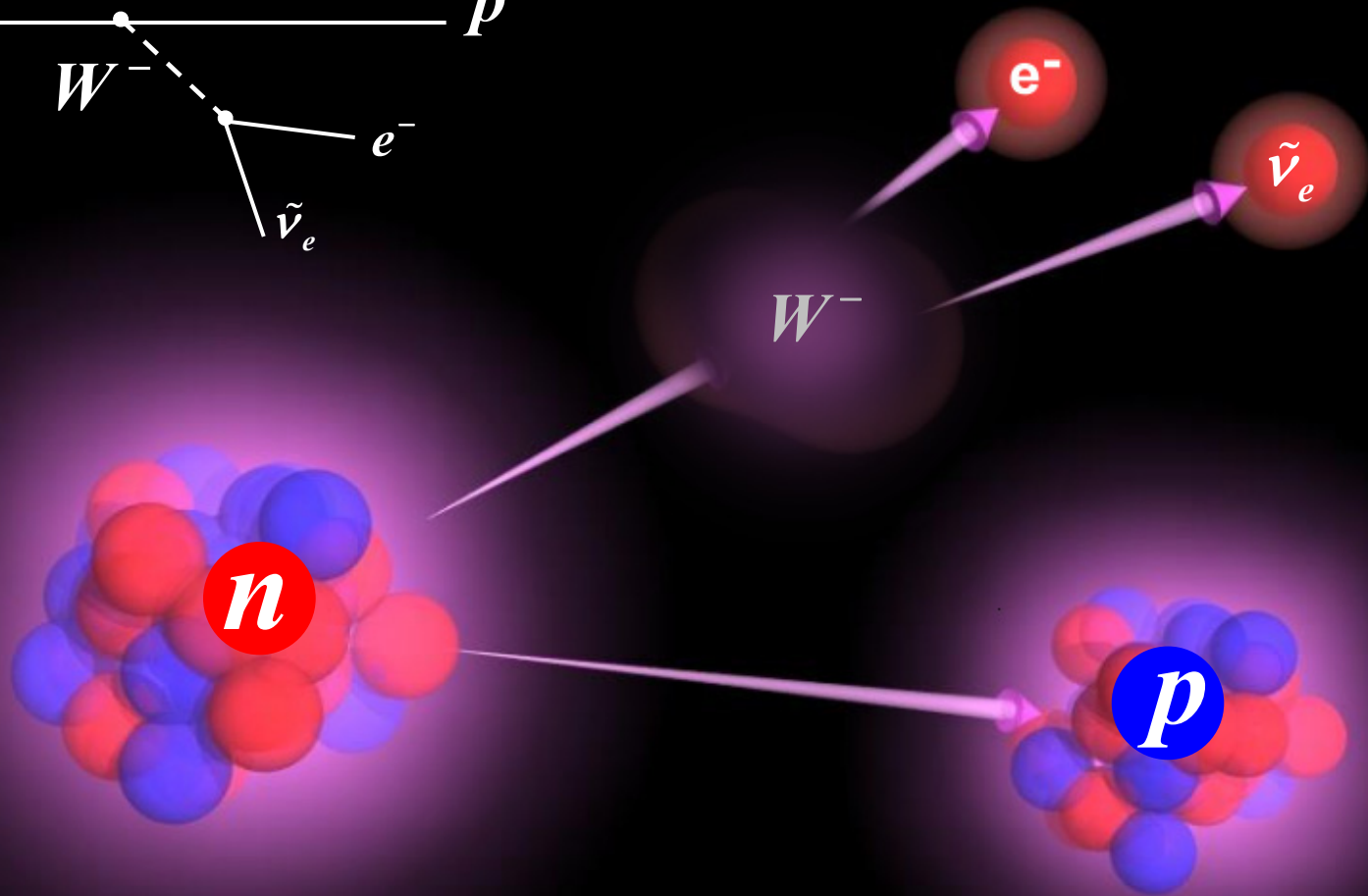
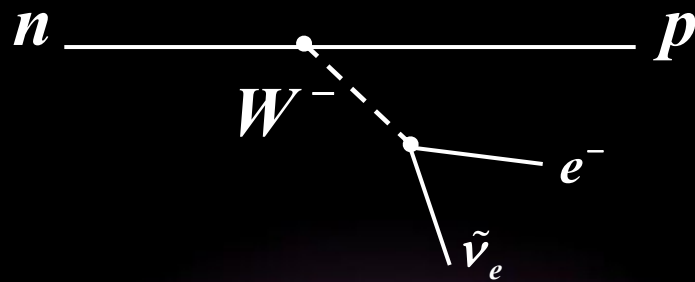
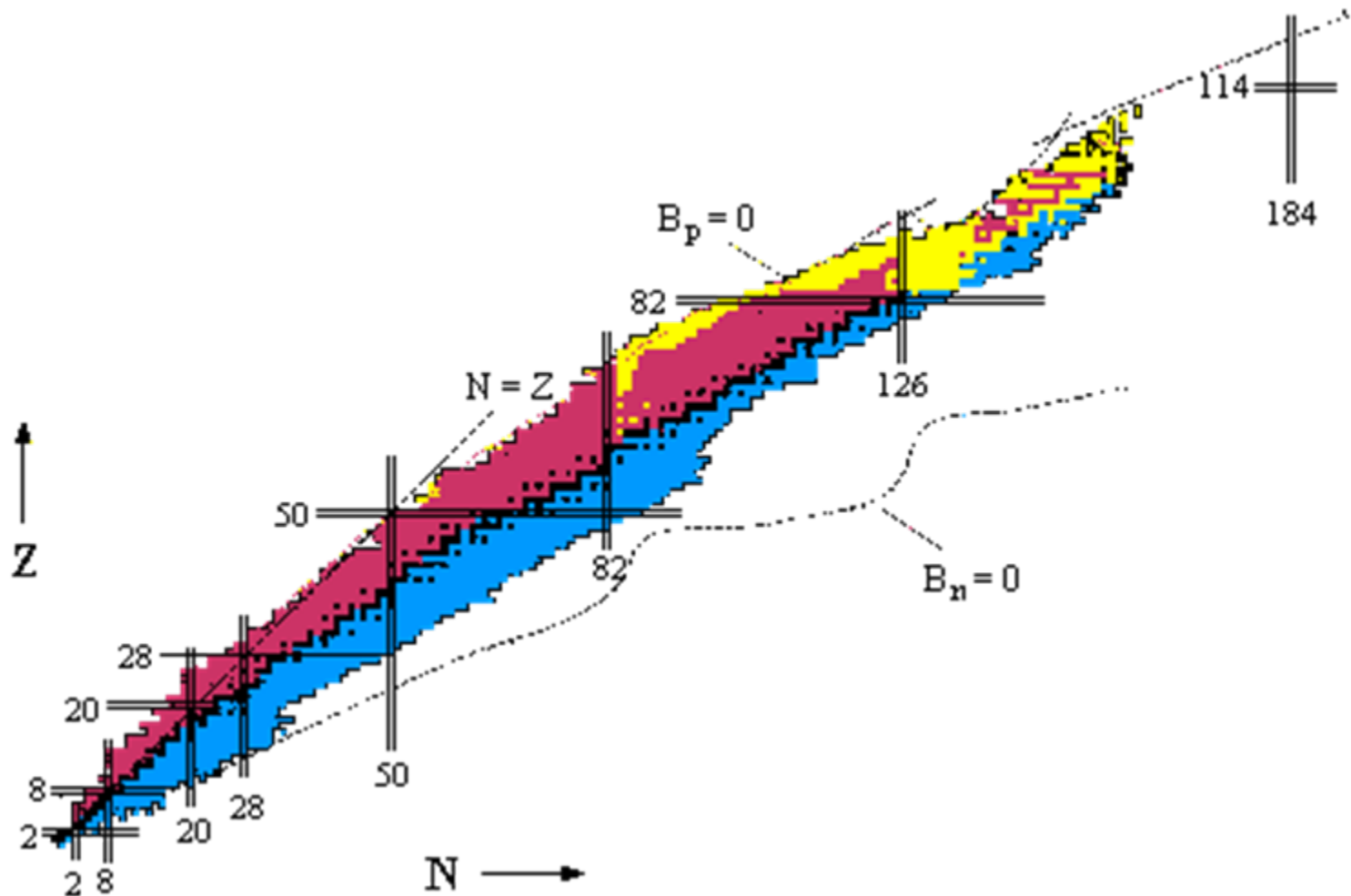


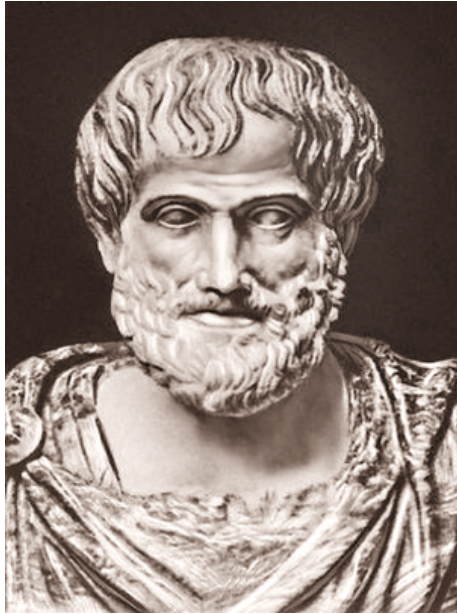
Рождение и жизнь атомных ядер





Мир атомных ядер

Элементарные частицы вещества. Из чего всё сделано?



Аристотель
384 – 322 гг. до н.э.



Демокрит
460 – 360 до н.э.

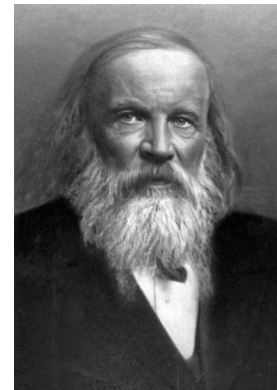


**Атом – неделимая
частица материи**



Антуан Лавуазье
1743 – 1794

Химические элементы



Д. И. Менделеев
1834 – 1907

¹ H							² He		
³ Li	⁴ Be	⁵ B	⁶ C	⁷ N	⁸ O	⁹ F	¹⁰ Ne		
¹¹ Na	¹² Mg	¹³ Al	¹⁴ Si	¹⁵ P	¹⁶ S	¹⁷ Cl	¹⁸ Ar		
¹⁹ K	²⁰ Ca	²¹ Sc	²² Ti	²³ V	²⁴ Cr	²⁵ Mn	²⁶ Fe	²⁷ Co	²⁸ Ni
²⁹ Cu	³⁰ Zn	³¹ Ga	³² Ge	³³ As	³⁴ Se	³⁵ Br	³⁶ Kr		
³⁷ Rb	³⁸ Sr	³⁹ Y	⁴⁰ Zr	⁴¹ Nb	⁴² Mo	⁴³ Tc	⁴⁴ Ru	⁴⁵ Rh	⁴⁶ Pd
⁴⁷ Ag	⁴⁸ Cd	⁴⁹ In	⁵⁰ Sn	⁵¹ Sb	⁵² Te	⁵³ I	⁵⁴ Xe		
⁵⁵ Cs	⁵⁶ Ba	La-Lu	⁷² Hf	⁷³ Ta	⁷⁴ W	⁷⁵ Re	⁷⁶ Os	⁷⁷ Ir	⁷⁸ Pt
⁷⁹ Au	⁸⁰ Hg	⁸¹ Tl	⁸² Pb	⁸³ Bi	⁸⁴ Po	⁸⁵ At	⁸⁶ Rn		
⁸⁷ Fr	⁸⁸ Ra	Ac-Lr	¹⁰⁴ Rf	¹⁰⁵ Db	¹⁰⁶ Sg	¹⁰⁷ Bh	¹⁰⁸ Hs	¹⁰⁹ Mt	¹¹⁰ Ds
¹¹¹ Rg	¹¹² Cn	113	114	115	116	117	118		

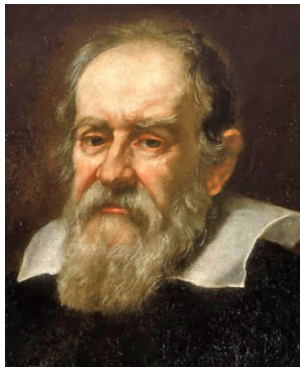
Лантаноиды

⁵⁷ La	⁵⁸ Ce	⁵⁹ Pr	⁶⁰ Nd	⁶¹ Pm	⁶² Sm	⁶³ Eu	⁶⁴ Gd	⁶⁵ Tb	⁶⁶ Dy	⁶⁷ Ho	⁶⁸ Er	⁶⁹ Tm	⁷⁰ Yb	⁷¹ Lu
------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------

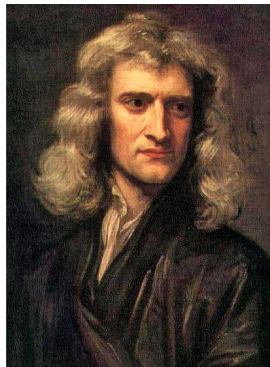
Актиноиды

⁸⁹ Ac	⁹⁰ Th	⁹¹ Pa	⁹² U	⁹³ Np	⁹⁴ Pu	⁹⁵ Am	⁹⁶ Cm	⁹⁷ Bk	⁹⁸ Cf	⁹⁹ Es	¹⁰⁰ Fm	¹⁰¹ Md	¹⁰² No	¹⁰³ Lr
------------------	------------------	------------------	-----------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------

