



Микромир и Вселенная 2019

НУКЛЕОСИНТЕЗ I

Как загораются звезды?

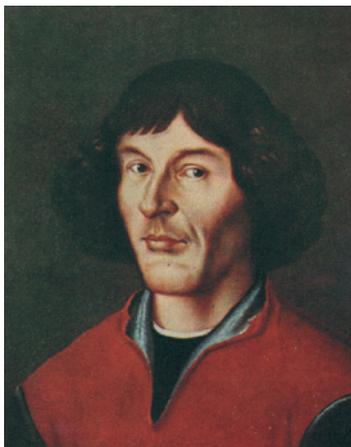
Геоцентрическая система Вселенной



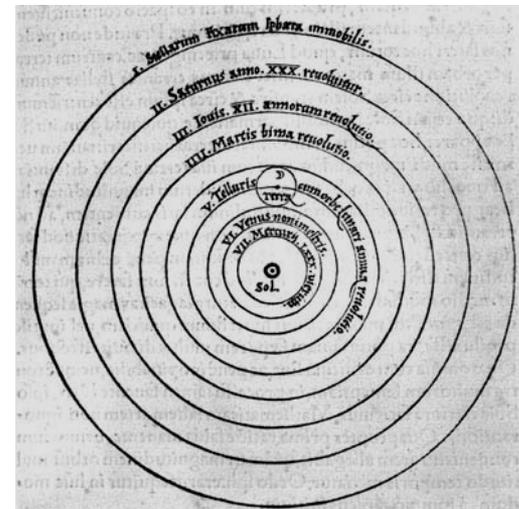
Птолемей
(87 - 150)



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 $R^3/T^2 = \text{Const}$
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**.

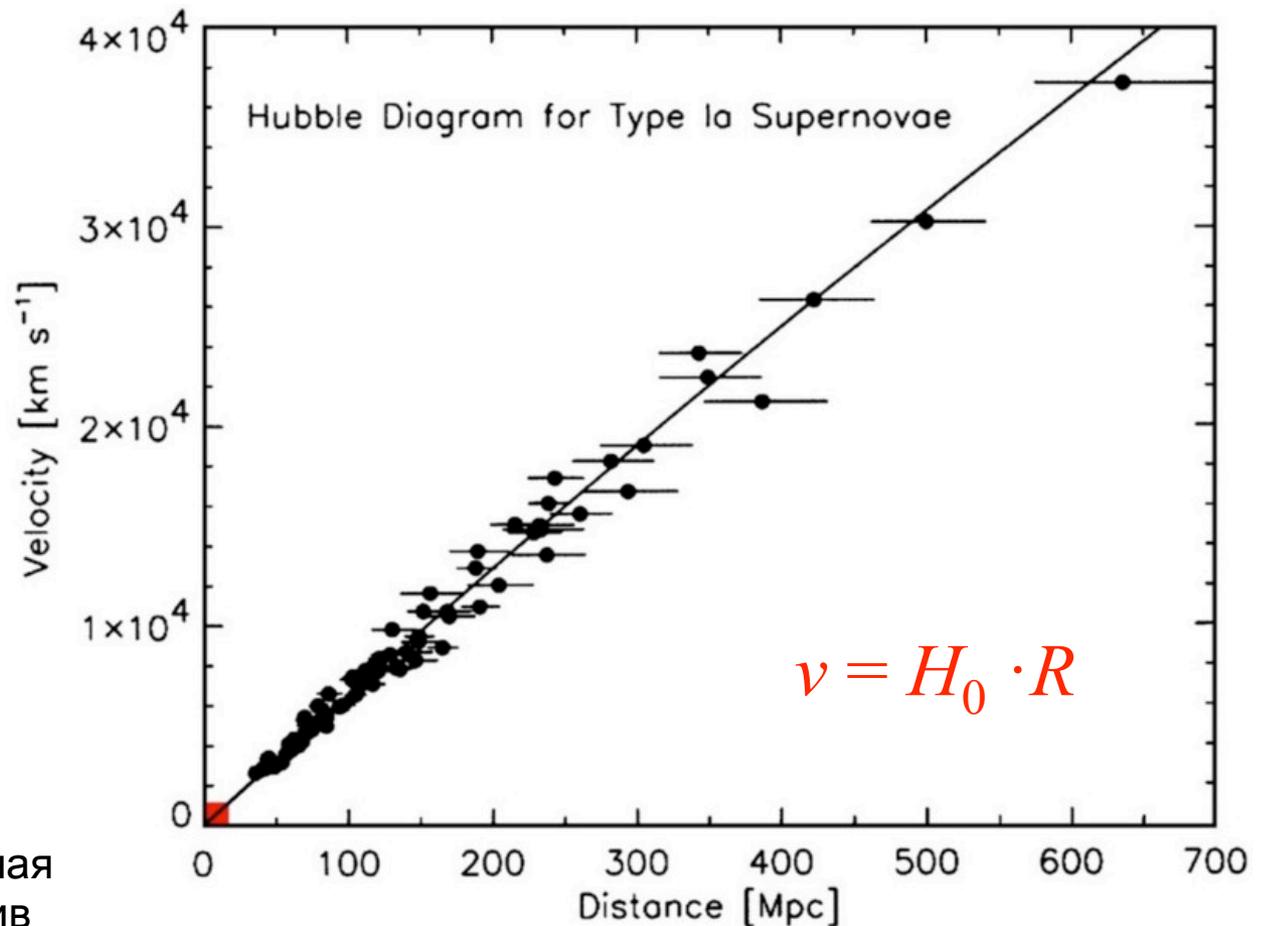
$$L = \int_0^{\infty} \left(\frac{l}{4\pi r^2} \right) 4\pi n r^2 dr = nl \int_0^{\infty} dr = \infty$$

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

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.

