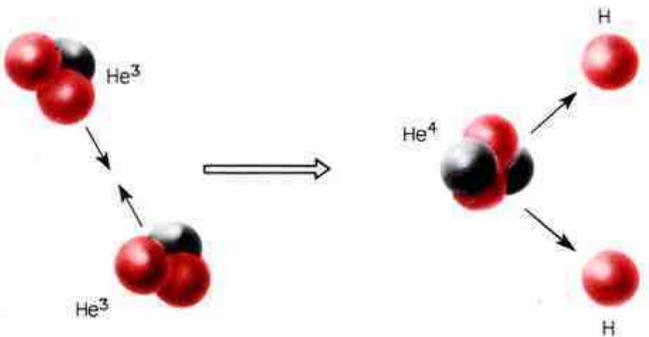
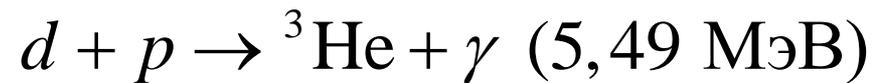
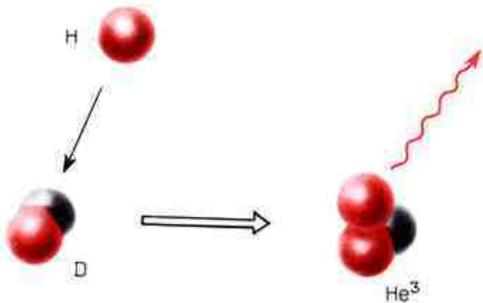
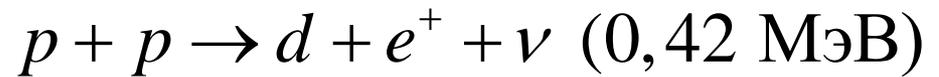
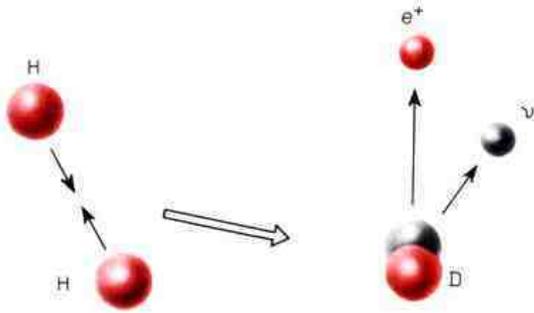
ПЕРВЫЕ ЗВЕЗДЫ

