

Мир атомных ядер

**Эволюция
представлений о
Вселенной**

Земля



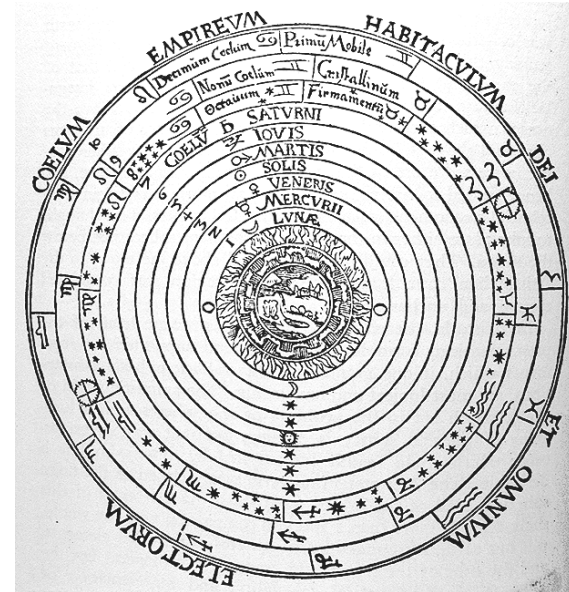
В самых ранних представлениях Земля считалась плоской поверхностью, покрытой куполом, усеянным звездами.

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.

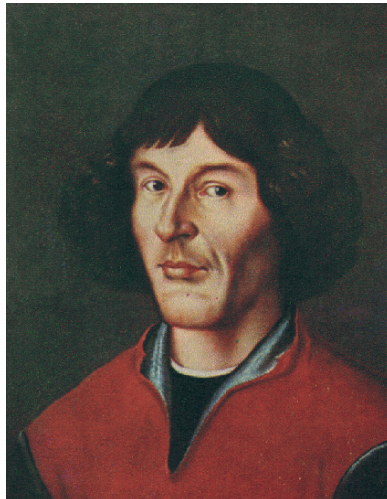
Геоцентрическая система Вселенной



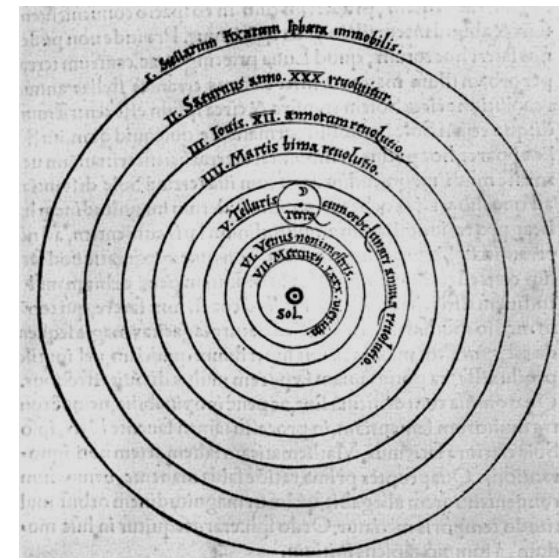
Claudius Ptolemaeus (87 - 150)



Гелиоцентрическая система Вселенной



Nicolaus Copernicus (1473 - 1543)



1609-1611 гг. Законы Кеплера



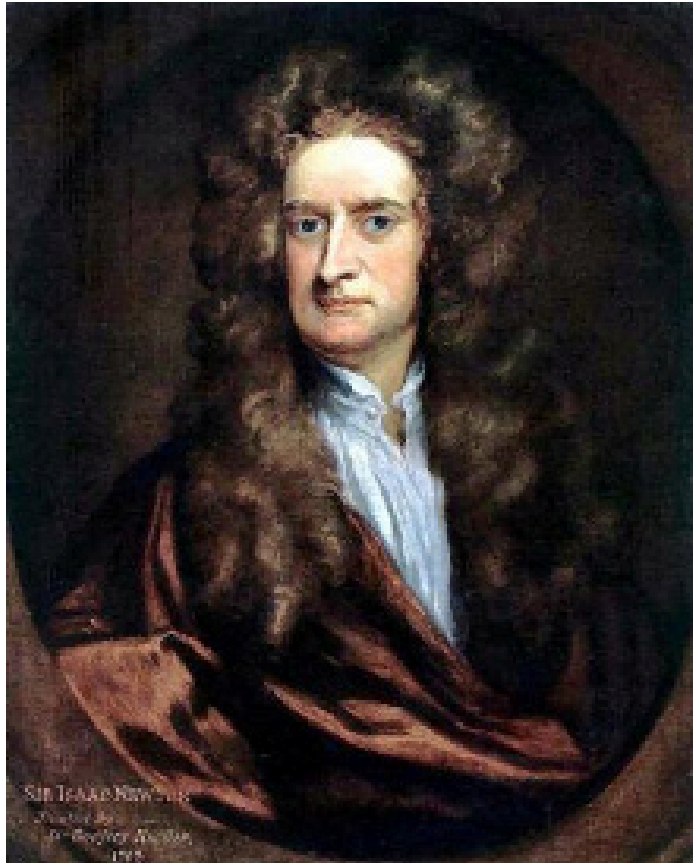
Иоганн Кеплер
1571 – 1630

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 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.

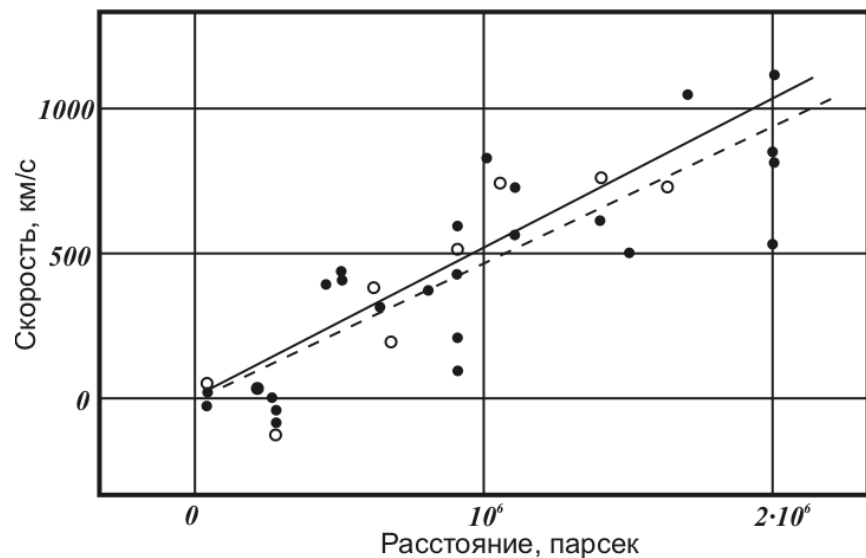
Расширение Вселенной



Эдвин Хаббл

Обсерватория Маунт-Вилсон

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

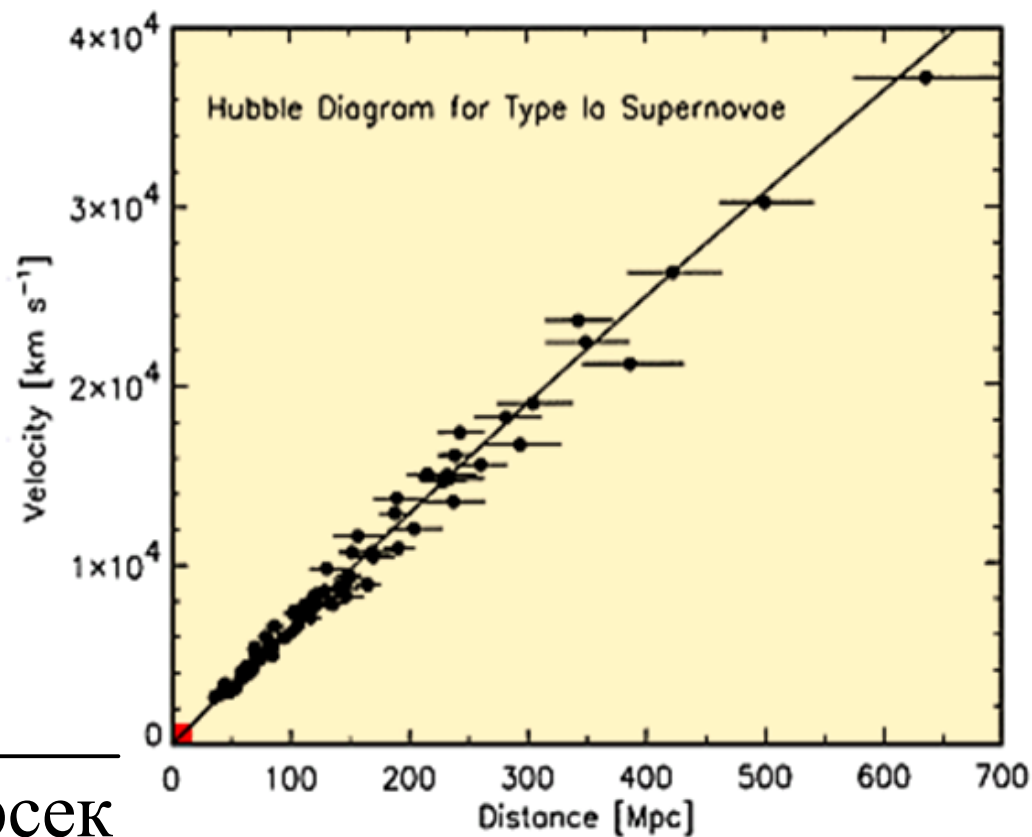


Расширение Вселенной

$$v = H_0 \cdot R$$

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 ~ 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 ~ 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 ~ 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 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 Доплера 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

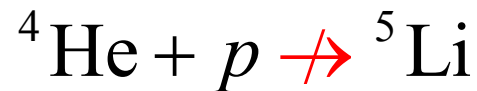
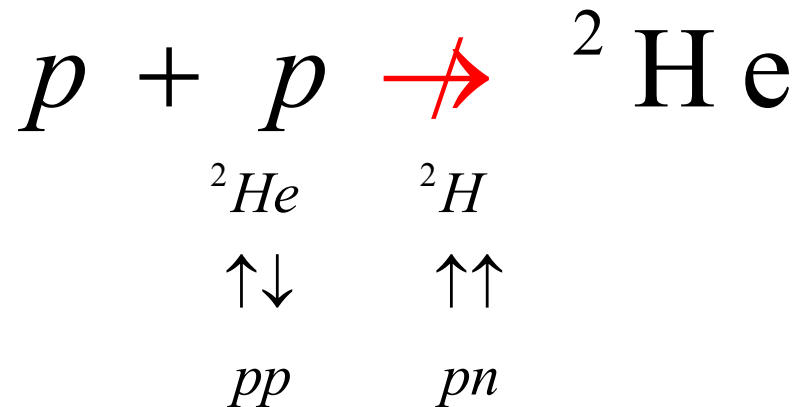
Время после Большого взрыва	Характерные температуры (К)	Характерные расстояния (см)	Основные события
10 с	10^{10}	10^{-10}	Окончание лептонной эры.
10 с - 10^4 лет	10^{10} - 10^4	10^{-10} - 10^{-5}	Радиационная эра. Доминирование излучения над веществом.
10^4 лет	10^4	10^{-5}	Начало эры Вещества. Вещество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

Нуклеосинтез

Первичный нуклеосинтез

Модель Гамова

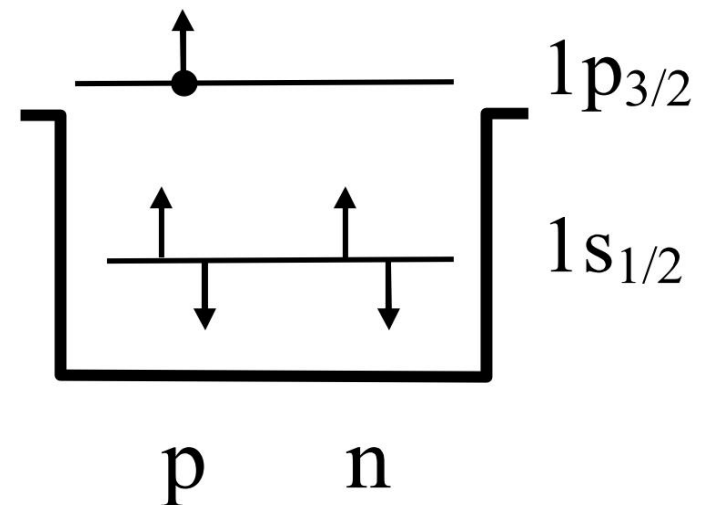
Все химические элементы образуются в момент Большого взрыва.



