



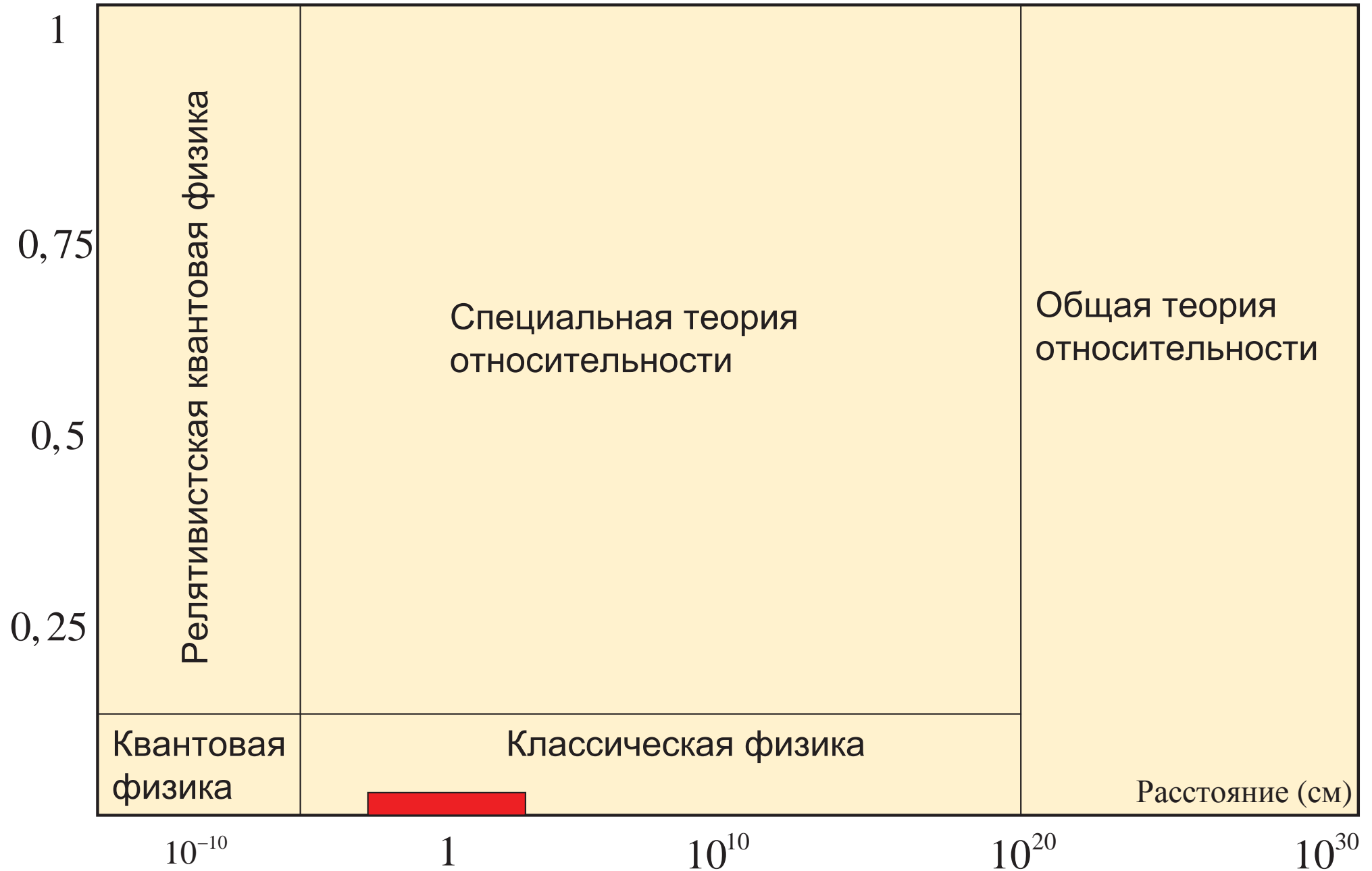
Рождение и жизнь атомных ядер

ОБРАЗОВАНИЕ АТОМНЫХ ЯДЕР

Эволюция представлений о Вселенной

Явления повседневной жизни

$$\beta = \frac{v}{c}$$



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.

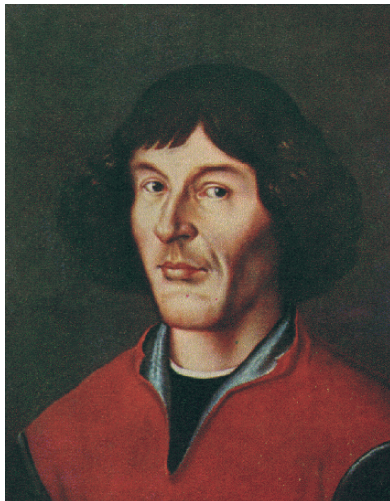
Геоцентрическая система Вселенной



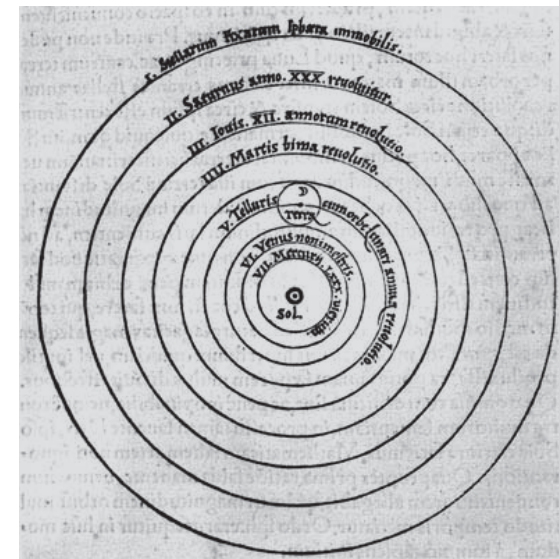
Claudius Ptolemaeus (87 - 150)



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.

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

L — световой поток на Землю
от всех звезд.

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




Стационарная Вселенная

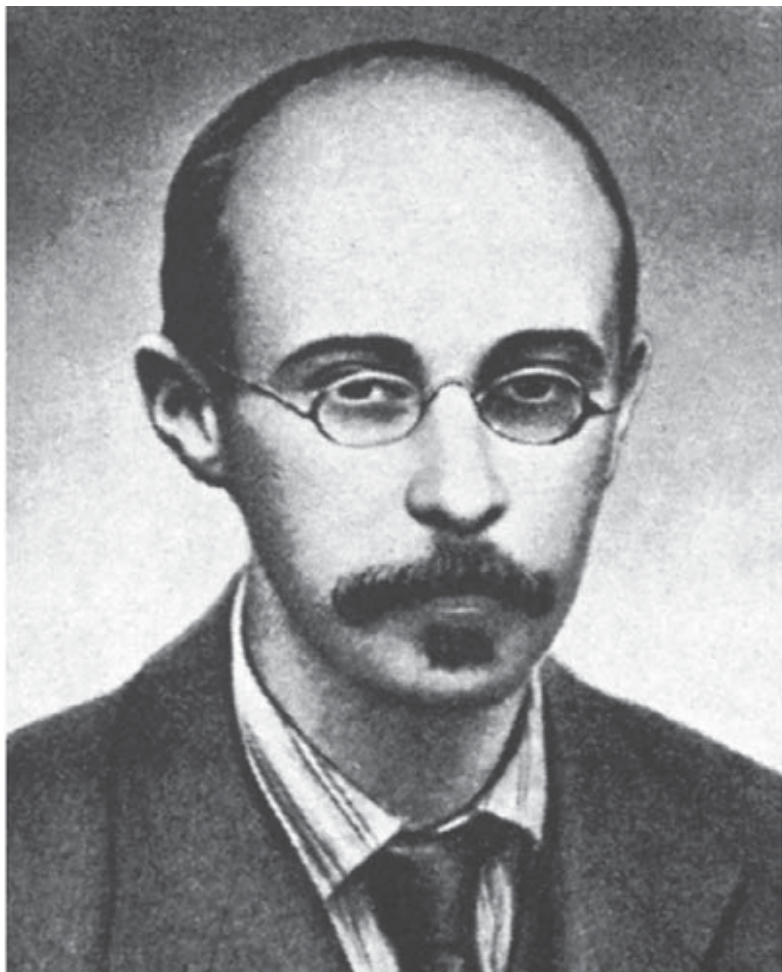


Общая Теория Относительности

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.

