

# Мир атомных ядер

# **Эволюция представлений о Вселенной**

# Земля



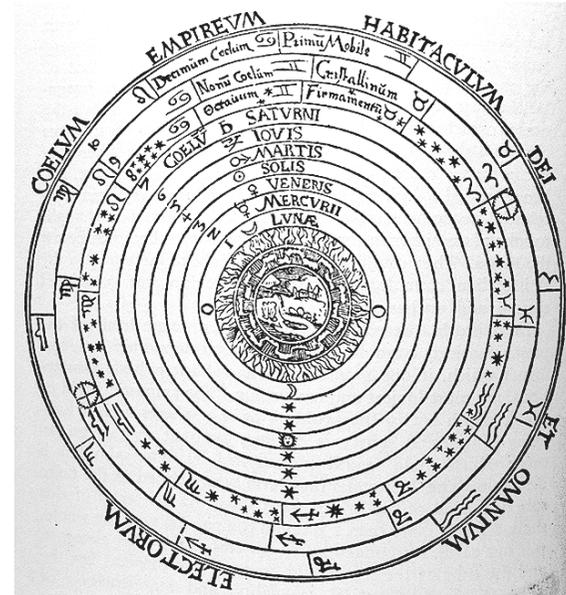
В самых ранних представлениях Земля считалась плоской поверхностью, покрытой куполом, усеянным звездами.

Однако уже в VI веке до н.э. Пифагор считал, что Земля имеет форму шара. В качестве доказательства он приводил круглую тень Земли, падающую на Луну во время лунных затмений.

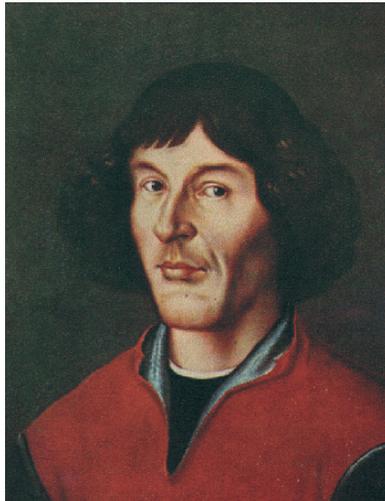
## Геоцентрическая система Вселенной



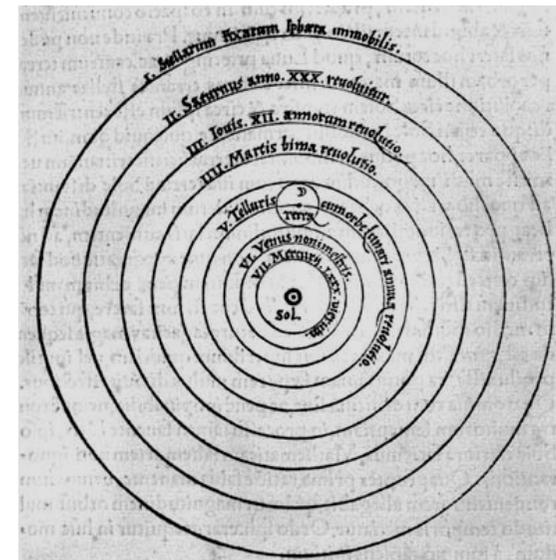
Claudius Ptolemaeus (87 - 150)



## Гелиоцентрическая система Вселенной



Nicolaus Copernicus (1473 - 1543)



# 1609-1611 гг. Законы Кеплера



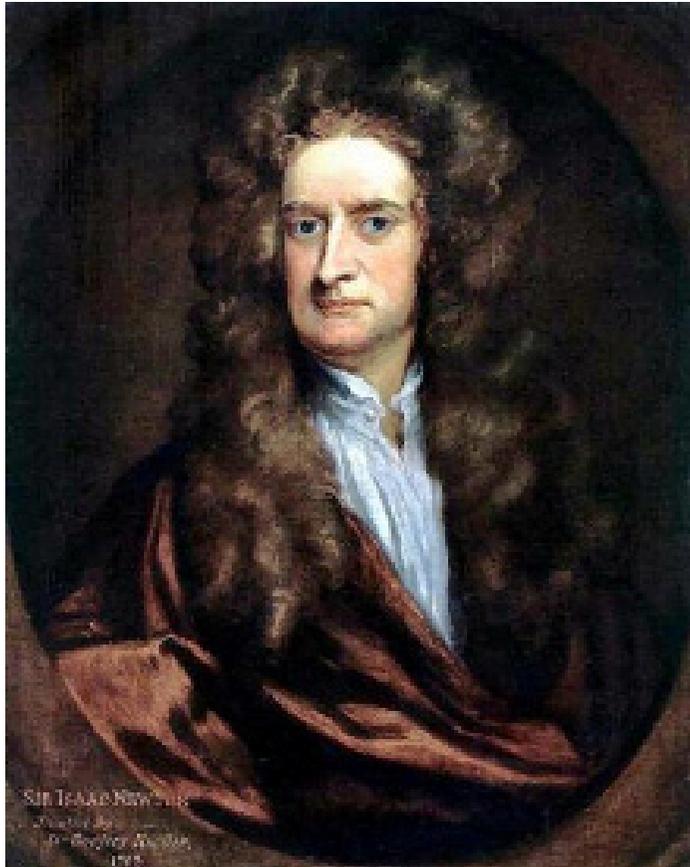
Иоганн Кеплер  
1571 – 1630

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  $\text{const}$  имеет одно и то же значение для всех планет.

# Стационарная Вселенная



Исаак Ньютон  
1643—1727

Закон всемирного тяготения

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

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

# Парадокс Ольберса. 1826

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.

$4\pi nr^2 dr$  — число звезд в шаровом слое  $r \div r + dr$  .

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

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



# Стационарная Вселенная

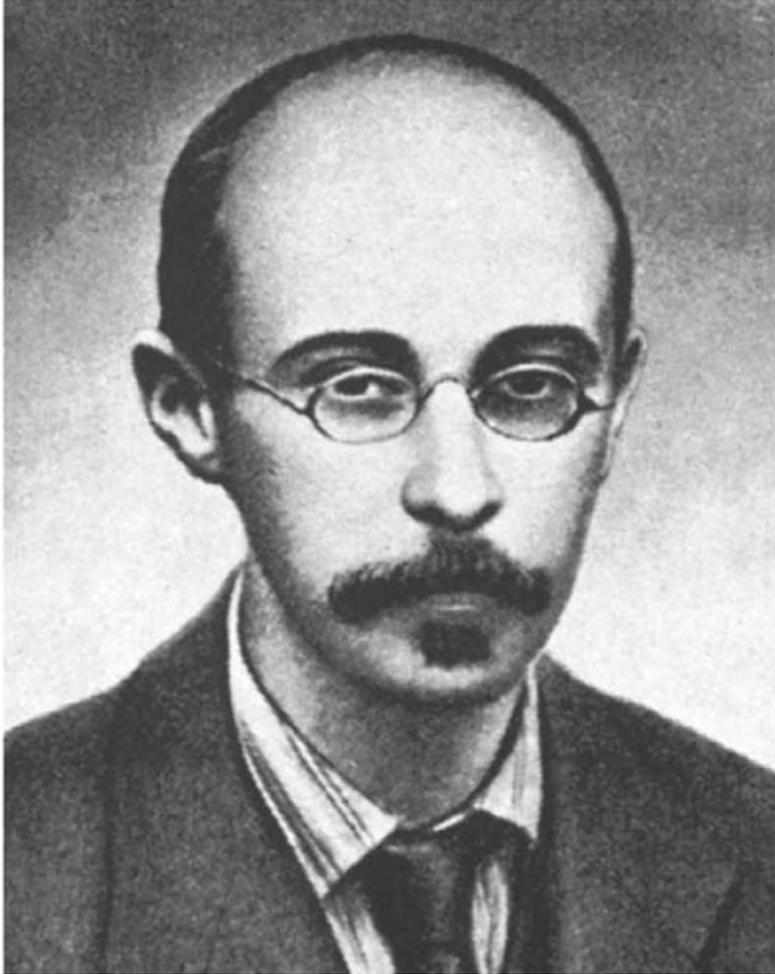


## Общая Теория Относительности

уравнение Эйнштейна с  
КОСМОЛОГИЧЕСКИМ ЧЛЕНОМ

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} \cdot R = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu} - \Lambda g_{\mu\nu}$$


# Нестационарные решения уравнения Эйнштейна



Александр Фридман

1922-1924 гг.



Жорж Леметр

1927 г.