Горение водорода

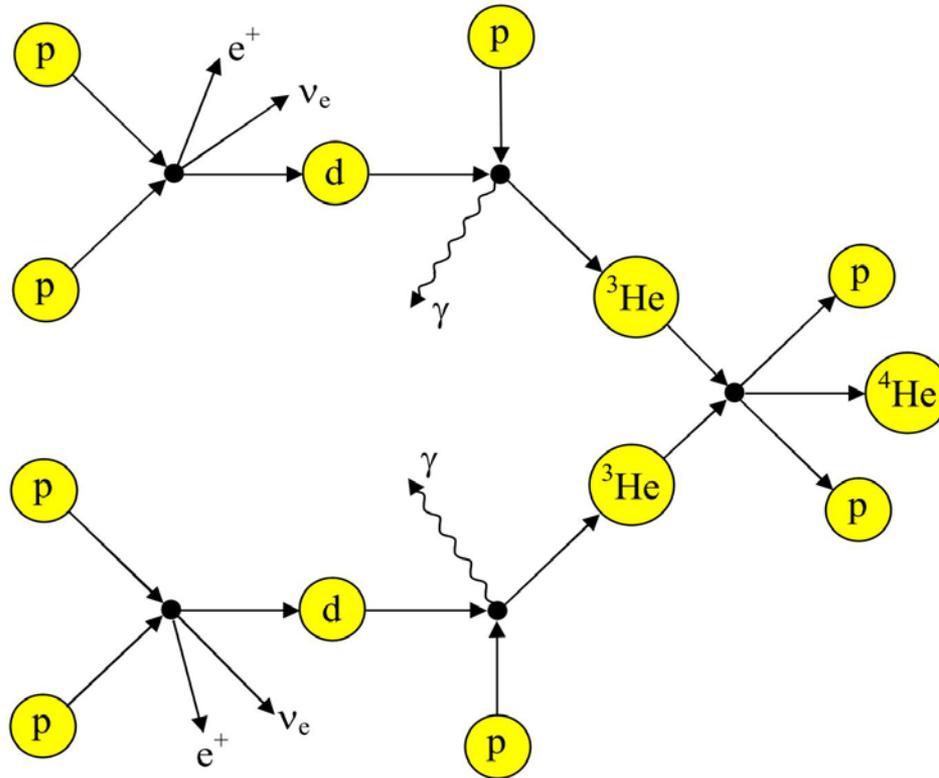
$$T = 10^7 \text{ К}$$



Образование ${}^4\text{He}$



Образование ${}^4\text{He}$



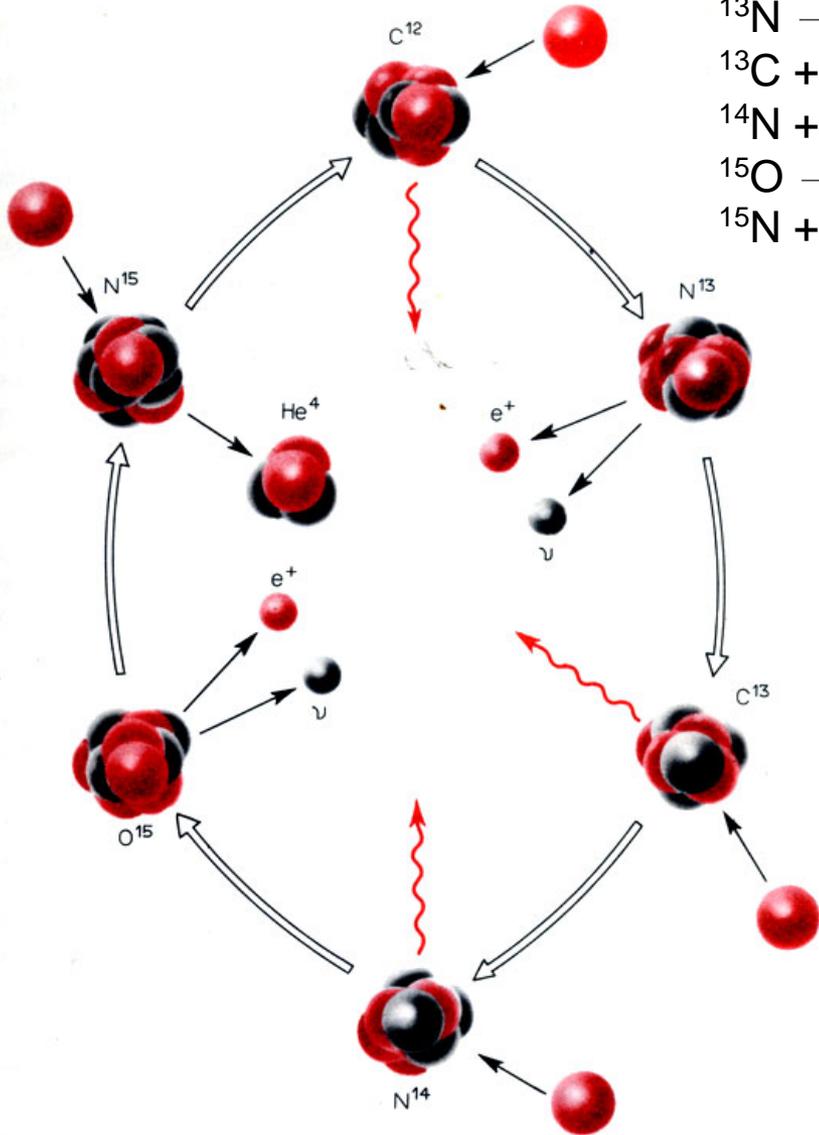
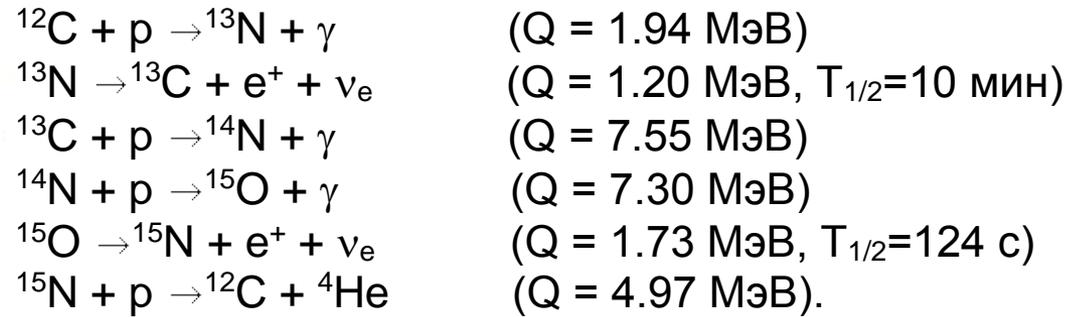
$$\rho = 10^2 \text{ г/см}^2 \quad T = 2 \cdot 10^6 \text{ К}$$



$$E \approx 25 \text{ МэВ} \quad W_{\odot} \approx 4 \cdot 10^{26} \text{ Вт}$$

$$\Delta E = \Delta M c^2 \approx 4,4 \cdot 10^{12} \text{ г/сек} = 4,4 \text{ млн тонн/сек}$$