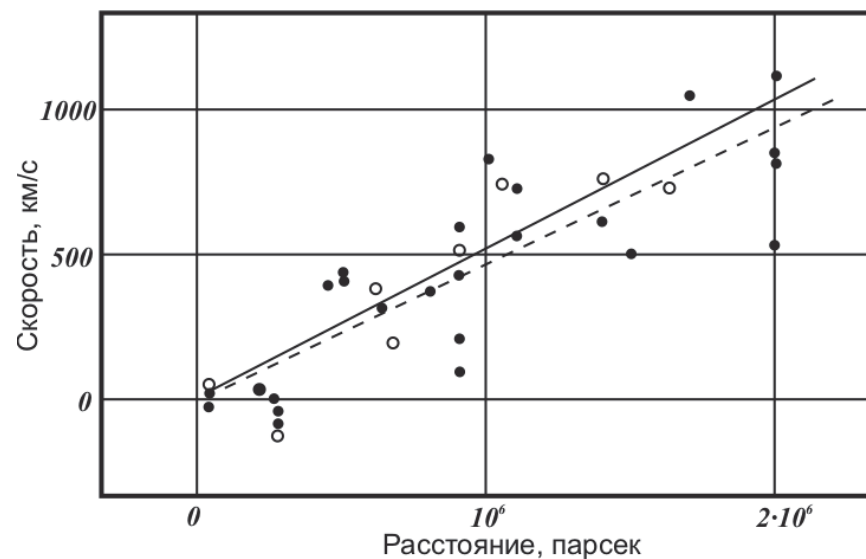
Расширение Вселенной



Эдвин Хаббл
1889 - 1953

Обсерватория Маунт-Вилсон

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

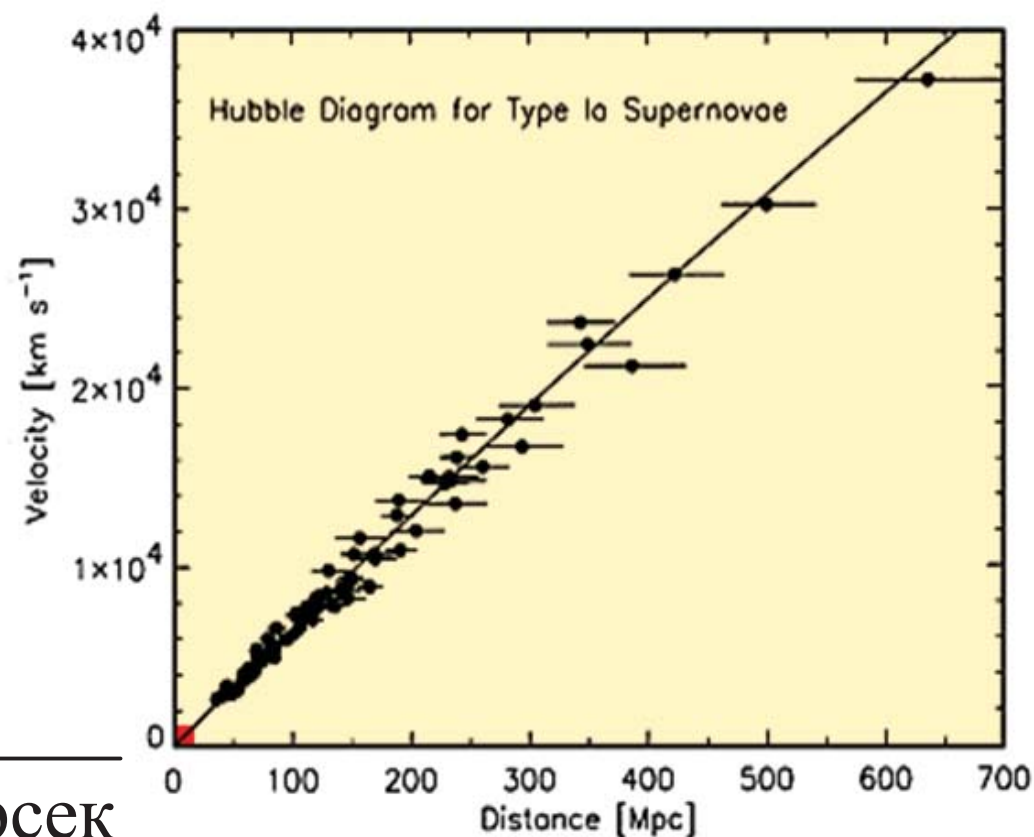


Расширение Вселенной

$$v = H_0 \cdot R$$

постоянная Хаббла

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



Эдвин Хаббл (1889-1953)