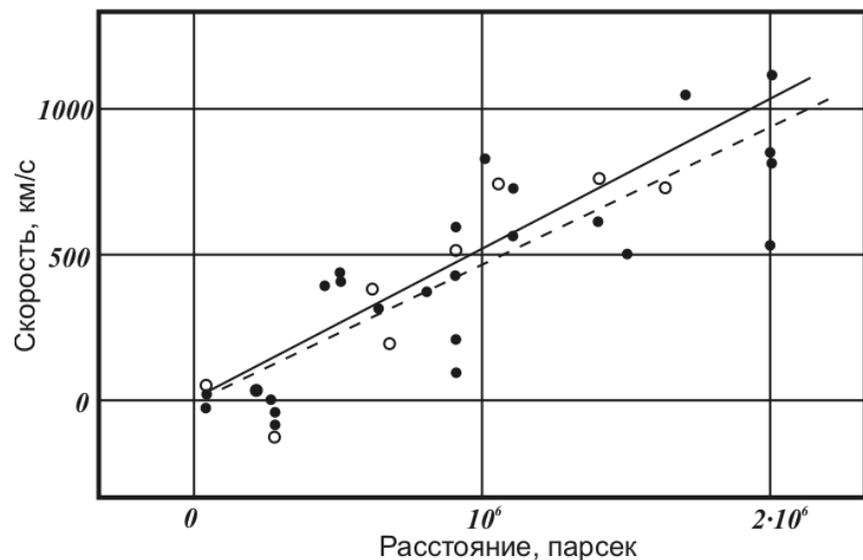
# Расширение Вселенной



Эдвин Хаббл

Обсерватория Маунт-Вилсон

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

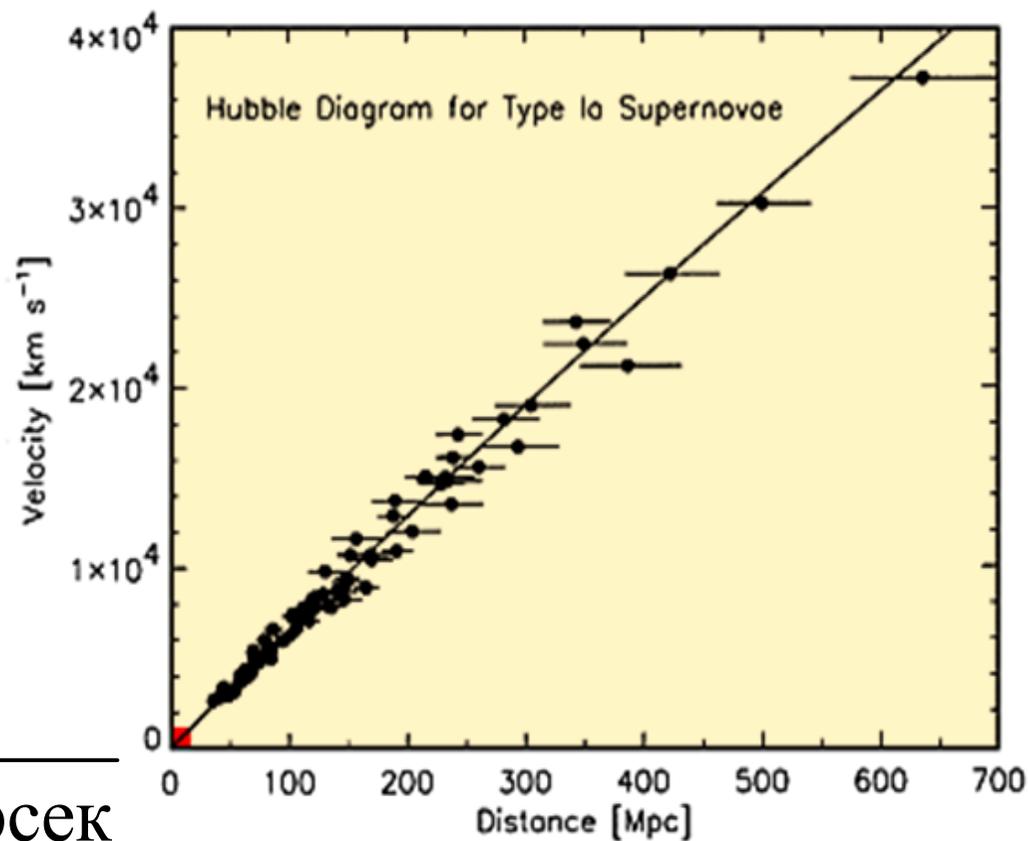


# Расширение Вселенной

$$v = H_0 \cdot R$$

постоянная Хаббла

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



# **Теория Большого Взрыва**

# Крупномасштабная структура Вселенной



На карте распределения галактик во Вселенной, построенной в таком масштабе, когда каждой галактике соответствует одна точка, обнаружилась ячеисто-сетчатая структура с характерным размером ячейки  $\sim 100$  миллионов световых лет. Внутри этих ячеек галактик практически нет. Все они располагаются на стенках ячеек. Ячейки и войды (пустоты) — самые большие структурные образования во Вселенной. Однако если рассматривать Вселенную в масштабе  $\sim 500$  миллионов световых лет, то число галактик, количество видимого вещества в таких размерах оказывается одинаковым и не зависит от того, в какой области Вселенной проводится измерение.

**На масштабах  $\sim 500$  миллионов световых лет  
Вселенная однородна и изотропна.**

# Первые секунды жизни Вселенной

**Планковский момент  $t_{\text{п}} \sim 10^{-43}$  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):

$$t_{\text{п}} = (G\hbar/c^5)^{1/2} \approx 10^{-43} \text{ с}.$$

Планковскому моменту соответствует планковский масштаб расстояний (планковская длина)

$$L_{\text{п}} = (G/c^3)^{1/2} \approx 10^{-33} \text{ см},$$

планковская энергия

$$E_{\text{п}} = (c^5/G)^{1/2} \approx 10^{19} \text{ ГэВ}$$

и температура  $T_{\text{п}} \approx 10^{32}$  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  $\Rightarrow$   $\gamma$ -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 Доплера при отражении от удаляющихся частиц. Увеличение длины волны фотонов  $\Delta\lambda$  связано с увеличением расстояния  $\Delta R$  между удаляющимися при расширении Вселенной частицами соотношением:

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

# Эра вещества

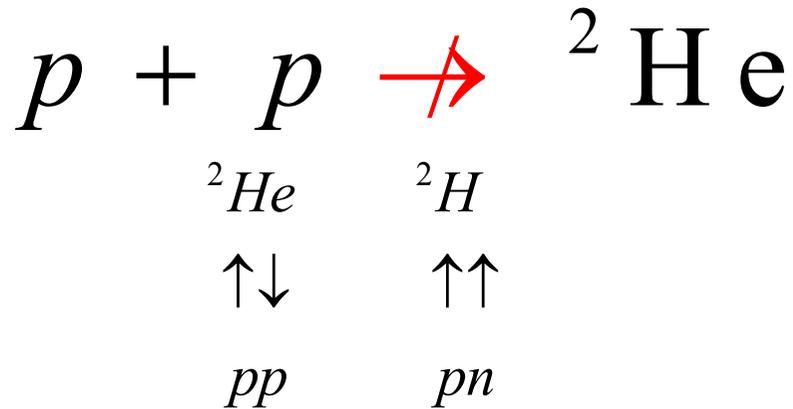
Время после Большого взрыва	Характерные температуры (К)	Характерные расстояния (см)	Основные события
10 с	$10^{10}$	$10^{-10}$	Окончание лептонной эры.
10 с - $10^4$ лет	$10^{10}$ - $10^4$	$10^{-10}$ - $10^{-5}$	Радиационная эра. Доминирование излучения над веществом.
$10^4$ лет	$10^4$	$10^{-5}$	Начало 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

# Первичный нуклеосинтез

## Модель Гамова

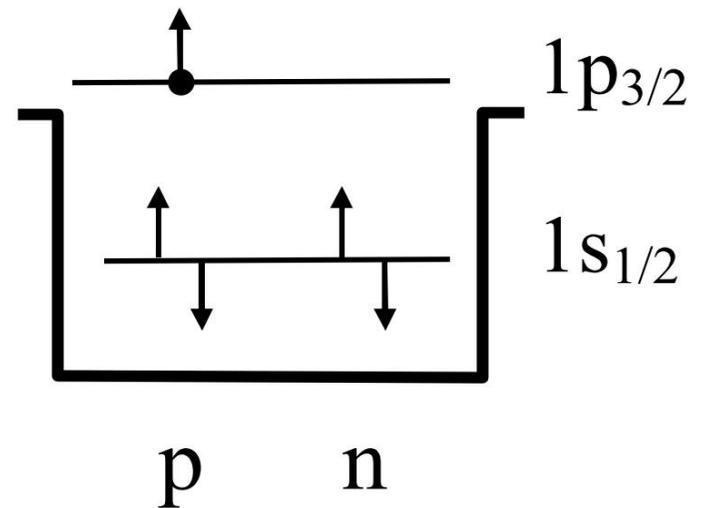
Все химические элементы образуются в момент Большого взрыва.



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



**Г. Га́мов**  
(1904-1968)



# 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

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

# 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

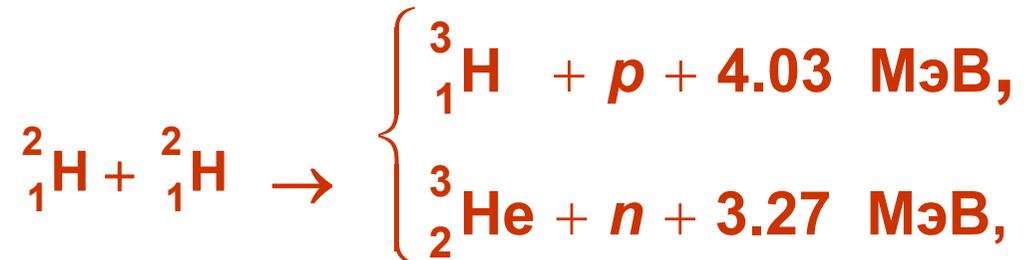
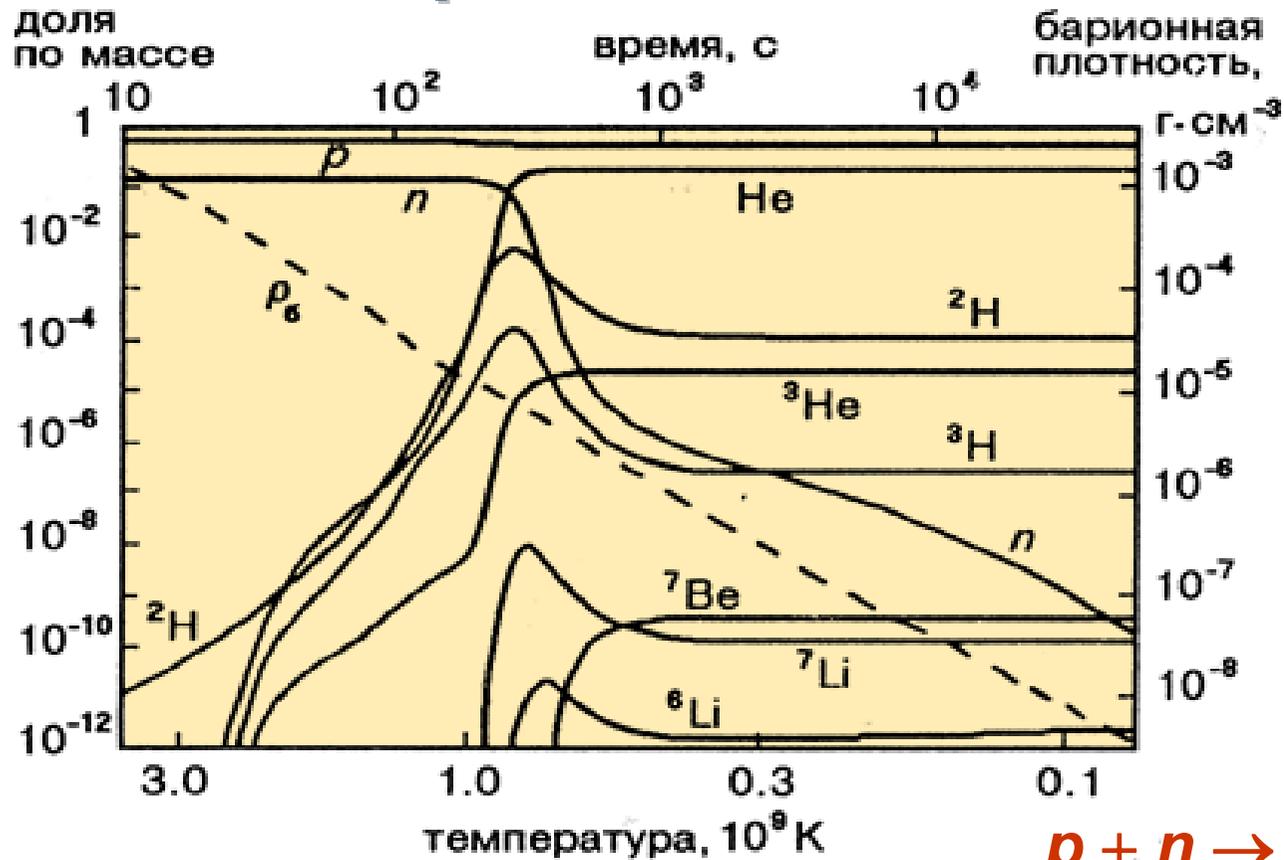


Накоплению дейтерия за счёт этой реакции на первых порах препятствует интенсивное разрушение дейтерия фотонами в обратном процессе фотодиссоциации. Отношение числа фотонов  $n_\gamma$  к числу барионов  $n_b$ :

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

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



# Микроволновое фоновое (реликтовое) излучение

	$T, \text{ К}$	$t, \text{ с}$
$q + \bar{q} \rightarrow h + \bar{h}$	$10^{13}$	$10^{-6}$
$h + \bar{h} \leftrightarrow \gamma \leftrightarrow l + \bar{l}$	$10^{12}$	$10^{-10}$
$h + \bar{h} \rightarrow \gamma \leftrightarrow l + \bar{l}$	$10^{11}$	$10^{-4}$
$\gamma \leftarrow l + \bar{l}$	$10^{10}$	$10$