$$T > 10^{10} \text{ К:}$$



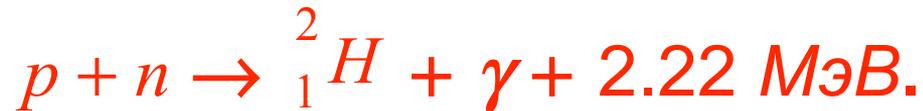
$$W = Ae^{-E/kT}$$

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

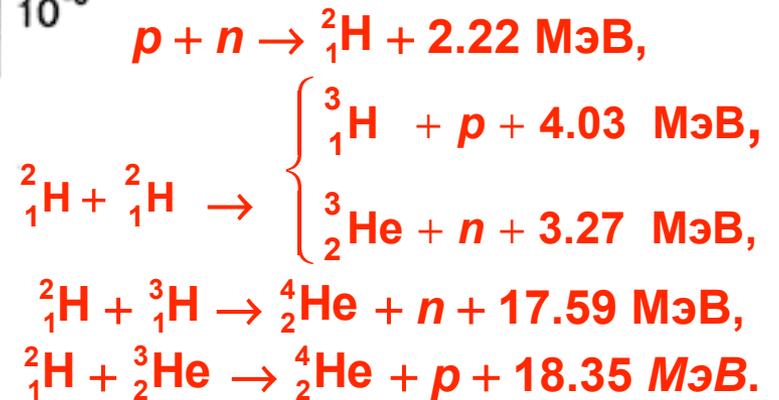
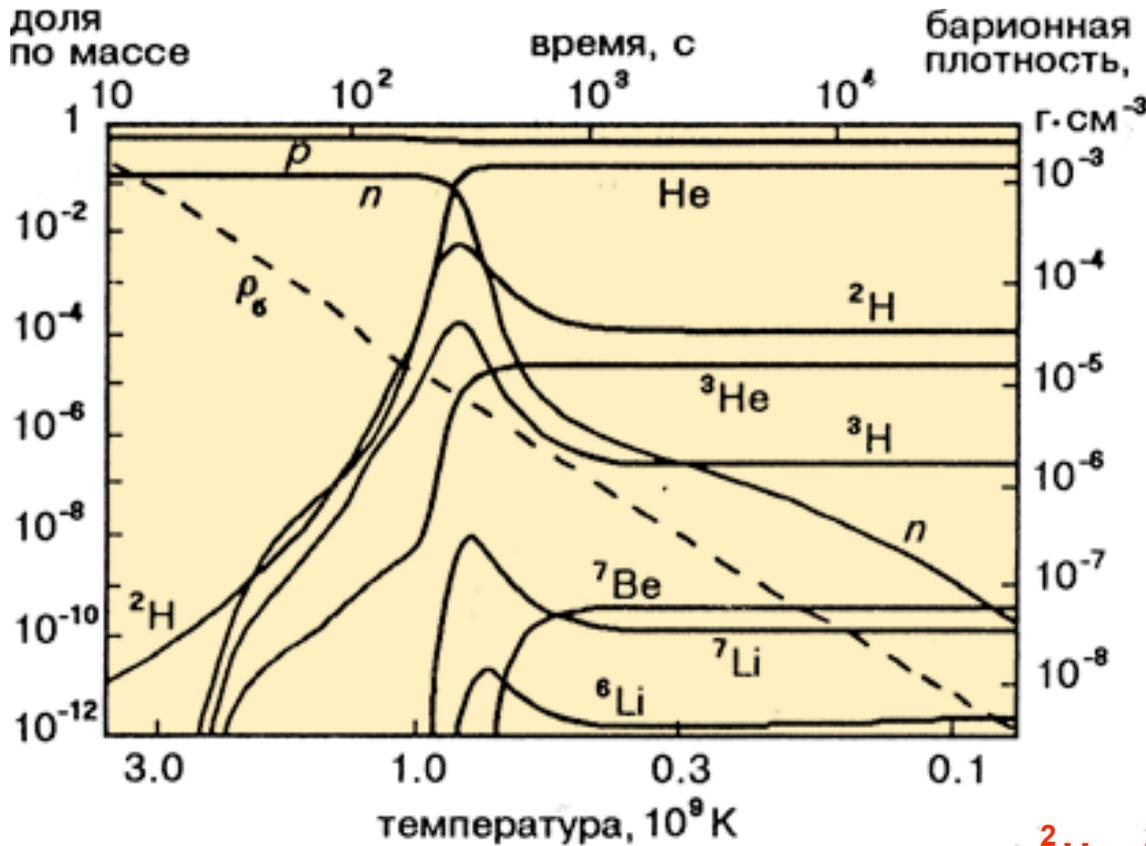


Накоплению дейтерия за счёт этой реакции на первых порах препятствует интенсивное разрушение дейтерия фотонами в обратном процессе фотодиссоциации. Отношение числа фотонов n_γ к числу барионов n_b :

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

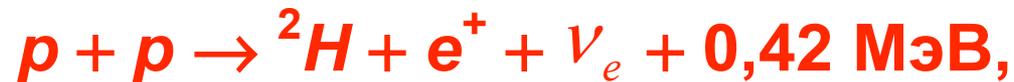
Поэтому начало синтеза дейтерия и всей цепочки первичного нуклеосинтеза задерживается примерно до 100-й секунды после Большого Взрыва, когда средняя кинетическая энергия частиц уменьшается до 0.1 МэВ. Вселенная к этому времени остывает до 10^9 К.

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

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

$$t = 13,7 \text{ млрд. лет}$$

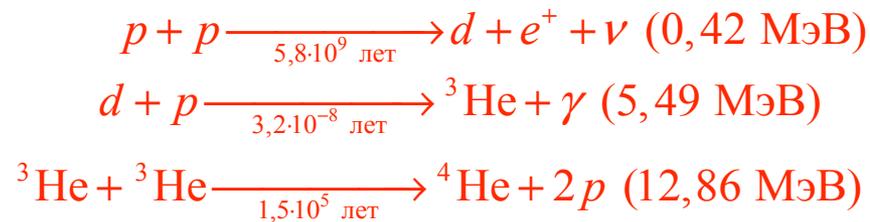
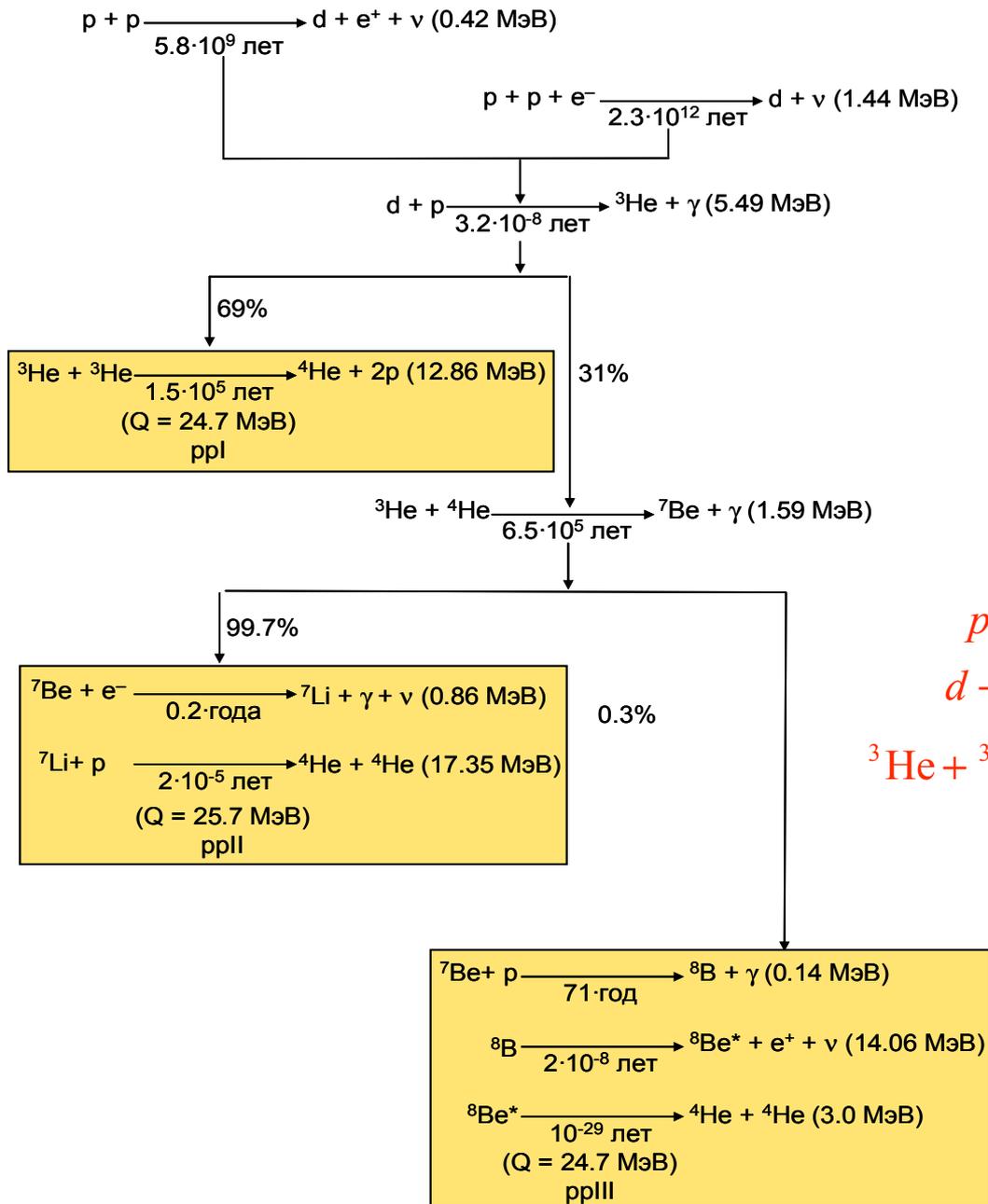
Современная Вселенная