1924

туманность Андромеда – другая
галактика

1929

красное смещение, разбегание галактик

1990

запуск телескопа Хаббл



Теория Большого Взрыва

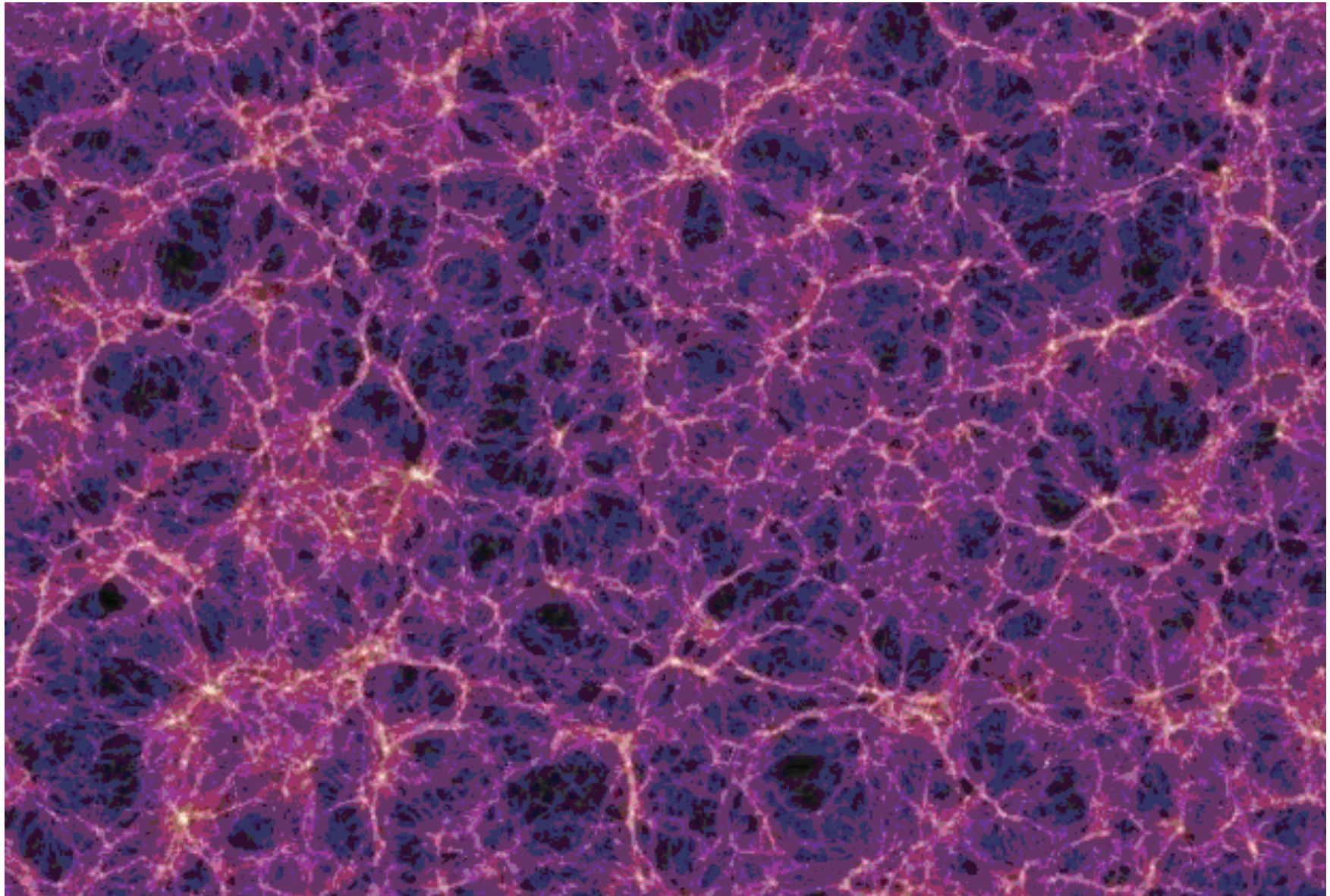
Крупномасштабная структура Вселенной



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.**

Крупномасштабная структура Вселенной



Туманность Андромеды



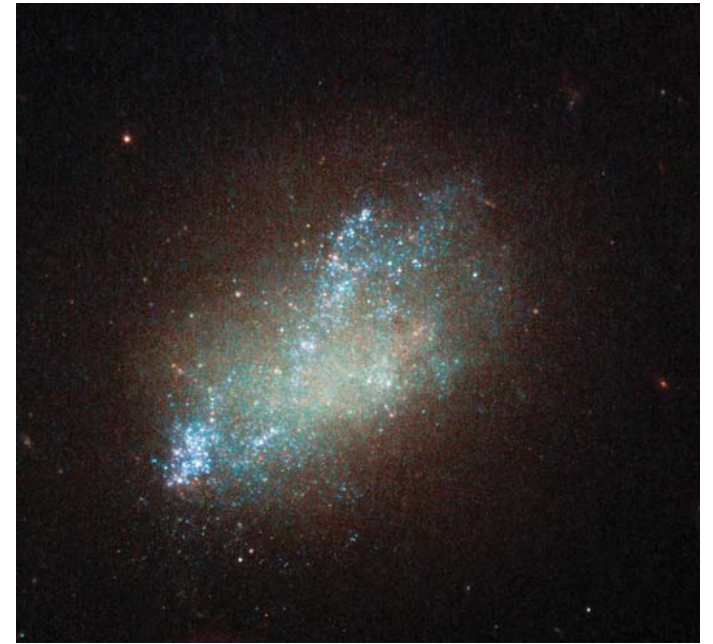
Типы галактик



спиральная



эллиптическая



иррегулярная

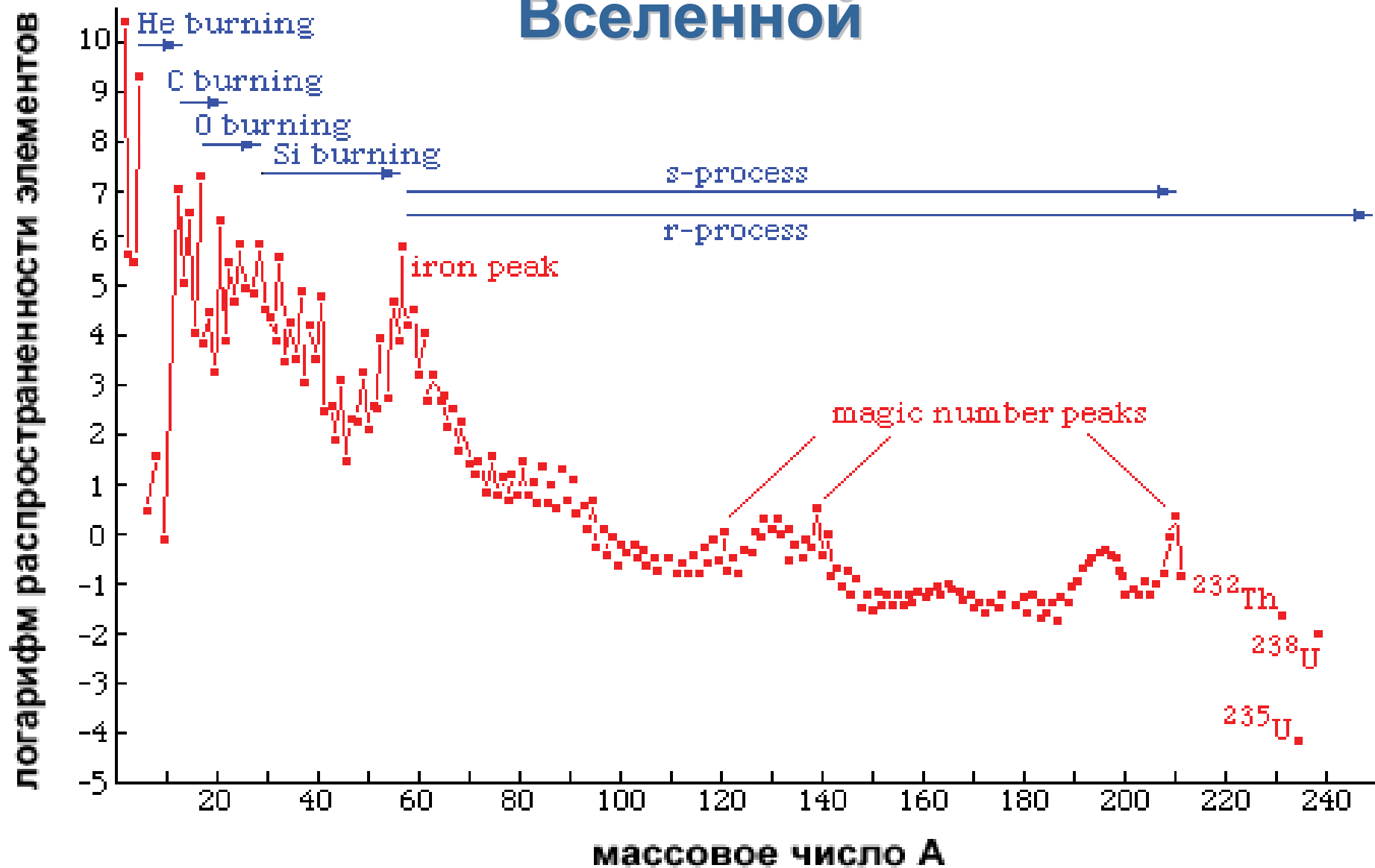
Типы галактик

Спиральные	Эллиптические	Иррегулярные
Процентное соотношение во Вселенной		
34%	13%	53%
Форма и структурные свойства		
Плоский диск звезд и газа со спиральными рукавами, утолщающимися к центру. Ядро из более старых звезд и примерно сферическое гало (межзвездный газ, немного звезд и магнитные поля)	Диск отсутствует. Звезды распределены в объеме, напоминающем эллипсоид.	Никаких внутренних особенностей, кроме плотного ядра в центре. Структура отсутствует.
Состав звезд		
Диск содержит молодые и старые звезды. Ядро - только старые	Только старые звезды.	Молодые и старые звезды.
Газ и пыль		
В диске довольно много газа и пыли, в гало — мало или нет совсем.	Газа и пыли мало или нет совсем.	Газа и пыли много.
Образование звезд		
Звезды продолжают рождаться в спиральных рукавах.	Звезды практически не образуются последние 10 млрд. лет.	Энергичное рождение звезд сейчас.
Движение звезд и газа		
Газ и звезды в диске движутся по эллиптическим орбитам вокруг галактического центра. Звезды в гало движутся хаотически.	Звезды движутся хаотически.	Звезды и газ движутся хаотически.