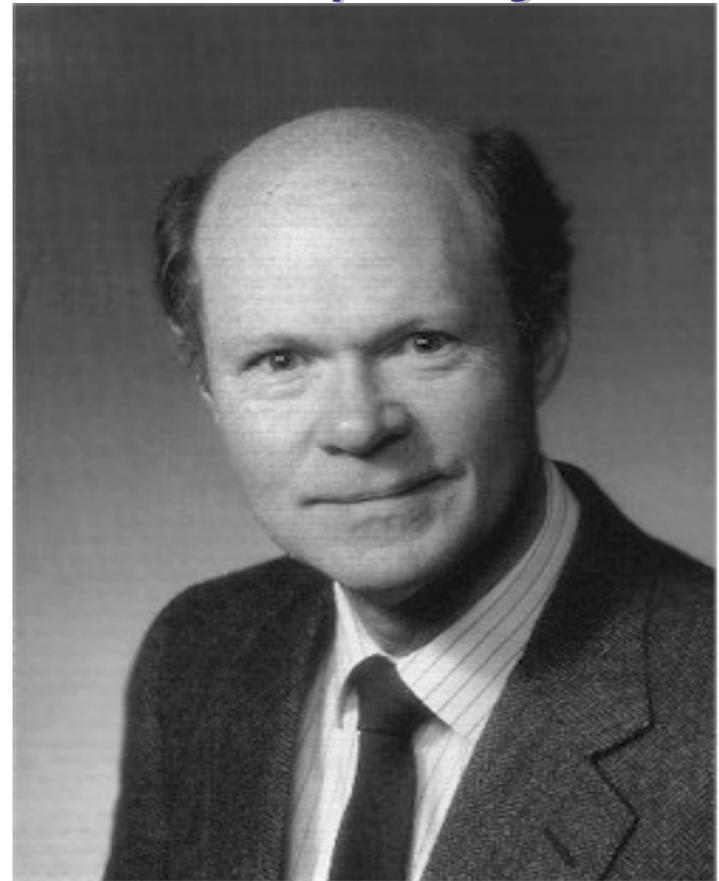
Реликтовое излучение – результат аннигиляции частиц и античастиц.

При  $t \approx 400000$  лет температура Вселенной упала до нескольких тысяч градусов и плотность вещества снизилась до  $10^{-20}$  г/см<sup>3</sup>, наступило время формирования стабильных атомов. Реликтовое излучение **равномерно** заполняет всю Вселенную.

# Микроволновое фоновое (реликтовое) излучение



**Arno Allan Penzias**  
1933



**Robert Woodrow Wilson**  
1936

**Нобелевская премия по физике**

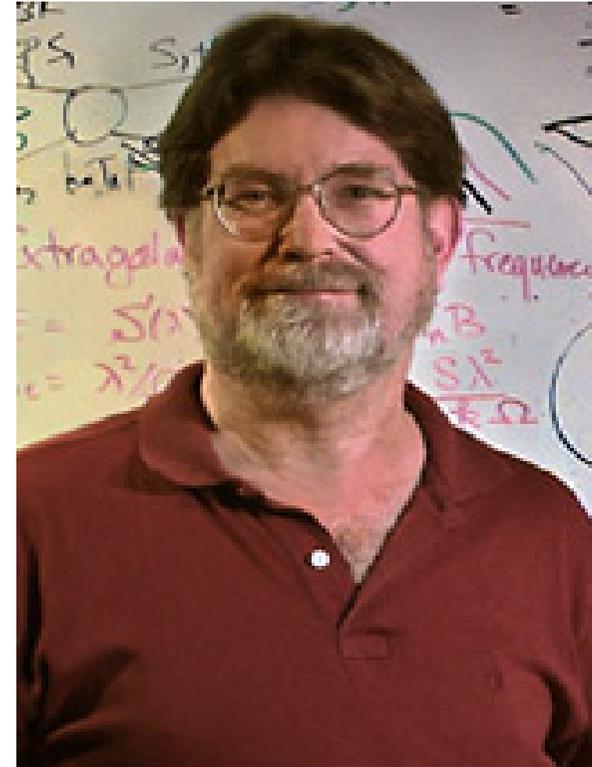
**1978 г.** — А. Пензиас и Р. Вильсон

За открытие космического микроволнового фонового излучения.

# Микроволновое фоновое (реликтовое) излучение



**John C. Mather**  
р. 1946

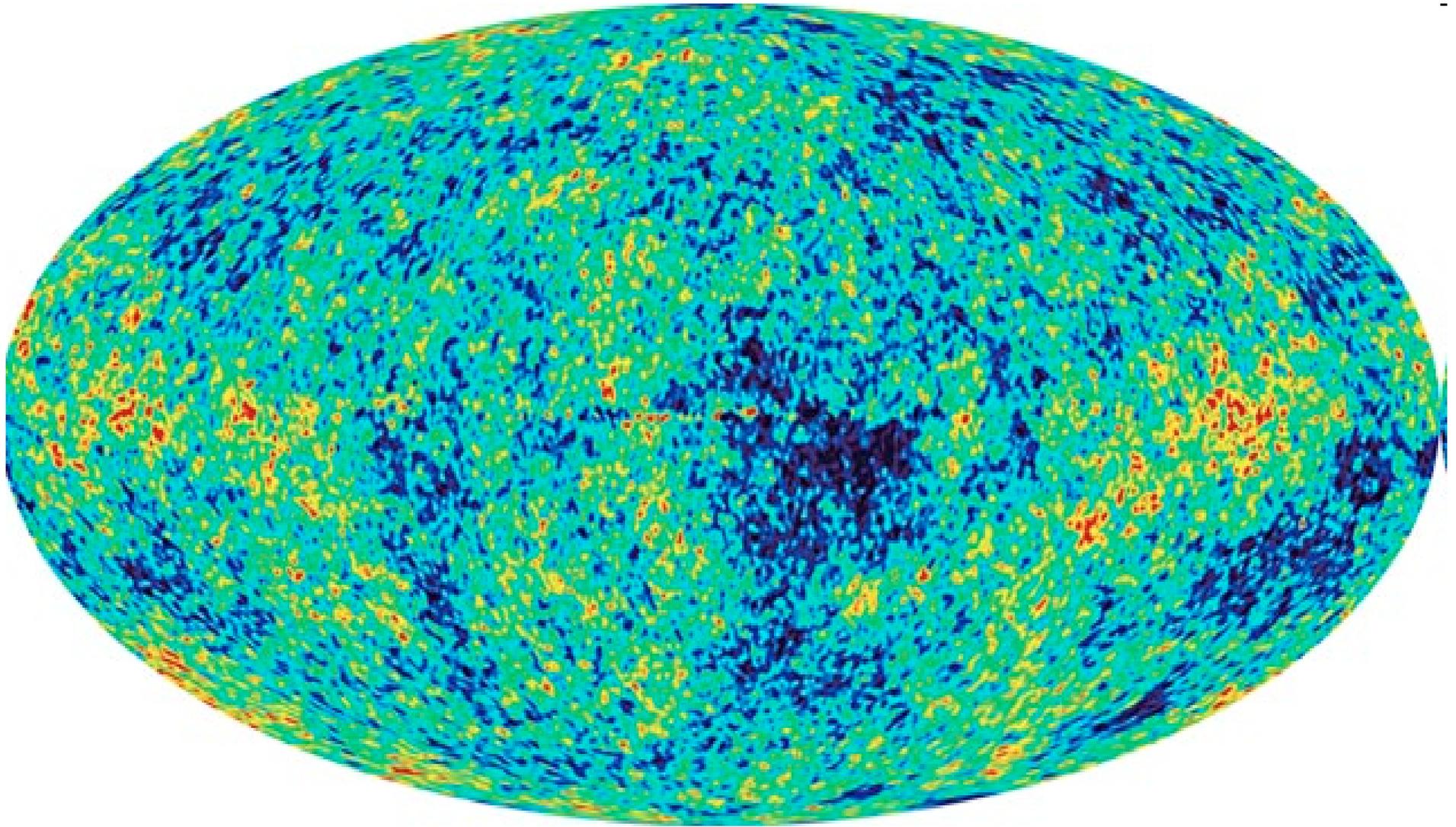


**George F. Smoot**  
р. 1945

**Нобелевская премия по физике**  
**2006 г.** — Дж. Матер и Дж. Смут

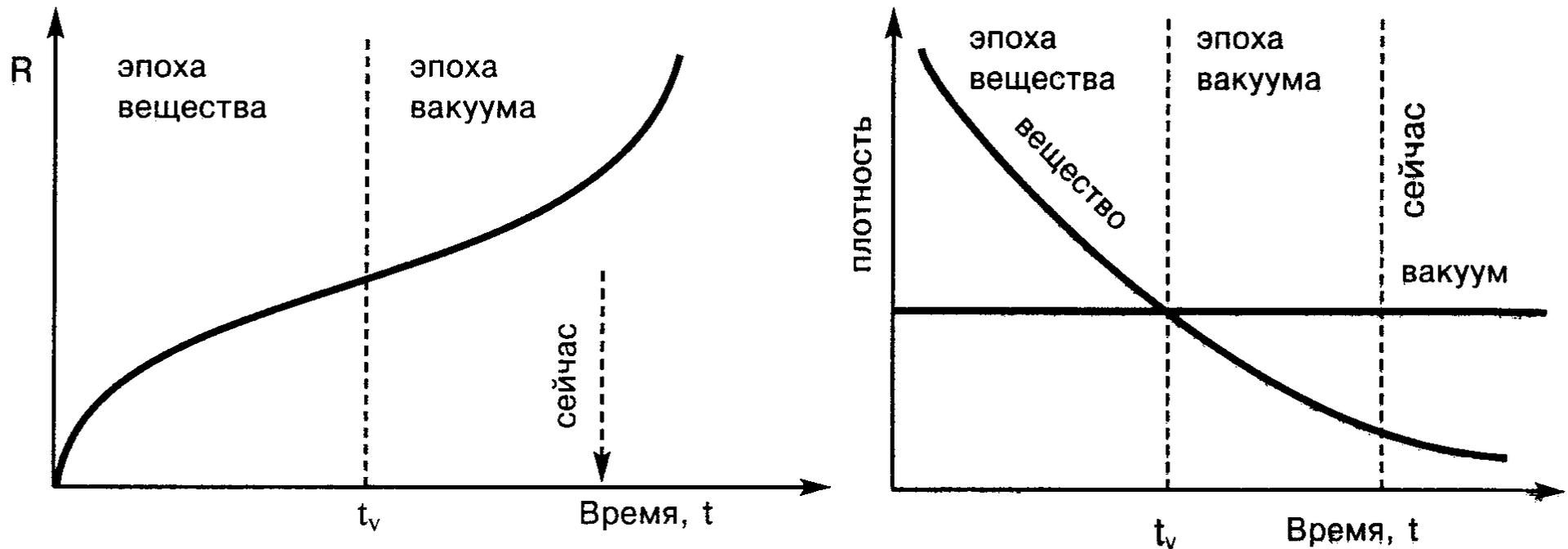
За открытие чернотельной формы и анизотропии  
космического микроволнового фонового излучения