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

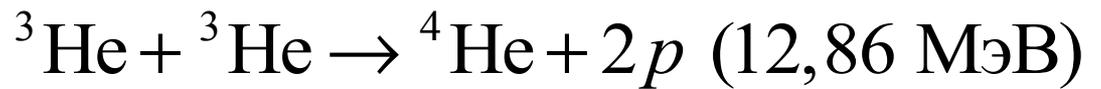
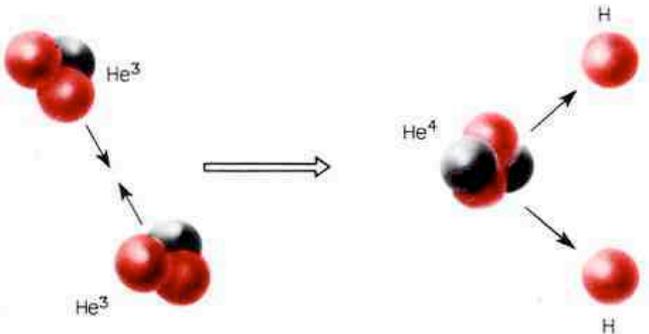
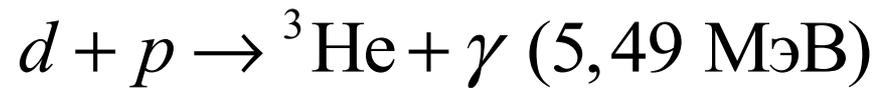
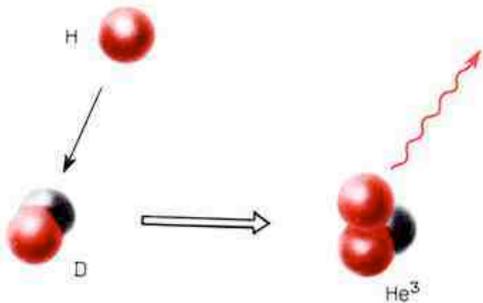
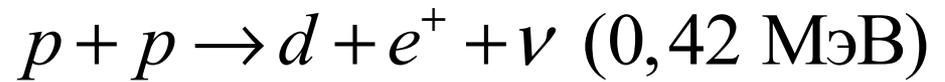
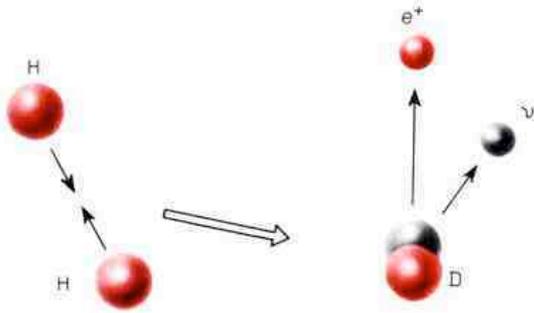
ПЕРВЫЕ ЗВЕЗДЫ

Горение водорода

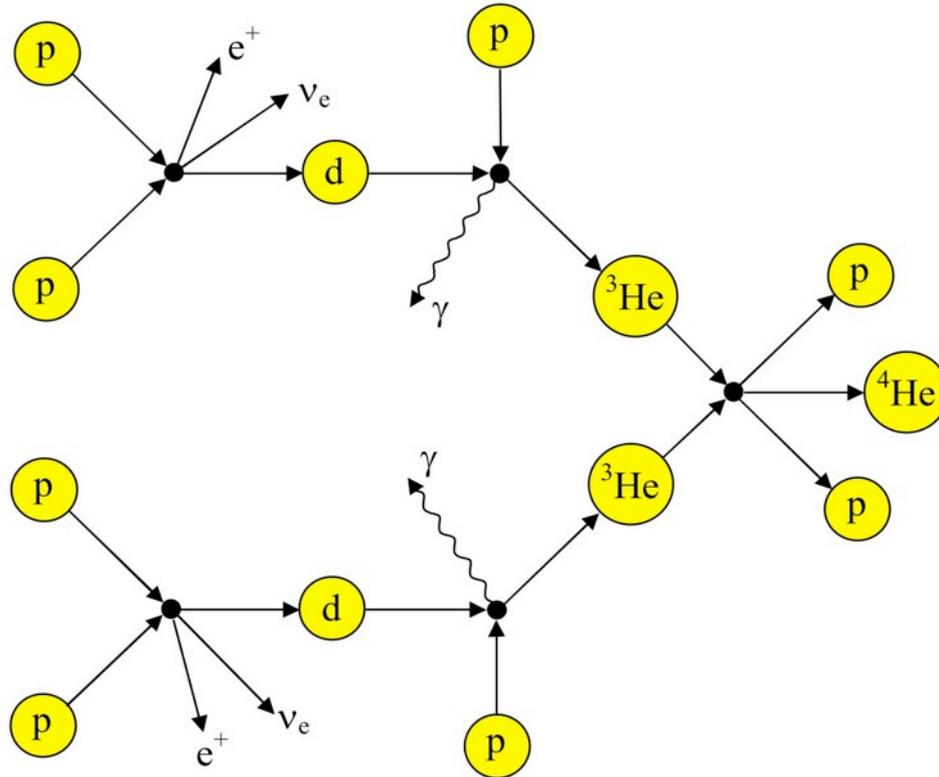
$$T = 10^7 \text{ К}$$



Образование ${}^4\text{He}$



Образование ^4He



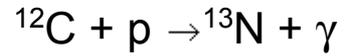
$$\rho = 10^2 \text{ г/см}^2 \quad T = 2 \cdot 10^6 \text{ К}$$