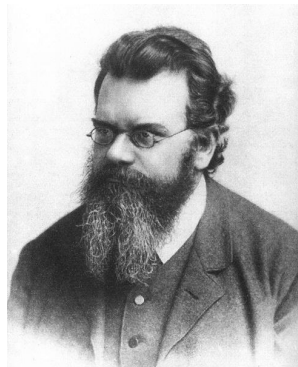
Классическая физика



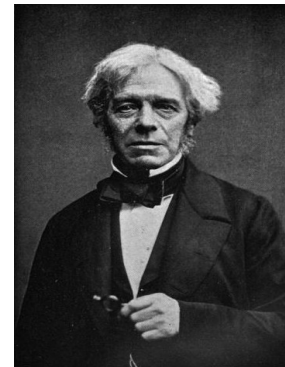
Г. Галилей
1564 – 1642



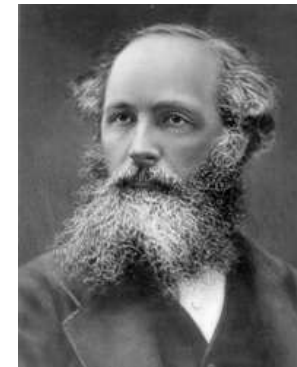
И. Ньютон
1642 – 1727



Л. Больцман
1844 – 1906



М. Фарадей
1791 – 1867



Дж. Максвелл
1831 – 1879

Законы Ньютона

$$\vec{F} = m\vec{a}$$

$$\vec{F}_{\text{гр}} = G \frac{m_1 m_2}{r^2} \vec{r}$$

Энтропия

$$s = k \lg W$$

Уравнения Максвелла

$$\text{div } E = 4\pi\rho$$

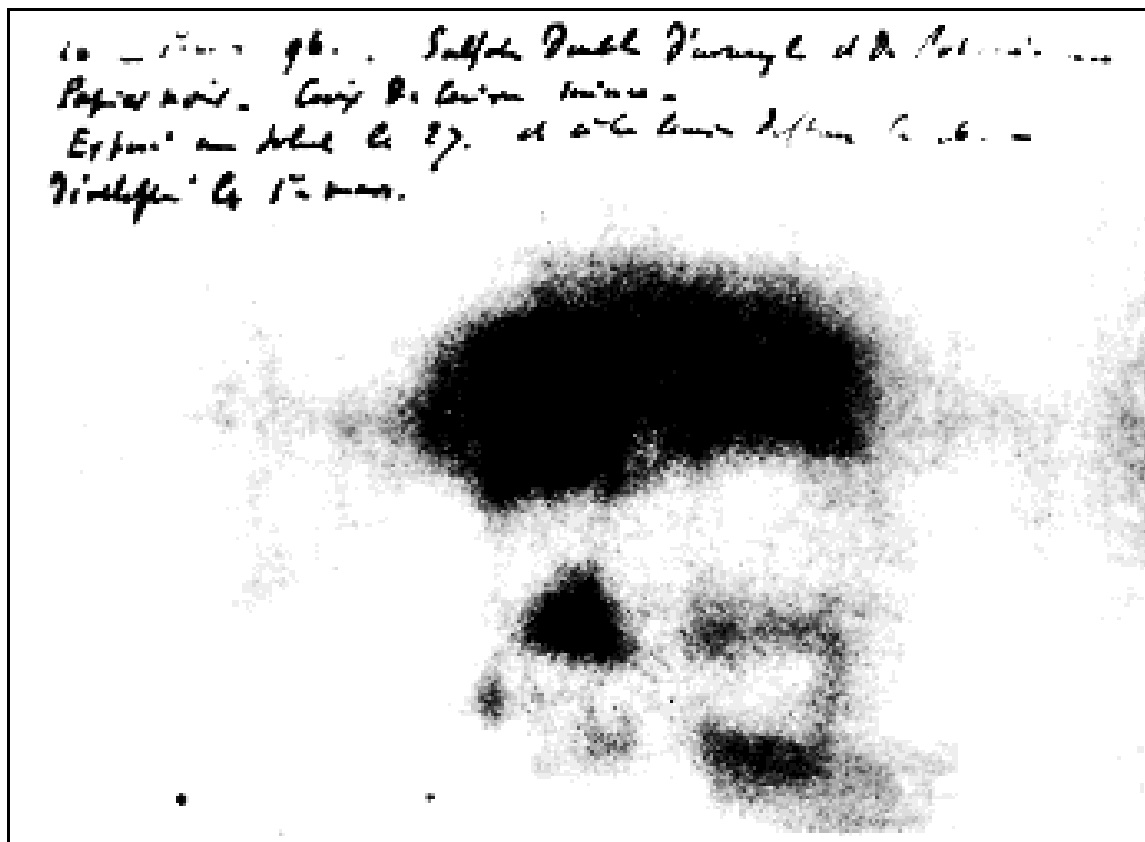
$$\text{div } B = 0$$

$$\text{rot } E = -\frac{1}{c} \frac{\partial B}{\partial t}$$

$$\text{rot } B = \frac{4\pi}{c} j + \frac{1}{c} \frac{\partial E}{\partial t}$$

Радиоактивность

1896 – Открытие радиоактивности



А. Беккерель
1852 – 1908

Нобелевская премия по физике

1903 г. – А. Беккерель.

За открытие радиоактивности

1903 г. – П. Кюри, М. Кюри-Склодовская.

За исследования радиоактивности

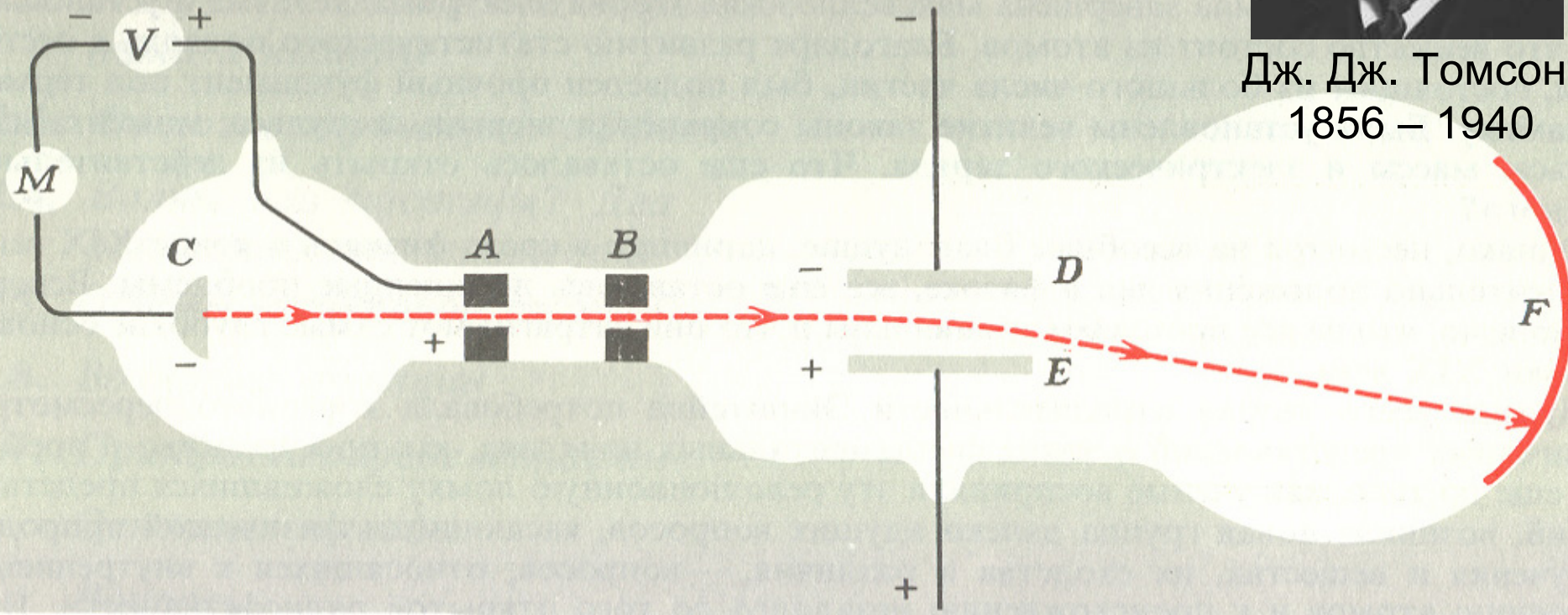
Электрон

1897 - Дж. Дж. Томсон. Открытие электрона

1904 - Дж. Дж. Томсон. Модель атома



Дж. Дж. Томсон
1856 – 1940



Нобелевская премия по физике

1906 г. – Дж. Дж. Томсон.

За большие заслуги в теоретических и экспериментальных исследованиях электрической проводимости газов

1911 г. Опыты по рассеянию α -частиц

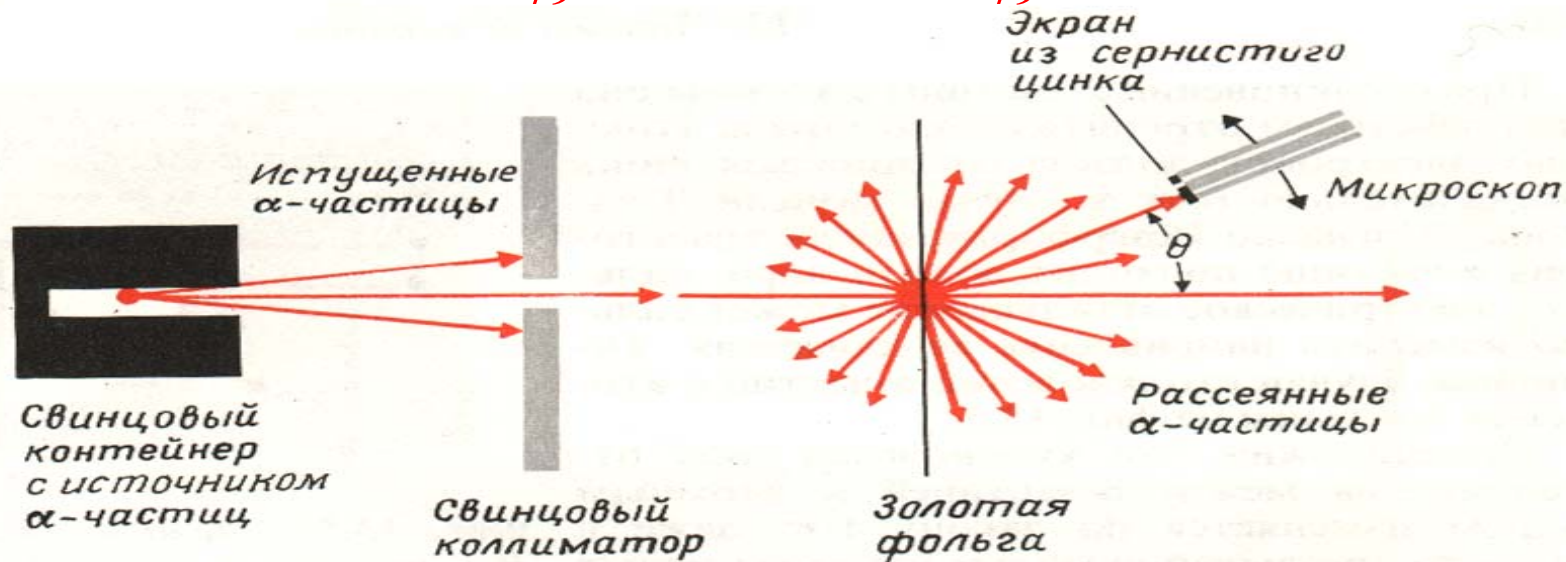
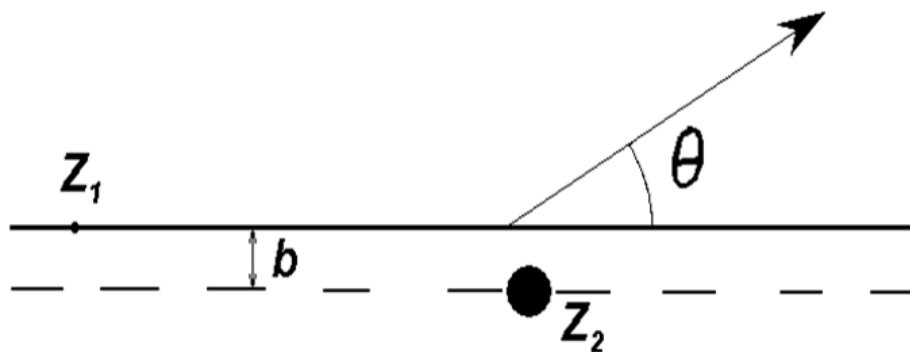


Схема эксперимента, в котором исследовалось рассеяние альфа-частиц



$$\operatorname{tg} \frac{\theta}{2} = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{2bE}$$

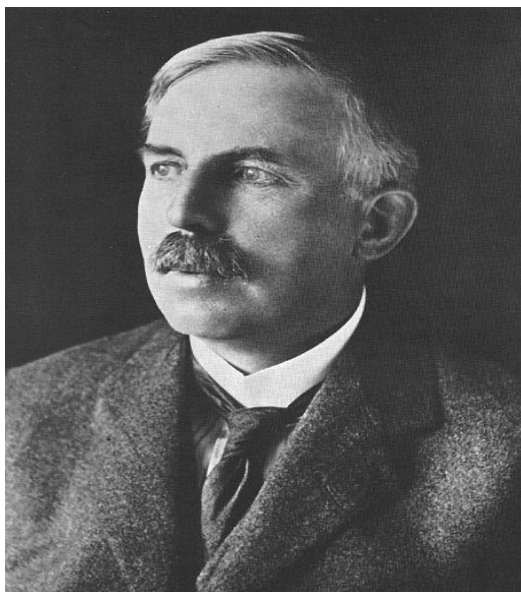
$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \left(\frac{Z_1 Z_2 e^2}{4E} \right)^2 \frac{1}{\sin^4 \frac{\theta}{2}}$$

Из опытов по рассеянию α -частиц следовало, что масса атома практически полностью сосредоточена в небольшой центральной части атома – атомном ядре.