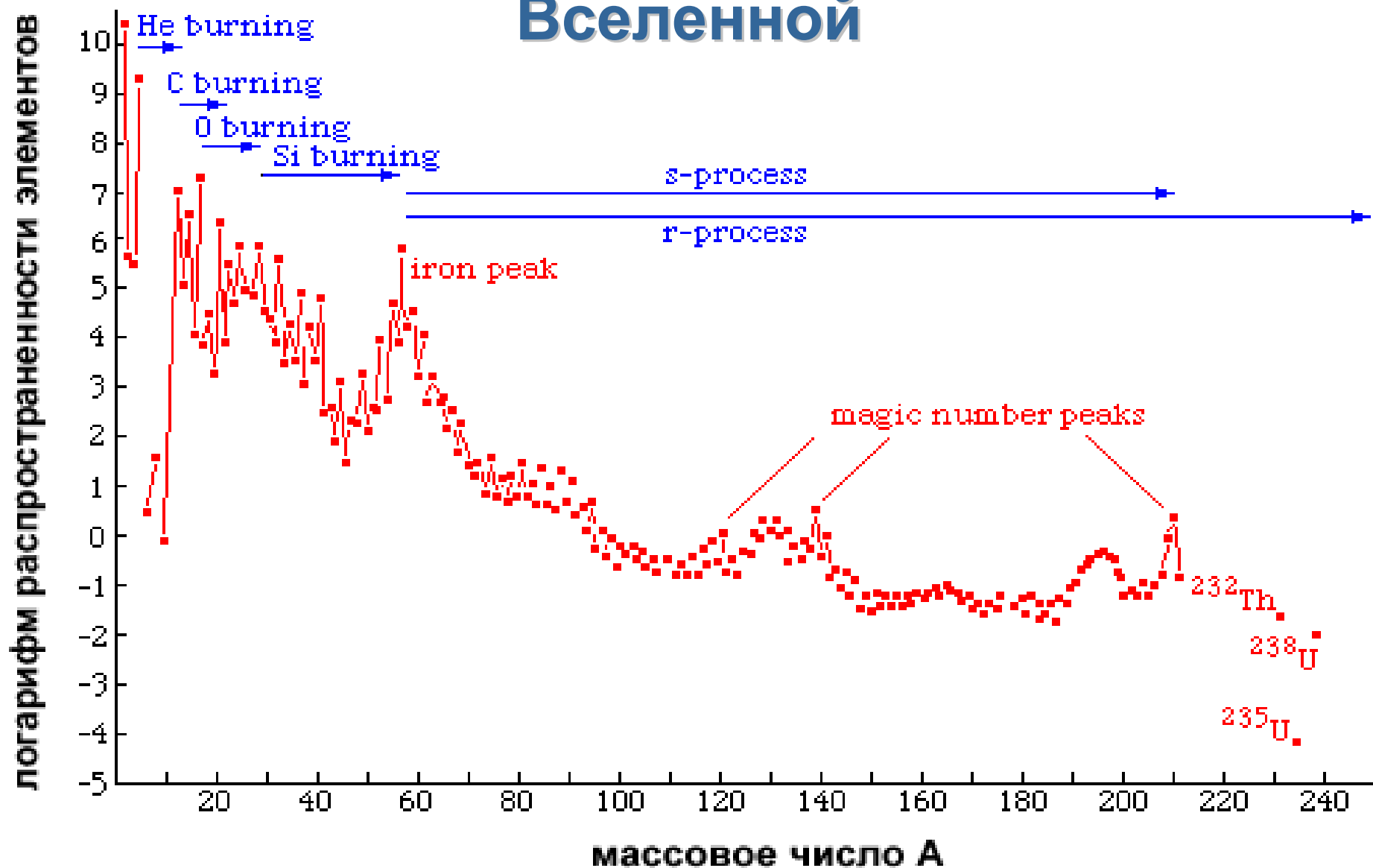
$$T_{1/2}({}^8\text{Be}) = 0,7 \cdot 10^{-16} \text{ c}$$



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 :



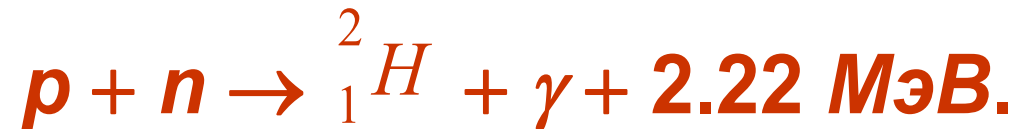
$$W = Ae^{-E/kt}$$

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

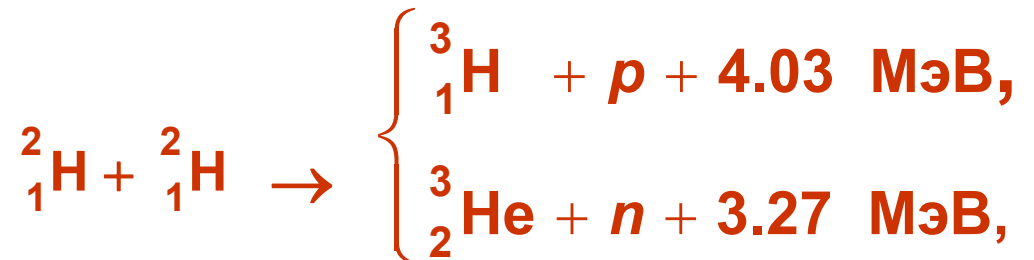
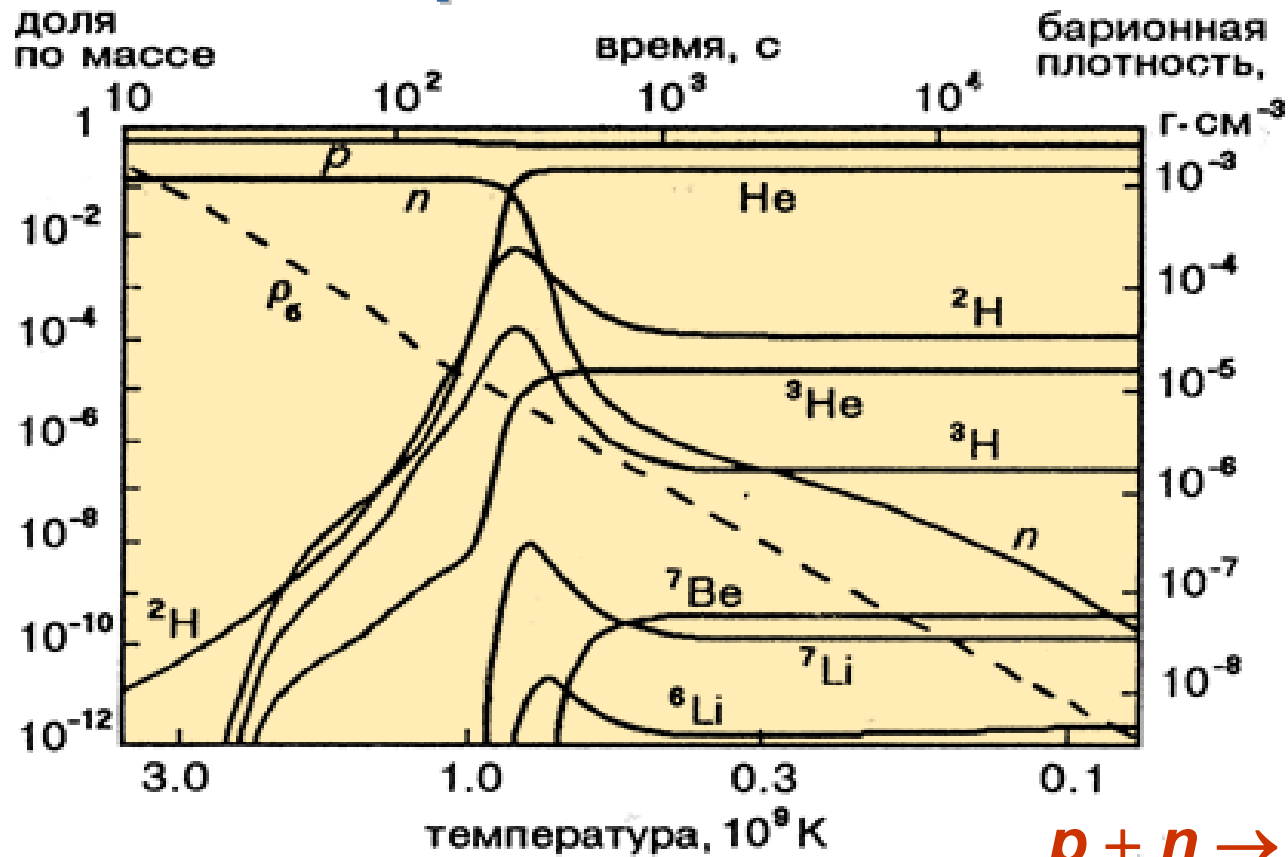


Накоплению дейтерия за счёт этой реакции на первых порах препятствует интенсивное разрушение дейтерия фотонами в обратном процессе фотодиссоциации. Отношение числа фотонов n_γ к числу барионов n_b :

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

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



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

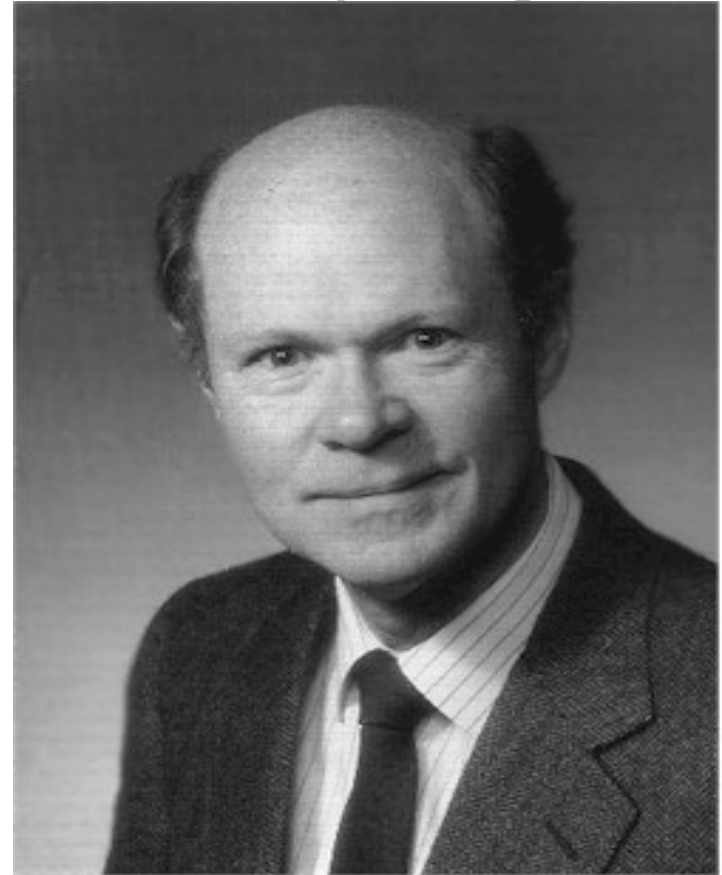
Реликтовое излучение – результат аннигиляции частиц и античастиц.