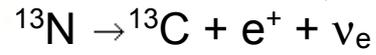
$$E \approx 25 \text{ МэВ} \quad W_{\odot} \approx 4 \cdot 10^{26} \text{ Вт}$$

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

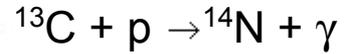
Цепочка реакций I



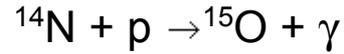
(Q = 1.94 МэВ)



(Q = 1.20 МэВ, $T_{1/2}=10$ мин)



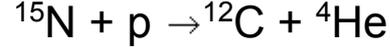
(Q = 7.55 МэВ)



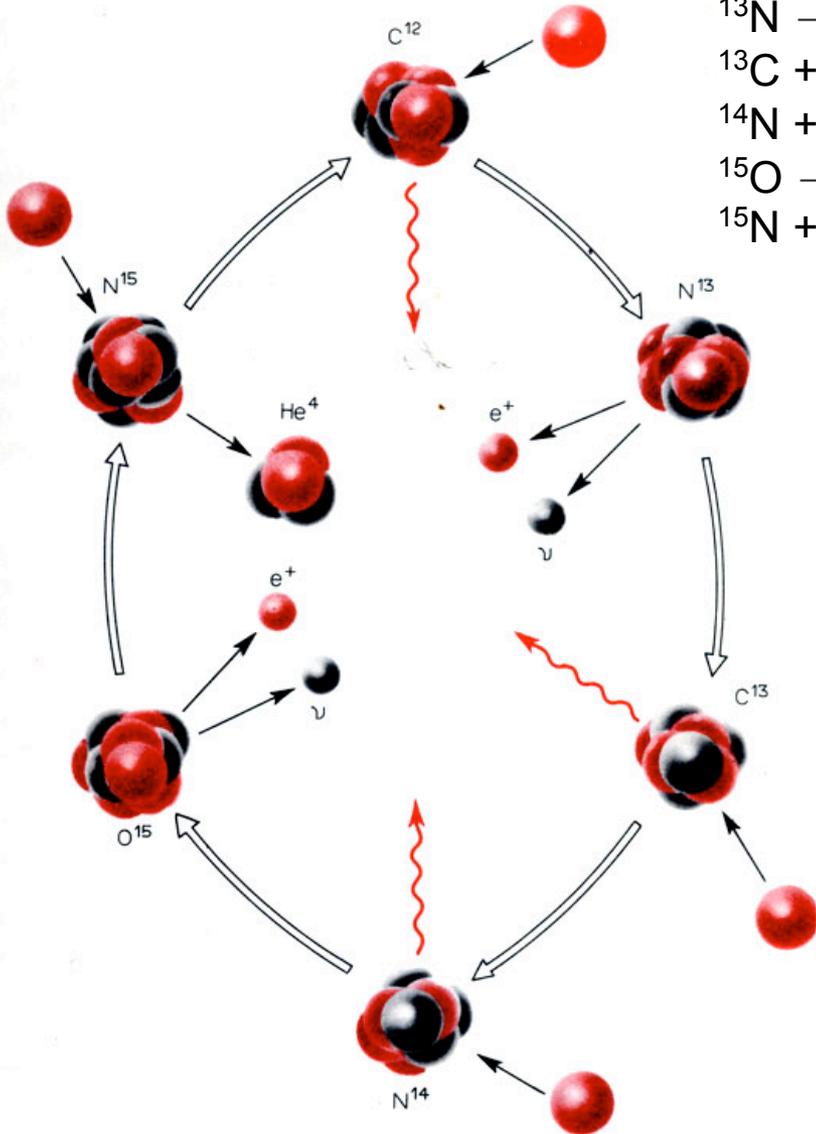
(Q = 7.30 МэВ)



(Q = 1.73 МэВ, $T_{1/2}=124$ с)



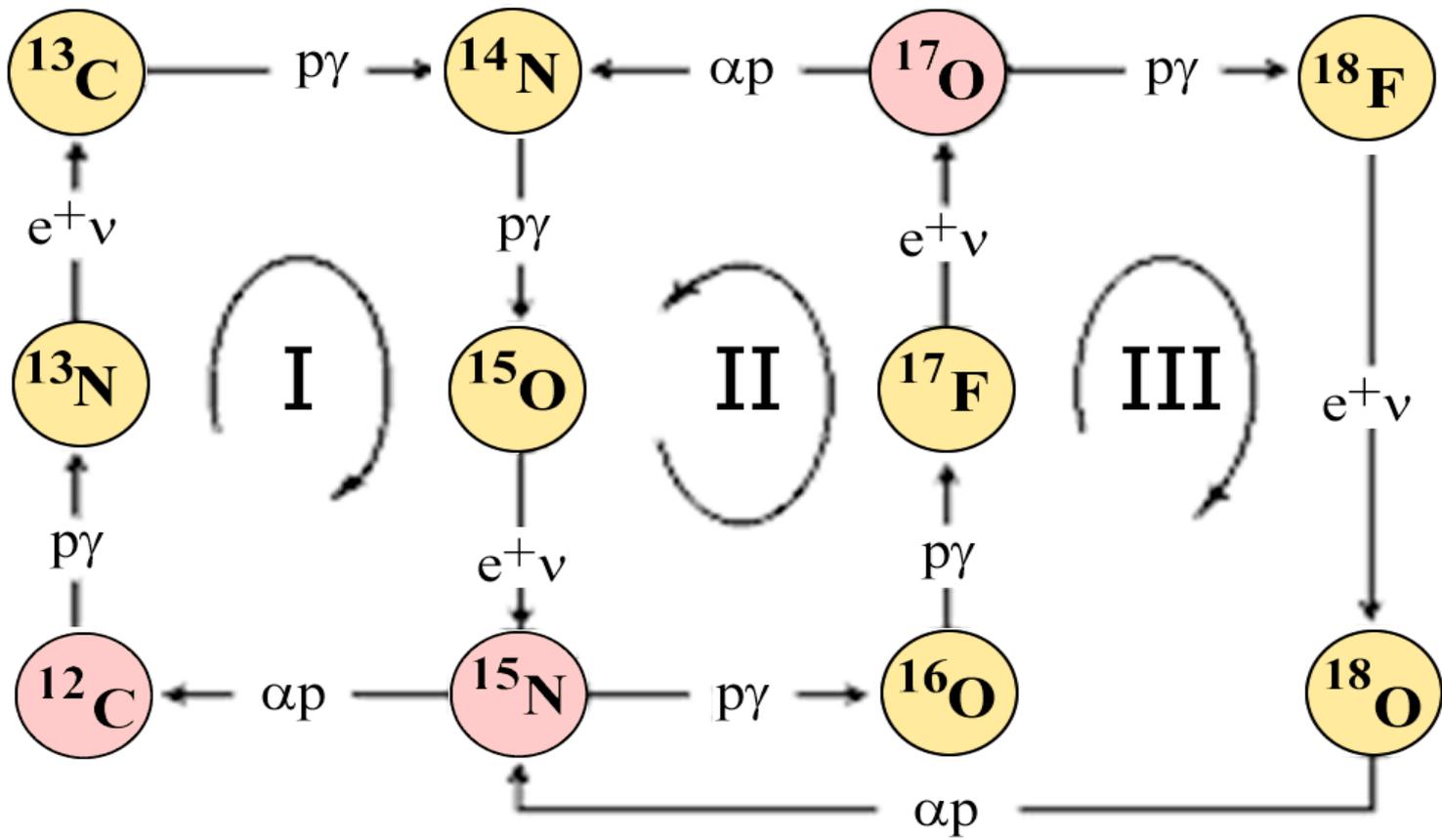
(Q = 4.97 МэВ).