Строение атома



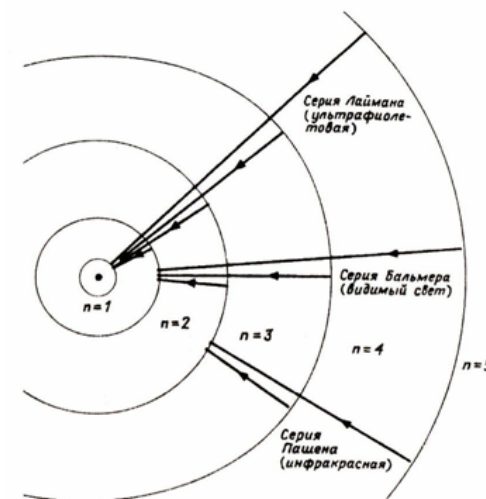
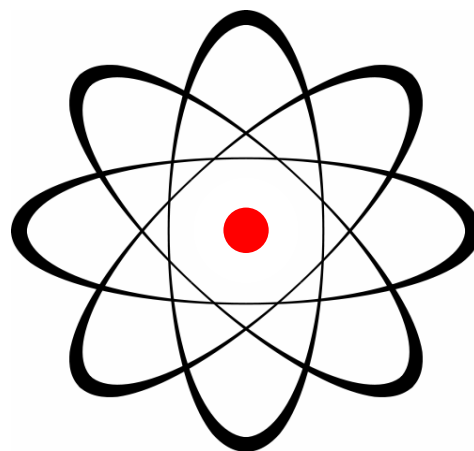
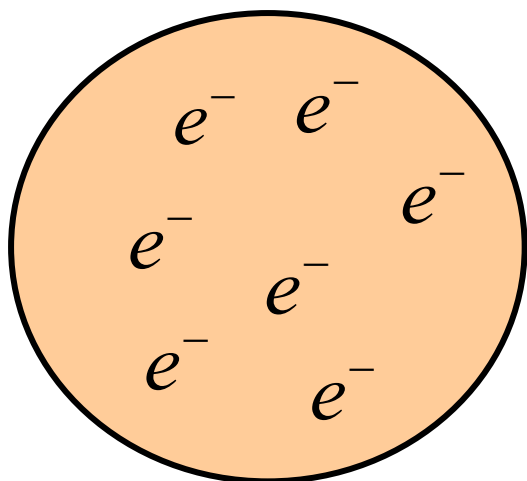
Дж. Дж. Томсон
1856 - 1940



Эрнест Резерфорд
1871 - 1937



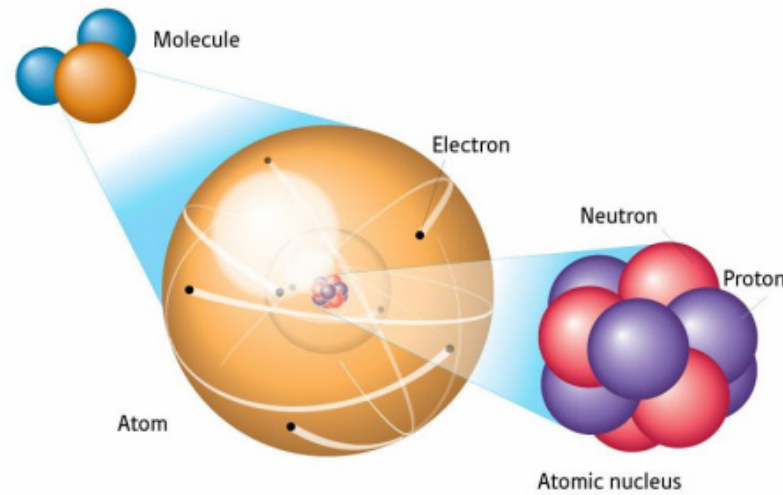
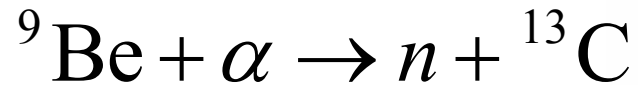
Нильс Бор
1885 - 1962



1919 г. Э. Резерфорд



1932 г. Дж. Чэдвик



$^{208}_{82}\text{Pb}$

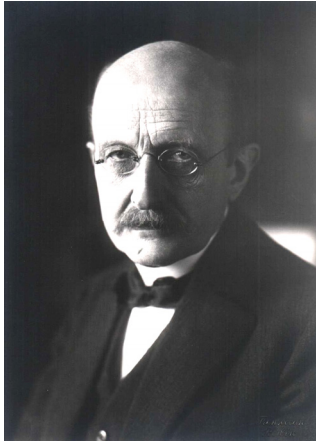
$Z = 82$
 $N = 126$
 $A = 208$

Z – заряд ядра, число протонов в ядре

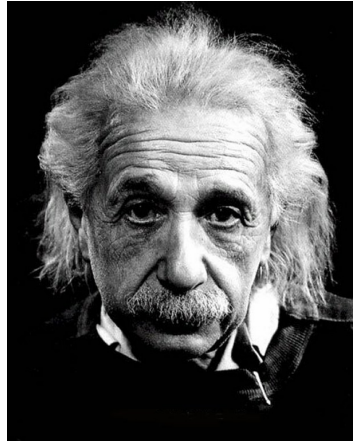
N – число нейтронов в ядре

A = N + Z – массовое число

Квантовое мышление



М. Планк
1858 – 1947



А. Эйнштейн
1879 – 1955



А. Комптон
1892 – 1962



Л. Де Бройль
1892 – 1987

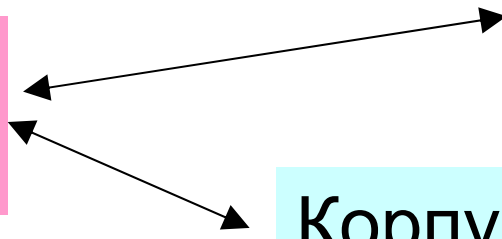
$$E = h\nu$$

$$p = h / \lambda$$

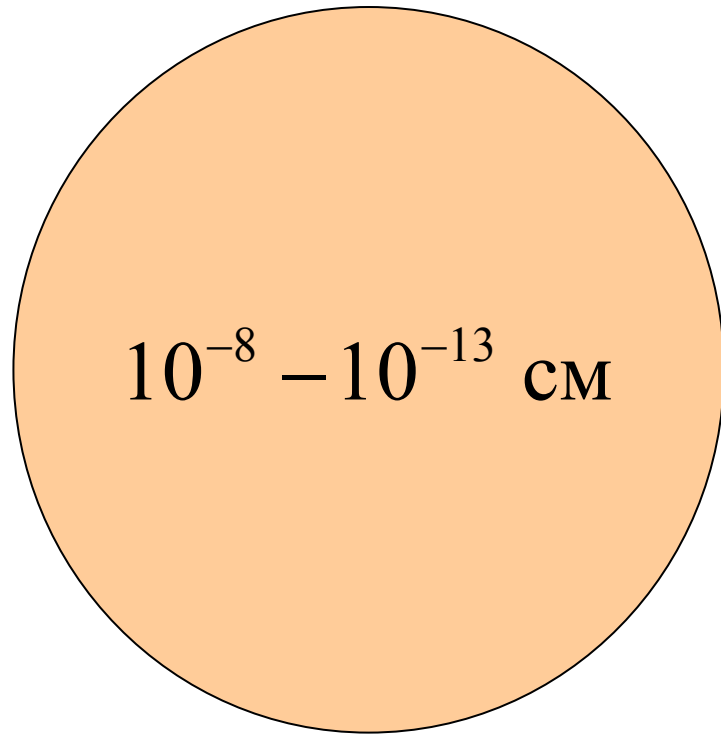
Квантовая
частица

Волновые свойства

Корпускулярные свойства



Человек открыл в атомных ядрах новый мир



4 типа взаимодействий

- Гравитационное
- Электромагнитное
- Сильное
- Слабое

1927 г. – В. Гейзенберг. Принцип неопределенности

Любая физическая система не может находиться в состояниях, в которых координаты её центра инерции и импульс одновременно принимают точные значения.

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \approx \hbar$$

Если система находится в стационарном состоянии, энергию системы в этом состоянии можно измерить с точностью ΔE , не превышающей $\hbar/\Delta t$, где Δt – длительность процесса измерения.

$$\Delta E \cdot \Delta t \approx \hbar$$



В. Гейзенберг
1901 – 1976

Зачем нужны ускорители?

$$\lambda = \frac{\hbar}{p}, \quad E^2 = c^2 p^2 + m^2 c^4$$



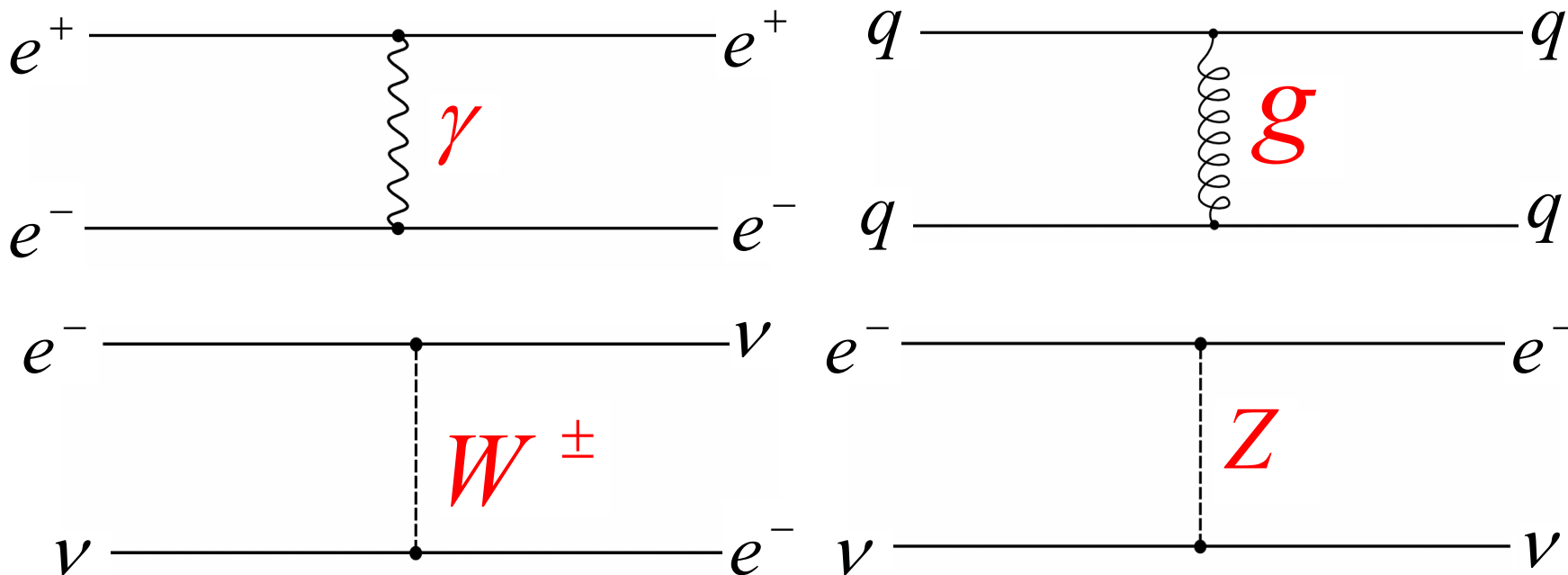
Как устроен Мир. 60-е годы XX века

Фермионы $J = 1/2, 3/2, \dots$		Бозоны $J=0, 1, 2 \dots$	
Барионы	Лептоны	Фотон	Мезоны
Нуклоны p, n	Электрон e^-	γ	Пионы π^-, π^+, π^0
Резонансы Δ, N	Мюон μ^-		Странные K -мезоны
Гипероны $\Lambda, \Sigma, \Xi, \Omega^-$	Нейтрино ν_e, ν_μ		Нестранные ρ -, ω - мезон
$B = 1$	$L = 1$		$B = 0$

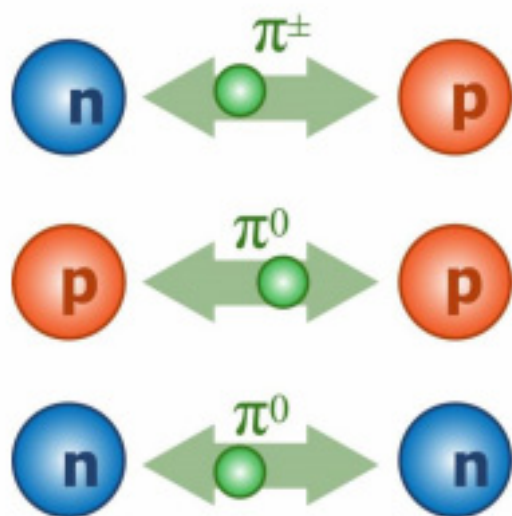
Взаимодействия

Спин $J=1$

Взаимодействие	На какие частицы действует	Калибровочные бозоны	Радиус действия	Константа взаимодействия
Сильное	Все цветные частицы	8 глюонов, безмассовые.	$1 \text{ ФМ} = 1/m_\pi$	1
Электромагнитное	Все электрически заряженные частицы	Фотон, безмассовый.	∞	1/137
Слабое	Кварки, лептоны, электрослабые калибровочные бозоны	W^+, W^-, Z , $m(W^\pm) = 80 \text{ ГэВ}$, $m(Z) = 91 \text{ ГэВ}$.	$10^{-2} \text{ ФМ} = 1/m_W$	$\sim 1/30$
Гравитационное	Все массивные частицы	Гравитон, спин $J = 2$, безмассовый	∞	10^{-38}



Теория Юкавы



1935 г. Х. Юкава разработал теорию ядерного взаимодействия и предсказал мезоны – кванты ядерного поля.

$$r_{NN} \sim 1 \text{ ФМ} (10^{-13} \text{ см})$$

$$m_{\pi} \sim 200 m_e$$

1937 г. К. Андерсон, С.Неддермейер. Открытие мюона.