При $t \approx 400000$ лет температура Вселенной упала до нескольких тысяч градусов и плотность вещества снизилась до 10^{-20} г/см³, 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

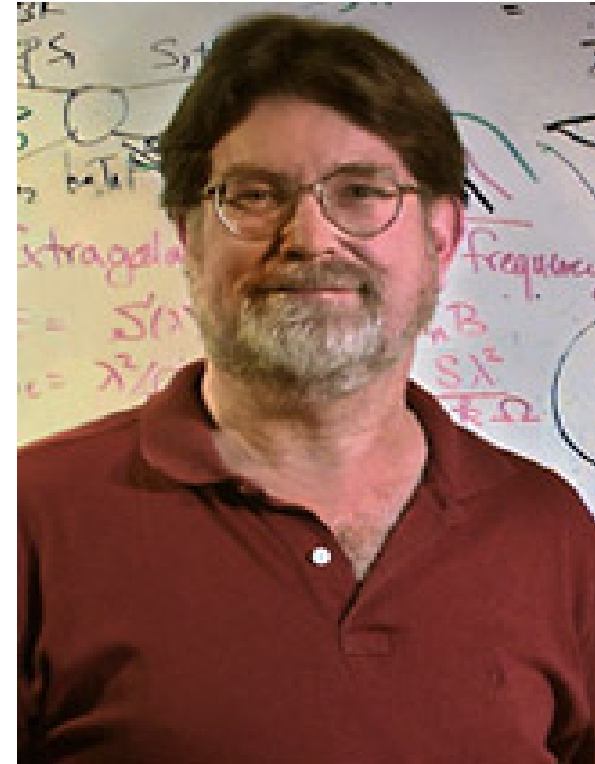
1978 г. — А. Пензиас и Р. Вильсон

За открытие космического микроволнового фонового излучения.

Микроволновое фоновое (реликтовое) излучение



John C. Mather
р. 1946

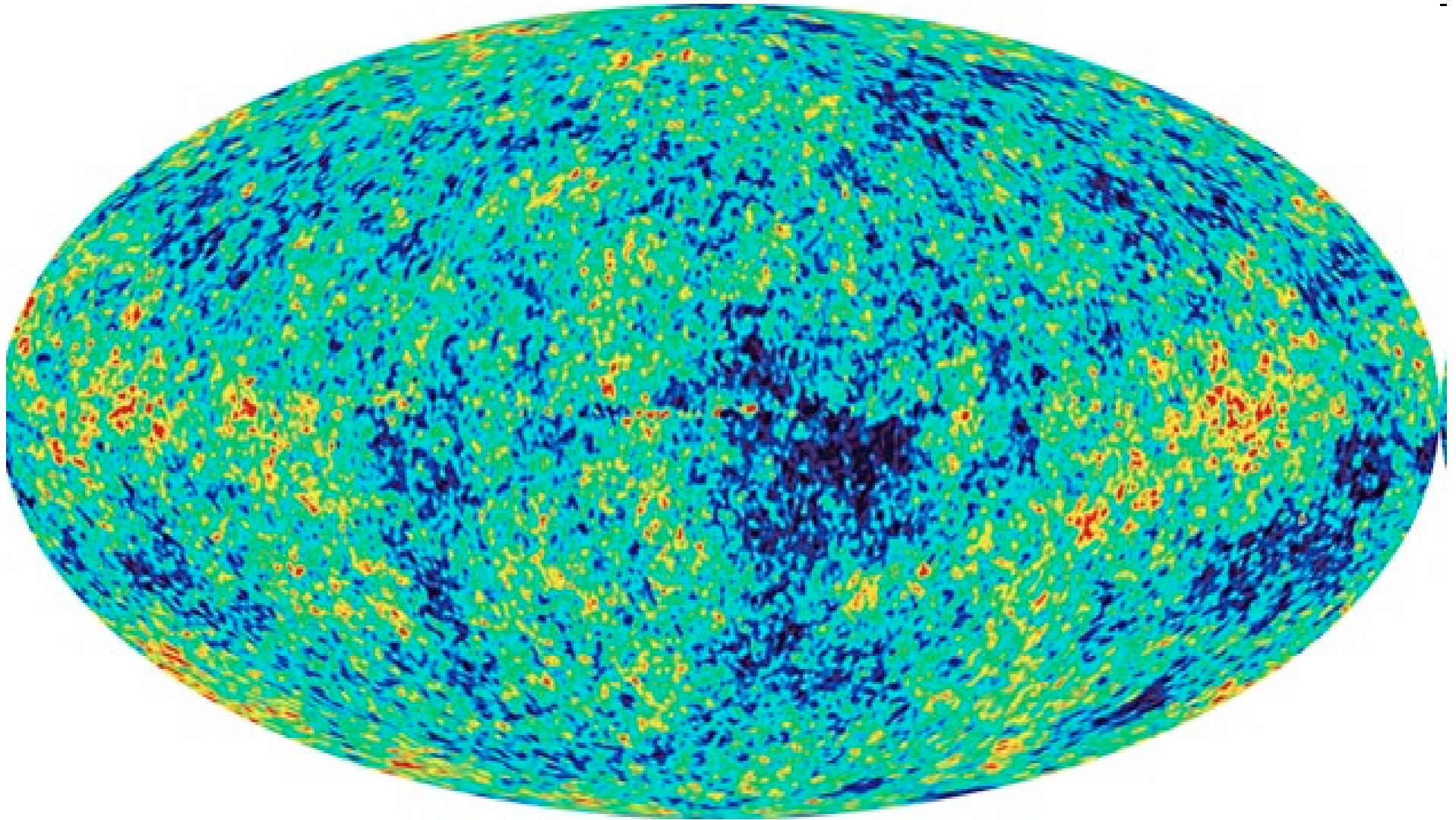


George F. Smoot
р. 1945

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

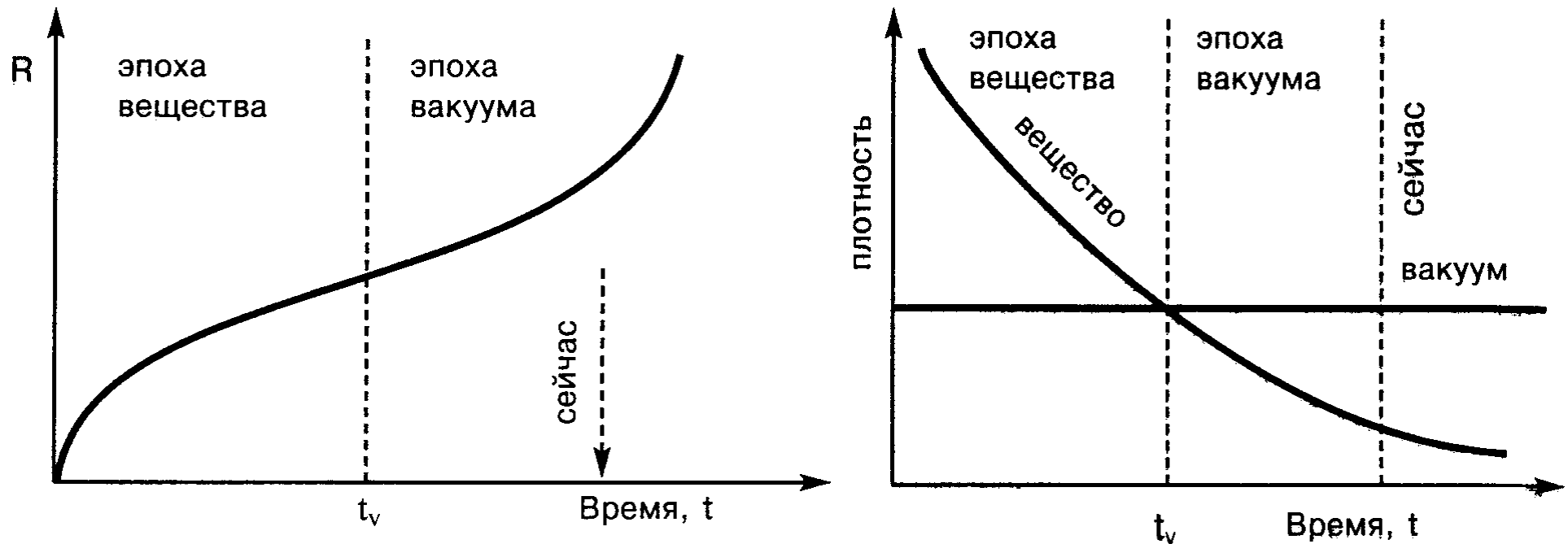
За открытие чернотельной формы и анизотропии
космического микроволнового фонового излучения

Реликтовое излучение



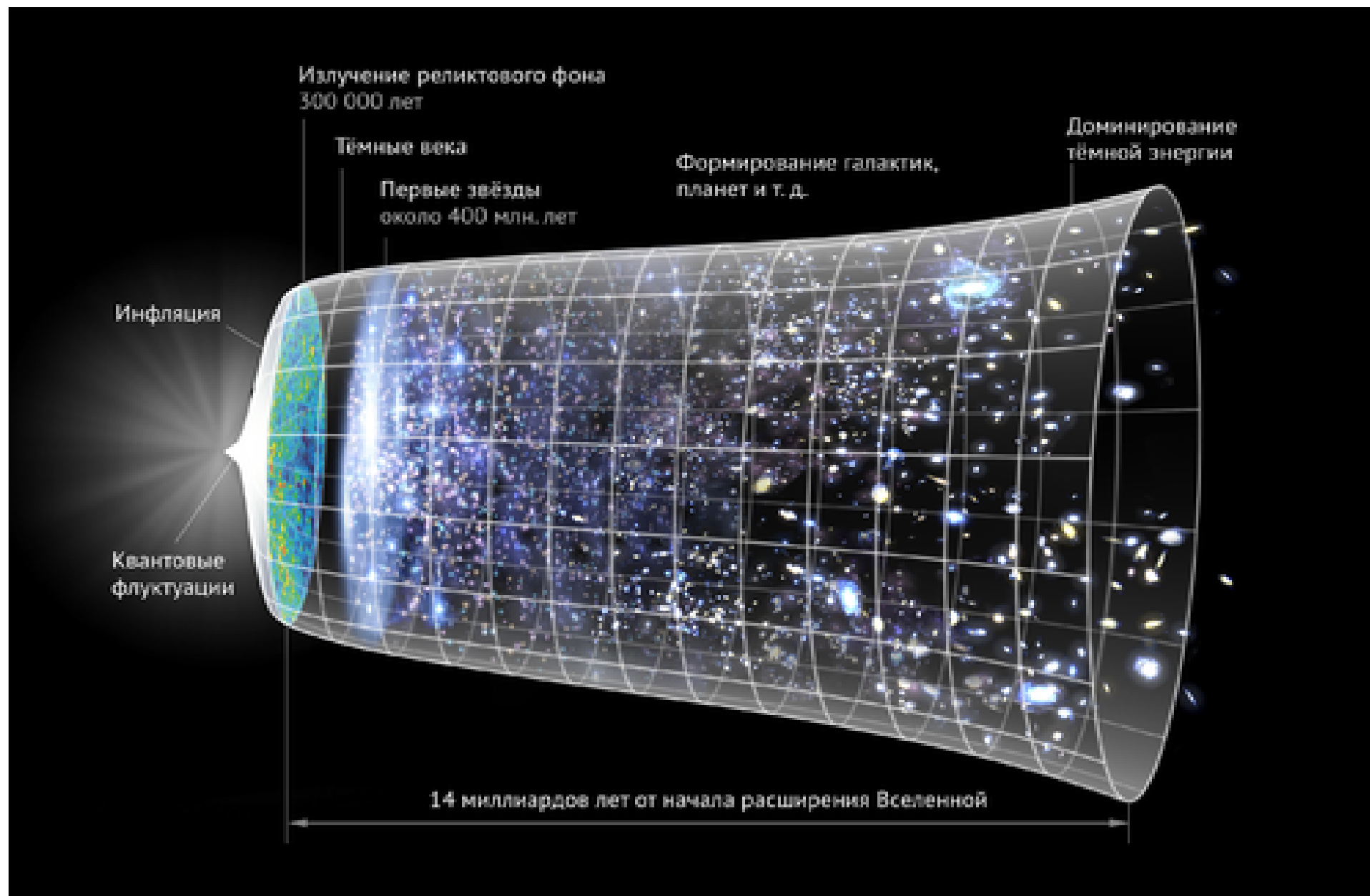
Анизотропия микроволнового фона во Вселенной