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 = 4.6·10 ⁻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%

Распространенность нуклидов во Вселенной



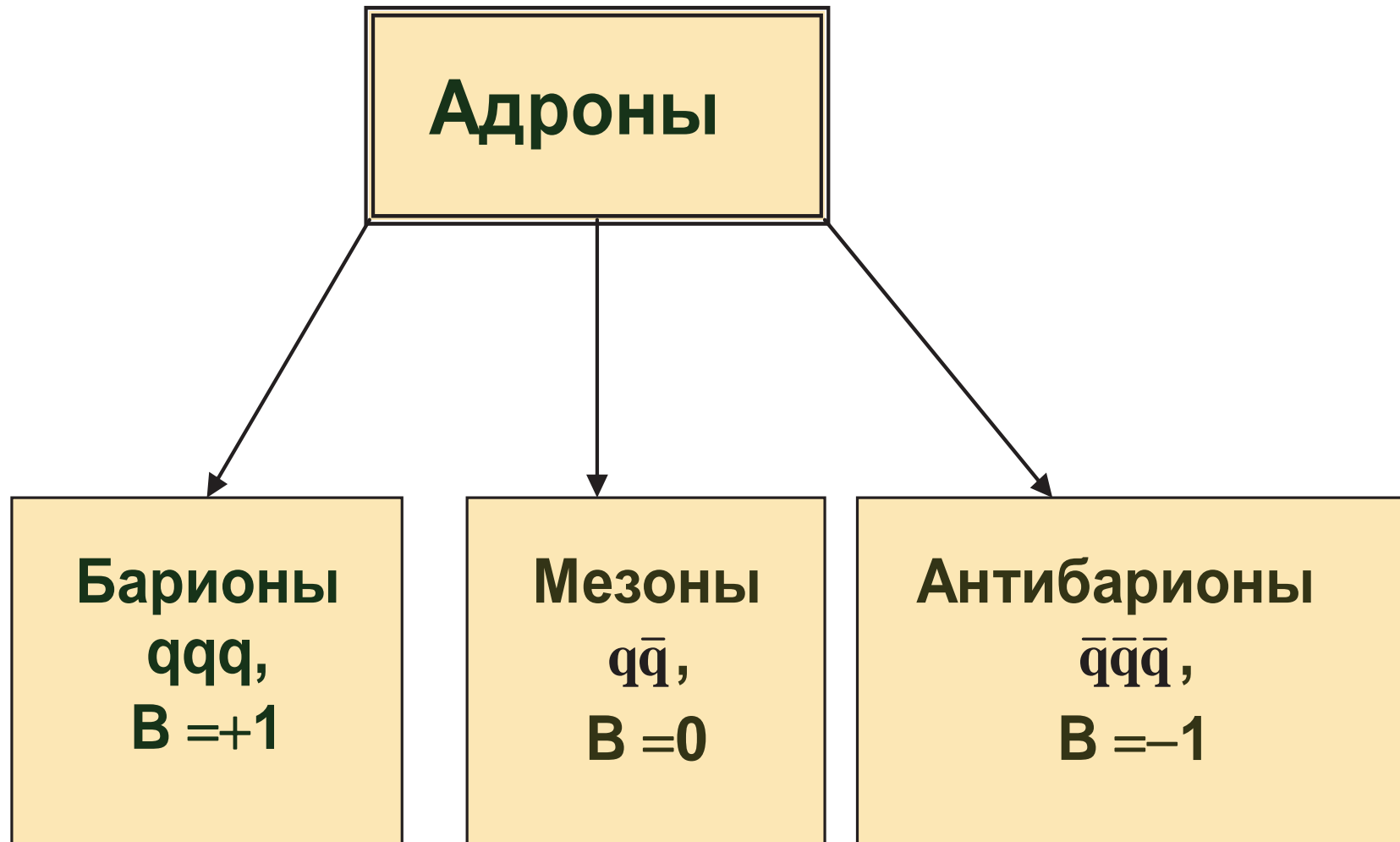
Распространенность Si принята равной 10^6 .

Фундаментальные частицы Стандартной Модели

 e^{-} μ^{-} τ^{-} ν_e ν_{μ} ν_{τ} u c t d s b $8g, \gamma, W^{+}, W^{-}, Z$ H – бозон Хиггса

Лептоны и кварки связаны в обычной материи. Атом

Адроны – системы связанных кварков



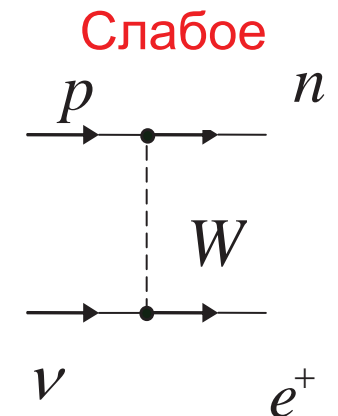
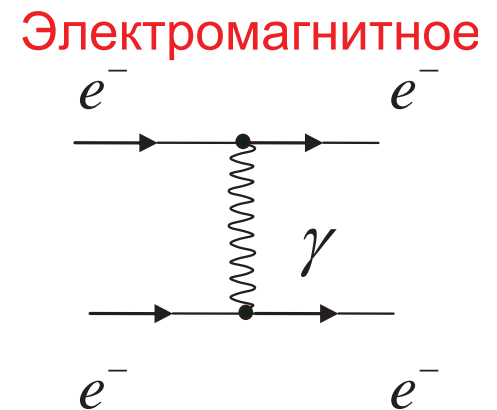
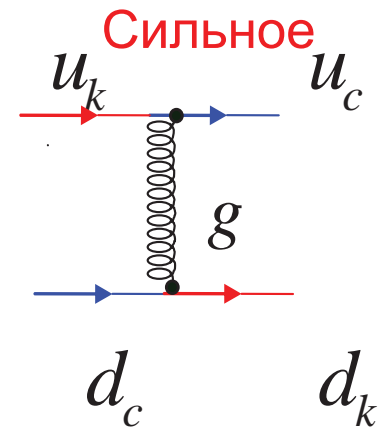
Кварки объединяются в частицы, называемые адронами.

Модель кварков

- Квантовые числа кварков, образующих адрон, определяют квантовые числа адронов. Адроны имеют определенные значения электрического заряда Q , спина J , чётности P , изоспина I . Квантовые числа s (странность), c (очарование или шарм), b (*bottom*) и t (*top*) разделяют адроны на обычные нестранные частицы (p, n, π, \dots), странные частицы ($K, \Lambda, \Sigma, \dots$), очарованные ($D, \Lambda_c, \Sigma_c, \dots$) и боттом-частицы (B, Λ_B, Ξ_B).
- t -кварк имеет время жизни $\approx 10^{-25}$ с, поэтому он не успевает образовать адрон.
- Всё многообразие адронов возникает в результате различных сочетаний u -, d -, s -, c -, b -кварков, образующих связанные состояния.
- барионы (фермионы с барионным числом $B = 1$) строятся из трех кварков;
- мезоны (бозоны с барионным числом $B = 0$) строятся из кварка и антикварка;
- квантовое число — цвет кварка — имеет три значения: красный, зеленый, синий;
- все известные адроны — бесцветны.