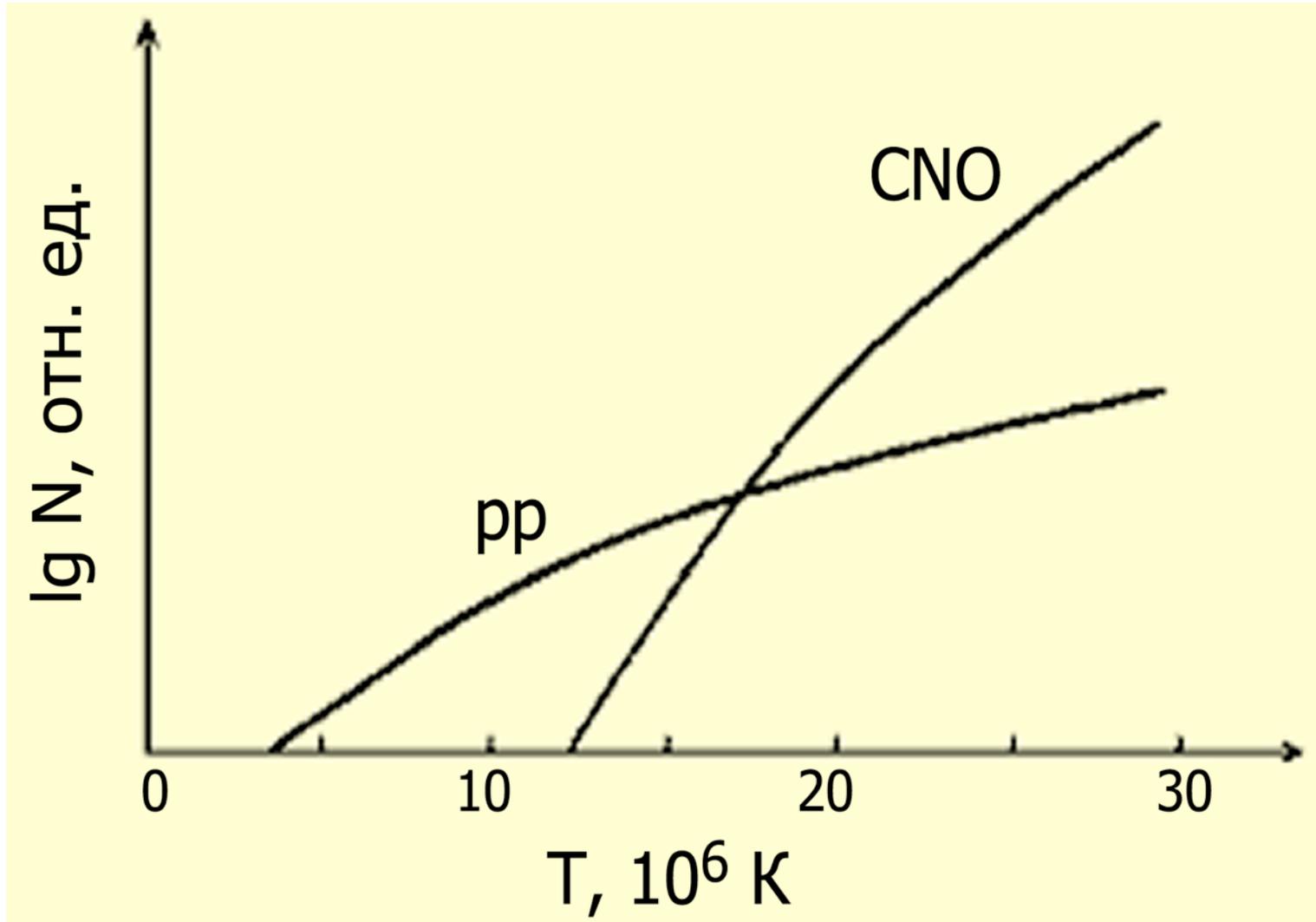
CNO - ЦИКЛ

CNO - ЦИКЛ

$T > 10^7$ К

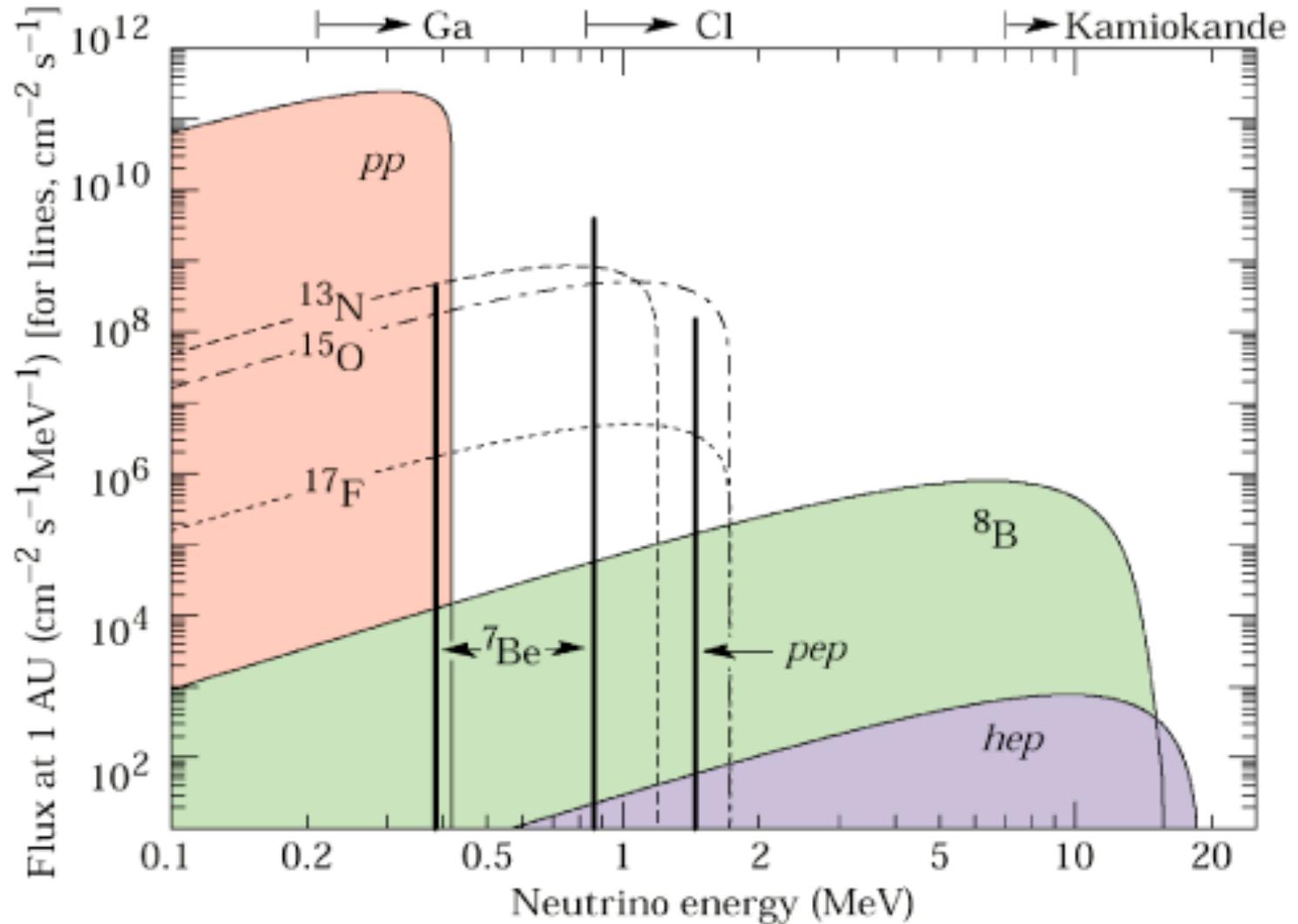


pp и CNO-циклы



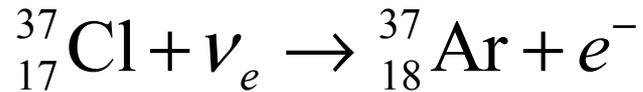
Температура в недрах Солнца $\sim 13 \cdot 10^6$ К, поэтому оно светит в основном за счет энергии, выделяющейся в водородном цикле.