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 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%

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

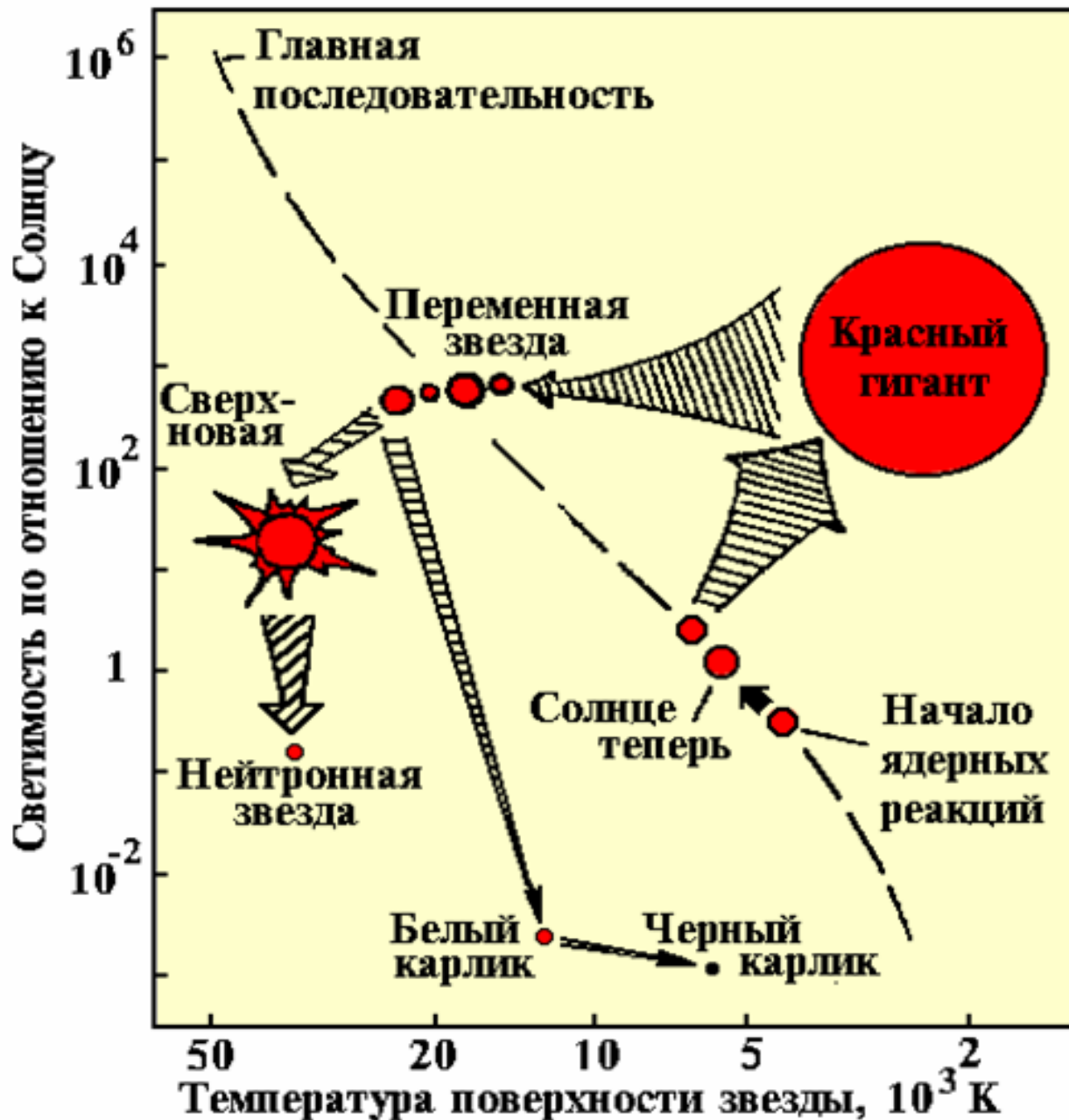
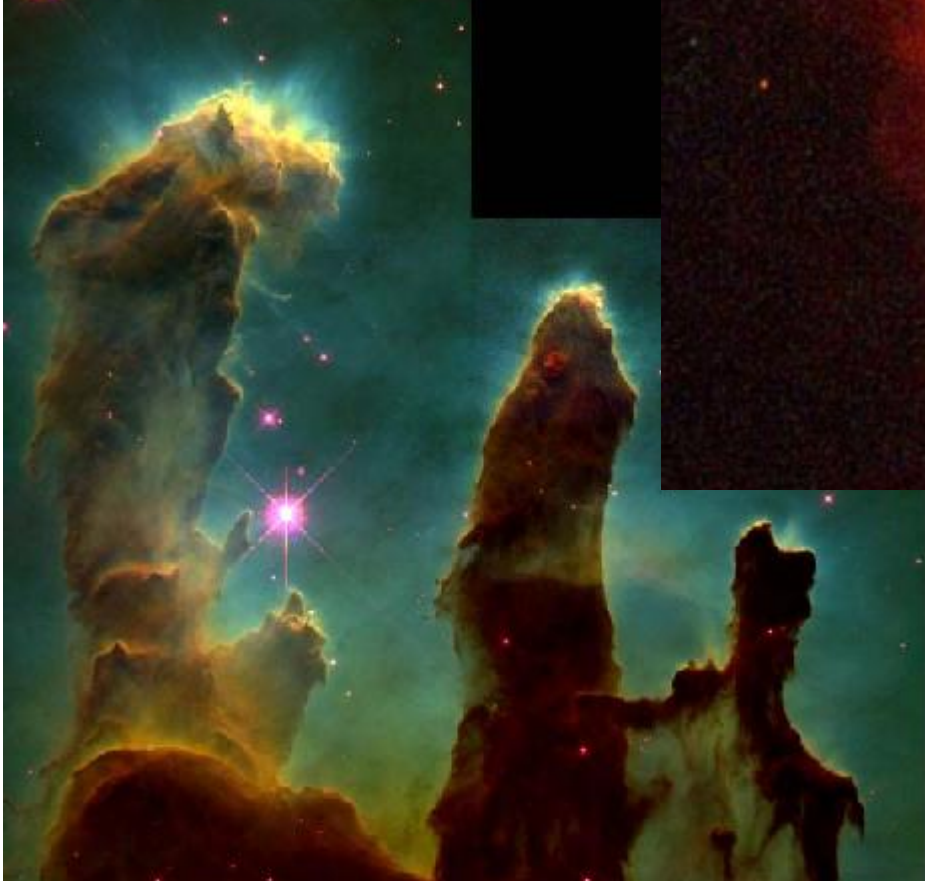
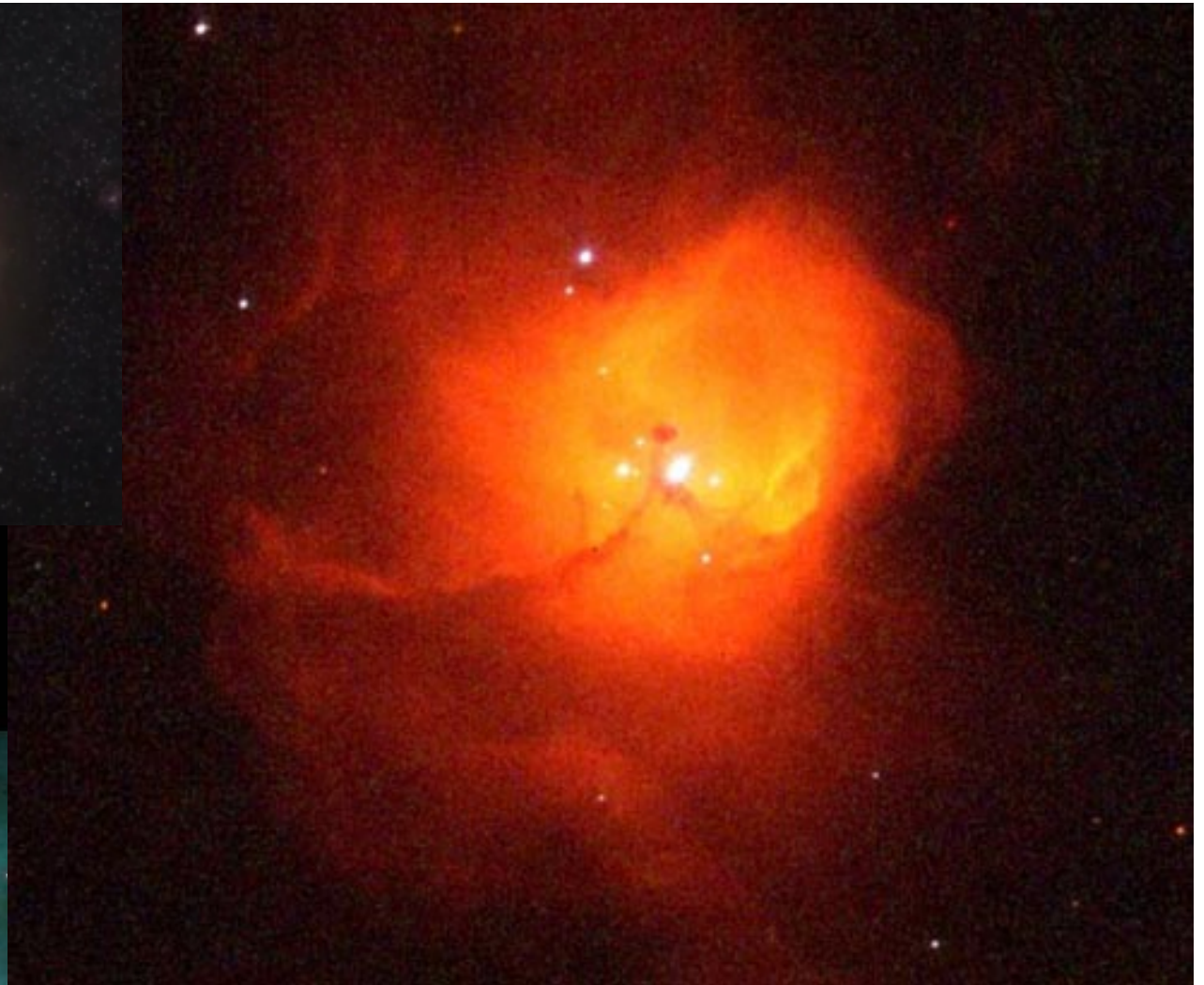


диаграмма
эволюции
звезд



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



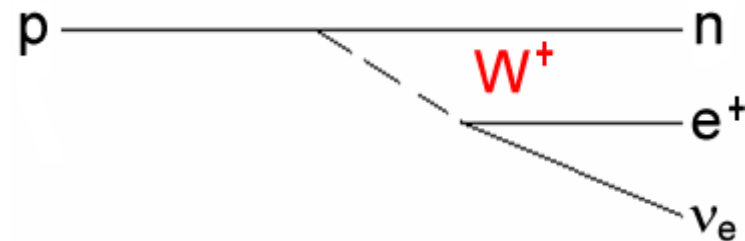
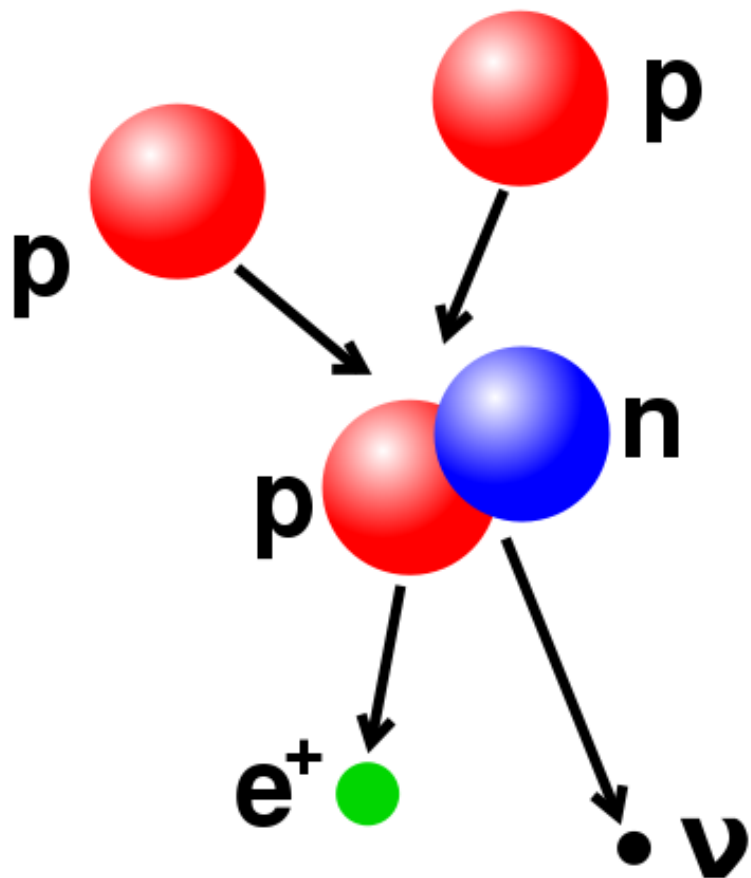
требует более высокой температуры (≈ 10 млн. К). Температура же в центре протозвезды составляет всего 1 млн. К. При такой температуре эффективно протекает реакция слияния ядра дейтерия