# Реликтовое излучение



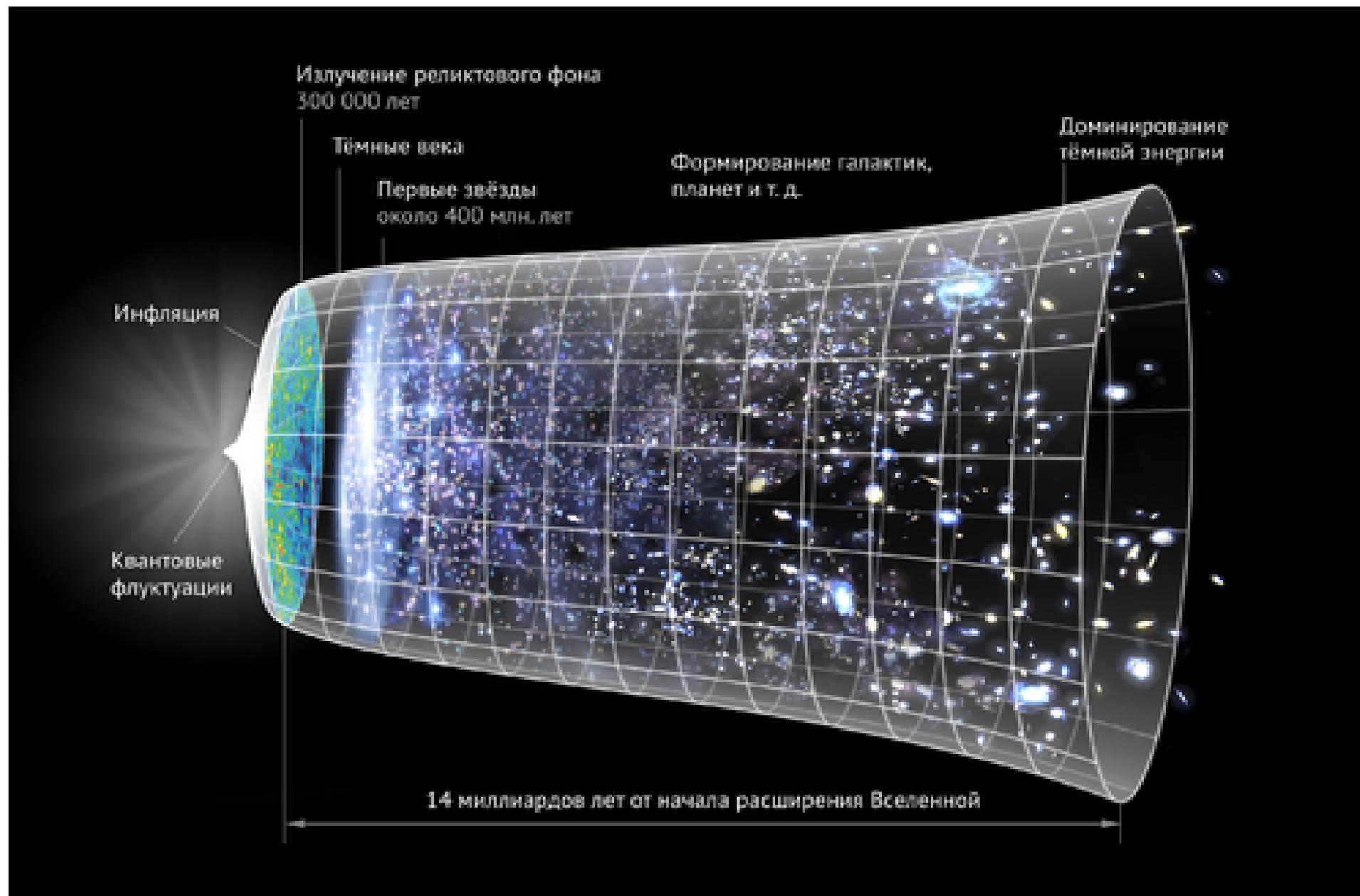
Анизотропия микроволнового фона во Вселенной

# Расширение Вселенной



В начале 1998 г. было сделано открытие. Оказалось, что последние 5 млрд лет расширение Вселенной не замедлялось, как следует из модели Большого Взрыва, а ускорялось. Этот вывод получен в результате анализа спектров излучения взрывающихся Сверхновых, расположенных от Земли на расстоянии 5-10 млрд световых лет. Таким образом, было доказано наличие в космосе гравитационного отталкивания, присущего физическому вакууму.

# Расширение Вселенной



# 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 <sup>3</sup>	
Полное барионное число (число нуклонов)	$10^{78}$	
Доля антивещества	$< 10^{-4}$	
Постоянная Хаббла $H$	$71 \pm 4$ км/с·Мпк	
Температура реликтового (фонового) излучения	2.73 К	
Плотность реликтовых фотонов	$411$ см <sup>-3</sup>	
Энергетическая плотность реликтовых фотонов	0.26 эВ/см <sup>3</sup> = $4.6 \cdot 10^{-34}$ г/см <sup>3</sup>	
Отношение числа реликтовых фотонов к числу барионов $n_\gamma/n_b$	$(10^9 - 10^{10}):1$	
Распространённость ядер:	по числу	по массе
водород	91%	70.7%
гелий	8.9%	27.4%
остальные ядра	<0.2%	1.9%

# **ЗВЕЗДНЫЙ НУКЛЕОСИНТЕЗ**

**Синтез ядер легче группы железа**

# Пределы изменения характеристик различных звезд

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

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

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

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

# Диаграмма Герцшпрунга-Рассела

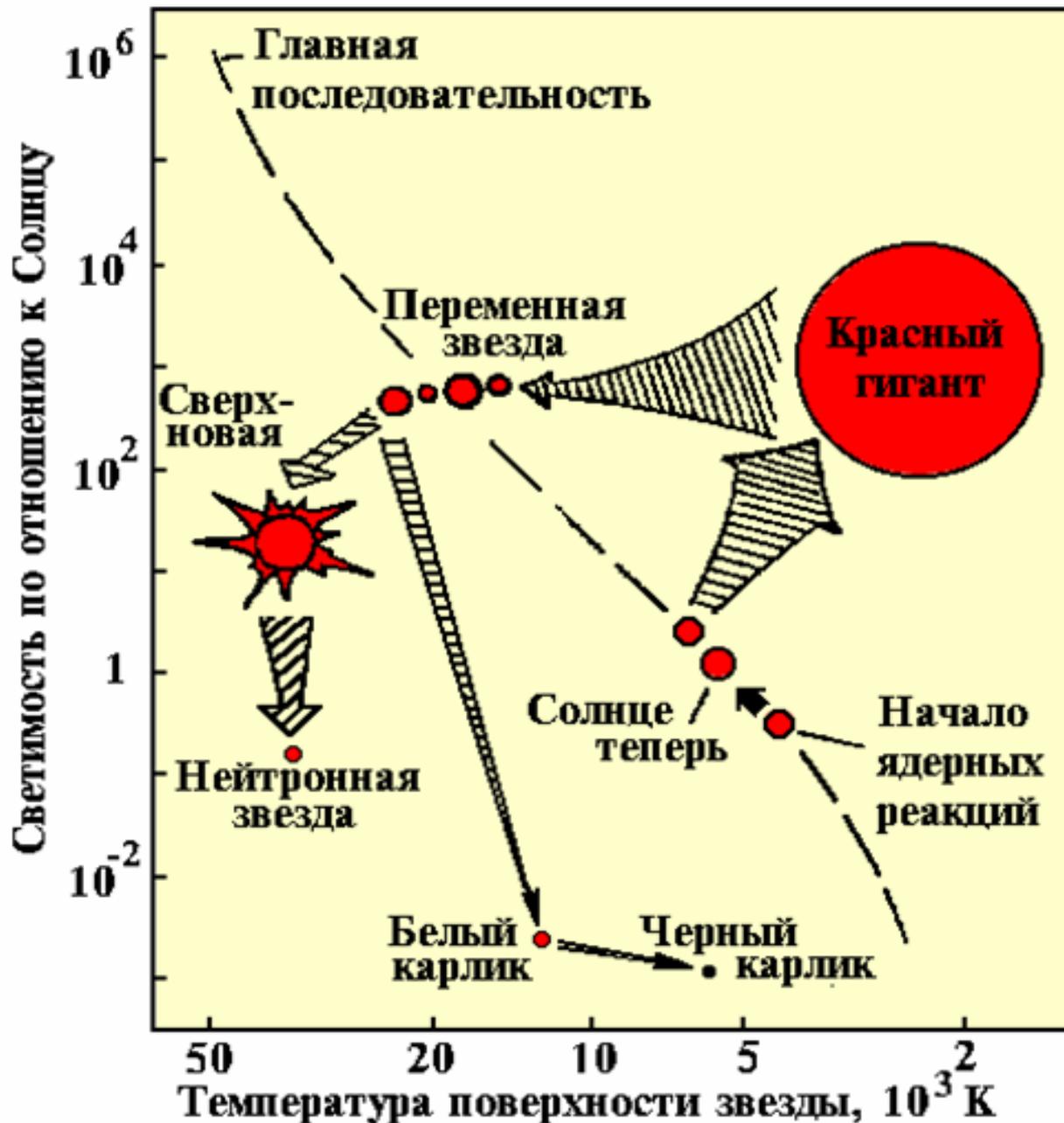
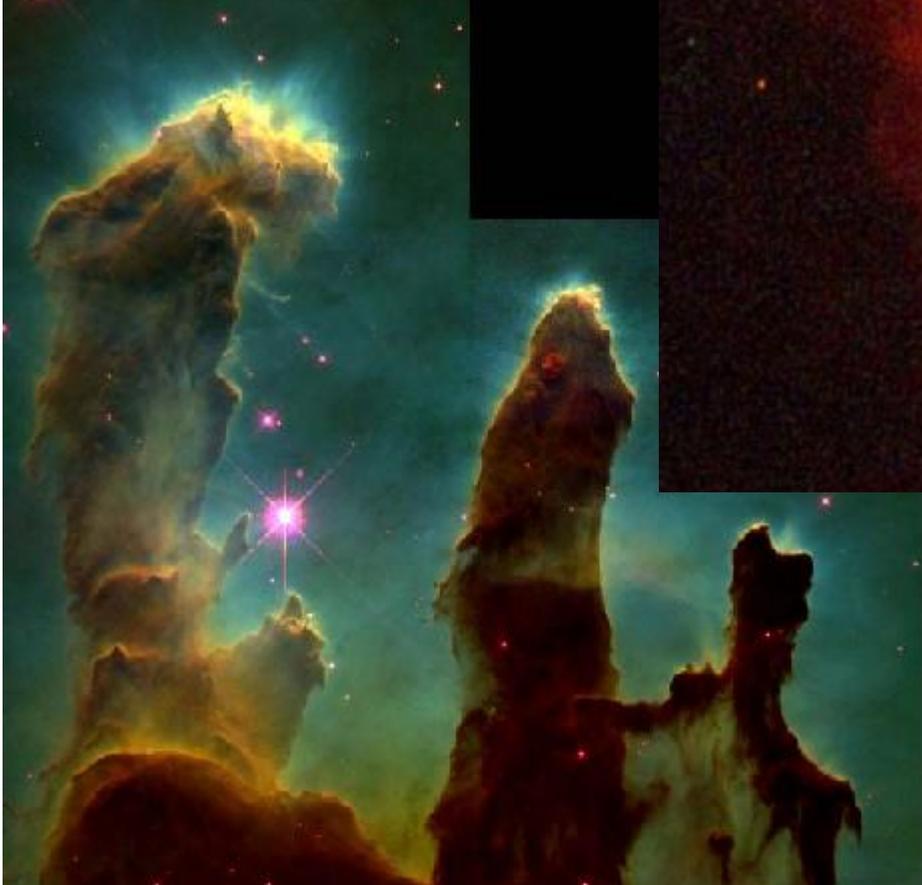
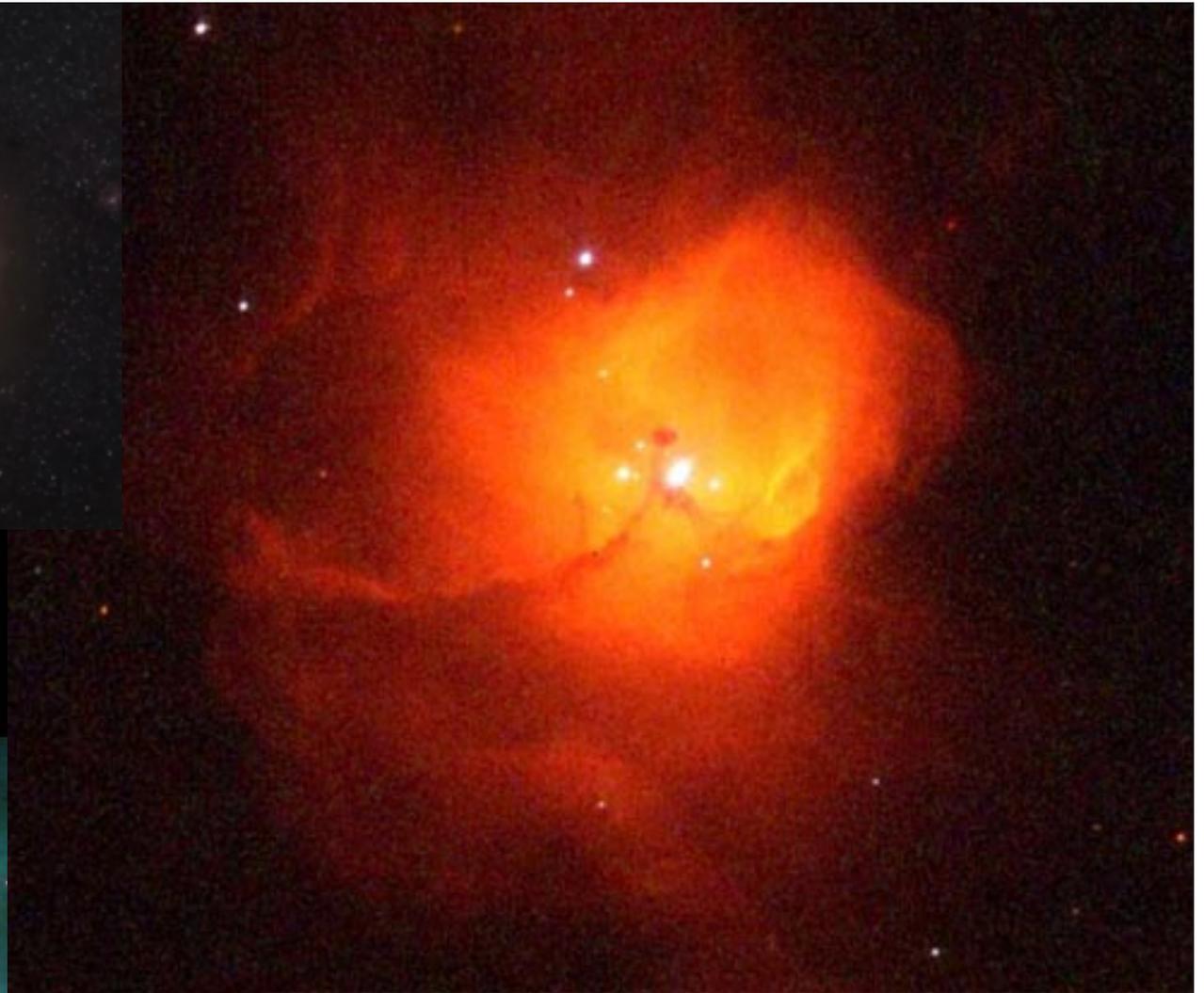