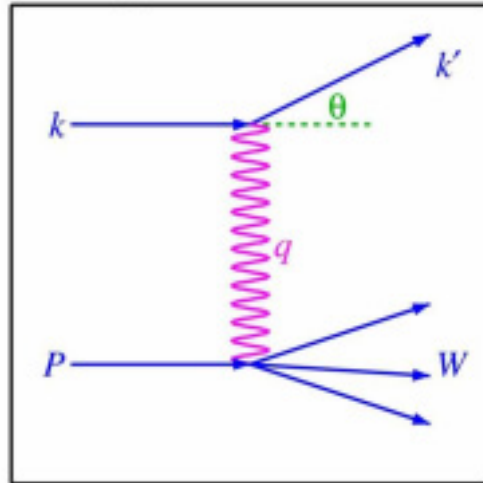
$$Q_{\mu} = q_e; \quad m_{\mu} = 200 m_e \quad J=1/2$$

1947 г. С.Пауэлл. Открытие заряженных пионов.

$$Q_{\pi} = \pm q_e; \quad m_{\pi} = 140 \text{ МэВ} \quad J=0$$

Как увидеть кварки

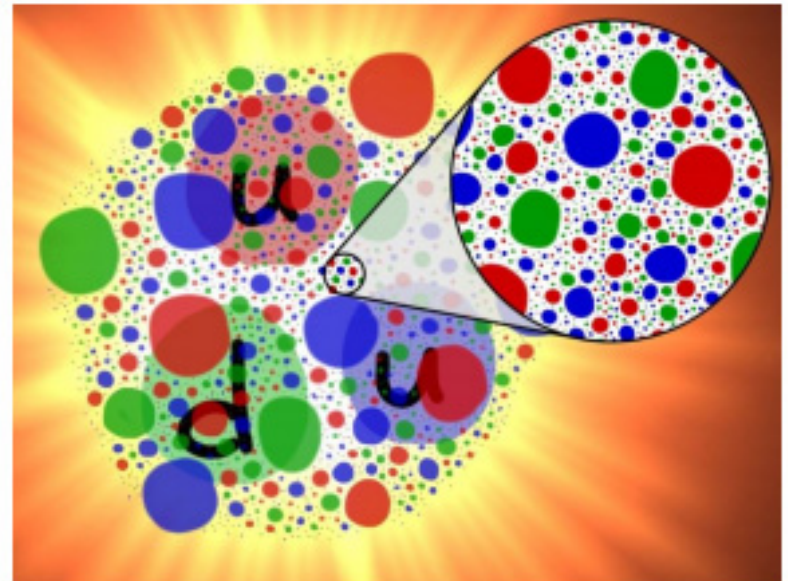
$$e + p \rightarrow e + X$$



$W = M \rightarrow$ упругое рассеяние

$2 < W < 1 \text{ GeV} \rightarrow$ неупругое рассеяние
(возбуждение резонансов)

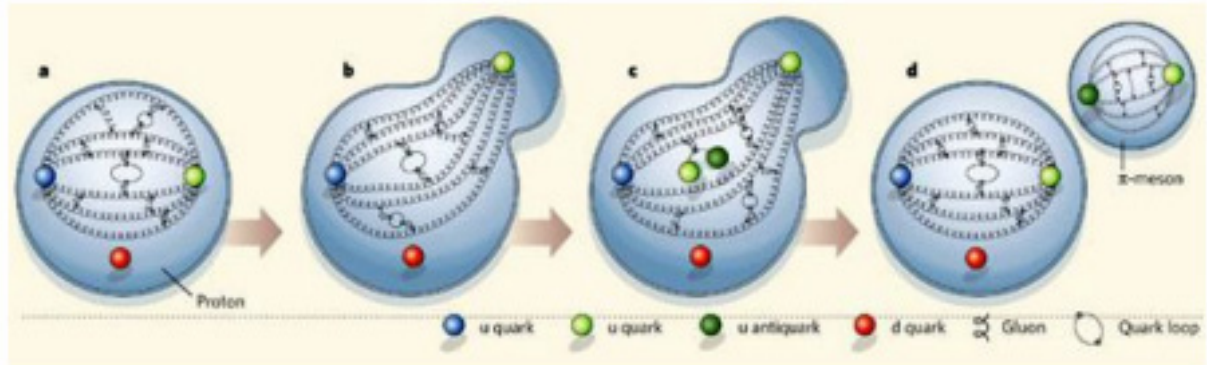
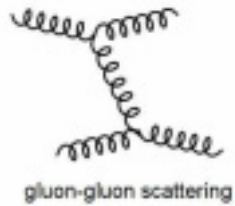
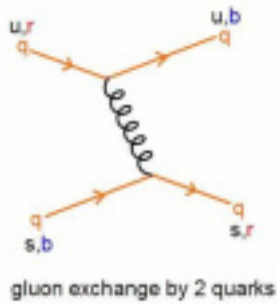
$W > 2 \text{ GeV} \rightarrow$ глубоко неупругое рассеяние



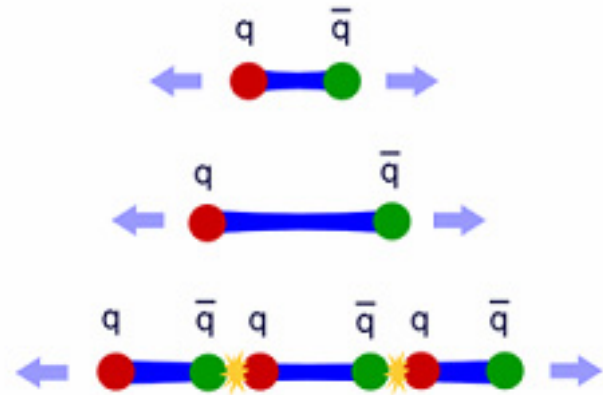
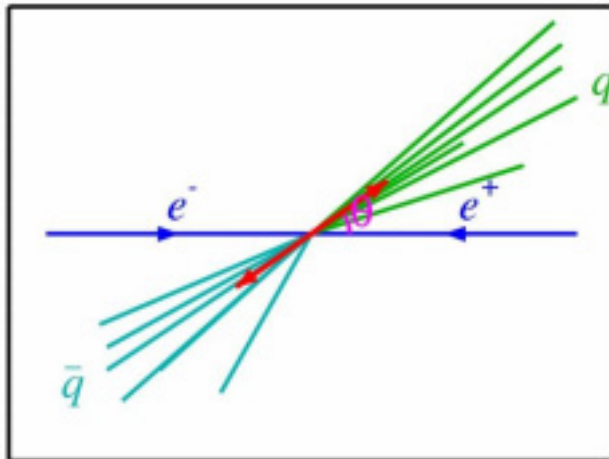
Нобелевская премия по физике

1990 г. – Дж. Фридман, Г. Кэндалл, Р. Тейлор За пионерские исследования глубоконеупругого рассеяния электронов на протонах и связанных нейтронах, что имело большое значение для развития кварковой модели в физике частиц

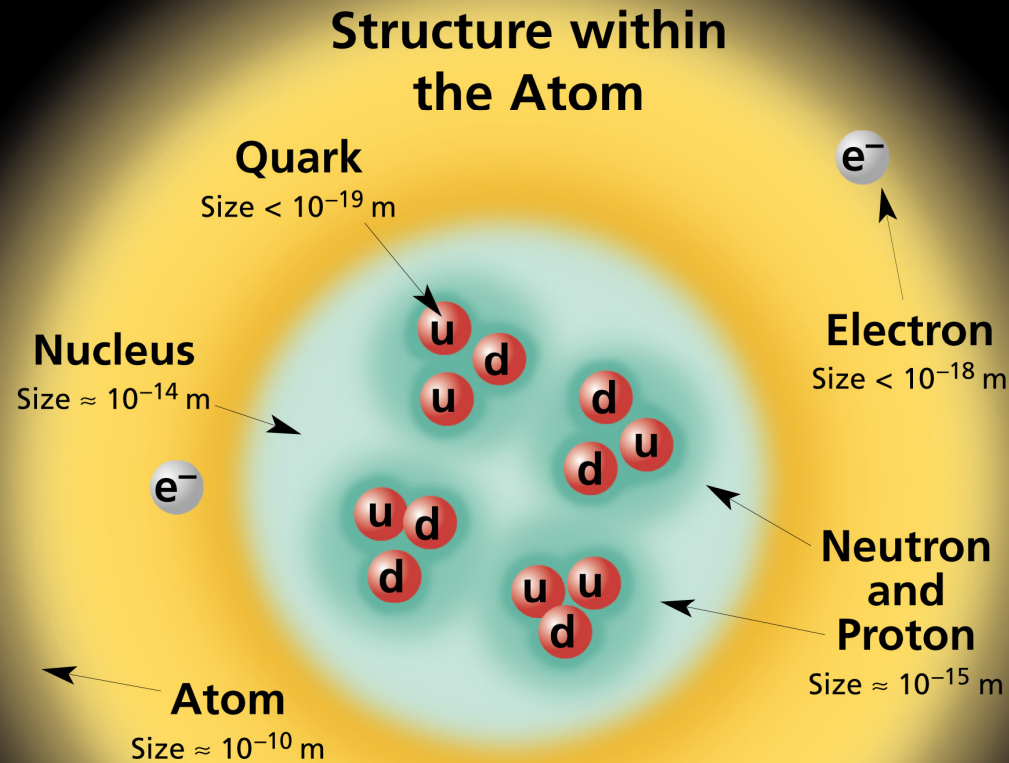
Адронизация



$e^+e^- \rightarrow \text{Hadrons}$



АТОМЫ. ЯДРА. Кварки



If the protons and neutrons in this picture were 10 cm across, then the quarks and electrons would be less than 0.1 mm in size and the entire atom would be about 10 km across.

Элементарные частицы материи. 2015 г.