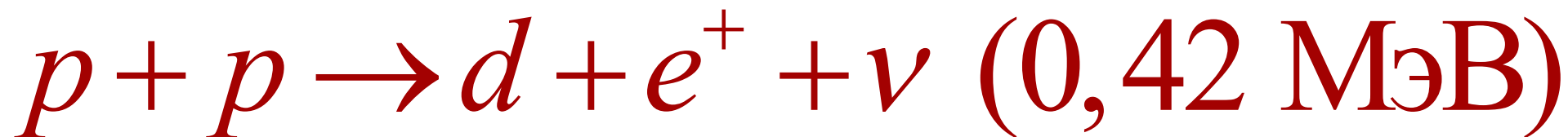
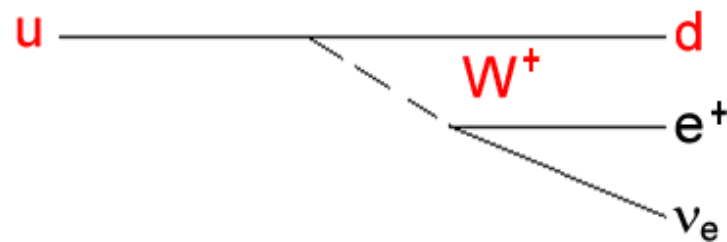
Дейтерий, как и ${}^4\text{He}$, образуется на дозвёздной стадии эволюции Вселенной и его содержание в протозвезде 10^{-4} - 10^{-5} от содержания протонов. Однако этого количества дейтерия достаточно для появления в центре протозвезды эффективного источника энергии.

Горение водорода

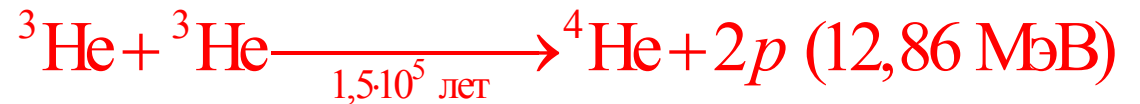
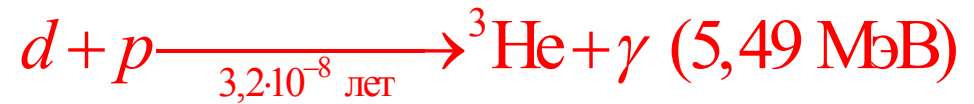
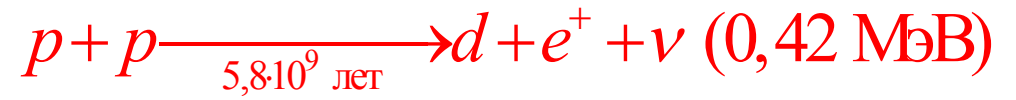
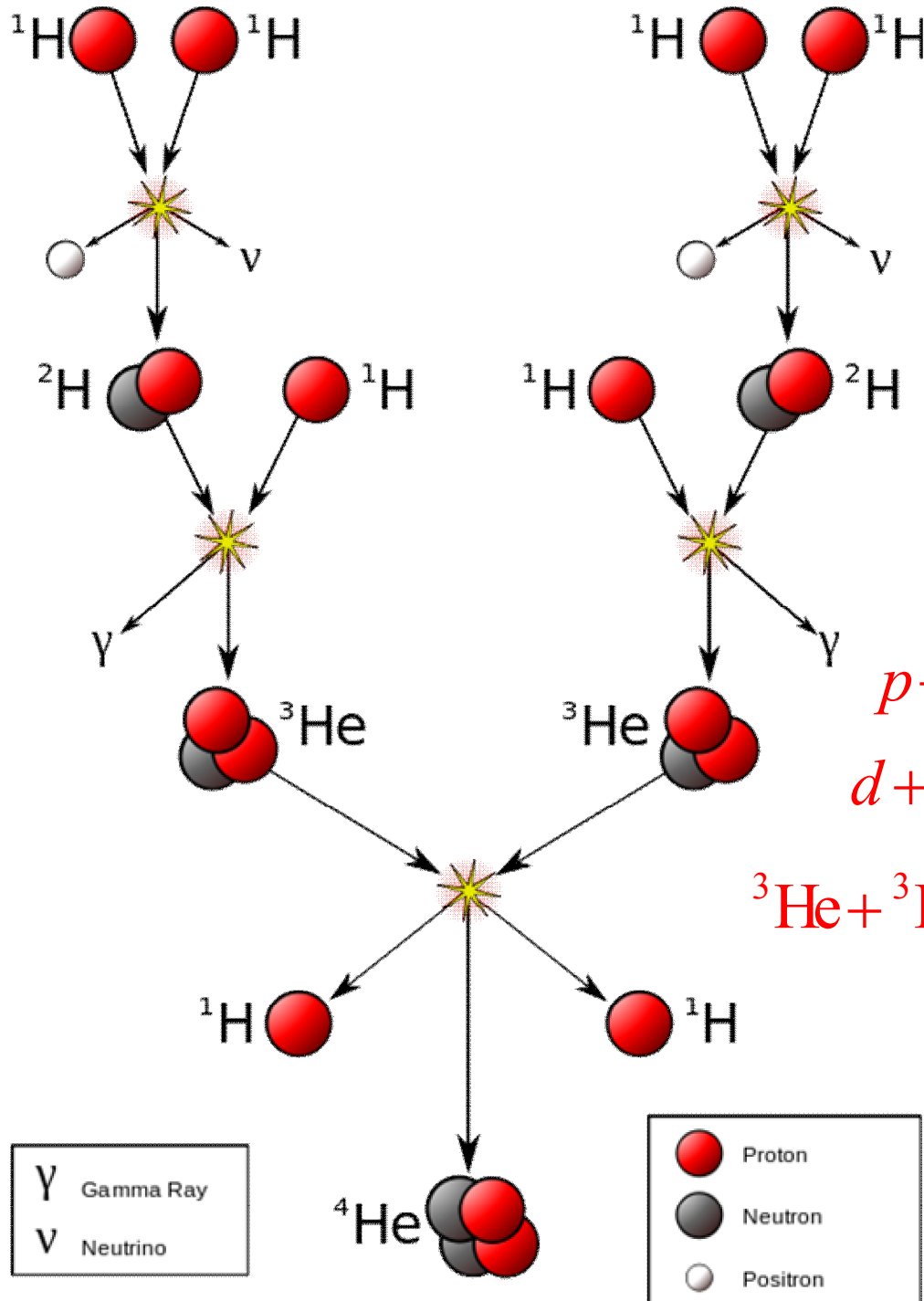
Горение водорода



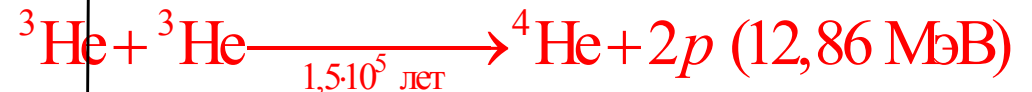
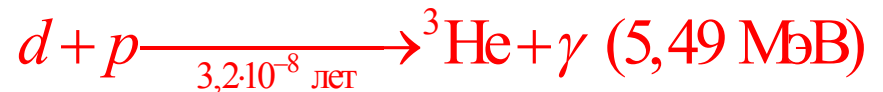
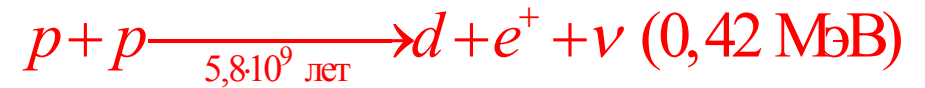
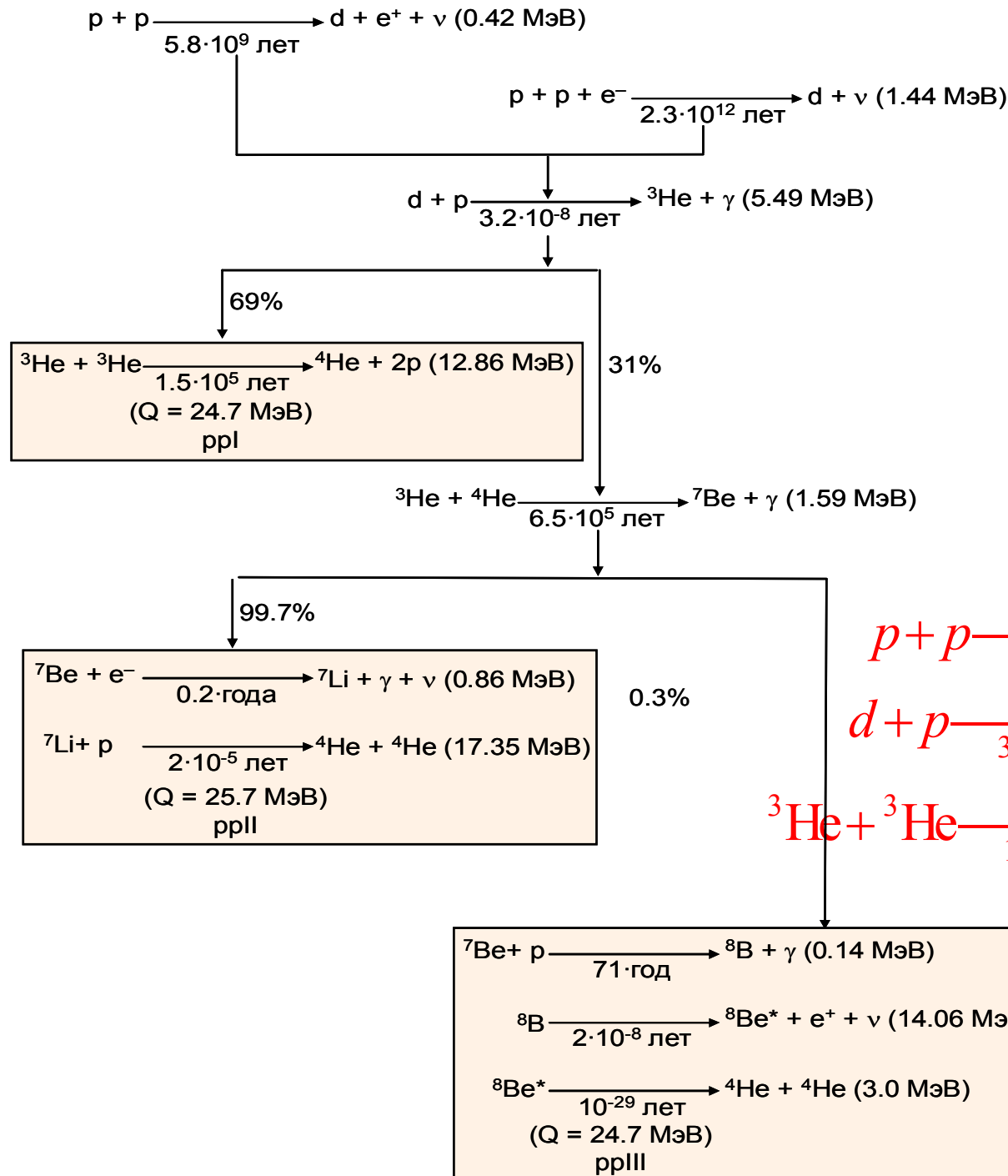
слабое взаимодействие



Горение водорода



Горение водорода



Горение гелия и более тяжелых ядер

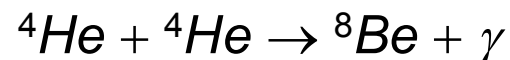
Горение гелия

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.