Солнечные нейтрино



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

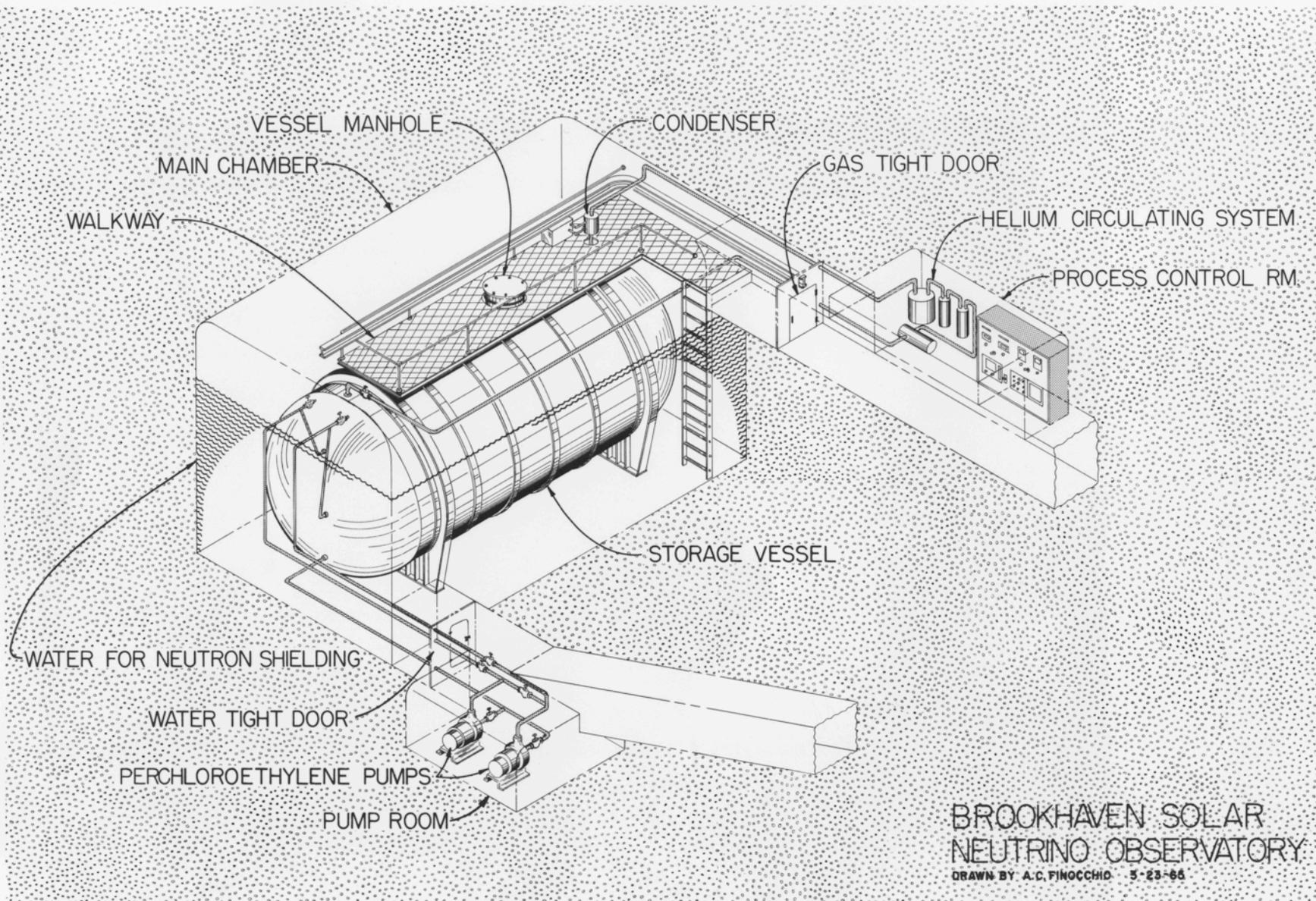
Детектор Дэвиса



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

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

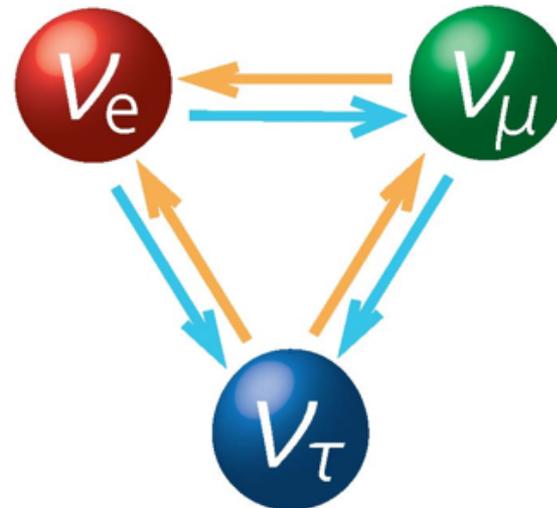
Детектор Дэвиса



Проблема солнечных нейтрино

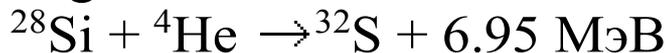
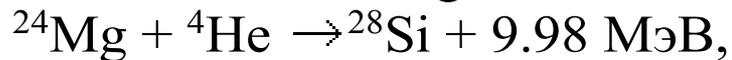