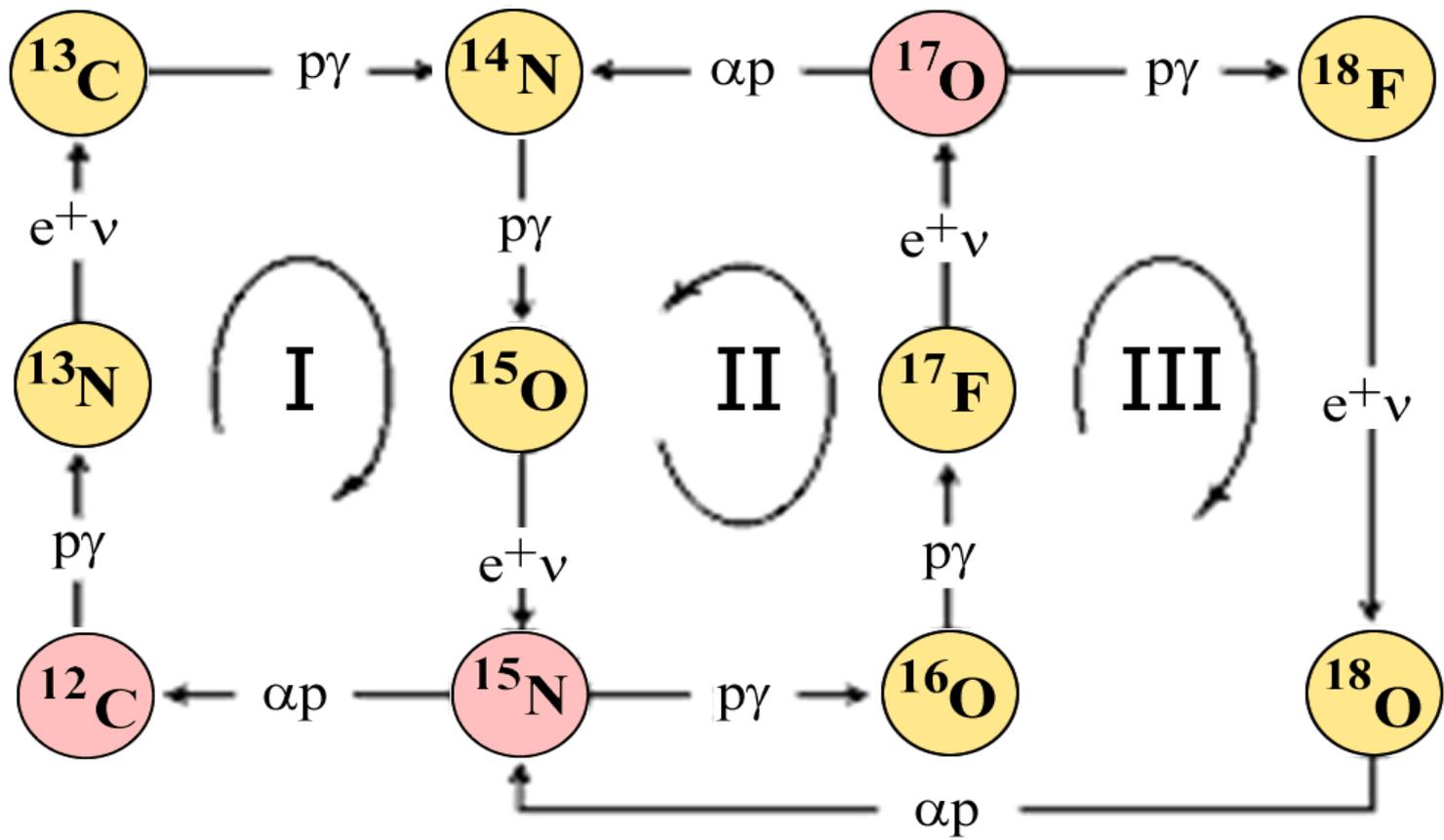
Цепочка реакций I



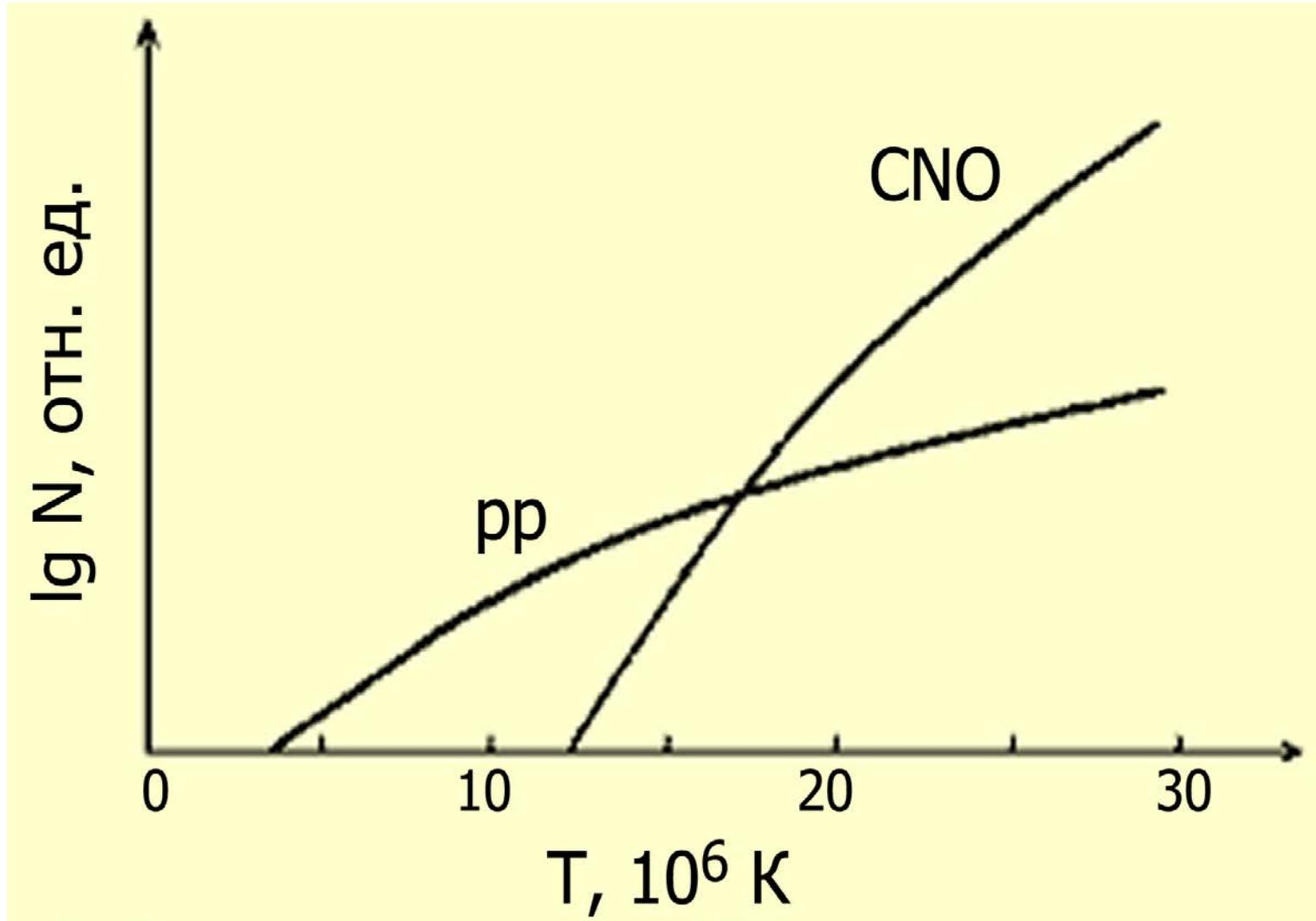
СНО - цикл

CNO - ЦИКЛ

$T > 10^7$ К

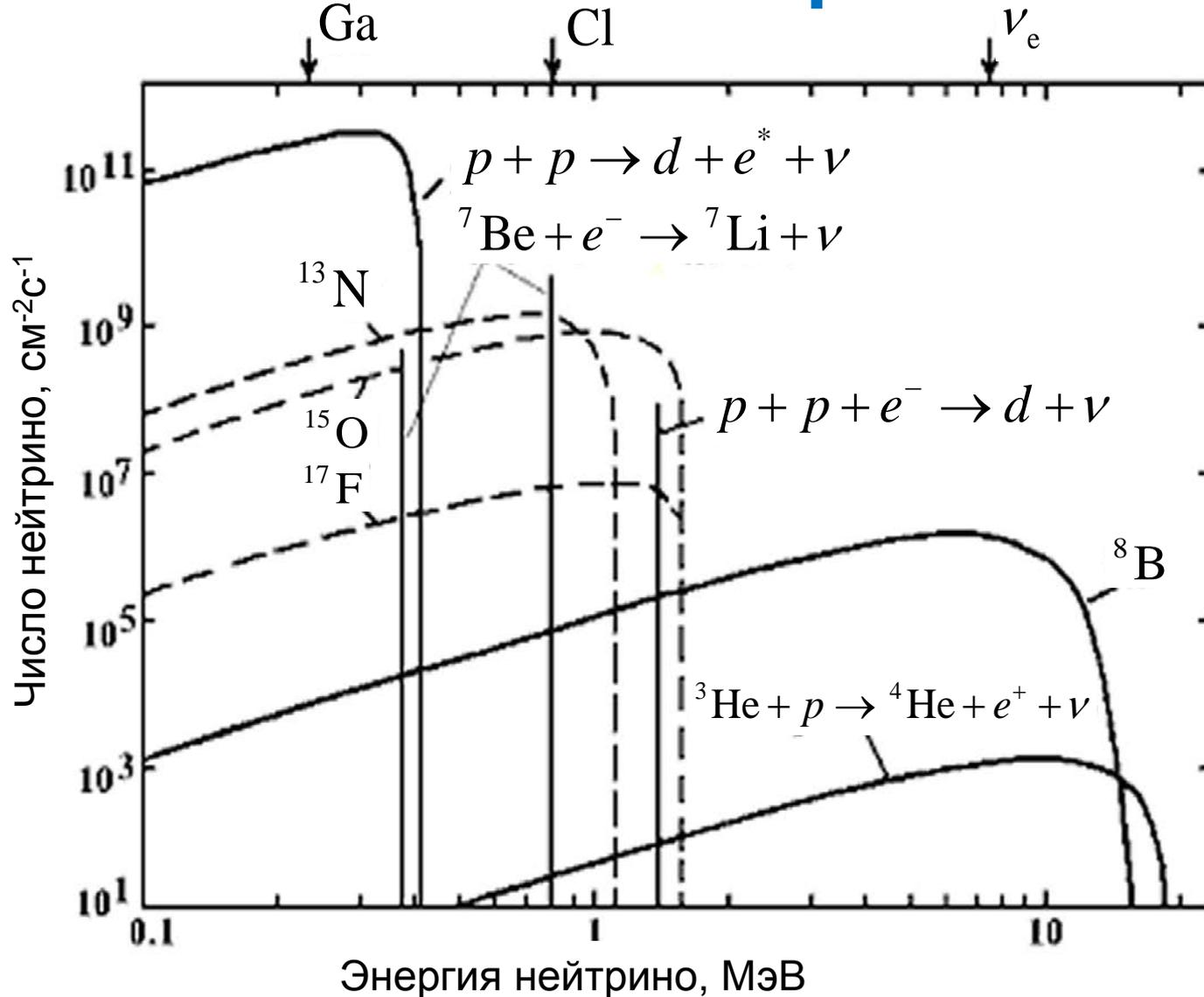


pp и CNO-циклы



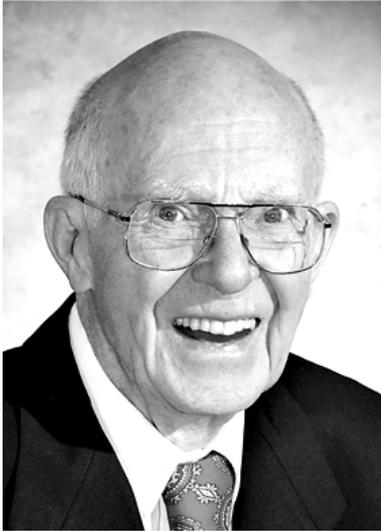