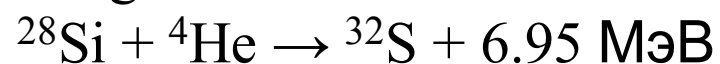
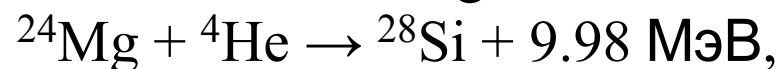
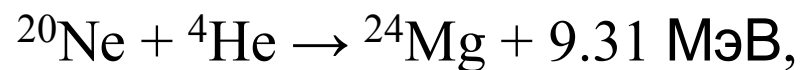
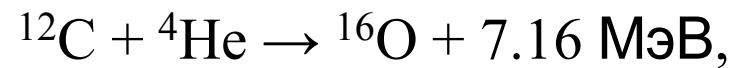
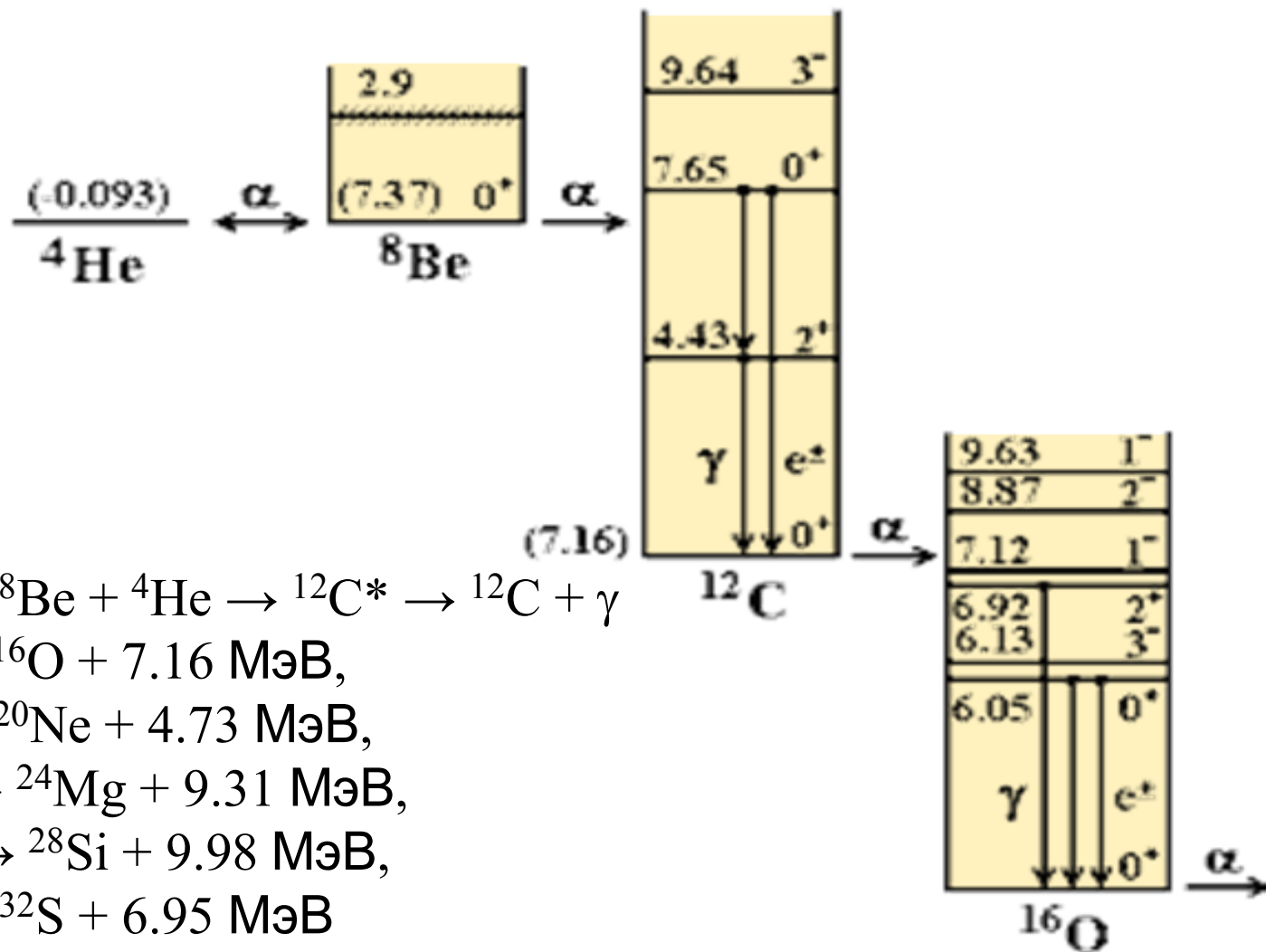
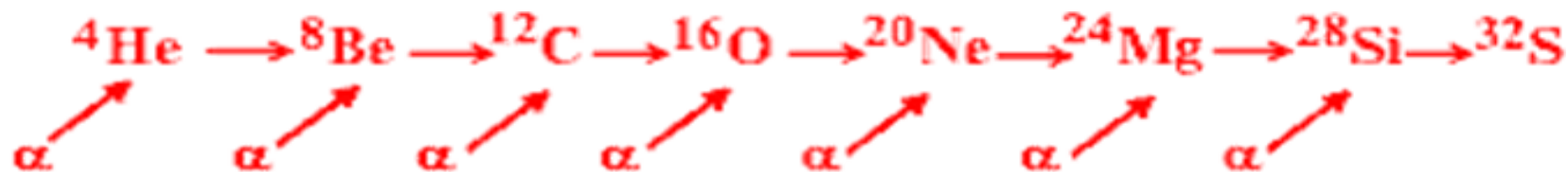
Кинетическая энергия сталкивающихся ядер гелия увеличивается и достигает в массивной звезде величины, достаточной для преодоления сил кулоновского отталкивания ядер гелия.

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

$$T = 10^9 - 10^{10} \text{ К}$$

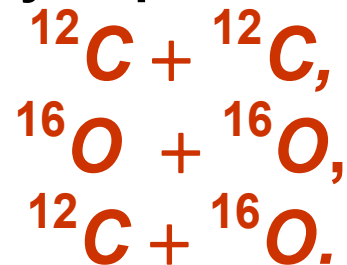
$$\rho = 10^5 - 10^7 \text{ г/см}^3$$



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



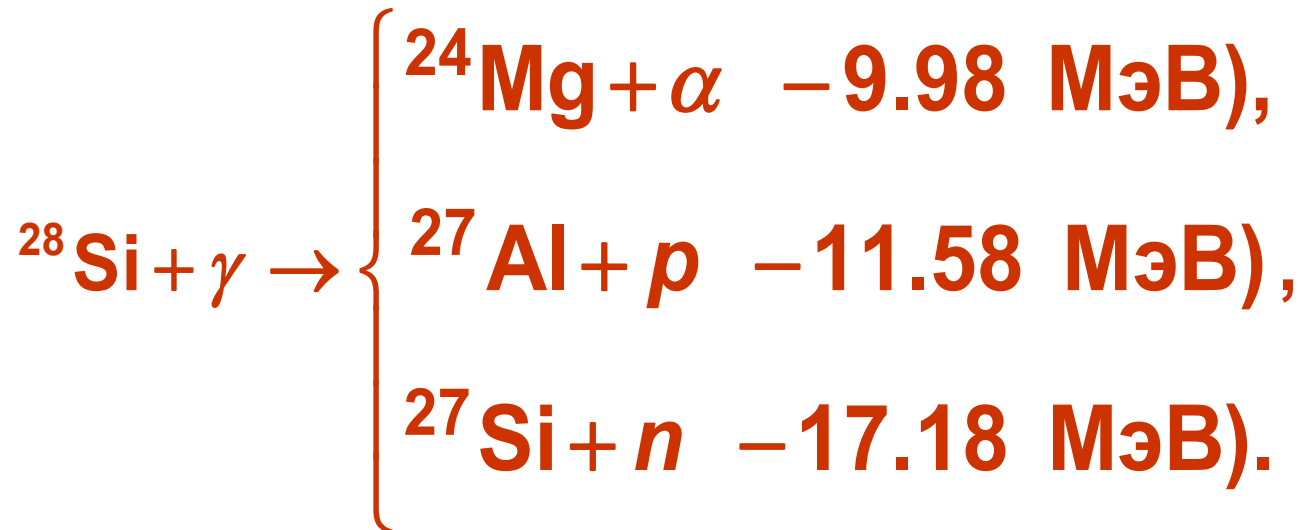
и реакции слияния углерода и кислорода



Фотоядерные реакции в звездах

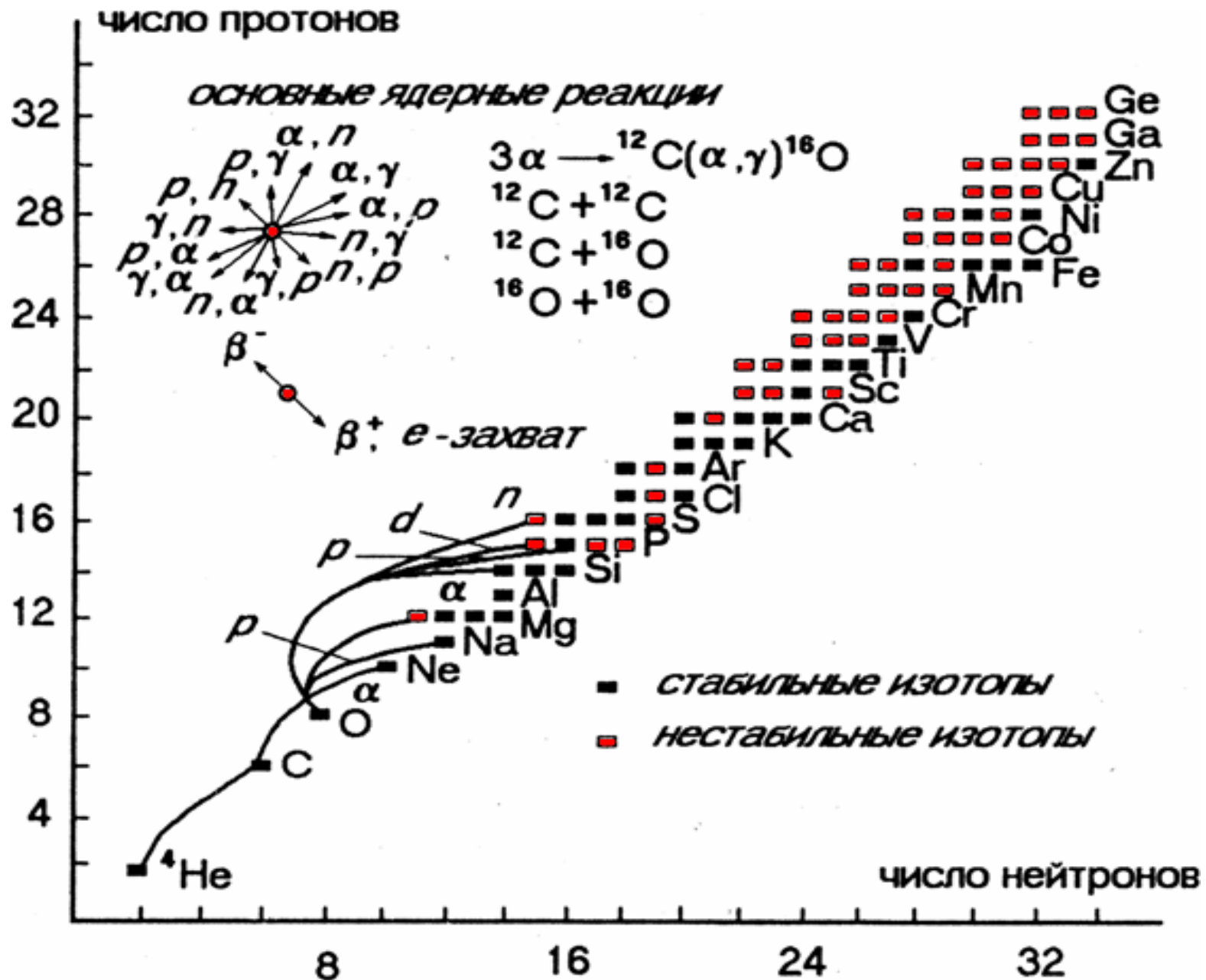
$T \sim 10^9$ К. Существенную роль начинают играть электромагнитные процессы – реакции под действием γ -квантов и электронов. Наряду с ростом энергии фотонов с увеличением температуры ($E_\gamma \sim T$) растёт их число ($N_\gamma \sim T^4$).