Кварки

u c t

d s b

Лептоны

e μ τ

ν_e ν_μ ν_τ

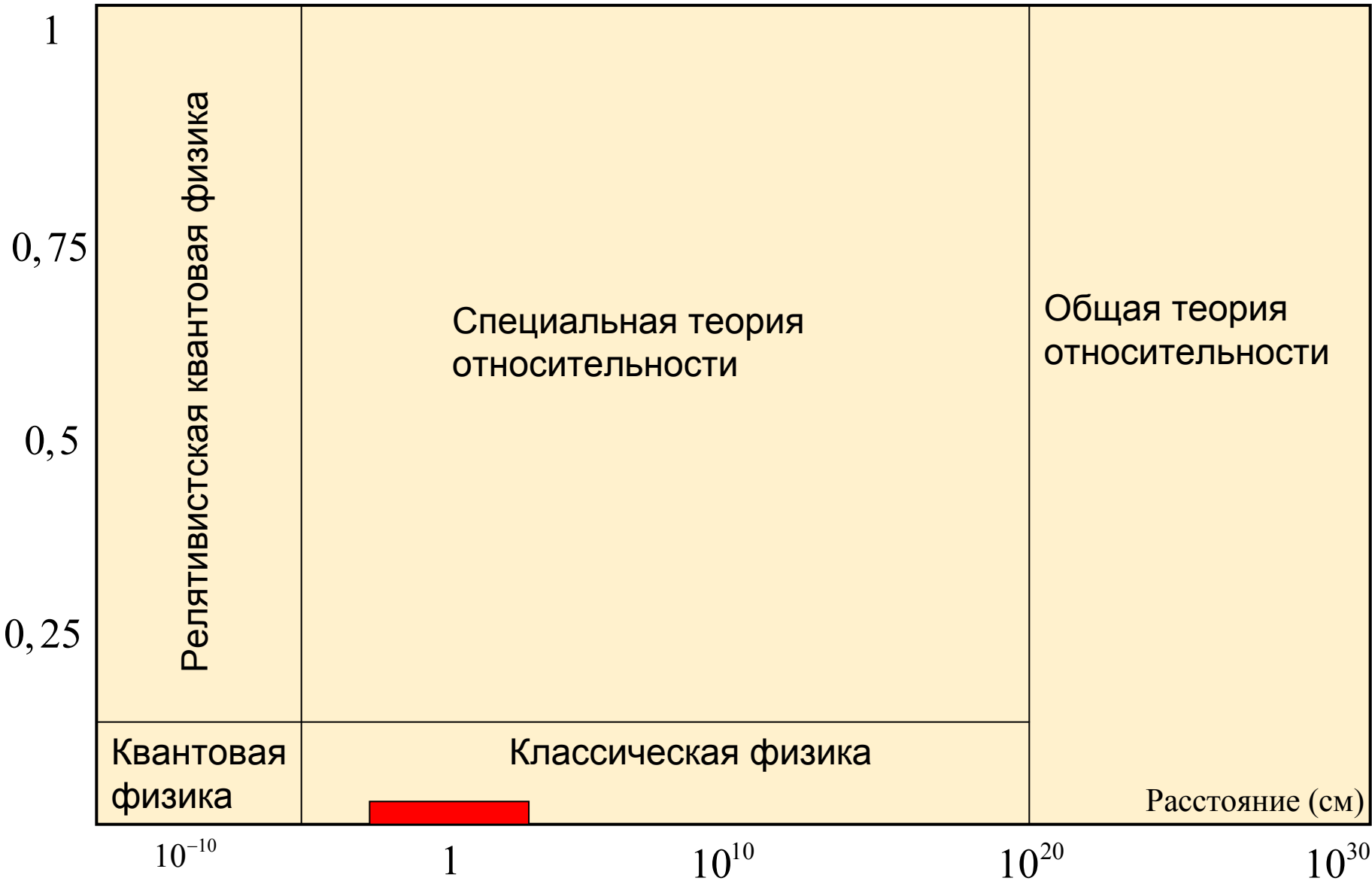
Переносчики взаимодействий

γ , W^+ , W^- , Z , $8g$

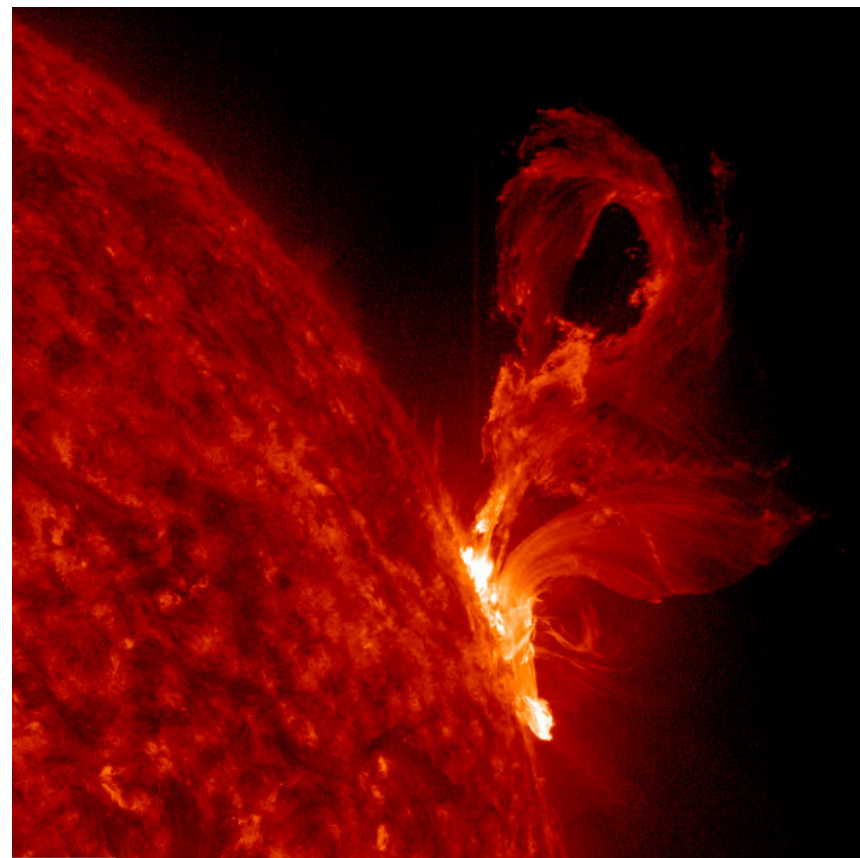
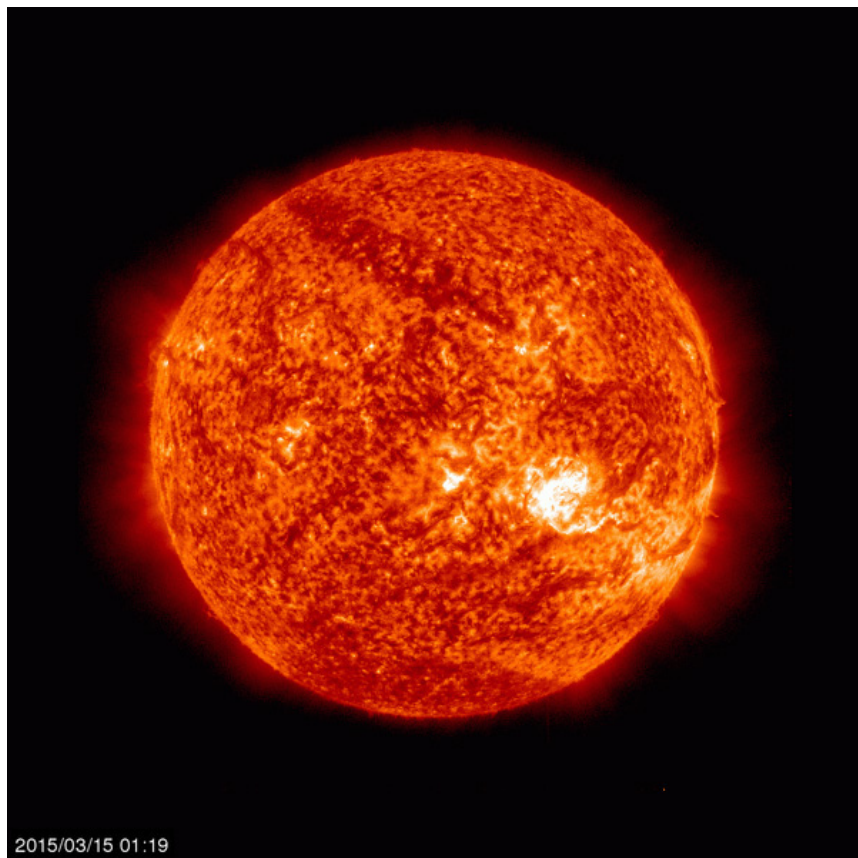
Бозон Хиггса H

Явления повседневной жизни

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



Солнце

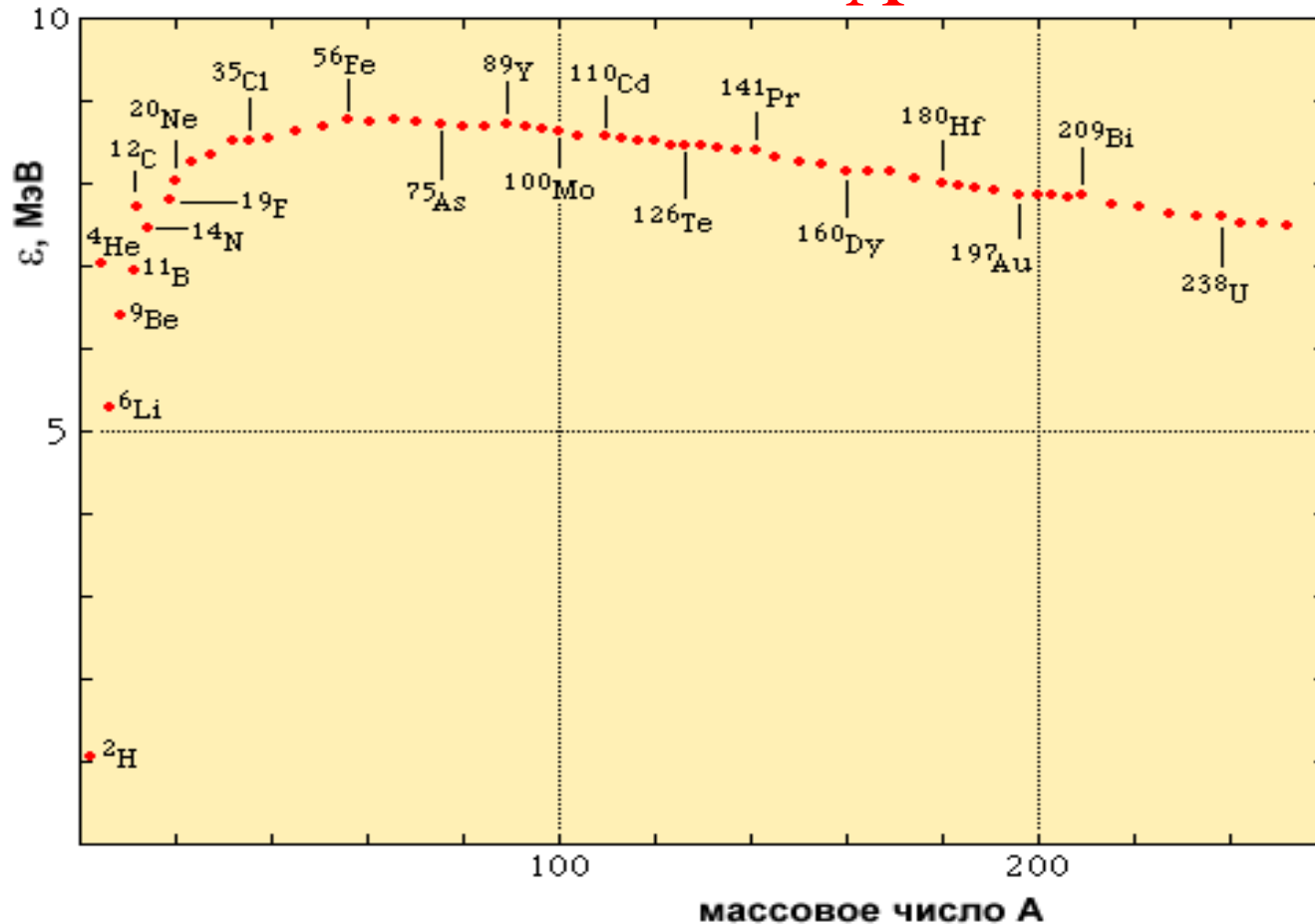


Средний диаметр	$1,4 \cdot 10^9$ м ($1,1 \cdot 10^2$)
Масса	$2 \cdot 10^9$ кг ($3,3 \cdot 10^5$)
Температура поверхности	$6 \cdot 10^3$ К
Температура ядра	$13,5 \cdot 10^6$ К ($6 \cdot 10^3$ К)
Температура короны	$1,5 \cdot 10^6$ К

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

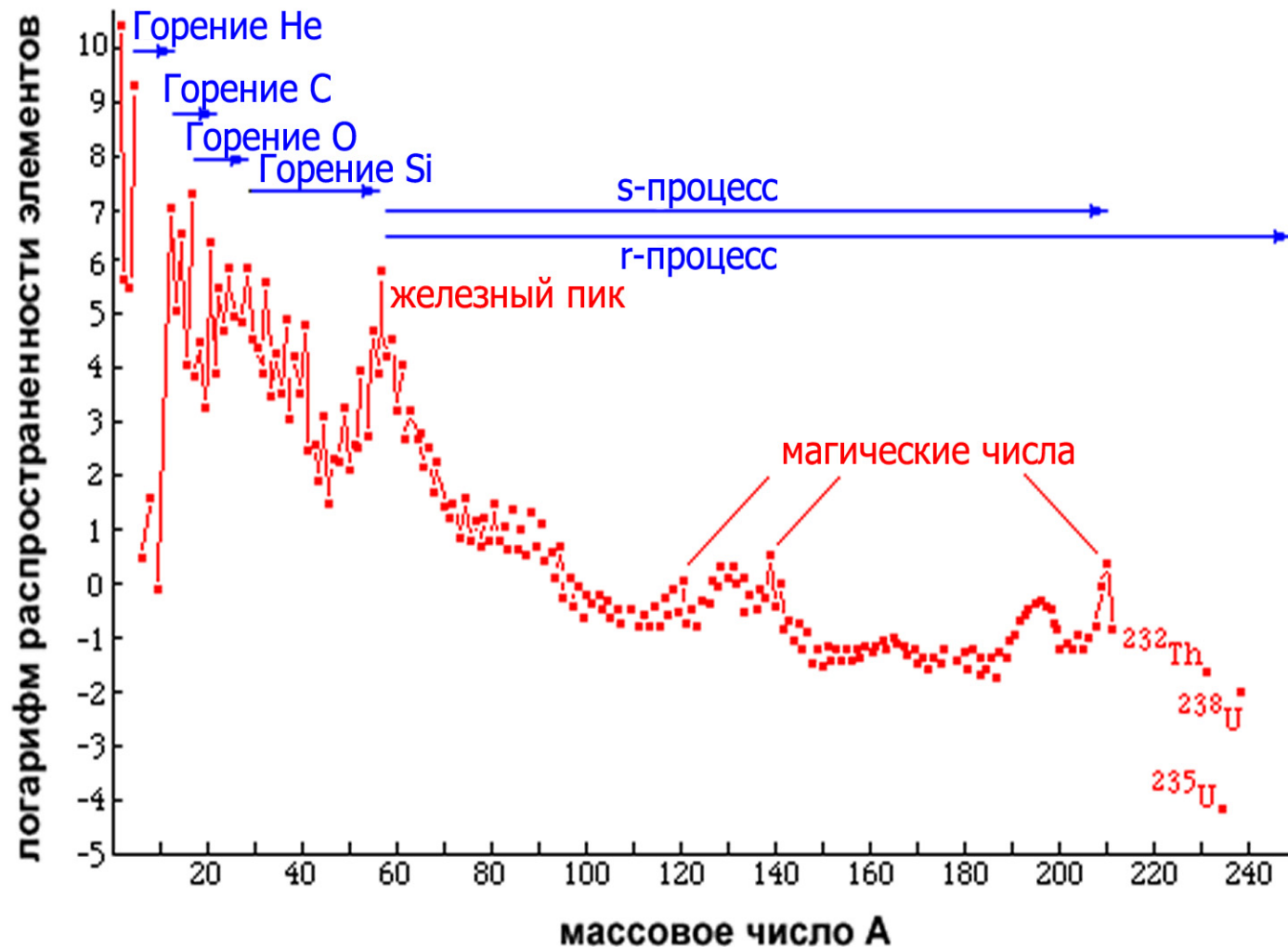
Удельная энергия связи ядра $\varepsilon(A, Z)$ – средняя энергия связи, приходящаяся на один нуклон.

$$\varepsilon(A, Z) = \frac{W(A, Z)}{A}$$



Зависимость удельной энергии связи $\varepsilon = W/A$ от массового числа A

Распространенность нуклидов во Вселенной



Распространенность Si принята равной 10^6 .

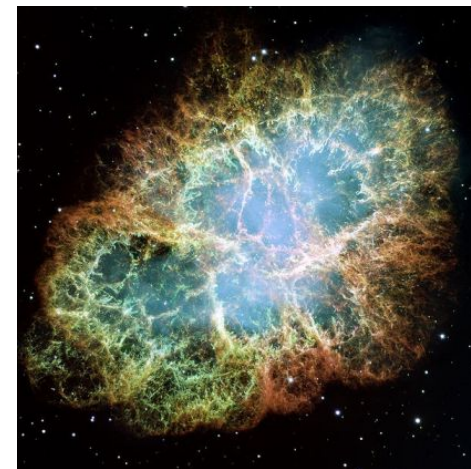
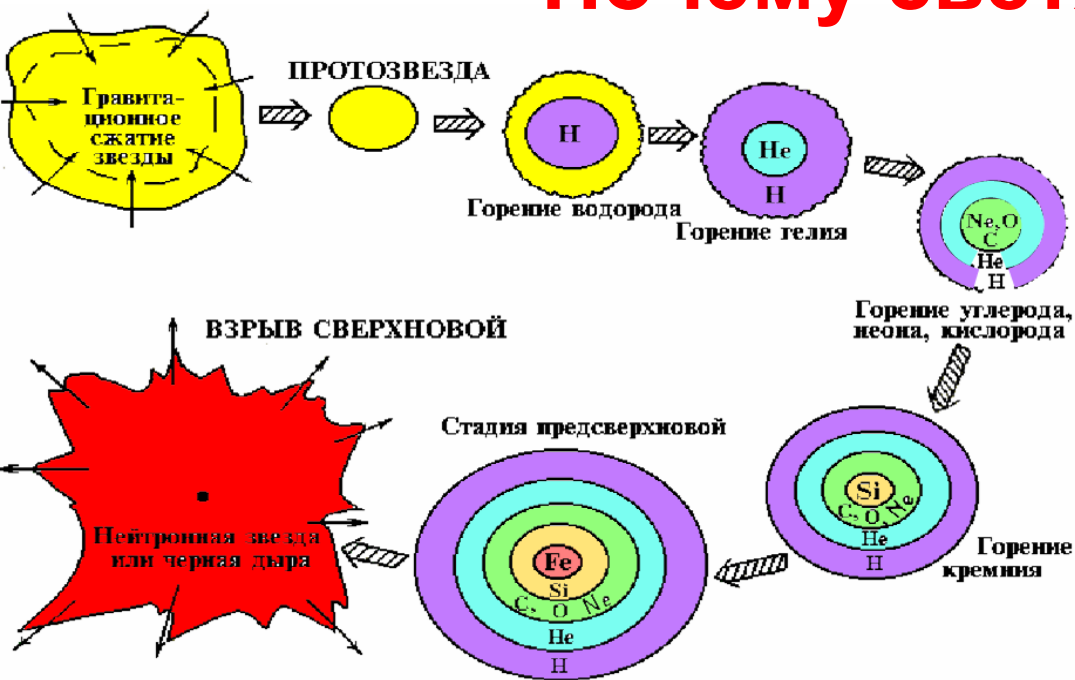
Химический состав