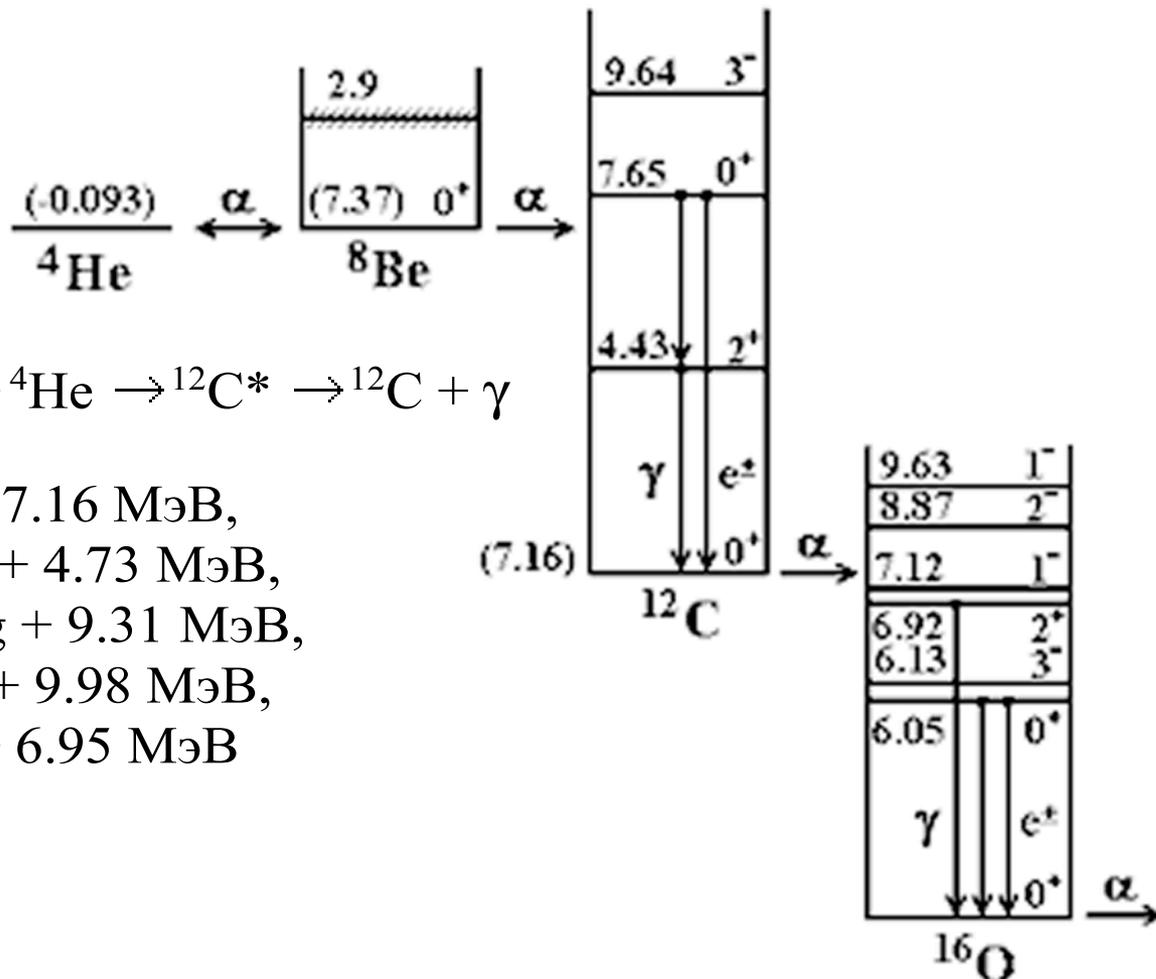
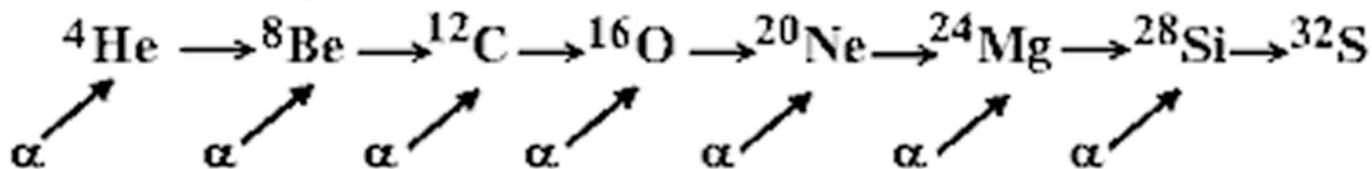
Поток нейтрино от Солнца оказался примерно вдвое меньше, чем предсказывала Стандартная солнечная модель!!!

**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 ($> 10M_e$), то в результате термоядерного горения в ней последовательно образуются всё более тяжелые ядра в результате последовательного захвата ядер гелия с образованием α -частичных ядер