Температура в недрах Солнца $\sim 13 \cdot 10^6$ K, поэтому оно светит в основном за счет энергии, выделяющейся в водородном цикле.

Солнечные нейтрино



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

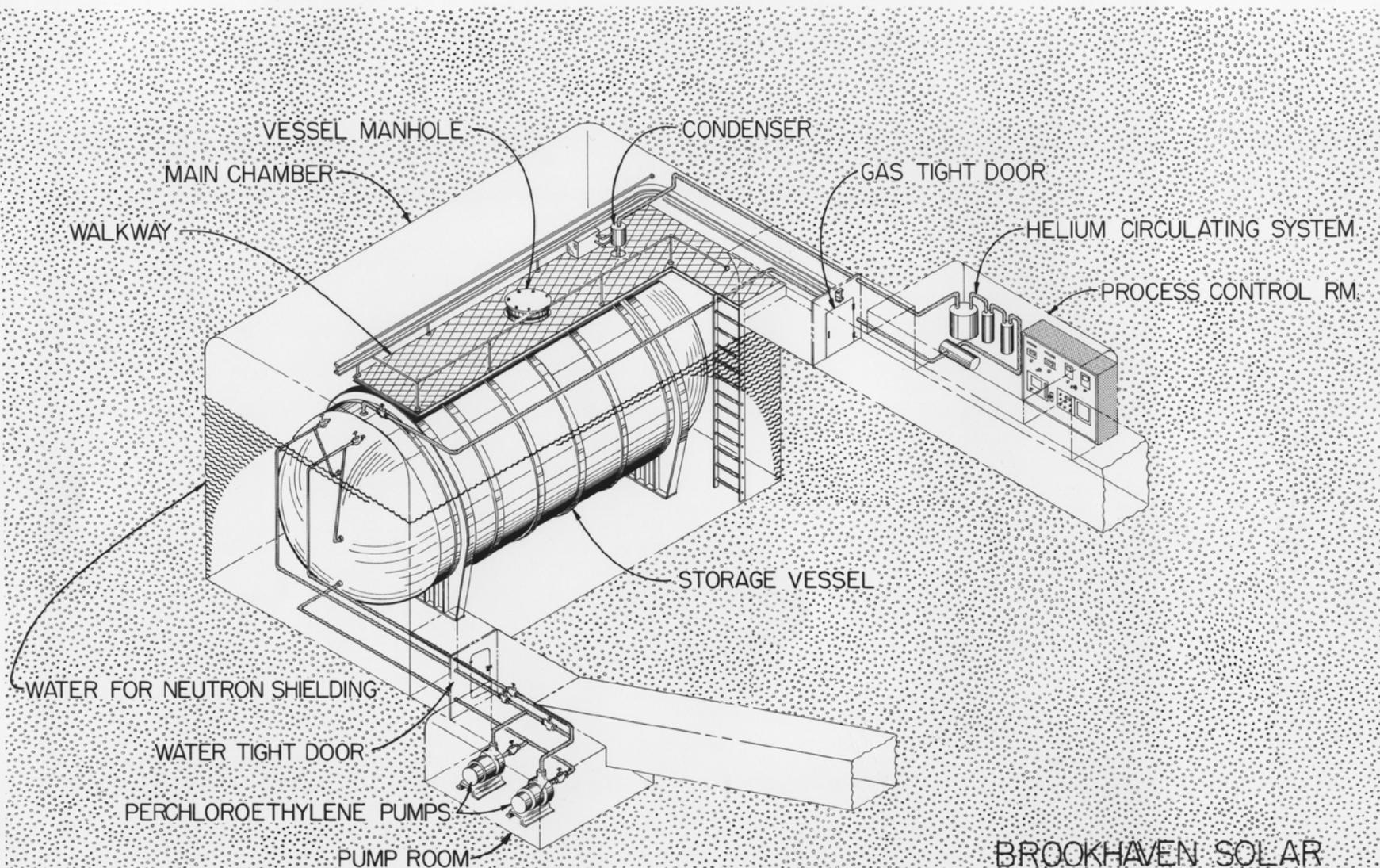
Детектор Дэвиса



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

Для регистрации солнечных нейтрино Дэвисом был сконструирован детектор, содержащий 380 тыс. литров раствора четыреххлористого углерода.