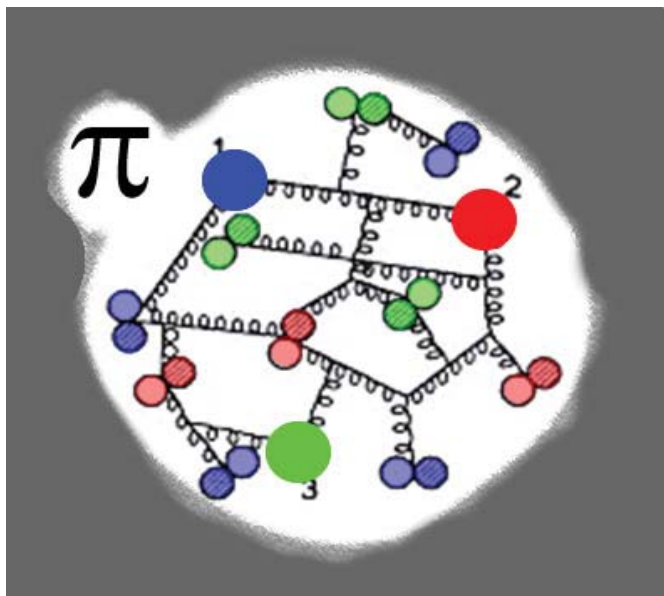
Фундаментальные взаимодействия. Калибровочные бозоны

Взаимодействие	На какие частицы действует	Калибровочные бозоны
Сильное	Все цветные частицы	8 безмассовых глюонов, спин $J = 1$
Электромагнитное	Все электрически заряженные частицы	Безмассовый фотон, спин $J = 1$
Слабое	Кварки, лептоны, калибровочные бозоны W^{\pm}, Z	Массивные бозоны W^{+}, W^{-}, Z , спин $J = 1$, $m_W c^2 \approx 80 \text{ ГэВ}$, $m_Z c^2 \approx 91 \text{ ГэВ}$
Гравитационное	Все частицы	Безмассовый гравитон, спин $J = 2$



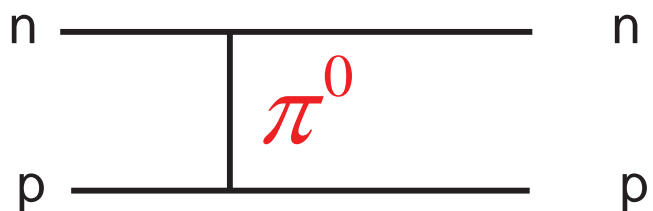
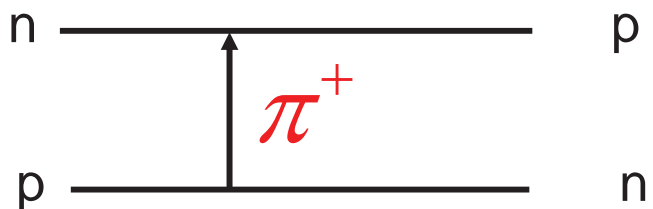
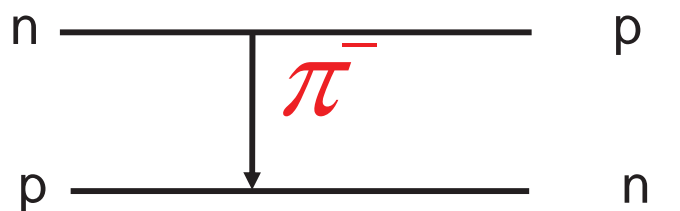
Источником калибровочных бозонов являются заряды соответствующих фундаментальных взаимодействий.

Структура протона



В экспериментах по глубоко неупругому рассеянию электронов и нейтрино были определены заряды и спины партонов внутри нуклона.

1. Внутри нуклона обнаружены точечноподобные объекты – партоны, в которых сосредоточена вся масса нуклона. Размер партонов $< 10^{-17}$ см.
2. Заряженные партоны имеют характеристики кварков – их спин $1/2$, а заряды в единицах e либо $+2/3$, либо $-1/3$.
3. Нейтральные партоны, отождествляемые с глюонами, несут около половины внутренней энергии нуклона.



Результаты этих исследований подтверждают, что нуклон это частица, состоящая из трех валентных кварков, виртуальных морских кварков-антикварков и глюонов.

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

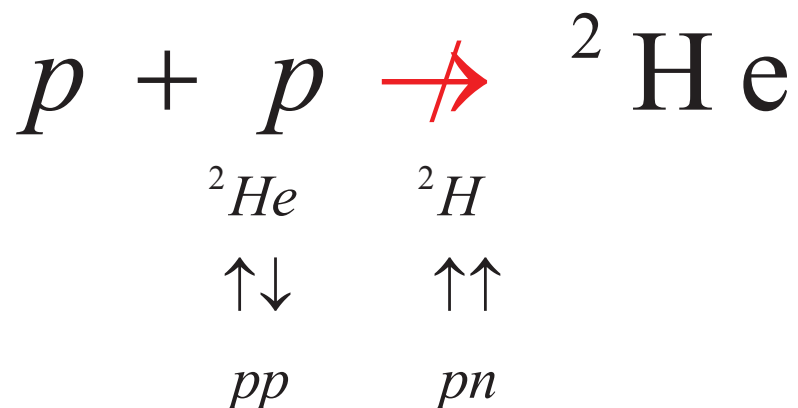
Время после Большого взрыва	Характерные температуры (K)	Характерные расстояния (см)	Основные события
10 с	10^{10}	10^{-10}	Окончание лептонной эры.
10 с - 10^4 лет	10^{10} - 10^4	10^{-10} - 10^{-5}	Радиационная эра. Доминирование излучения над веществом.
10^4 лет	10^4	10^{-5}	Начало эры Вещества. Вещество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

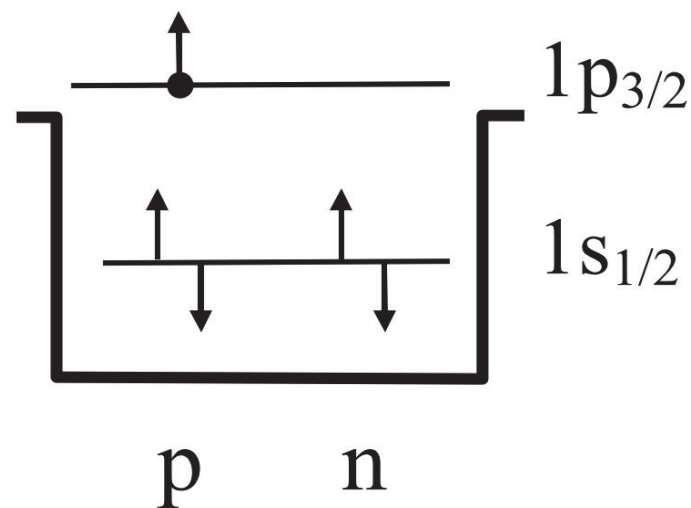
Все химические элементы образуются в момент Большого взрыва.