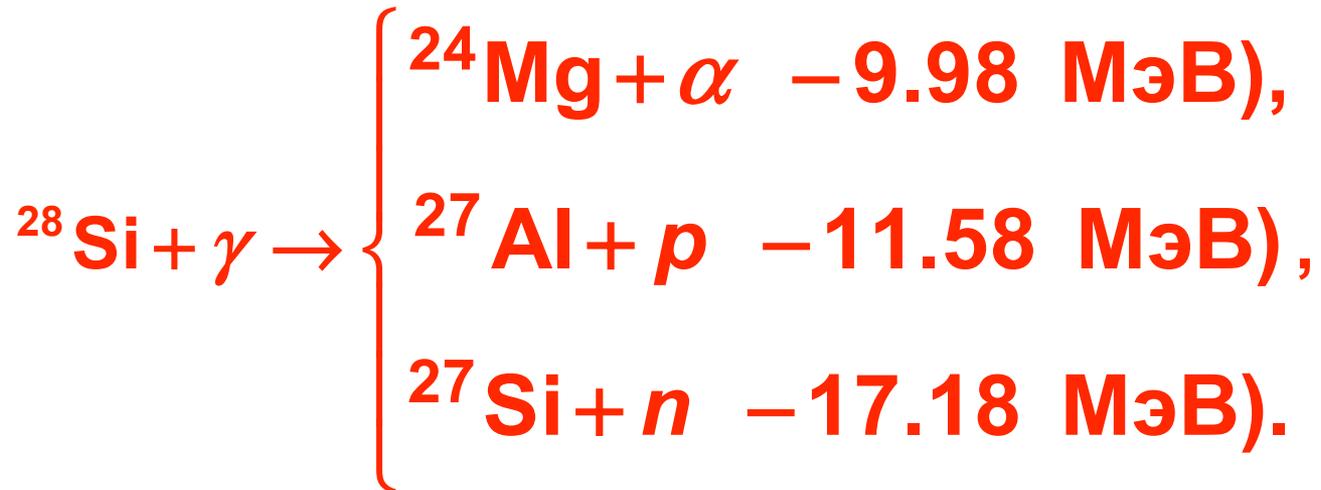
и реакции слияния углерода и кислорода



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

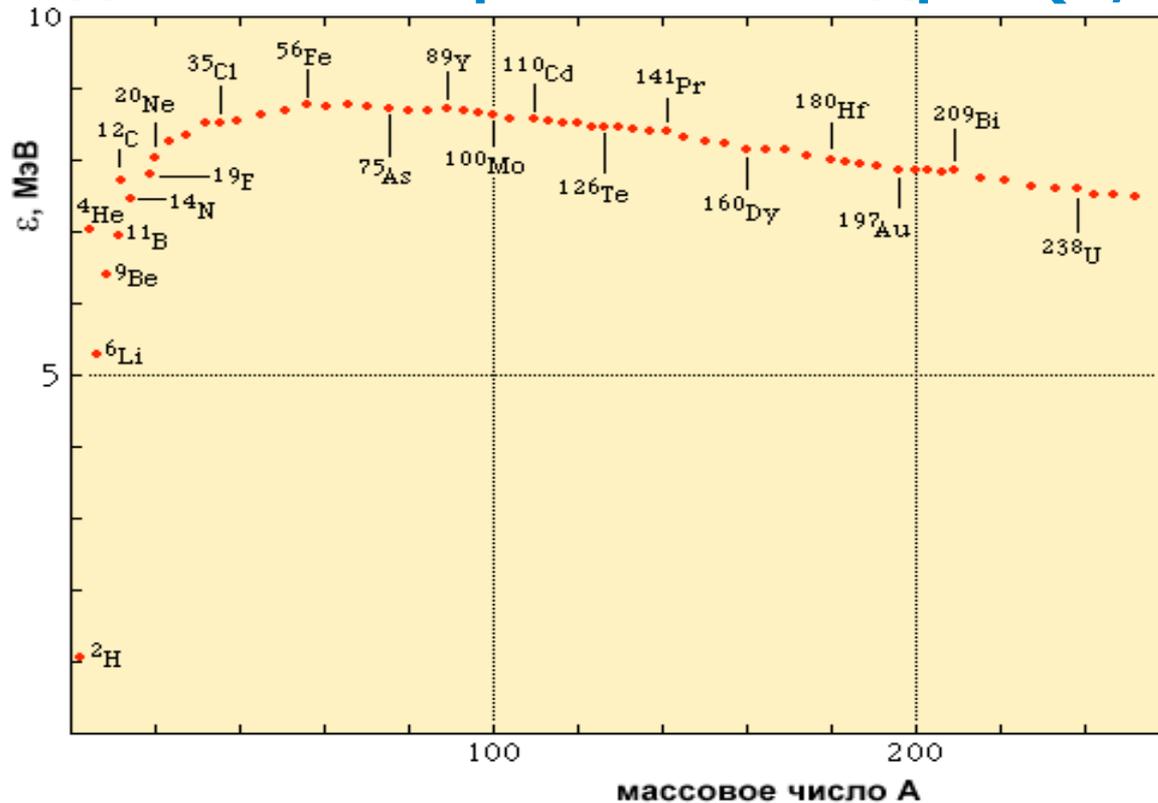
$T \sim 10^9$ К. Существенную роль начинают играть электромагнитные процессы – реакции под действием γ -квантов и электронов. Наряду с ростом энергии фотонов с увеличением температуры ($E_\gamma \sim T$) растёт их число ($N_\gamma \sim T^4$).

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 $\epsilon(A, Z)$

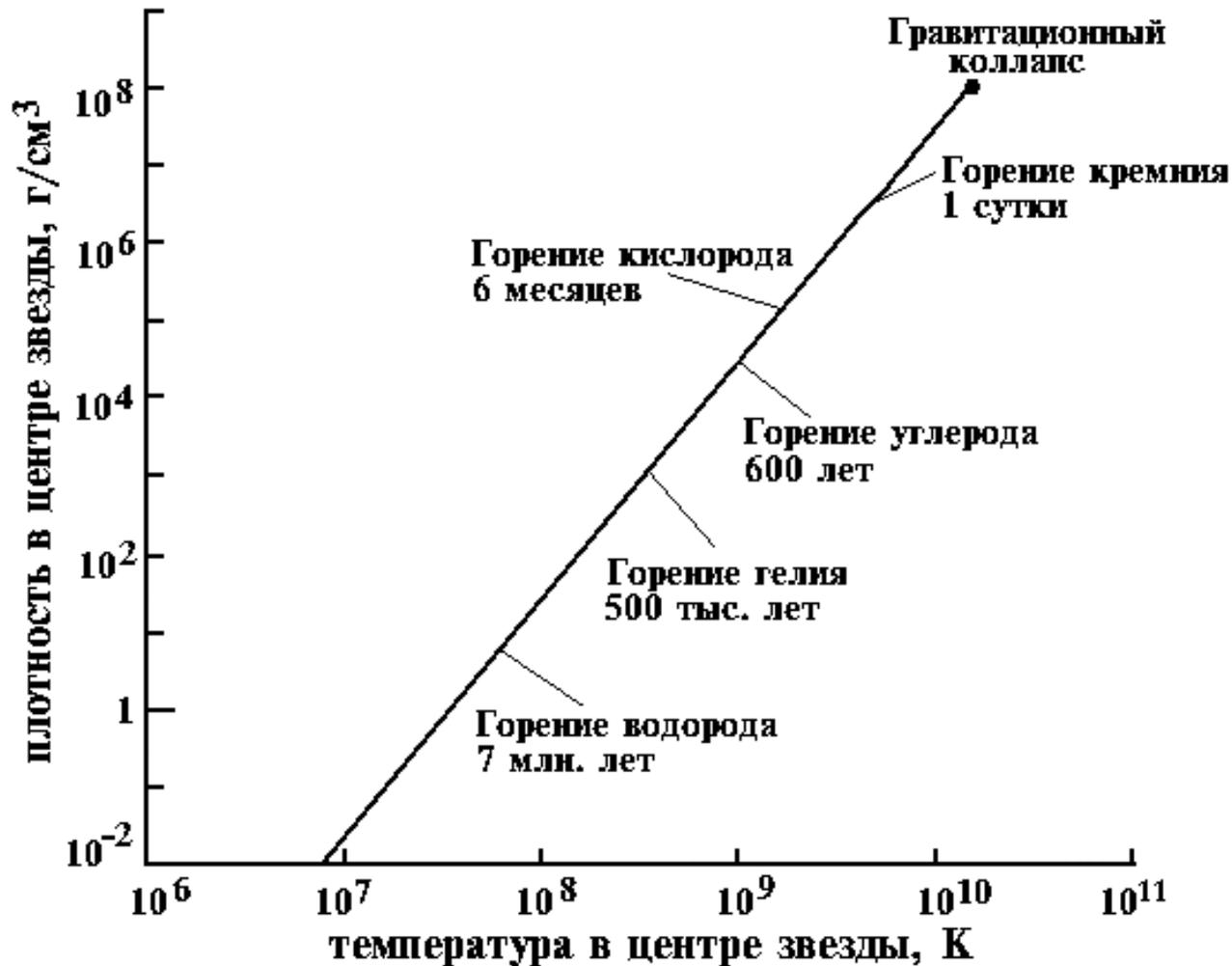


Ядерные реакции синтеза в звёздах различной массы

Масса, M_e	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

$$M > 25M_e$$



$$M > 25M_e$$

Эволюция массивной звезды