Солнце — ^1H (90%), ^4He (10%)

Земля — ^{56}Fe (32%), ^{16}O (15%), ^{28}Si (15%), ^{24}Mg (14%), ^{32}S (3%)

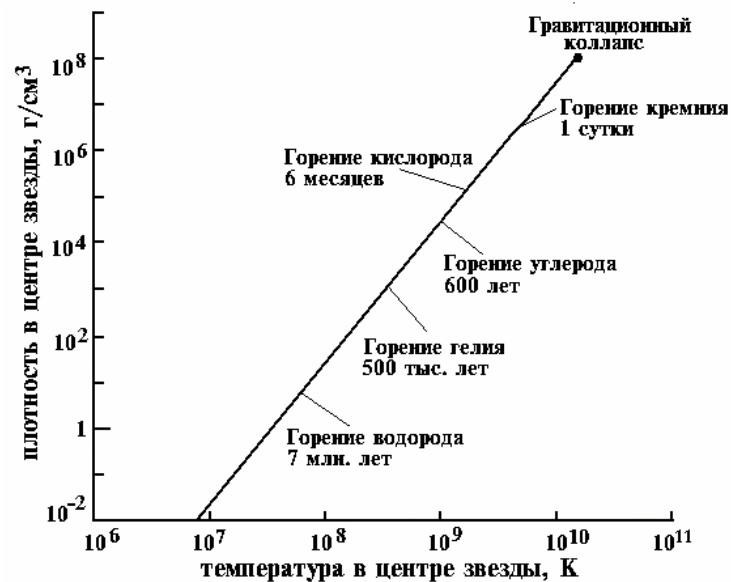
Человек — ^{16}O (65%), ^{12}C (18%), ^1H (10%), ^{14}N (3%), ^{40}Ca (1,5%) (% к массе тела)

Почему светят звезды?

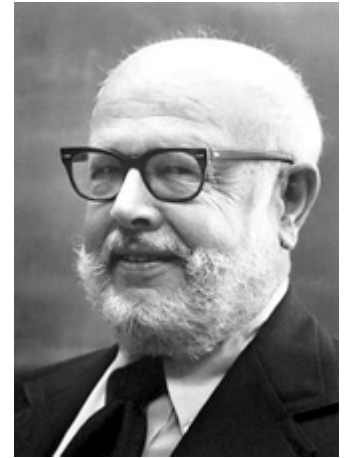


Крабоподобная туманность 1054

**Эволюция
массивной
звезды**
 $M > 25M_{\odot}$



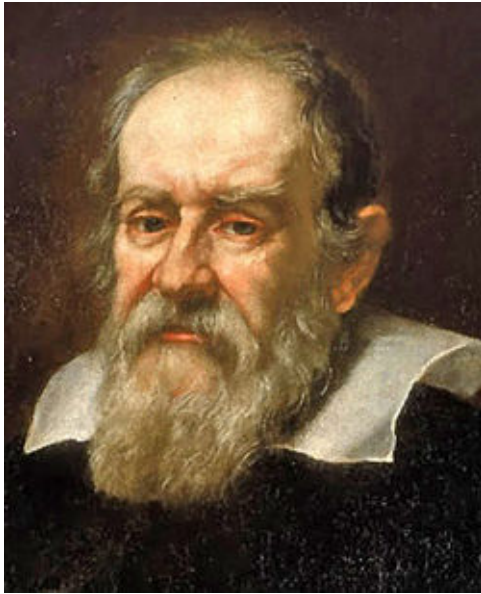
Ядерные реакции в звездах



У. А. Фаулер
1911 – 1995

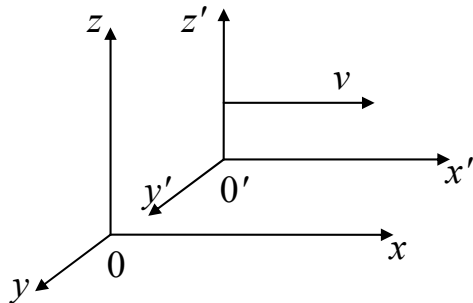
- Горение водорода. CNO-цикл
 $4p \rightarrow 4He + 2e^+ + 2\nu_e$
- Горение гелия.
 $3\alpha \rightarrow {}^{12}\text{C}$
- α -процесс. Образование α -частичных ядер
 $A + \alpha + \alpha + \alpha + \dots \rightarrow N\alpha$ -ядра
- E-процесс. Образование ядер в районе железного максимума в условиях термодинамического равновесия.
- s-процесс. Захват нейтронов происходит медленнее (slow), чем β -распад в последовательности процессов
 $(A, Z) + n \rightarrow (A+1, Z) \rightarrow (A+1, Z+1) + e^- + \tilde{\nu}$
- r-процесс. . Захват нейтронов происходит быстрее (rapid), чем β -распад в последовательности процессов
 $(A, Z) + Nn \rightarrow (A+N, Z) \rightarrow (A+N, Z+N) + Ne^- + N\tilde{\nu}$
- p-процесс. Реакции образования лёгких изотопов химического элемента в реакциях (p, n) (p, γ) (γ, n) $(\gamma, 2n)$
- x-процесс. Реакции под действием космических лучей. Образование изотопов Li, Be, B.

Г. Галилей



Галилео Галилей
1564 – 1642

- Заложил основы научного подхода в описание физического мира
- Сформулировал понятие движения
- Сформулировал законы движения падающих тел
- 1638 Принцип относительности



$$x' = x - vt,$$

$$y' = y,$$

$$z' = z,$$

$$t' = t$$

$$\vec{V} = \vec{V}_1 + \vec{V}_2$$

1905 г. Специальная теория относительности



Альберт Эйнштейн
1879 – 1955

$$v = \frac{v_1 + v_2}{1 + \frac{v_1 v_2}{c^2}}$$

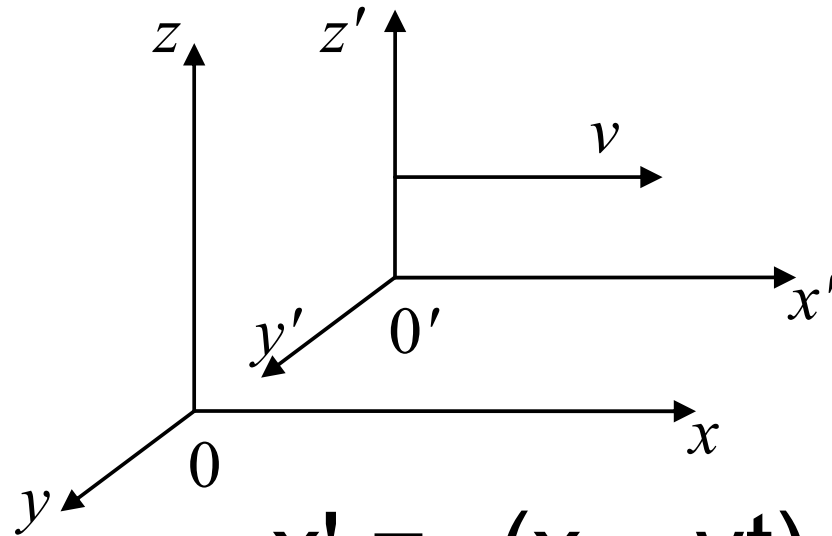
Постулаты Эйнштейна

1. Все физические законы одинаковы во всех инерциальных системах отсчета, движущихся относительно друг друга поступательно и равномерно.
2. Скорость света в пустоте одинакова с точки зрения всех наблюдателей независимо от движения источника света относительно наблюдателя.

Пространство. Время. Наблюдатель

1638 г. Преобразования Галилея

1904 г. Преобразования Лоренца



$$x' = x - vt,$$

$$y' = y,$$

$$z' = z,$$

$$t' = t$$

$$x' = \gamma(x - vt),$$

$$y' = y,$$

$$z' = z,$$

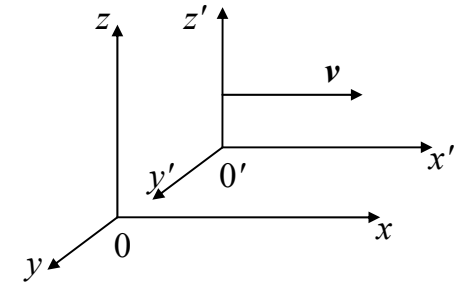
$$t' = \gamma(t - \beta x/c)$$

$$\beta = \frac{v}{c}, \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

Принцип относительности

Все наблюдатели, движущиеся с постоянной скоростью, испытывают действие одних и тех же физических законов. Поэтому каждый наблюдатель может утверждать, что он находится в покоящейся системе координат.

Замедление времени



Интервал времени, измеренный в движущейся системе отсчета S' , длиннее интервала времени в покоящейся системе отсчета S .

$$t' = t \cdot \gamma = \frac{t}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Сокращение длины

Размер линейки, движущейся параллельно своей оси в системе отсчета S' , короче размера линейки в покоящейся системе отсчета S .

$$l' = \frac{l}{\gamma} = l \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

Классическая и релятивистская динамики

$$E^2 = c^2 p^2 + m^2 c^4$$

$$E_{\text{кин}} = \frac{mv^2}{2}$$

$$E_{\text{кин}} = E - mc^2$$

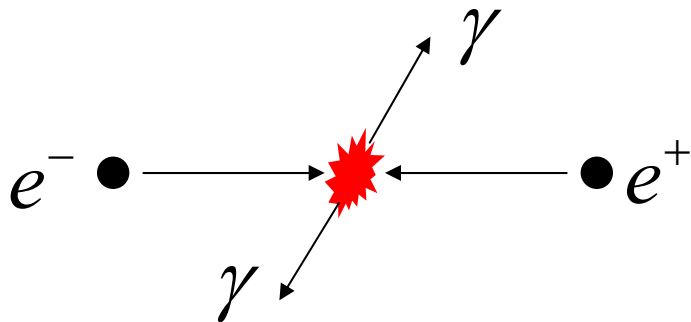
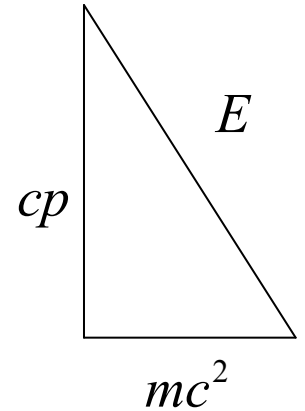
$$p = mv$$

$$p = \frac{mc\beta}{\sqrt{1-\beta^2}}$$

τ_0 - время жизни частицы
в системе покоя

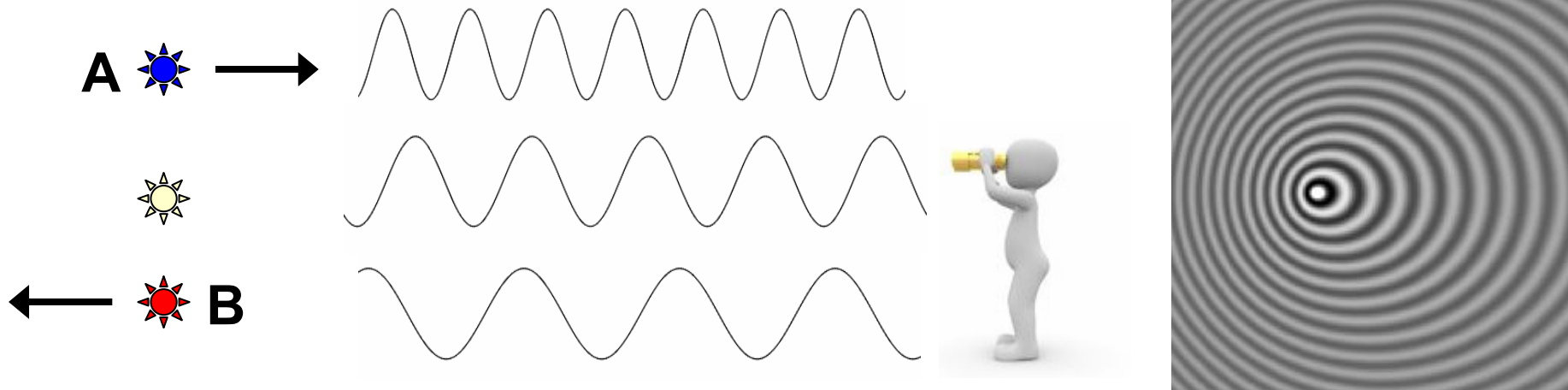
$$t = \frac{t_0}{\sqrt{1-\beta^2}}$$

- время жизни частицы,
движущейся со скоростью β .