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



Г. Гамов
(1904-1968)



Эволюция Вселенной

$$t = 0$$

Большой взрыв. Рождение Вселенной

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

$$t = 10^{-43} \text{ с}$$

Эра квантовой гравитации. Струны

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

$$t = 10^{-35} \text{ с}$$

Кварк-глюонная среда

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

$$t = 1 \text{ мкс}$$

Кварки объединяются в нейтроны и протоны

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

$$t = 100 \text{ с}$$

Образование дозвездного ${}^4\text{He}$

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

$$t = 380 \text{ тыс. лет}$$

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.

$$T \gg 10^{10} \text{ К} :$$

$$p + e^- \leftrightarrow n + \nu_e,$$

$$n + e^+ \leftrightarrow p + \bar{\nu}_e$$

$$p + \bar{\nu}_e \leftrightarrow n + e^+,$$

$$n \leftrightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e,$$

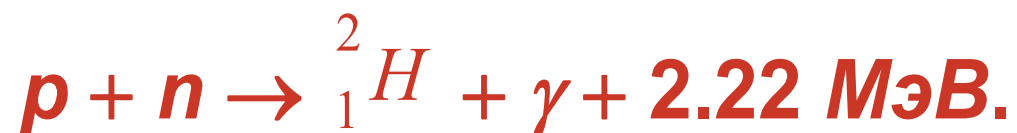
$$W = Ae^{-E/kt}.$$

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

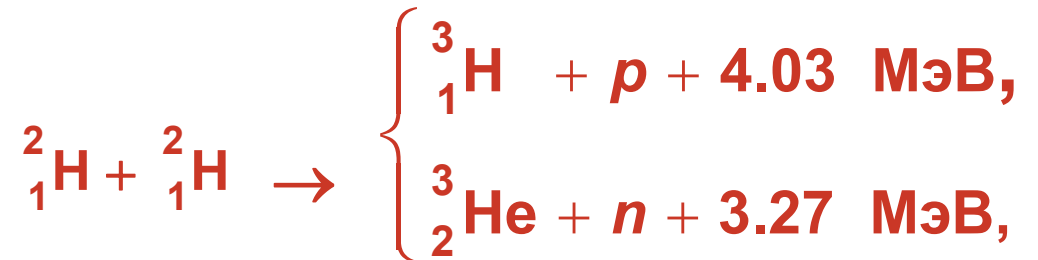
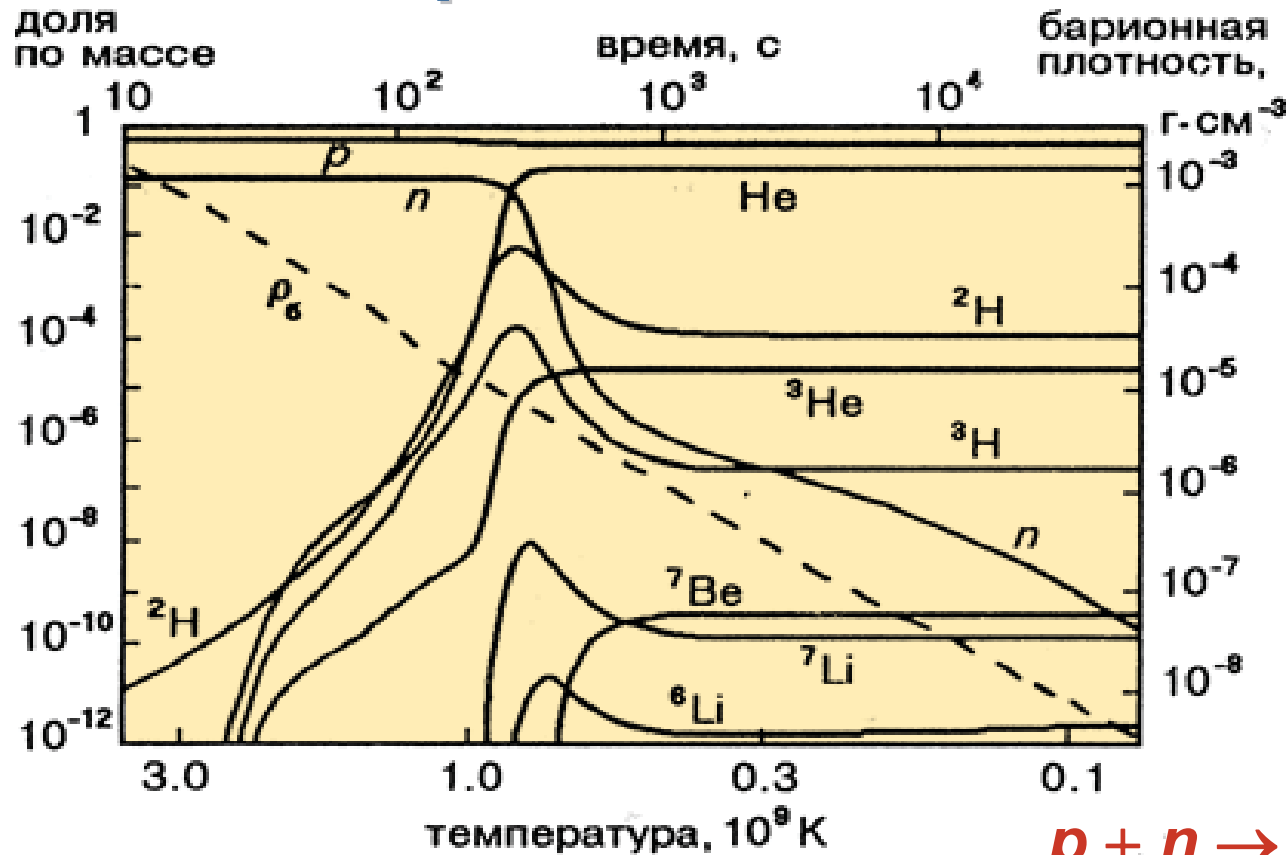


Накоплению дейтерия за счёт этой реакции на первых порах препятствует интенсивное разрушение дейтерия фотонами в обратном процессе фотодиссоциации. Отношение числа фотонов n_γ к числу барионов n_b :

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

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



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.

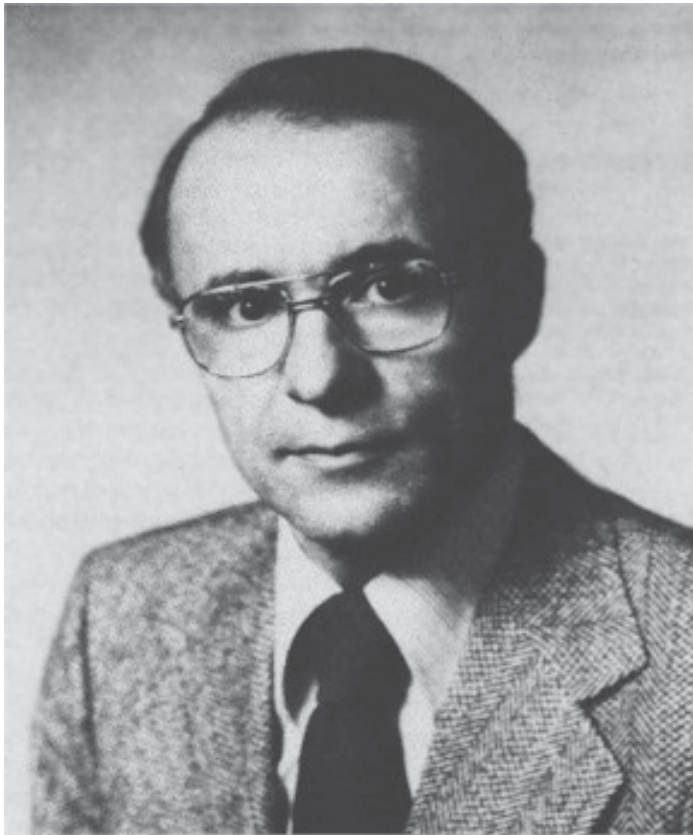
Микроволновое фоновое (реликтовое) излучение

	$T, \text{ K}$	$t, \text{ c}$
$q + \bar{q} \rightarrow h + \bar{h}$	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