Детектор Дэвиса

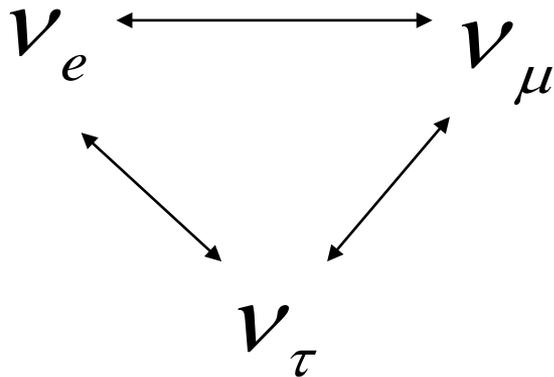


BROOKHAVEN SOLAR
NEUTRINO OBSERVATORY
DRAWN BY A.C. FINOCCHIO 5-23-66

Проблема солнечных нейтрино

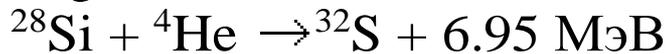
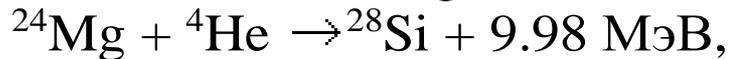
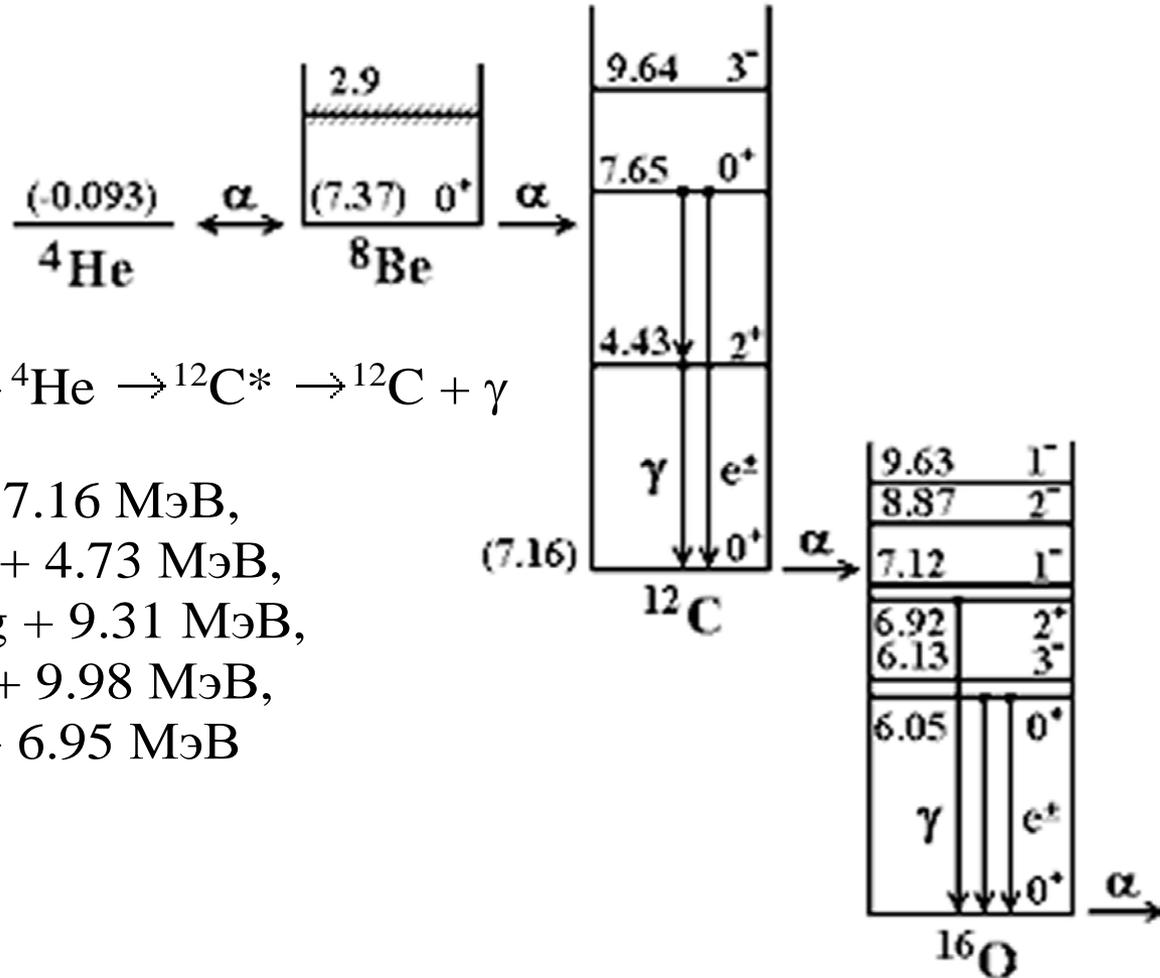
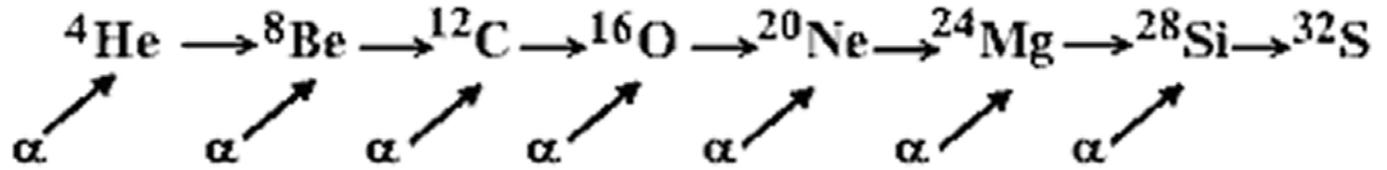
Поток нейтрино от Солнца оказался примерно вдвое меньше, чем предсказывала Стандартная солнечная модель!!!