диаграмма  
эволюции  
звезд

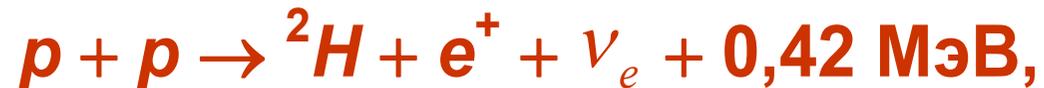


**Рождение звезд**

# **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



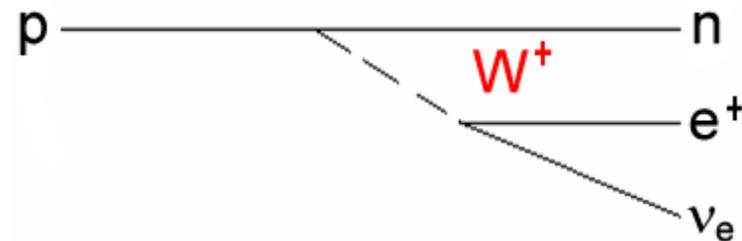
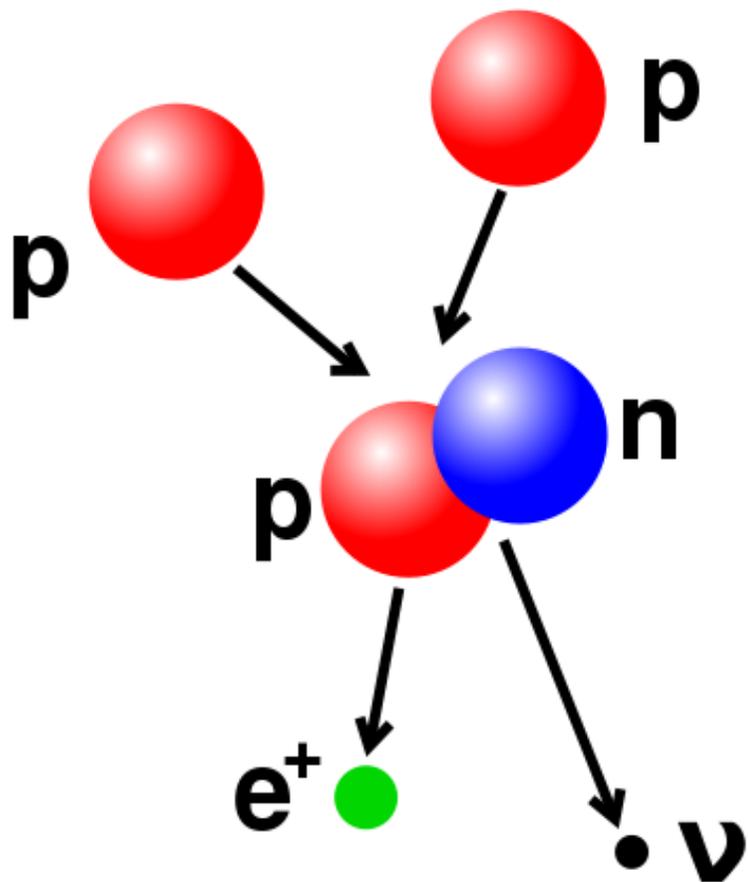
требует более высокой температуры ( $\approx 10$  млн. К). Температура же в центре протозвезды составляет всего 1 млн. К. При такой температуре эффективно протекает реакция слияния ядра дейтерия



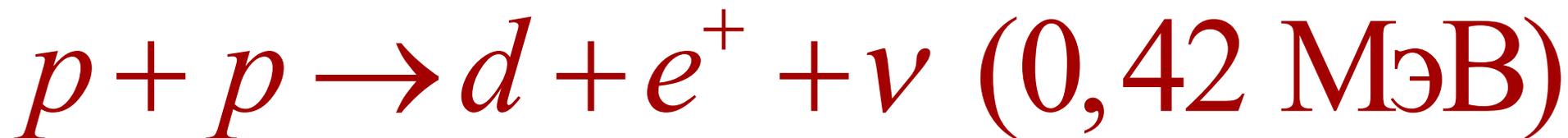
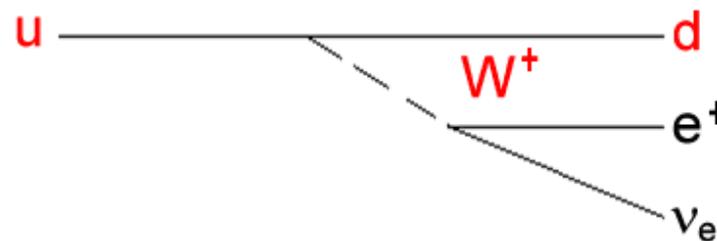
Дейтерий, как и  ${}^4\text{He}$ , образуется на дозвёздной стадии эволюции Вселенной и его содержание в протозвезде  $10^{-4}$ - $10^{-5}$  от содержания протонов. Однако этого количества дейтерия достаточно для появления в центре протозвезды эффективного источника энергии.

# Горение водорода

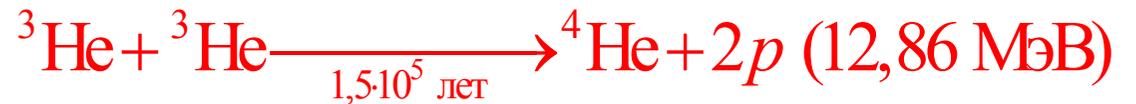
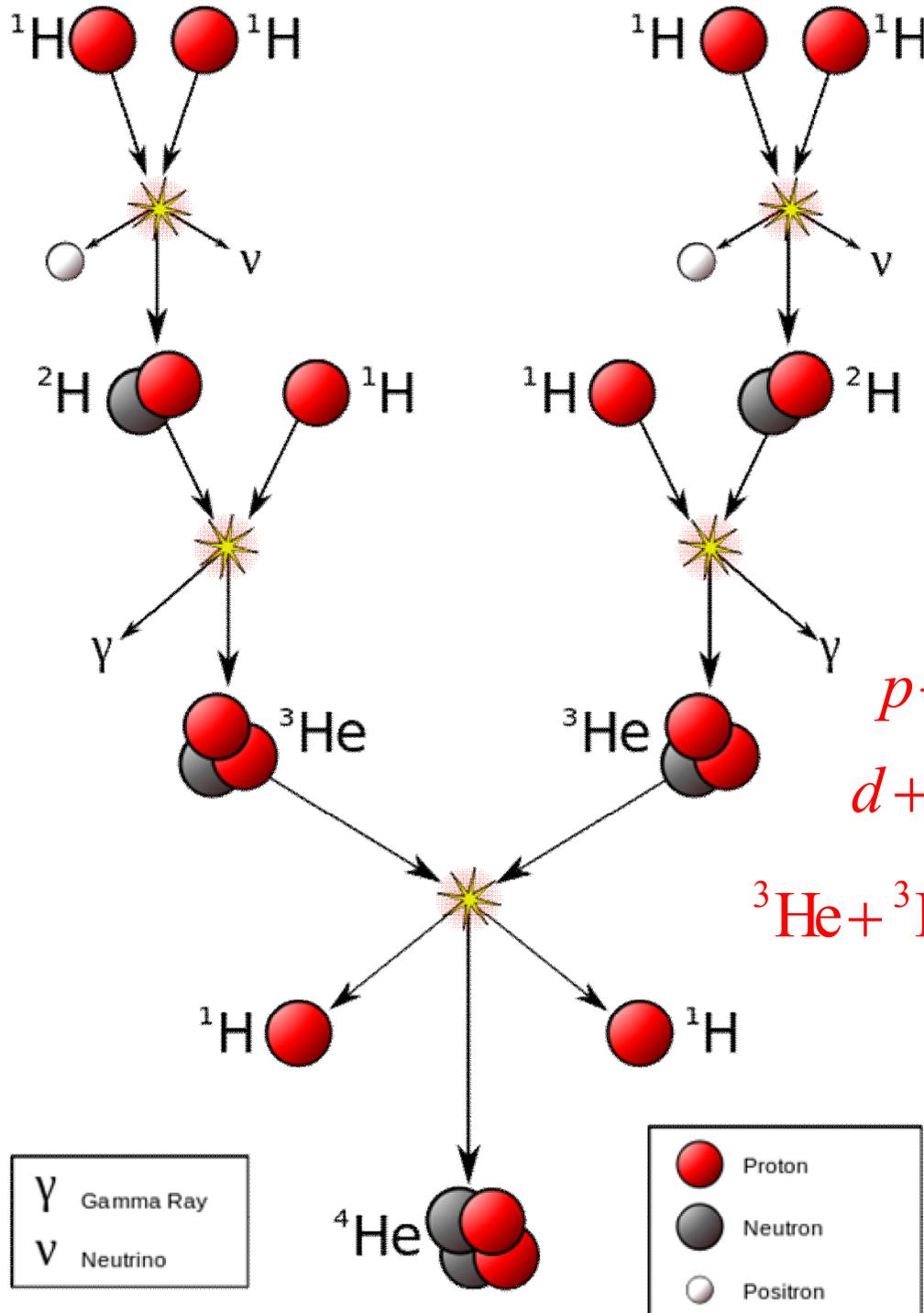
# Горение водорода