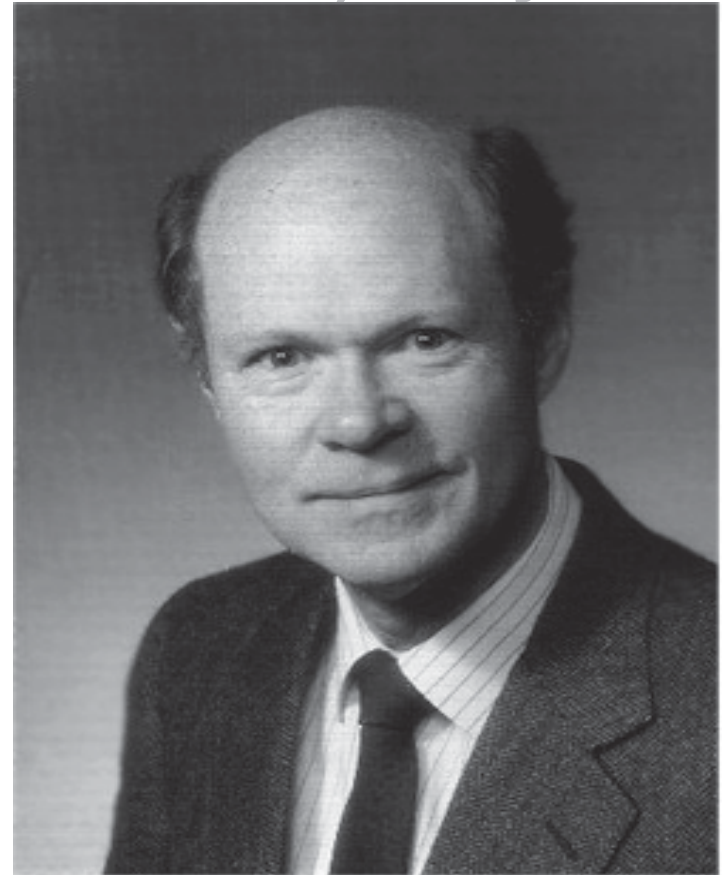
Реликтовое излучение – результат аннигиляции частиц и античастиц.

При $t \approx 400000$ лет температура Вселенной упала до нескольких тысяч градусов и плотность вещества снизилась до 10^{-20} г/см^3 , 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

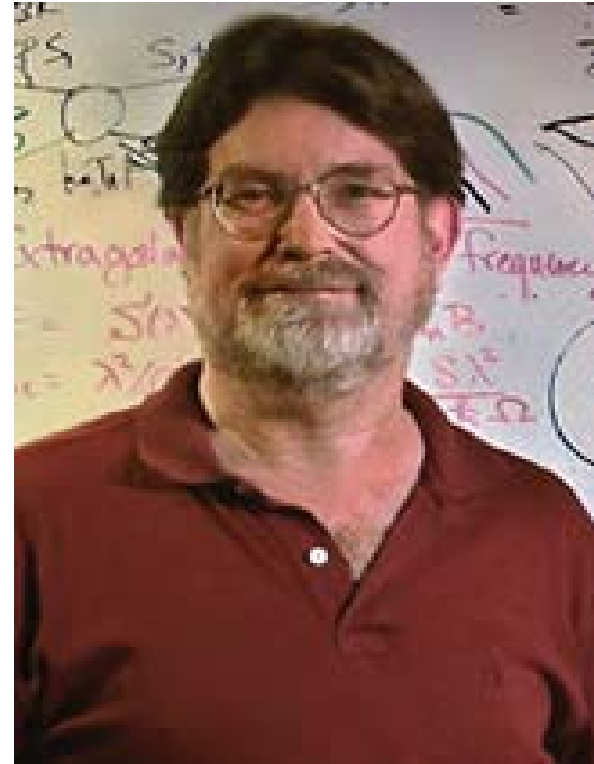
1978 г. — А. Пензиас и Р. Вильсон

За открытие космического микроволнового фонового излучения.