1842 г. Эффект Доплера

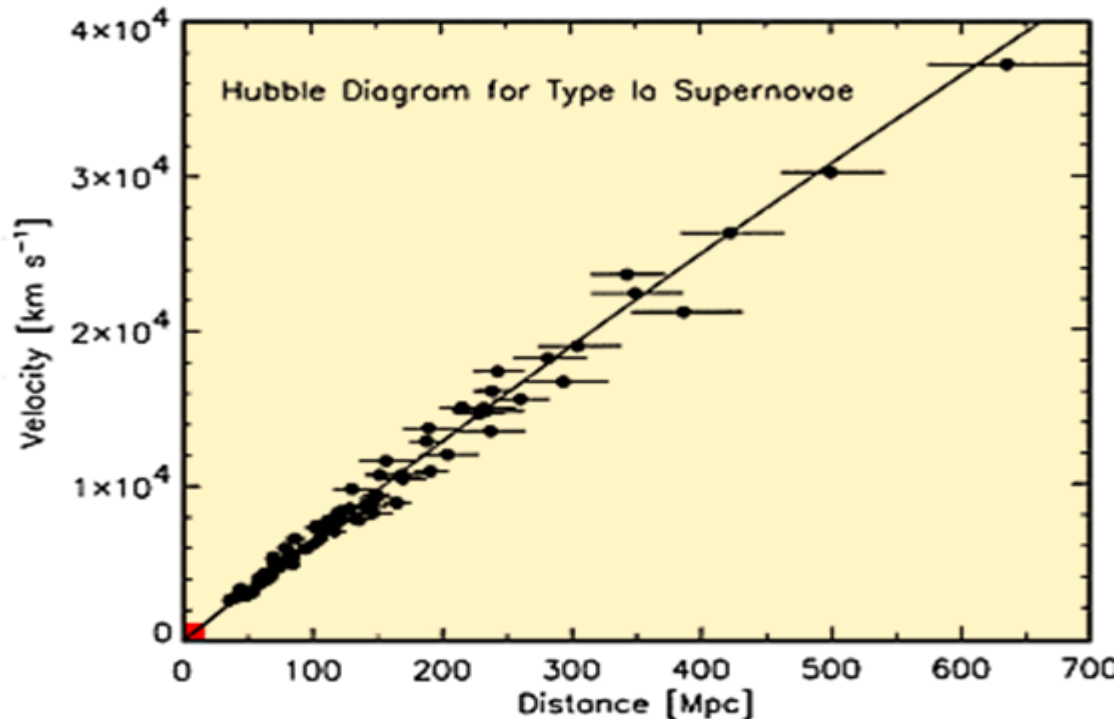
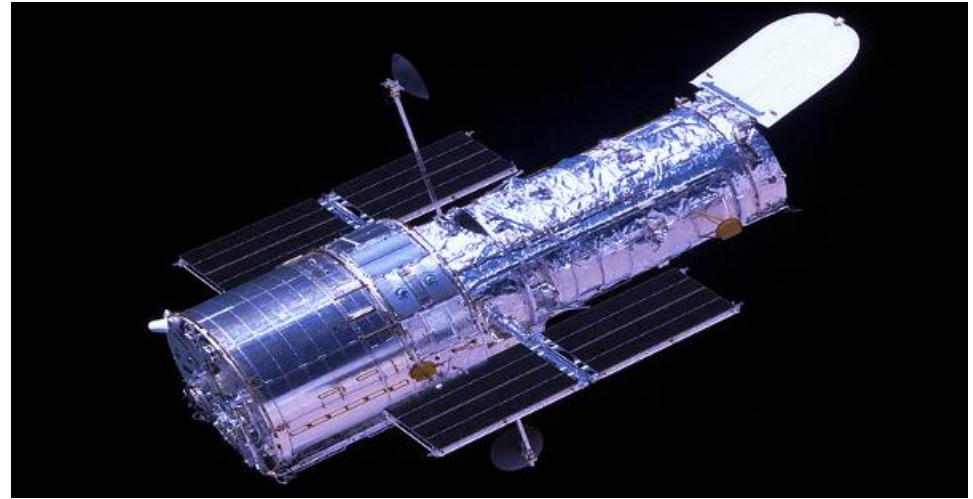
Во всех инерциальных системах отсчета скорость света в вакууме постоянна и равна c . Существует ли различие в световых сигналах от неподвижного и движущегося источников? **Да.** Оно проявляется в эффекте Доплера. Свет, приходящий к наблюдателю от источника **A**, движущегося к наблюдателю, будет приходить с меньшей длиной волны (синее смещение). Свет, приходящий к наблюдателю от источника **B**, удаляющегося от наблюдателя, будет приходить с большей длиной волны (красное смещение).



Другие галактики



Э. Хаббл
1889 – 1953



1924 - туманность Андромеда – другая галактика

1929 - красное смещение, разбегание галактик

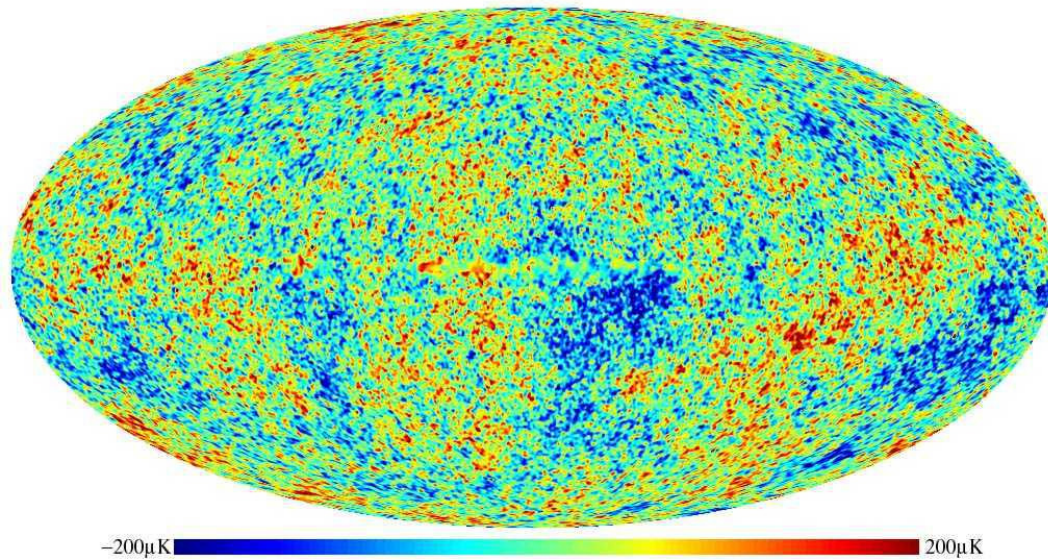
1990 - запуск телескопа Хаббл

$$V = H \cdot R$$

Постоянная Хаббла

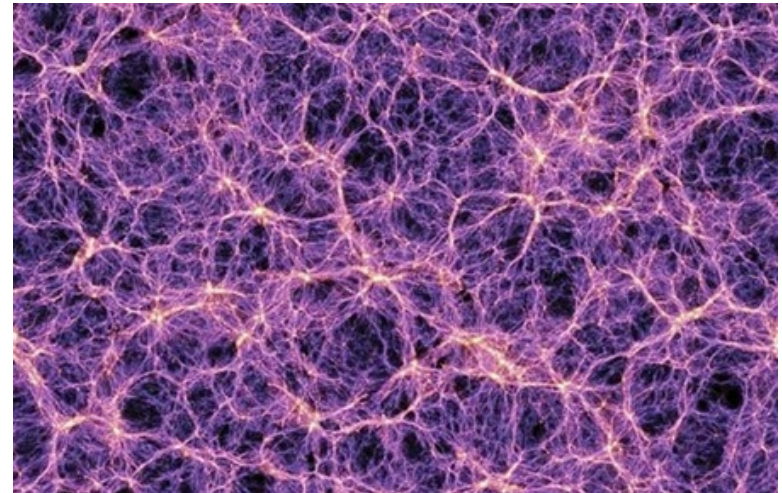
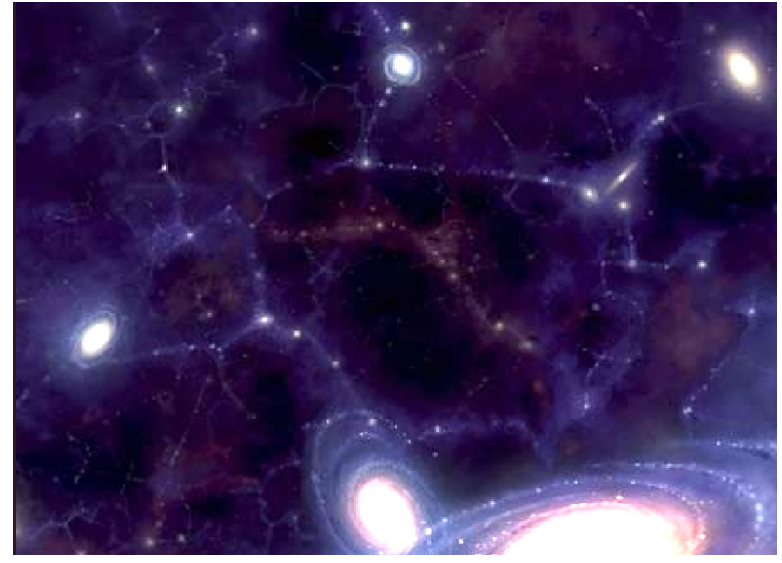
$$H = 71 \pm 4 \frac{\text{км}}{\text{сек} \cdot \text{мегапарсек}}$$

Реликтовое излучение



Реликтовое излучение – излучение остывающей после Большого взрыва Вселенной. Форма спектра реликтового излучения соответствует излучению абсолютно черного тела с температурой 2,7 К. Соотношение между числом реликтовых фотонов и барионов $10^9 : 1$

Крупномасштабная структура Вселенной



Как устроен Мир (Стандартная модель). 2015 г.

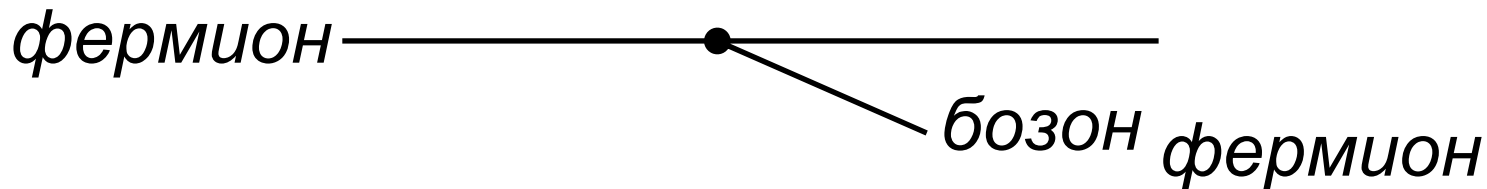
ФЕРМИОНЫ

u	c	t
d	s	b
ν_e	ν_μ	ν_τ
e	μ	τ
I	II	III

БОЗОНЫ

Кварки	g	Сильное
	γ	Электро-магнитное
Лептоны	W^\pm	Слабое
	Z^0	
	H	

Объединение взаимодействий



Астрономия

Механика

Гравитационное
взаимодействие

Электричество

Электромагнитное
взаимодействие

Магнетизм

Электрослабое
взаимодействие

Слабое взаимодействие

Великое
объединение

Сильное взаимодействие

E (ГэВ)

10^2

10^{16}

10^{19}

Планковские единицы

Объединение четырёх фундаментальных взаимодействий, включая гравитацию, должно происходить при энергиях $\approx 10^{19}$ ГэВ. Эту энергию называют *планковской*. Она получается комбинацией трёх мировых констант: гравитационной постоянной G , постоянной Планка \hbar и скорости света:

Планковская энергия

$$E_{Pl} = \sqrt{\frac{\hbar c^5}{G}} \approx 1.2 \cdot 10^{19} \text{ ГэВ}$$

Планковская масса

$$m_{Pl} = \frac{E_{Pl}}{c^2} = \sqrt{\frac{\hbar c}{G}} \approx 1.2 \cdot 10^{19} \text{ ГэВ} / c^2$$

Планковская длина

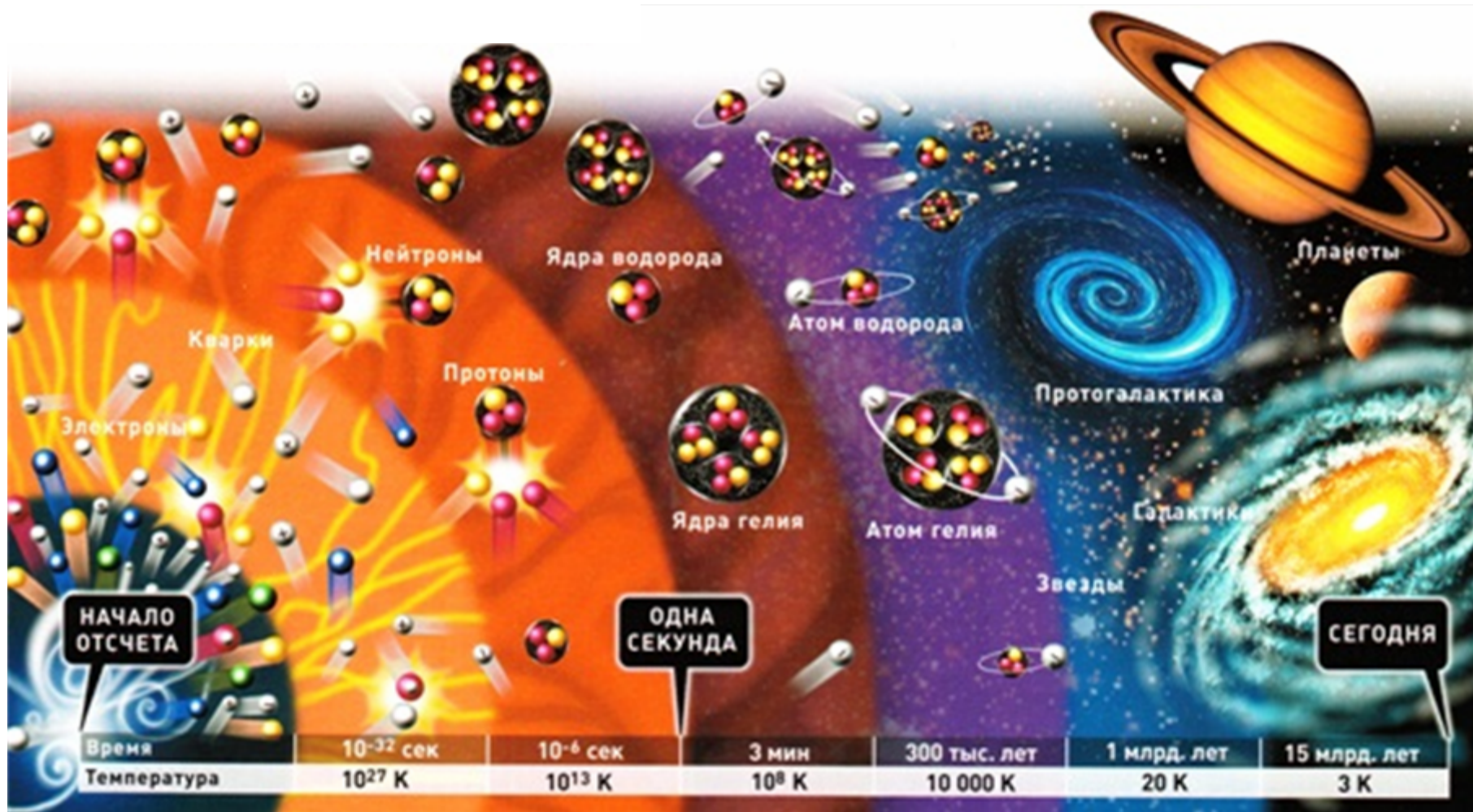
$$r_{Pl} = \sqrt{\frac{G\hbar}{c^3}} \approx 10^{-33} \text{ см}$$

При планковской энергии к трём уже объединённым при более низких энергиях сильному, электромагнитному и слабому взаимодействиям присоединяется гравитационное, образуя единое универсальное взаимодействие.