слабое взаимодействие



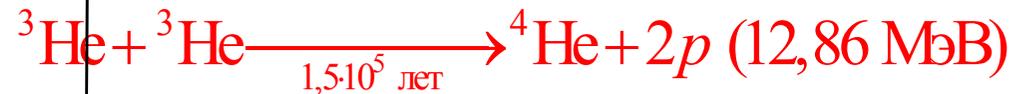
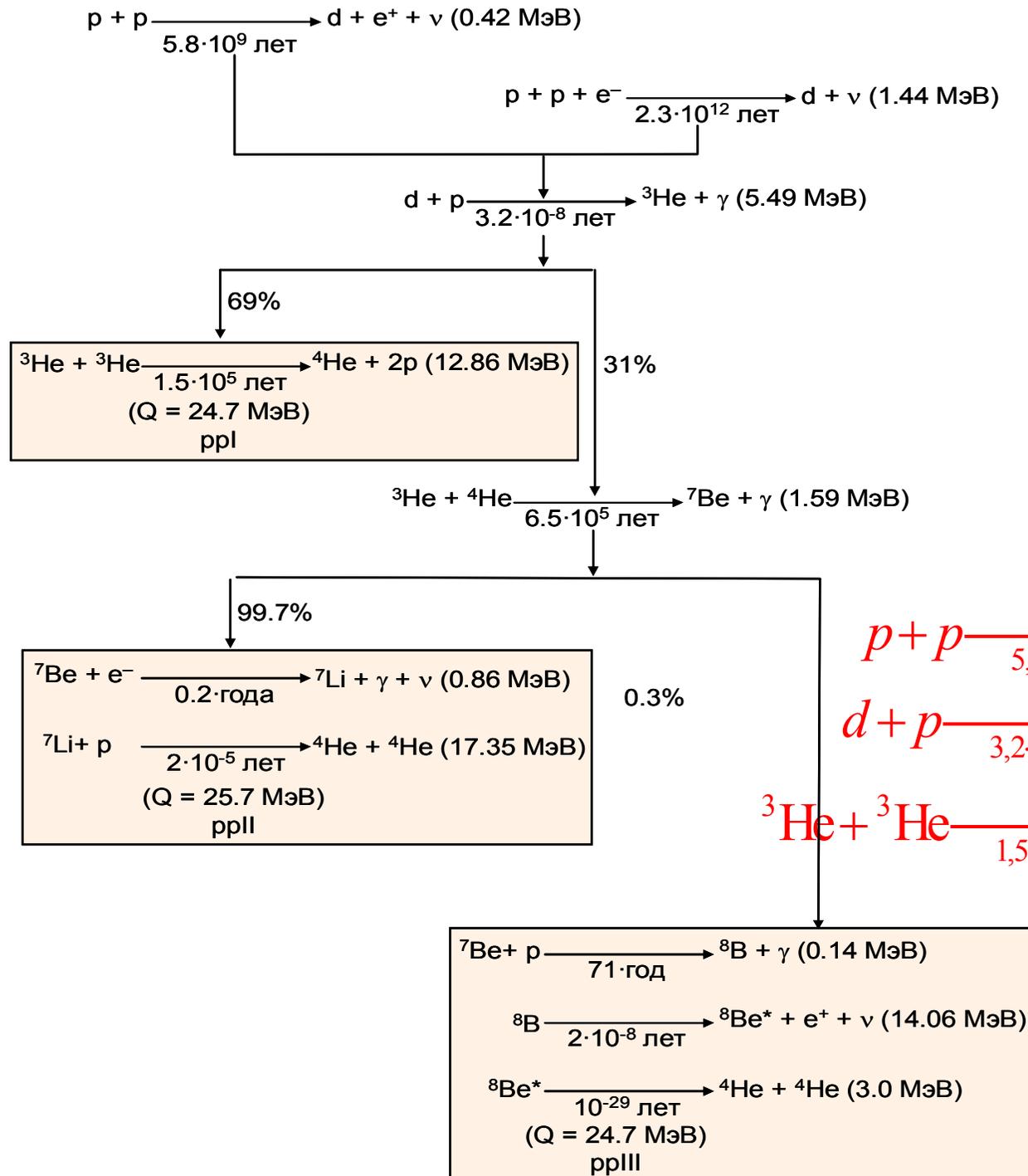
# Горение водорода



$\gamma$  Gamma Ray  
 $\nu$  Neutrino

 Proton  
 Neutron  
 Positron

# Горение водорода



# Горение гелия и более тяжелых ядер

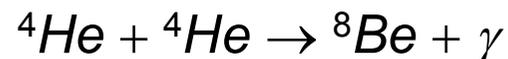
# Горение гелия

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.

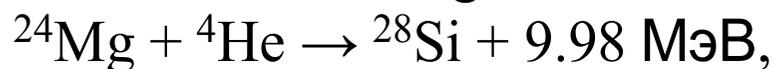
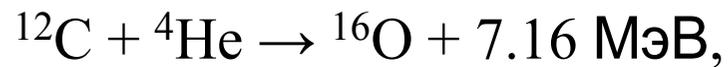
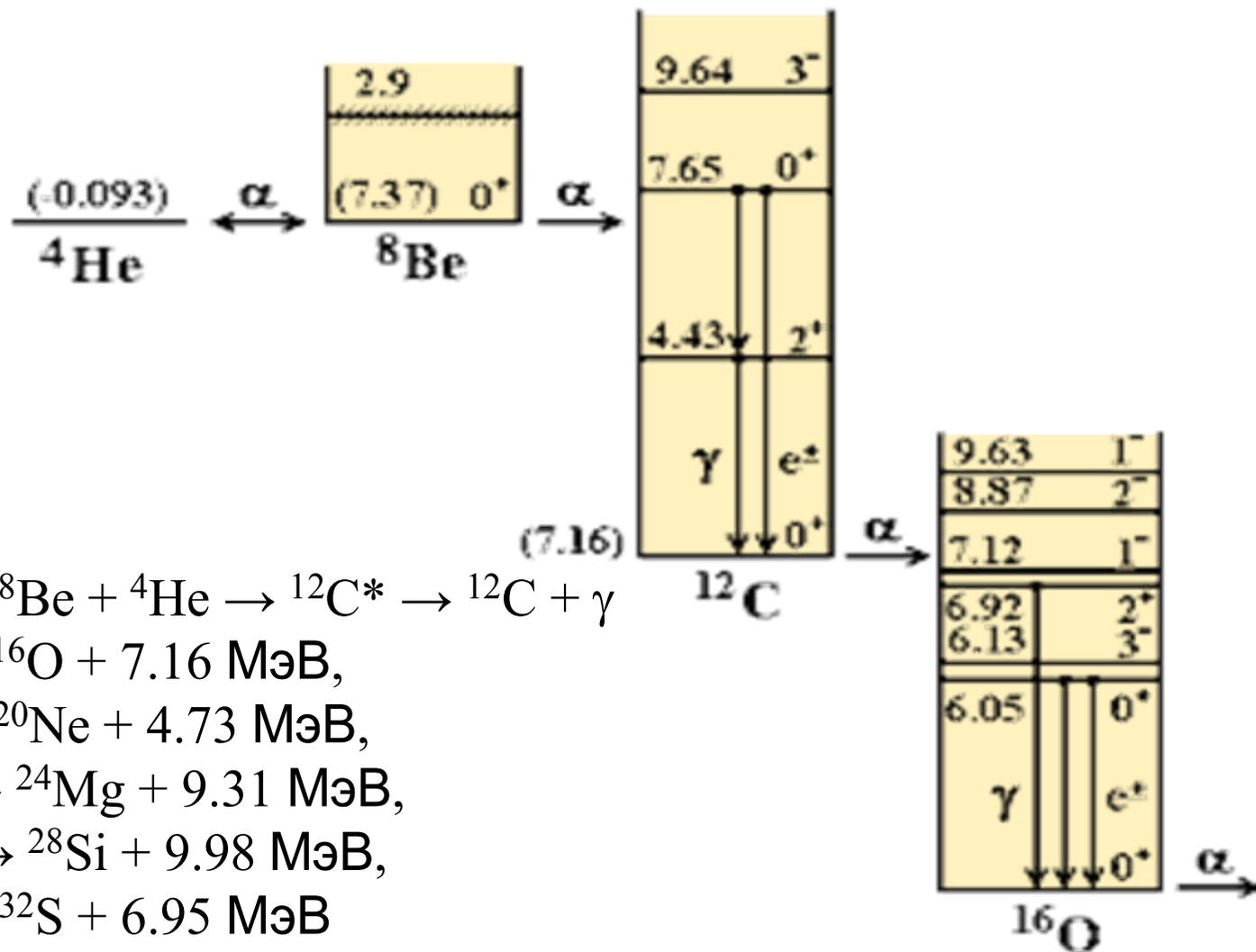
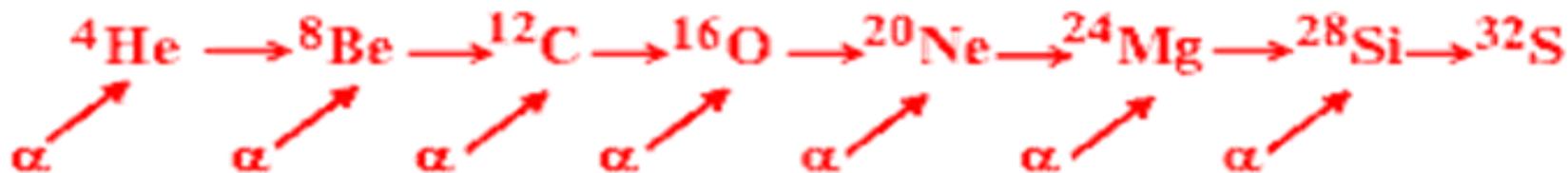
Кинетическая энергия сталкивающихся ядер гелия увеличивается и достигает в массивной звезде величины, достаточной для преодоления сил кулоновского отталкивания ядер гелия.