Микроволновое фоновое (реликтовое) излучение



John C. Mather
р. 1946

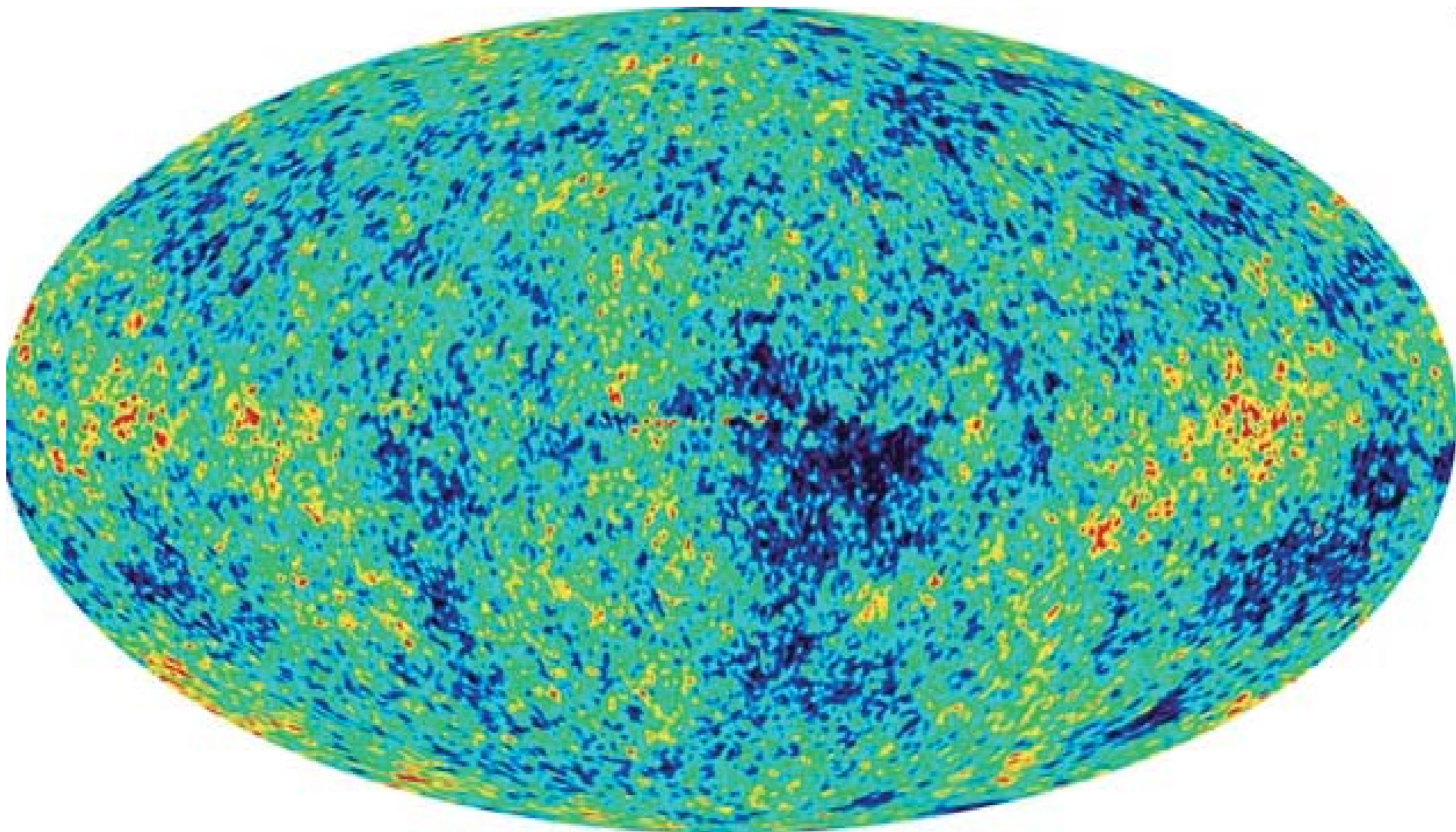


George F. Smoot
р. 1945

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

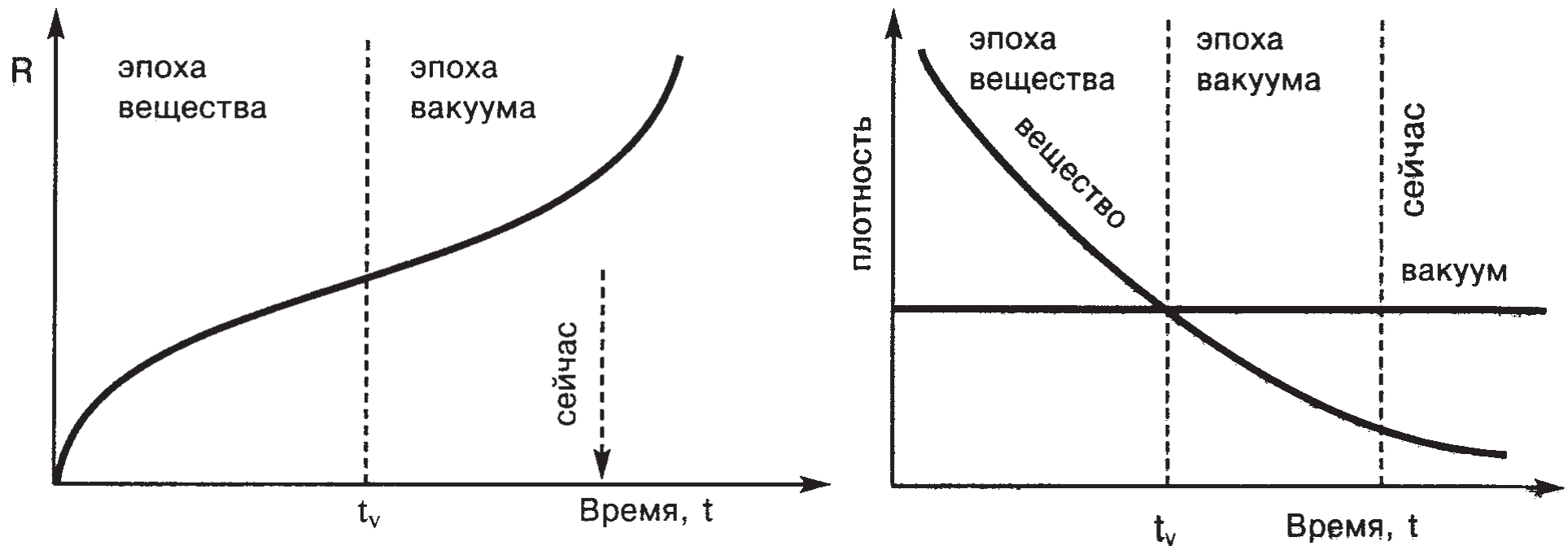
За открытие чернотельной формы и анизотропии
космического микроволнового фонового излучения

Реликтовое излучение



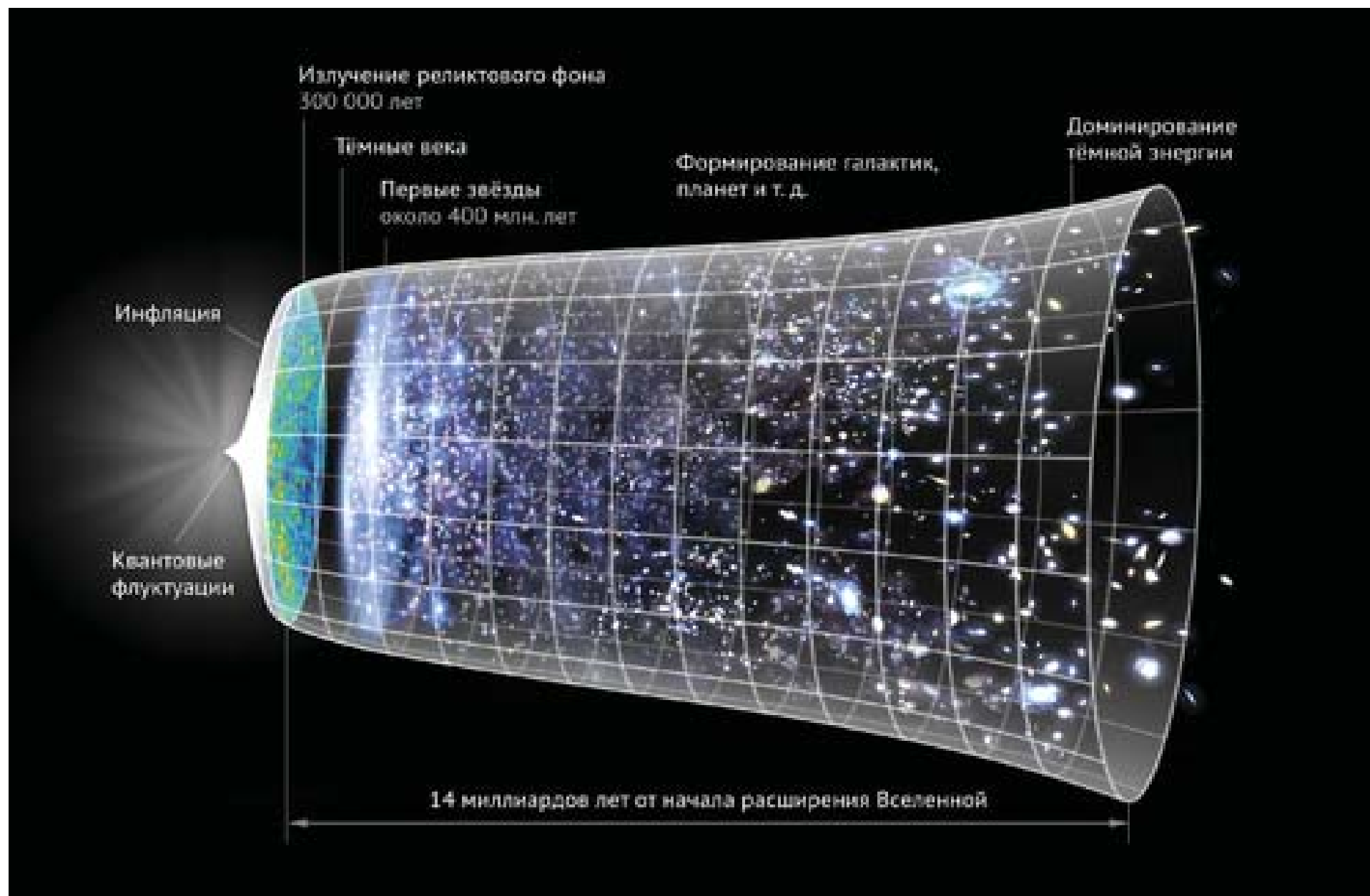
Анизотропия микроволнового фона во Вселенной

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

БАРИОНЫ	0.02-0.05
в том числе, ЗВЁЗДЫ:	0.002-0.003
ФОТОНЫ	$4.9 \cdot 10^{-5}$
НЕЙТРИНО	$3.3 \cdot 10^{-5}$
ТЁМНАЯ МАТЕРИЯ	0.2-0.4
ТЕМНАЯ ЭНЕРГИЯ (ВАКУУМ)	0.6-0.8
ПОЛНАЯ ПЛОТНОСТЬ ВЕЩЕСТВА-ЭНЕРГИИ	1.02 ± 0.02