Осцилляции нейтрино



$T > 10^8 \text{ K}$

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 -частичных ядер



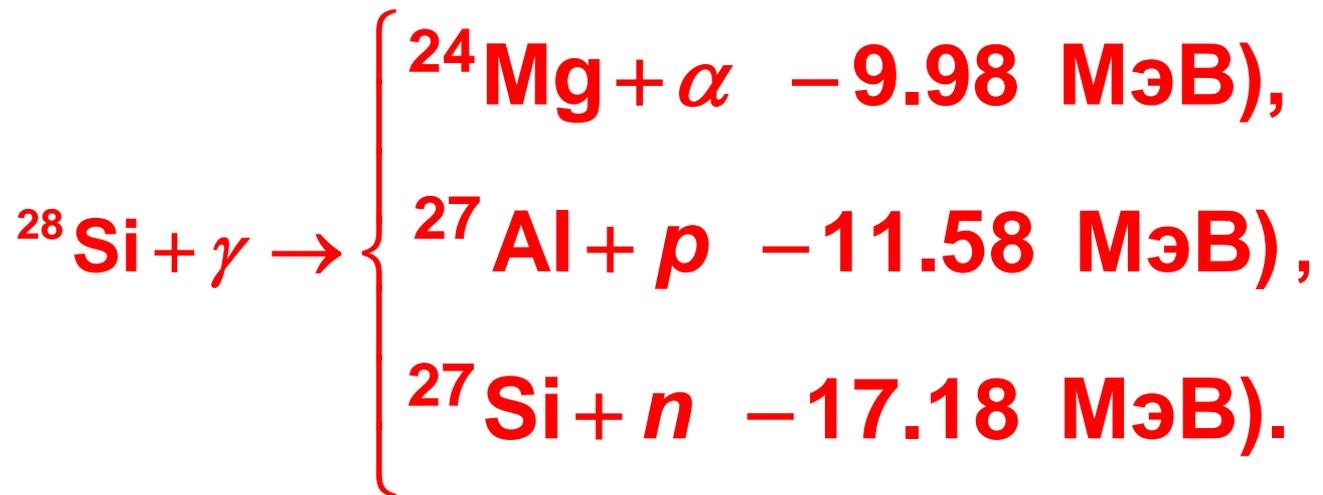
и реакции слияния углерода и кислорода



Фотоядерные реакции в звездах $T > 10^9$ К

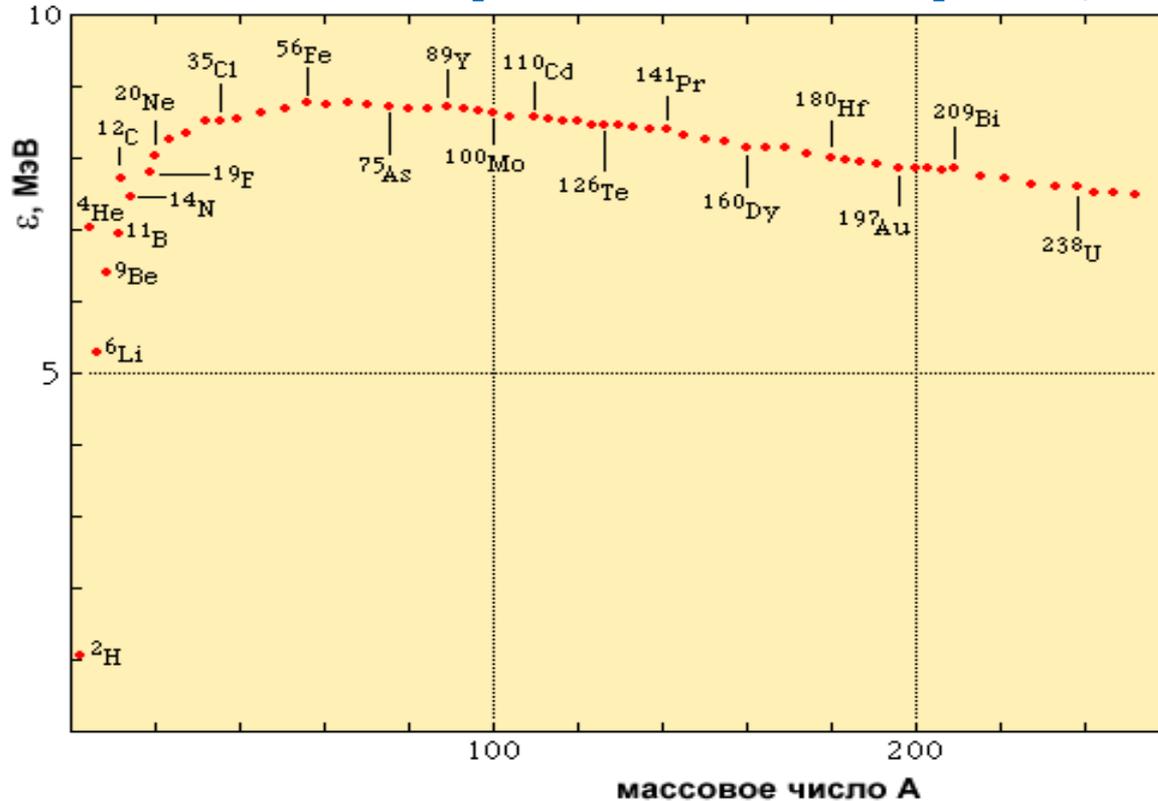
$T \sim 10^9$ К. Существенную роль начинают играть электромагнитные процессы – реакции под действием γ -квантов и электронов. Наряду с ростом энергии фотонов с увеличением температуры ($E_\gamma \sim T$) растёт их число ($N_\gamma \sim T^4$).