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  $\alpha$ -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

$$T = 10^9 - 10^{10} \text{ К}$$

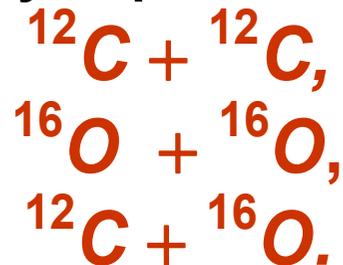
$$\rho = 10^5 - 10^7 \text{ г/см}^3$$



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  $\alpha$ -кратных ядер



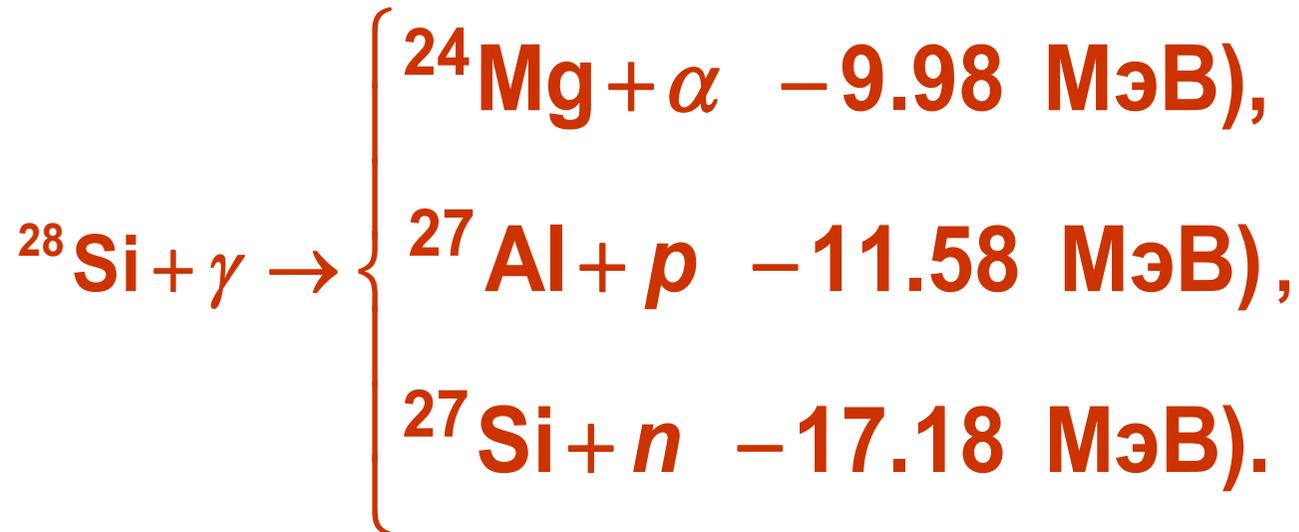
и реакции слияния углерода и кислорода



## Фотоядерные реакции в звездах

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

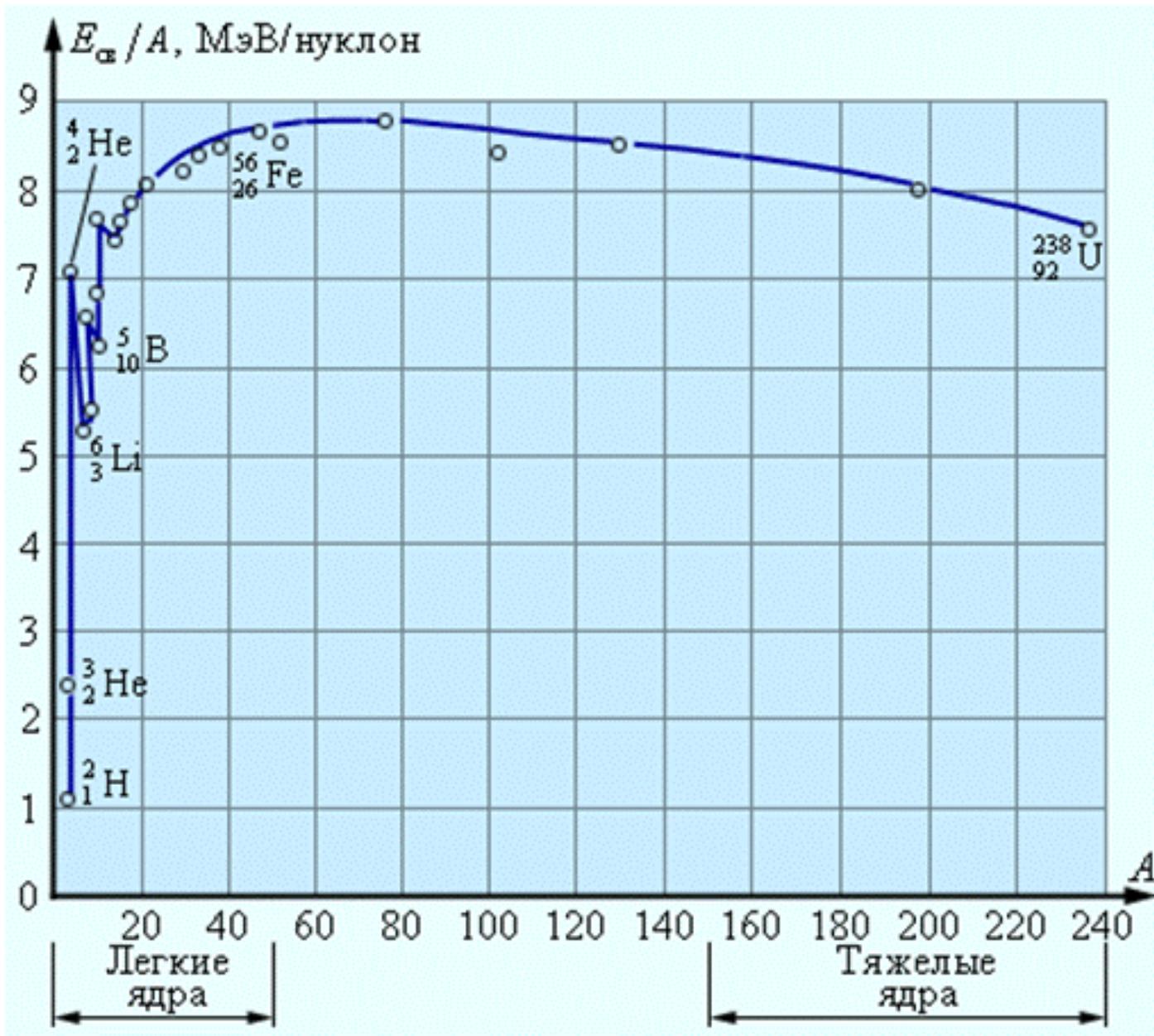
Реакции фоторасщепления кремния:



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



# Предел термоядерного синтеза

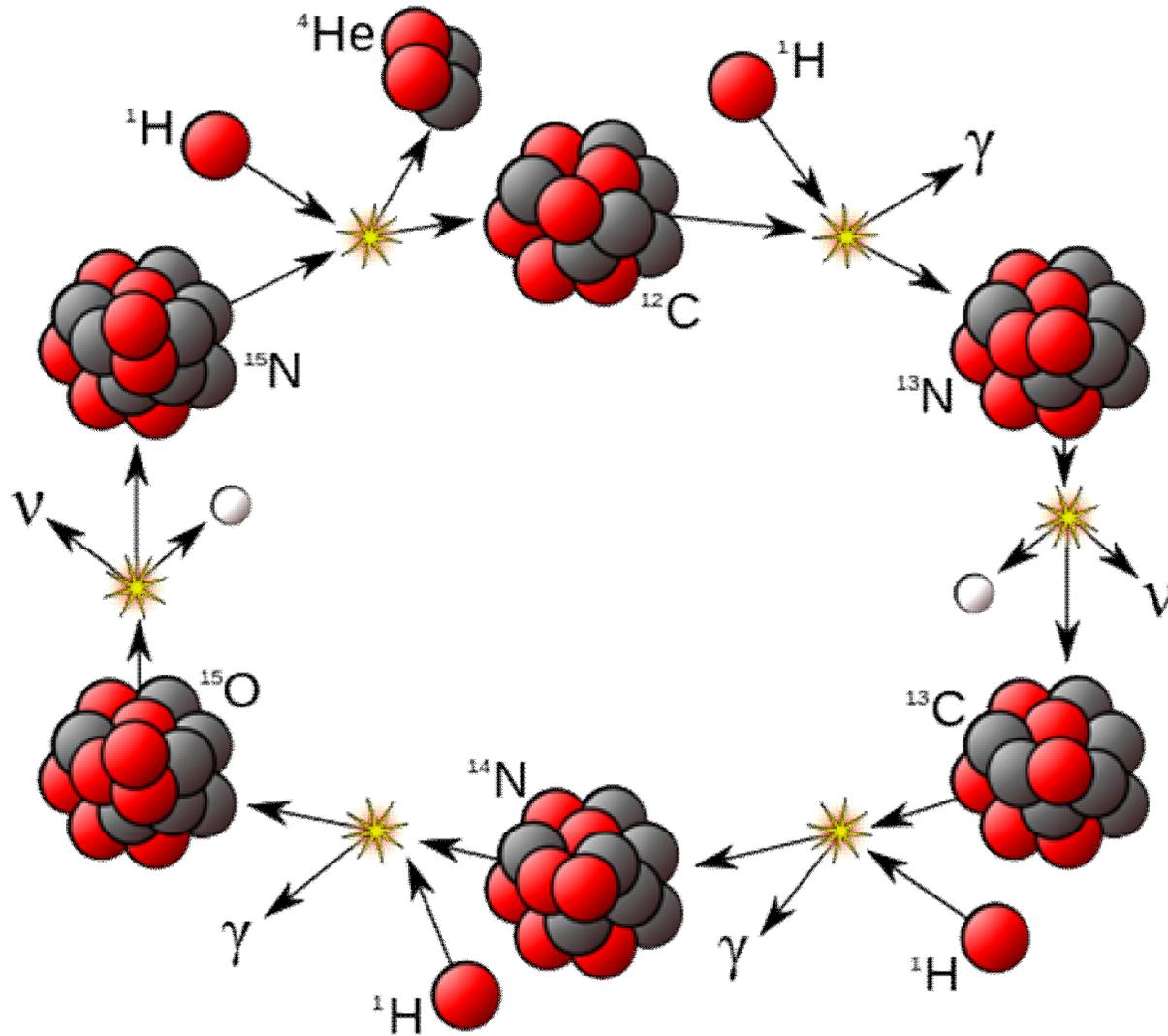


удельная  
энергия  
связи  
атомных  
ядер

# **Звезды второго поколения**

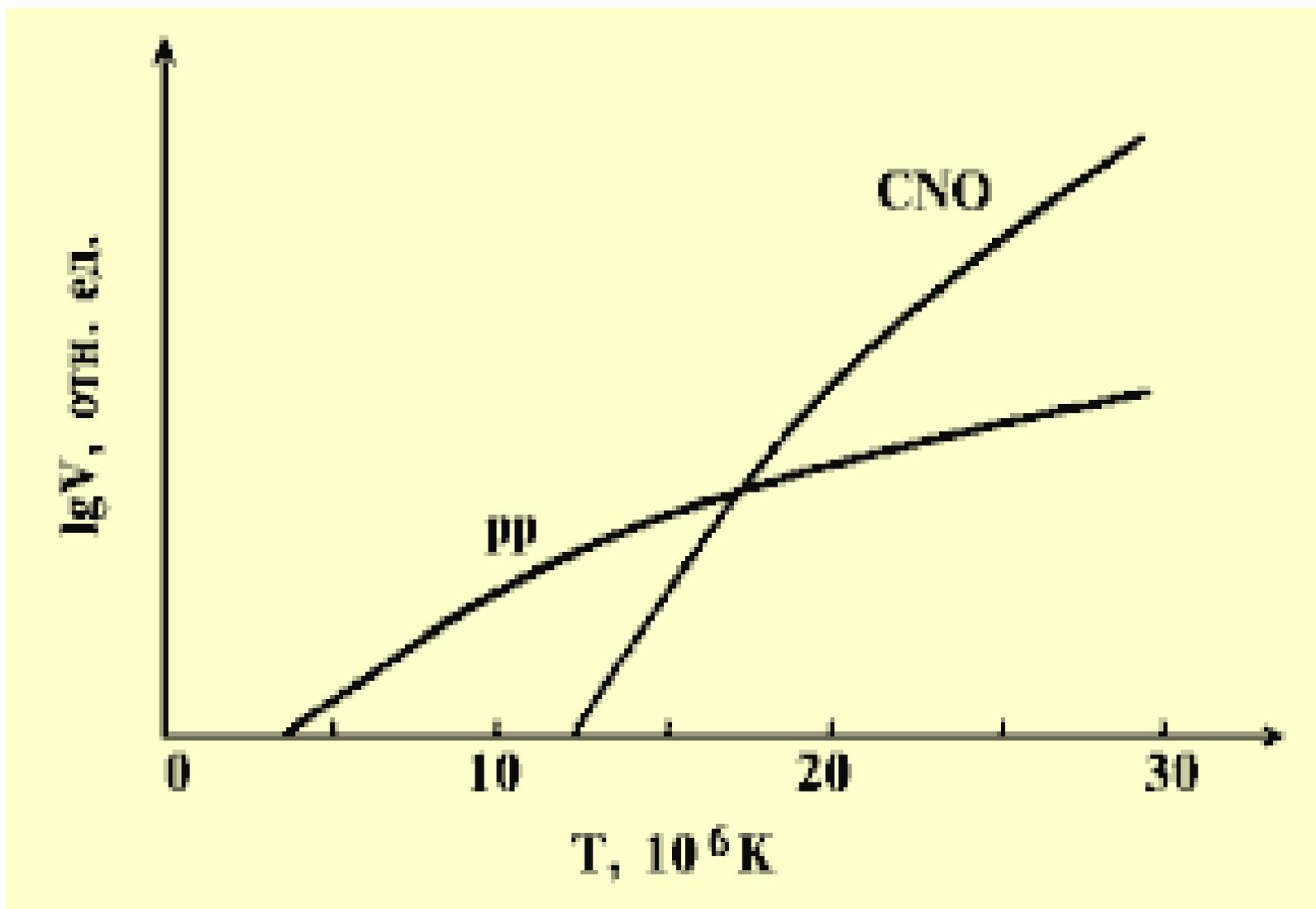
**CNO-цикл  
и солнечные нейтрино**

# CNO - ЦИКЛ



	Proton	$\gamma$	Gamma Ray
	Neutron	$\nu$	Neutrino
	Positron		

# 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

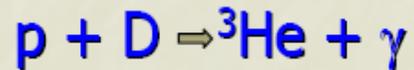


$E_\nu$  (МэВ)      Поток ( $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$ )

0 – 0.42       $6 \cdot 10^{10}$



1.44       $1.4 \cdot 10^8$

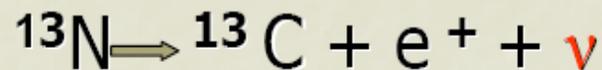
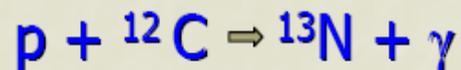


0 – 15       $5.8 \cdot 10^6$



0.83       $4.7 \cdot 10^9$

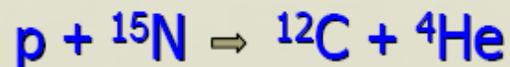
## CNO цикл



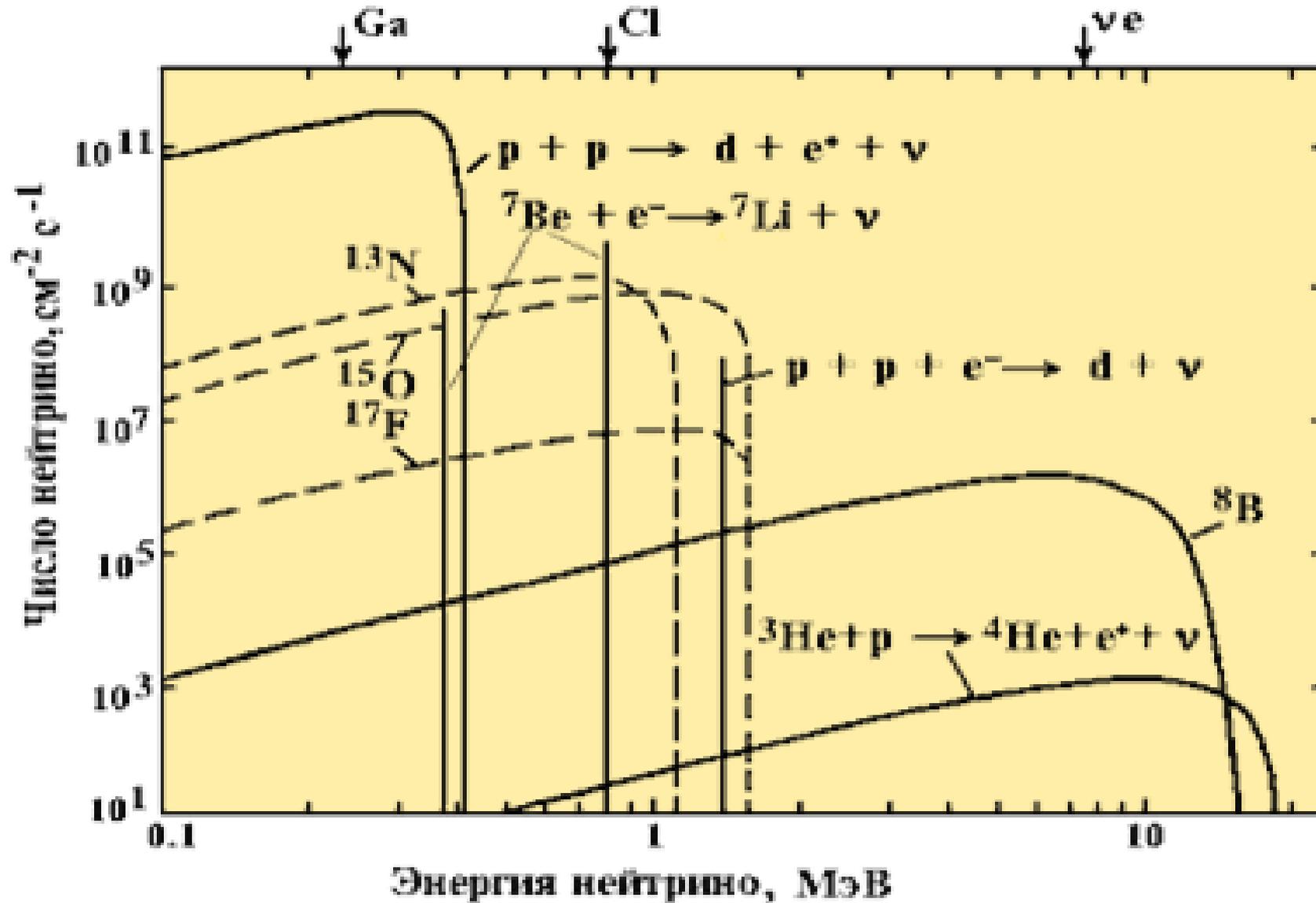
0 – 1.199       $6 \cdot 10^8$



0 – 1.732       $5 \cdot 10^8$

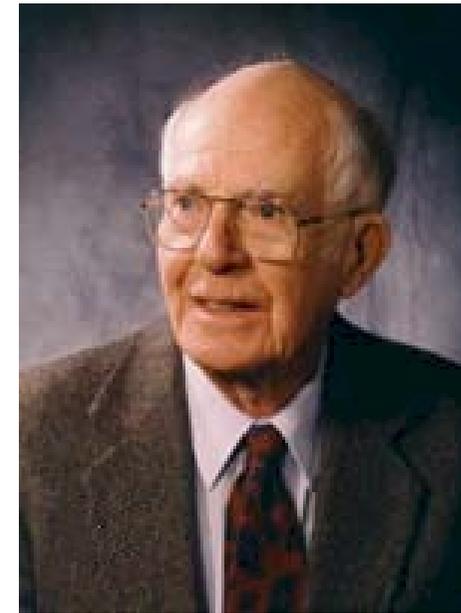
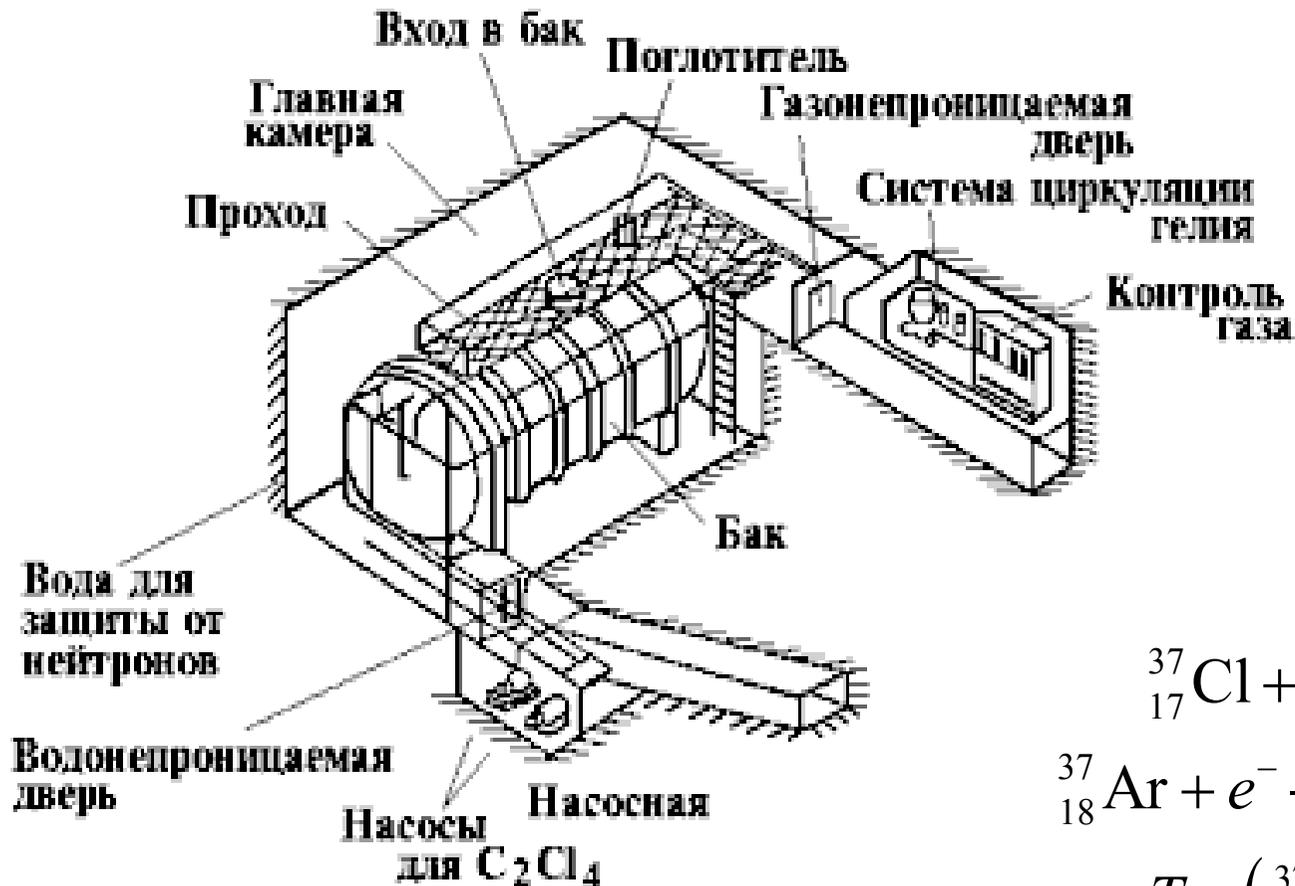


# Солнечные нейтрино



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