Реакции фоторасщепления кремния:

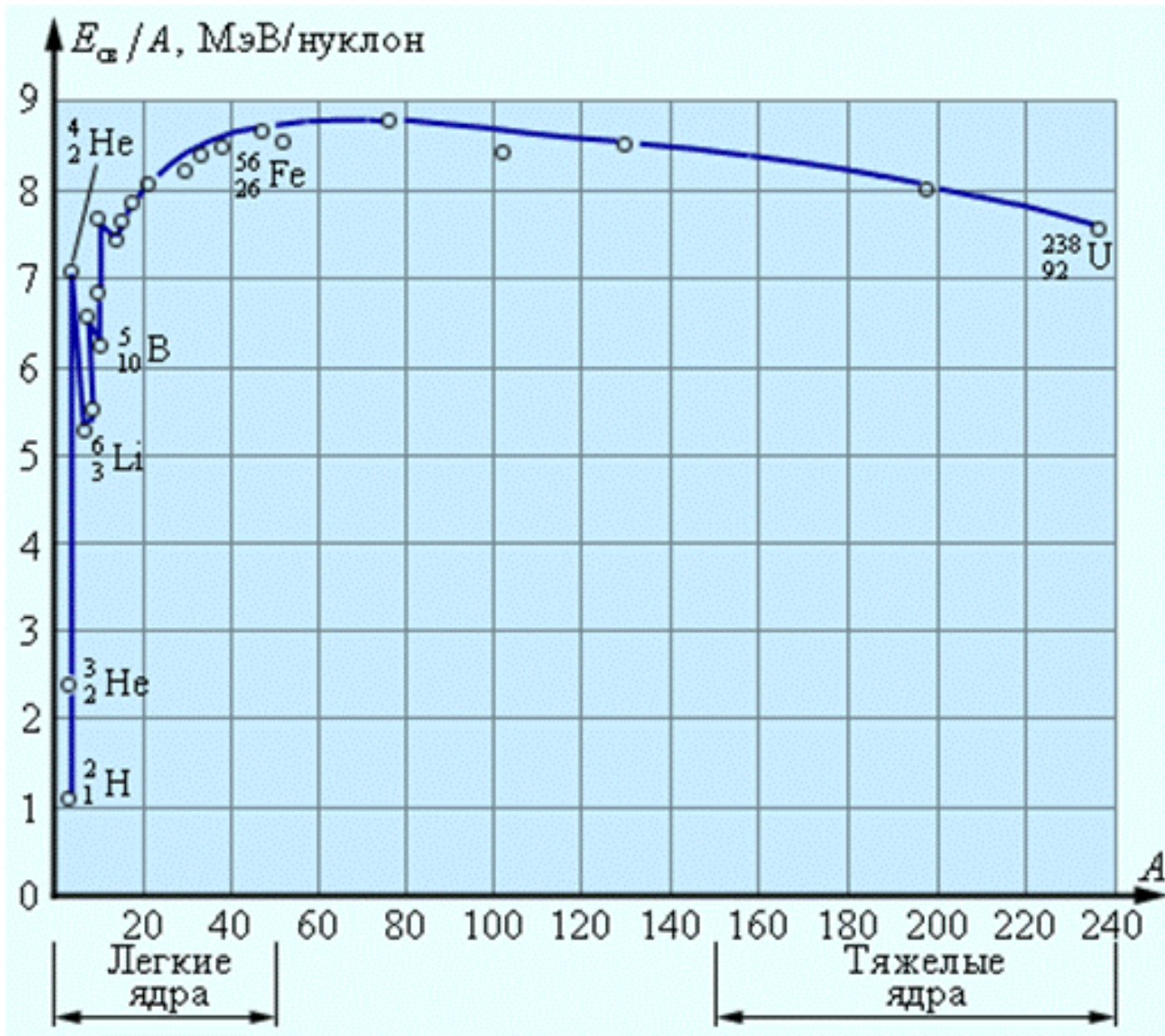


В результате появляется большое количество n , p и α -частиц и их роль в горении кремния увеличивается. ${}^{28}\text{Si}$ и образующиеся продукты с большим Z , облучаясь в потоках n , p , α и γ , в термодинамическом равновесии формируют большинство элементов в районе железного максимума.