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.

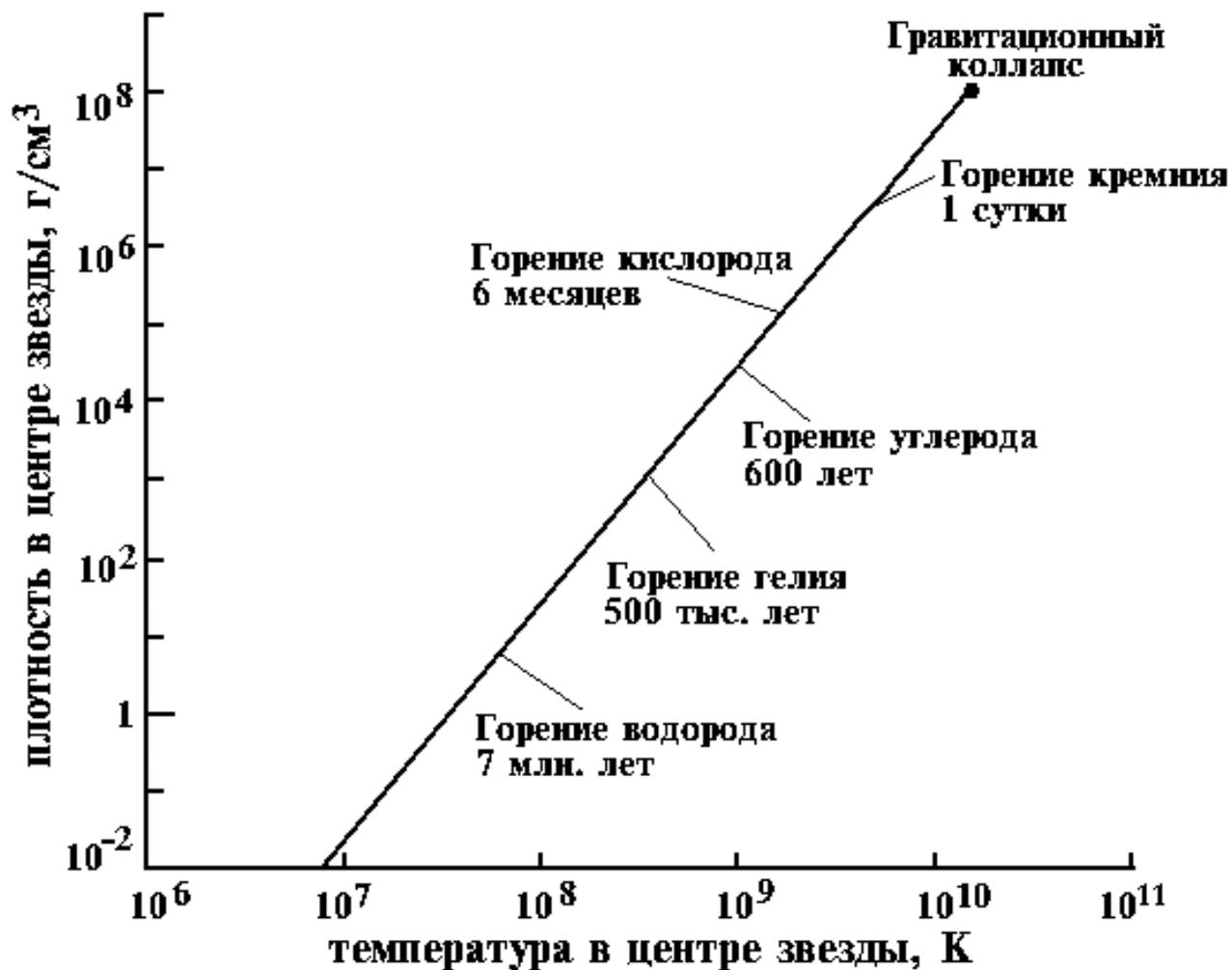
Удельная энергия связи ядра $\epsilon(A, Z)$



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 $M > 25M_{\odot}$



$$M > 25M_{\odot}$$

Эволюция массивной звезды