Синтез элементов He.....Ge



Предел термоядерного синтеза

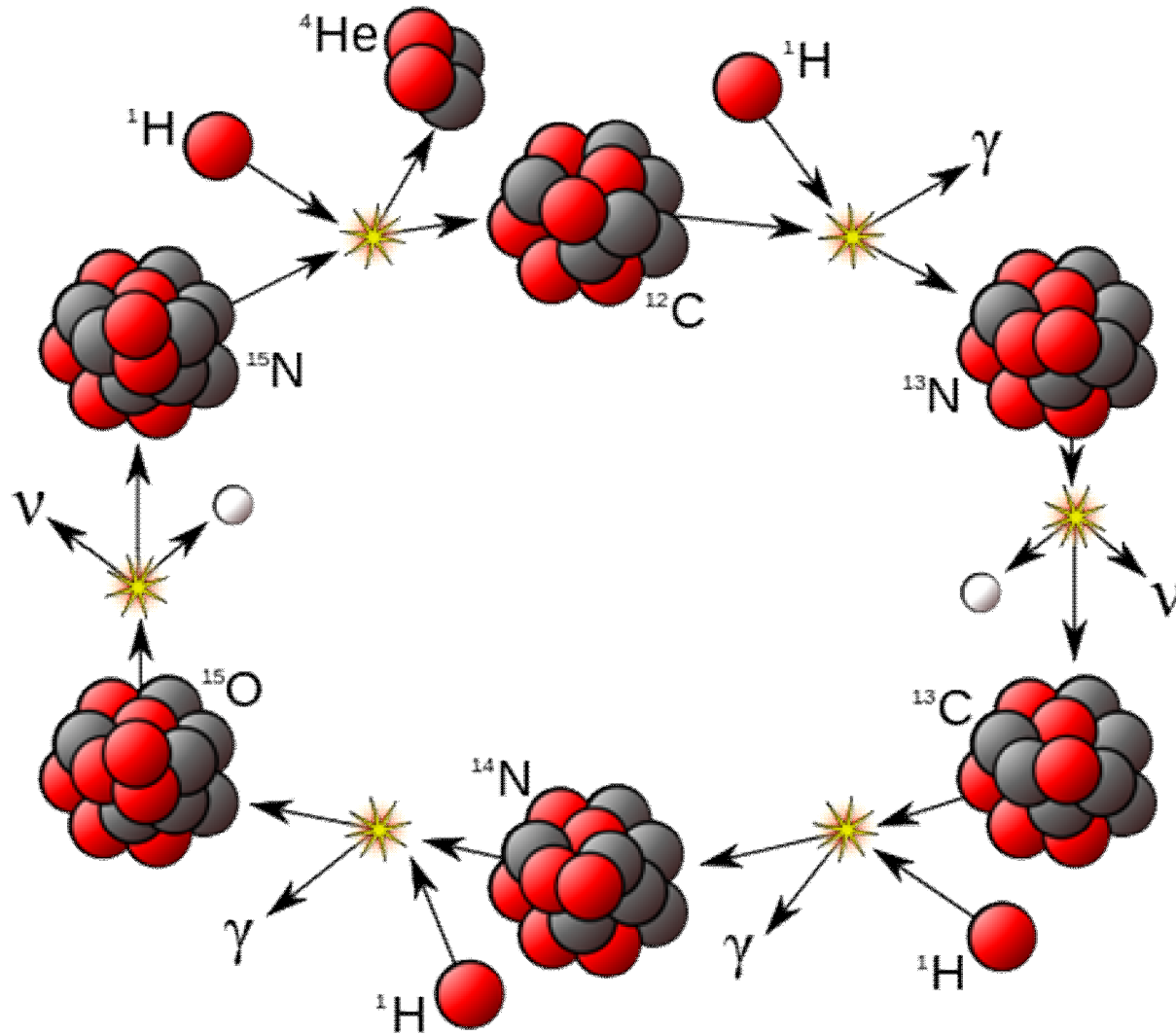





удельная
энергия
связи
атомных
ядер

Звезды второго поколения

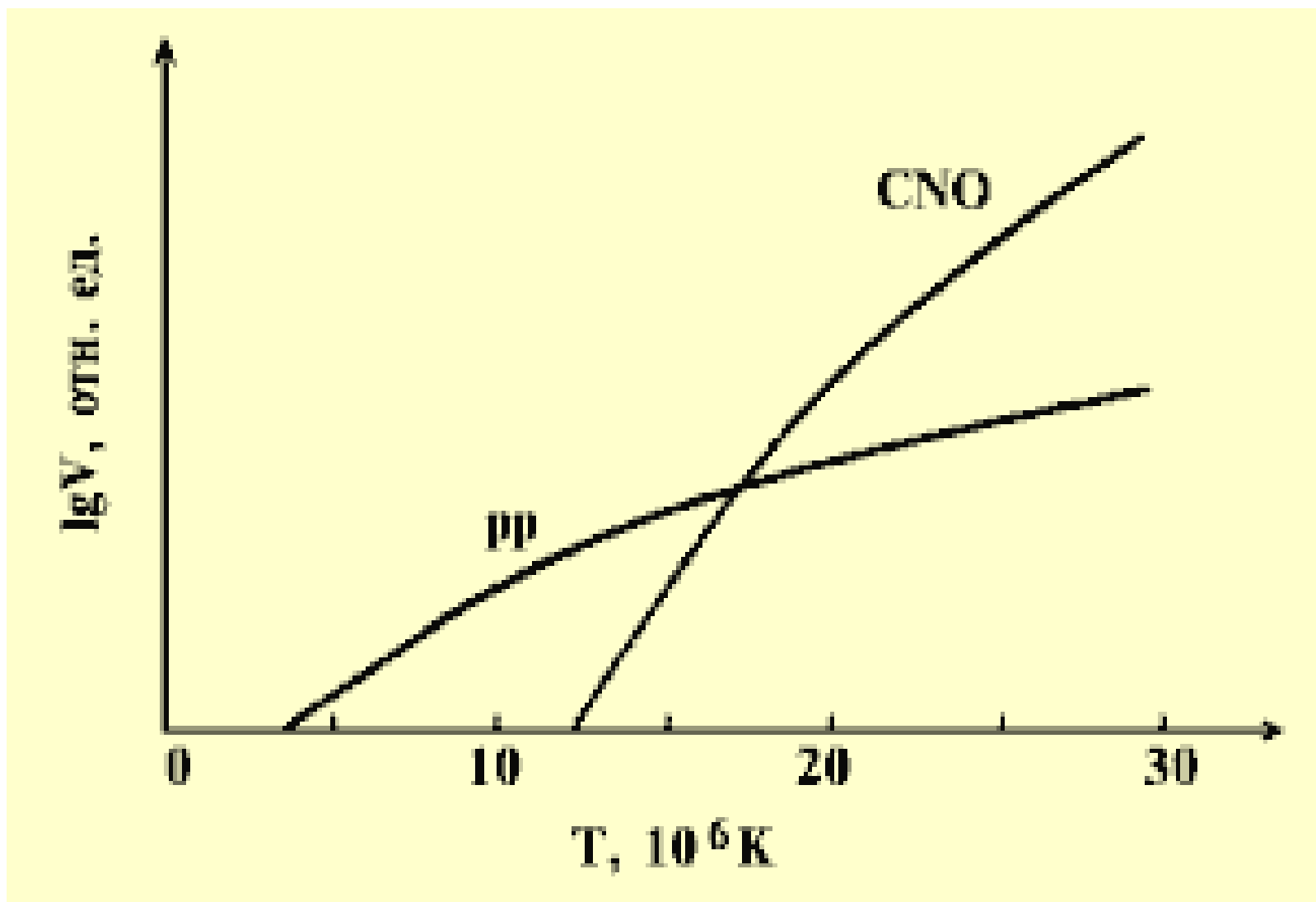
**CNO-цикл
и солнечные нейтрино**

CNO - ЦИКЛ



	Proton	γ	Gamma Ray
	Neutron	ν	Neutrino
	Positron		

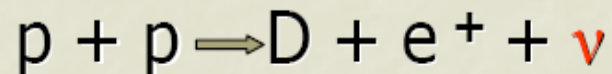
PP и CNO-циклы



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

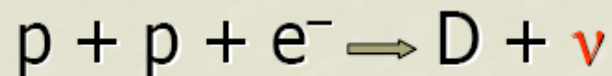
Источники солнечных нейтрино

Водородный цикл

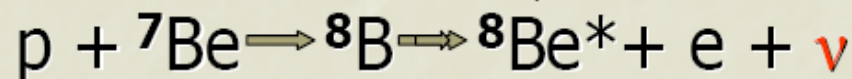
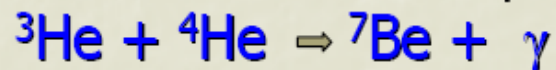
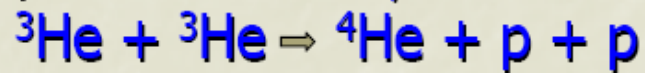
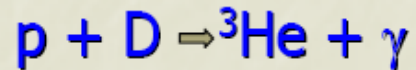


E_ν (МэВ) Поток ($\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$)

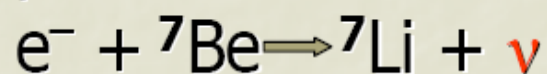
0 – 0.42 $6 \cdot 10^{10}$



1.44 $1.4 \cdot 10^8$

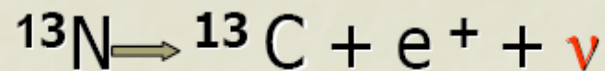
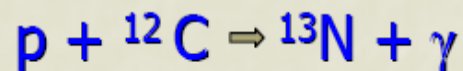


0 – 15 $5.8 \cdot 10^6$

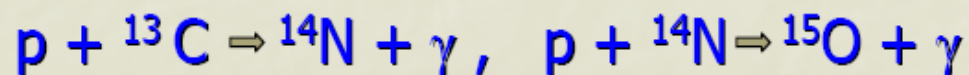


0.83 $4.7 \cdot 10^9$

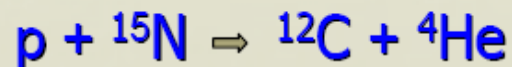
CNO цикл



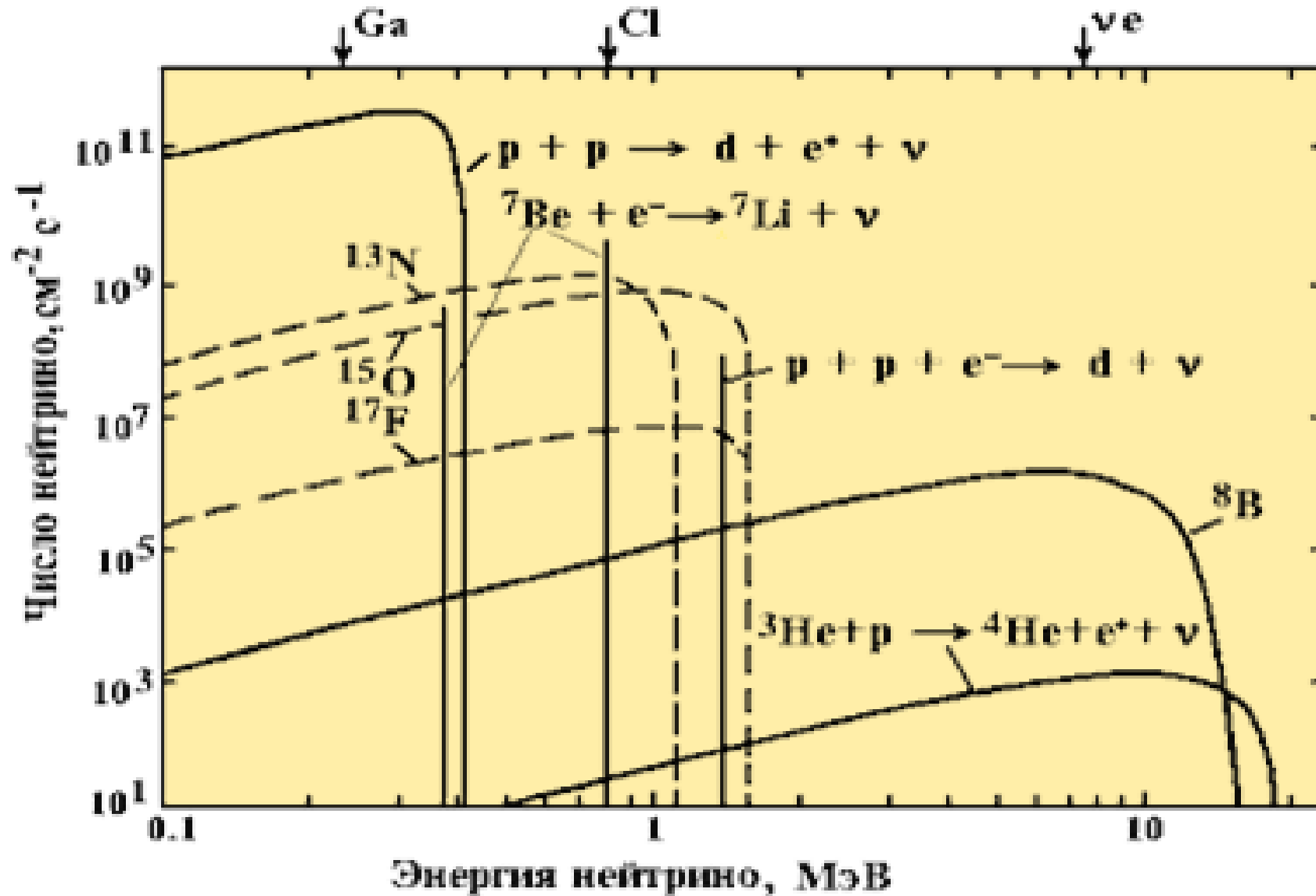
0 – 1.199 $6 \cdot 10^8$



0 – 1.732 $5 \cdot 10^8$

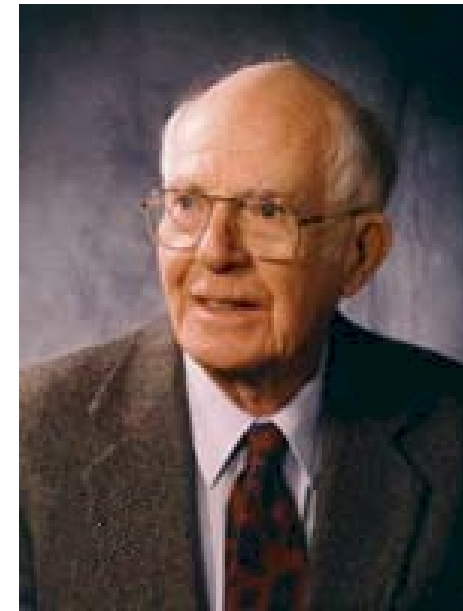
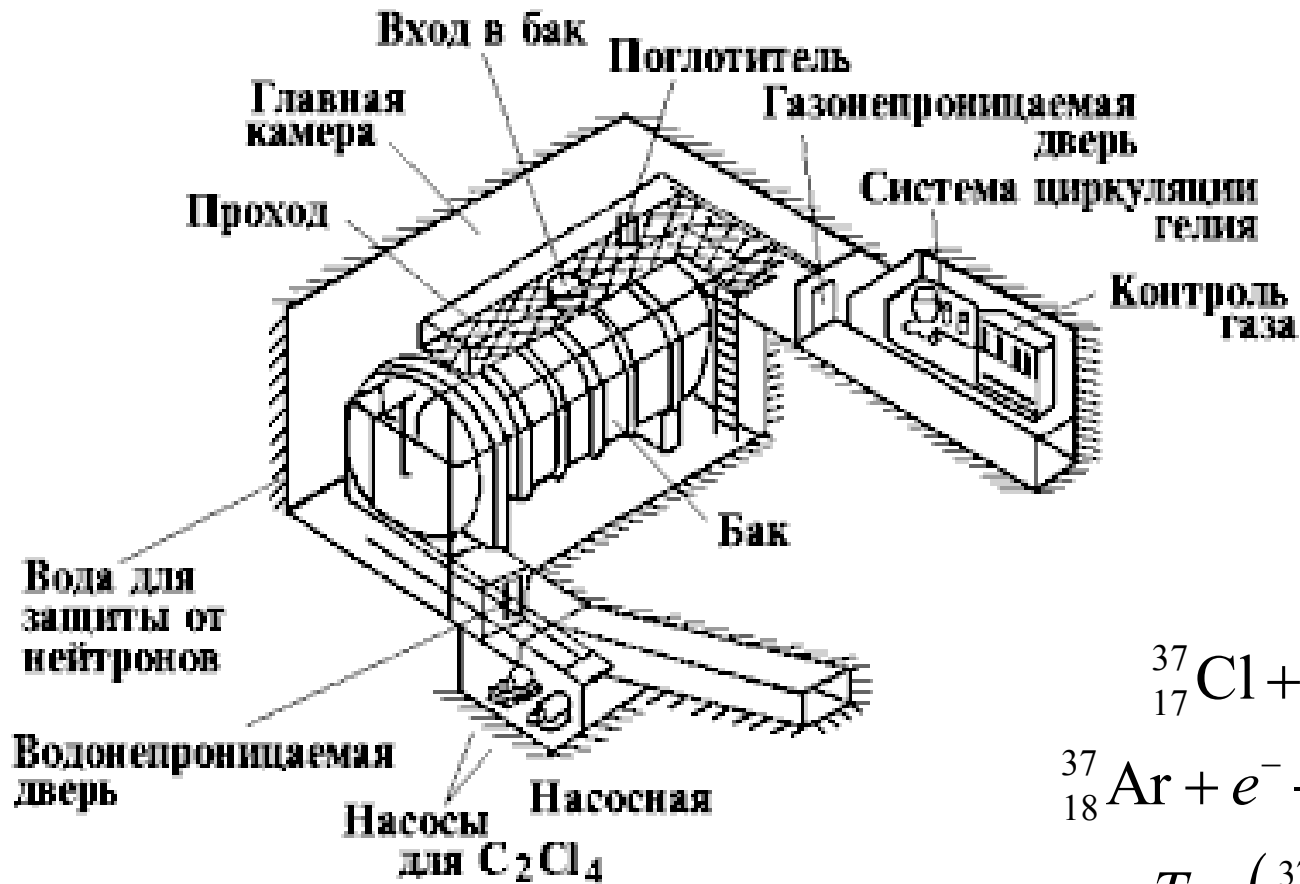


Солнечные нейтрино

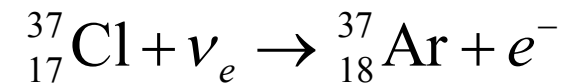


Спектр нейтрино, образующихся на Солнце в результате горения водорода в реакции $4p \rightarrow \alpha$ и в CNO-цикле.

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