Первые мгновения 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

История Вселенной



Космическая шкала времени

Время от настоящего момента, млрд. лет	Событие
14	Большой Взрыв
14	Рождение частиц, аннигиляция вещества и антивещества
14	Синтез ^2H , ^4He
13	Образование Галактик
10	Сжатие нашей протогалактики
10	Образование первых звёзд
5	Образование Солнечной системы, планет
4	Образование земных пород
3	Зарождение микроорганизмов
2	Формирование атмосферы Земли
1	Зарождение жизни
0,60	Ранние окаменелости
0,45	Рыбы
0,15	Динозавры
0,05	Первые млекопитающие
2 млн. лет	Человек

Тайны Вселенной

«Вполне возможно, что за гранью наших чувств находятся миры, которые мы не воспринимаем».

А. Эйнштейн.

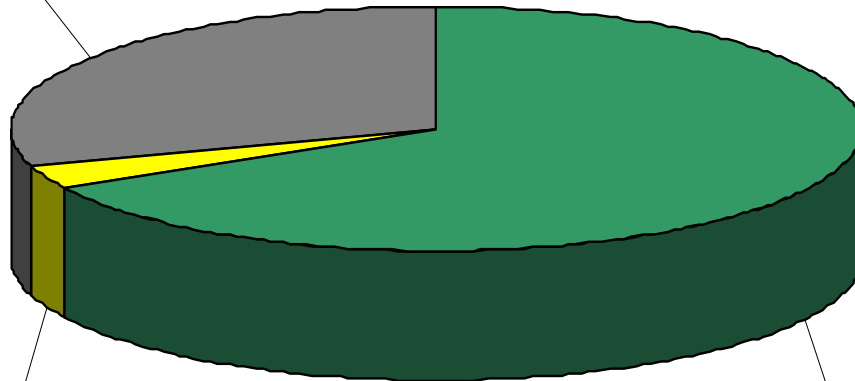
Характеристики Вселенной

БАРИОНЫ в том числе, ЗВЁЗДЫ:	0.02-0.05 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

Темная
материя

Барионы

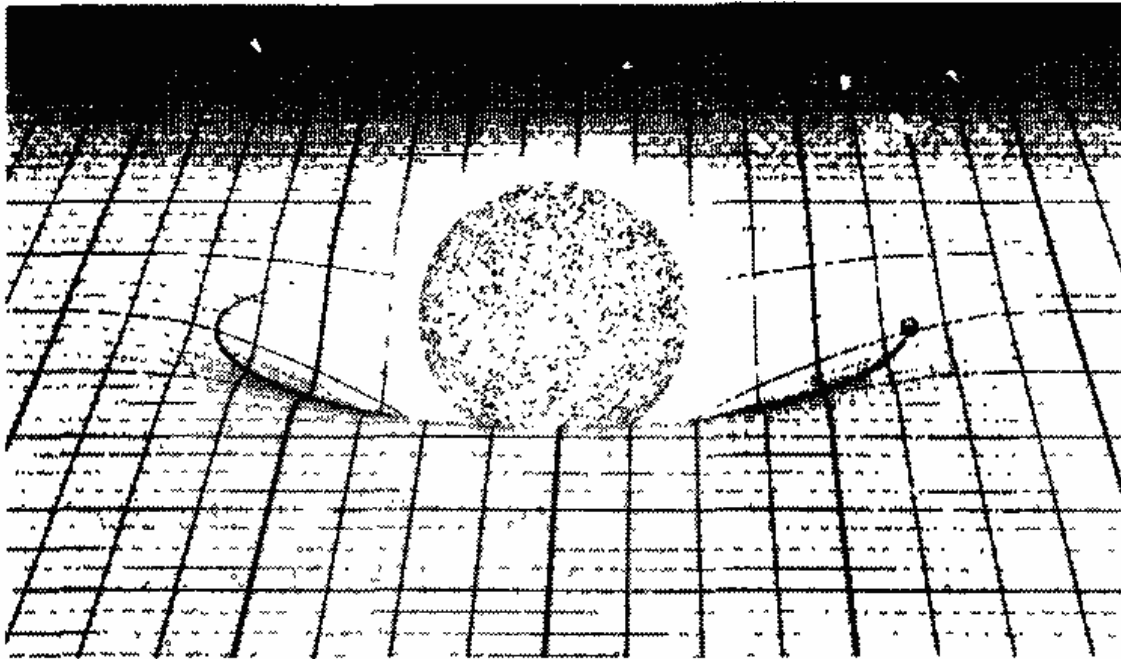
Вакуум



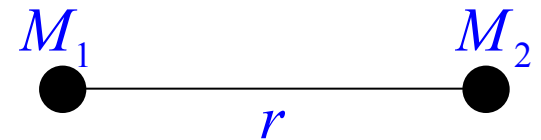
Гравитация.

Общая теория относительности.

Искривление пространства

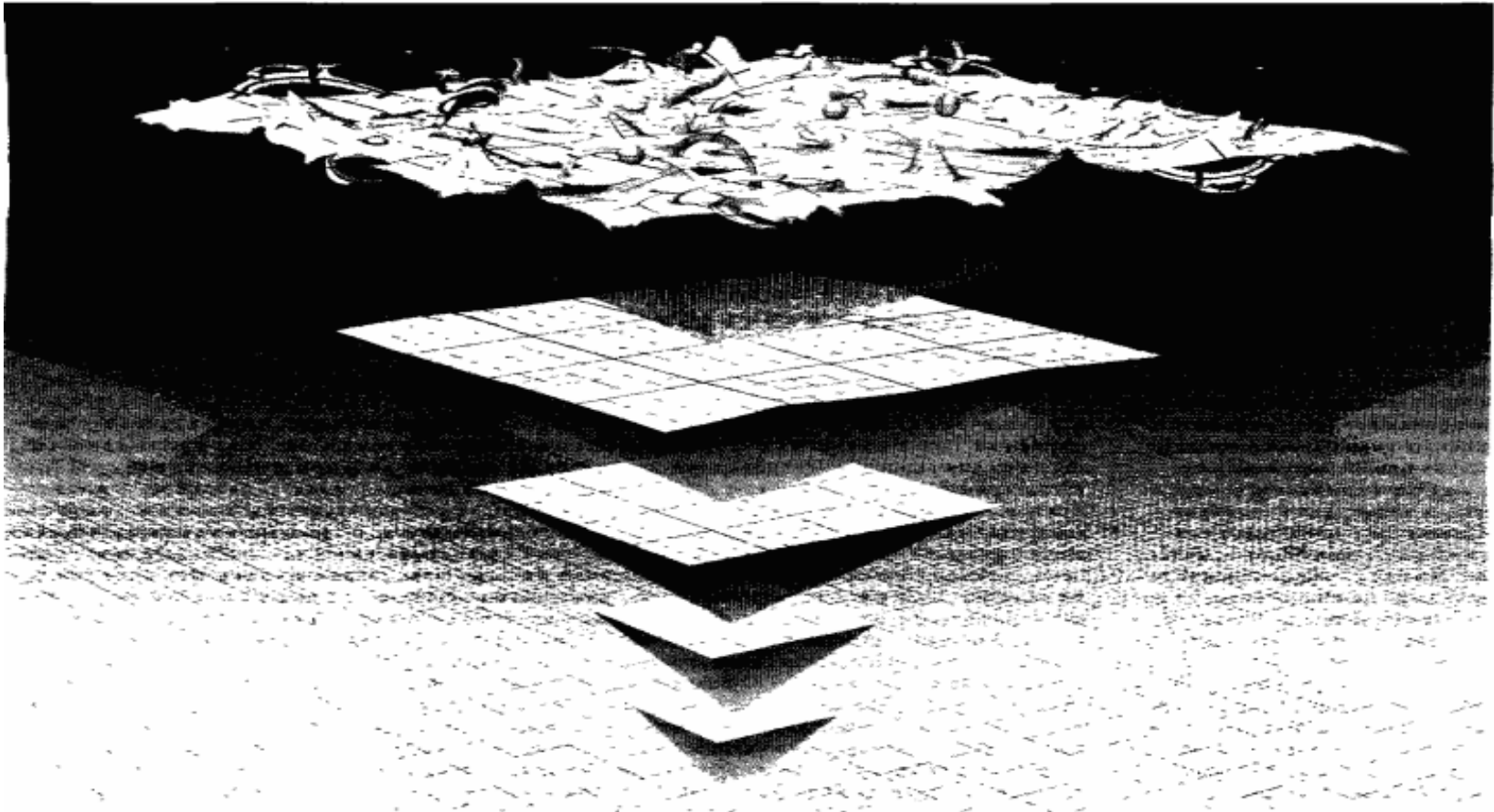


$$F = G \frac{M_1 M_2}{r^2}$$



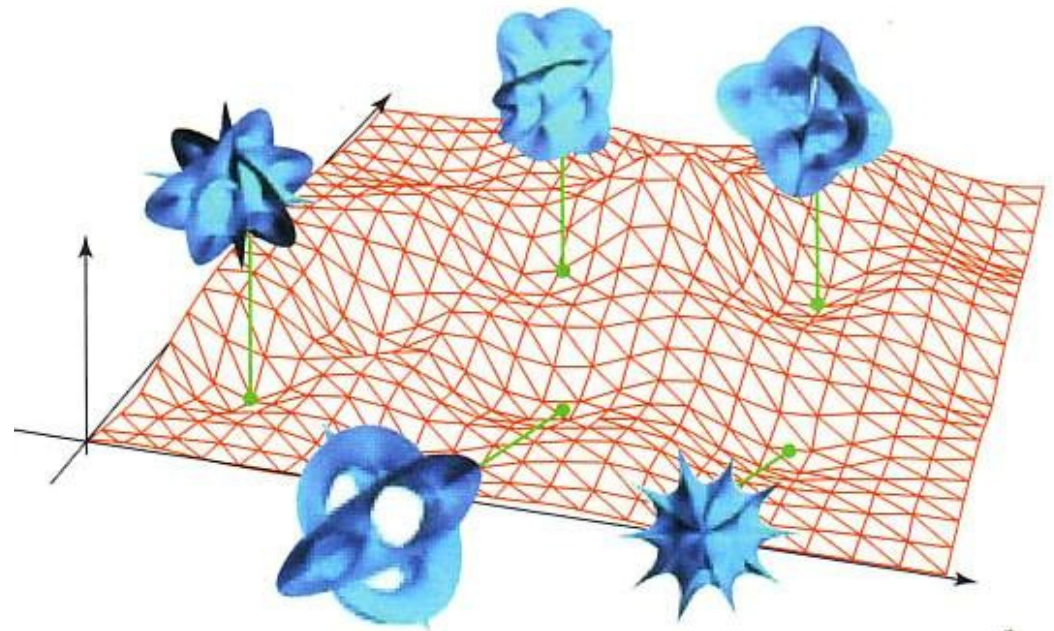
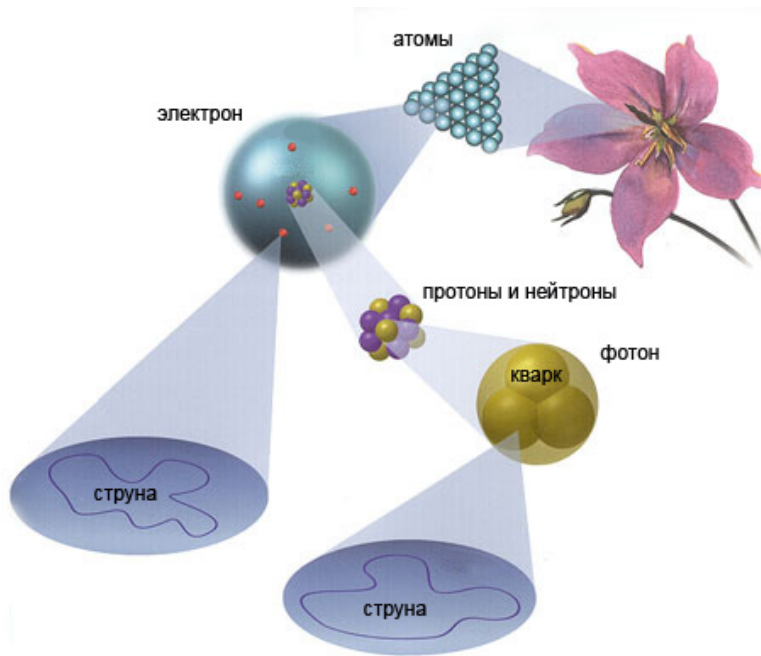
Земля остается на орбите вокруг Солнца потому, что катится по ложбине в искривленной структуре пространства. Говоря более точно, она следует «линии наименьшего сопротивления» в деформированной окрестности Солнца

Квантовая теория. Структура пространства

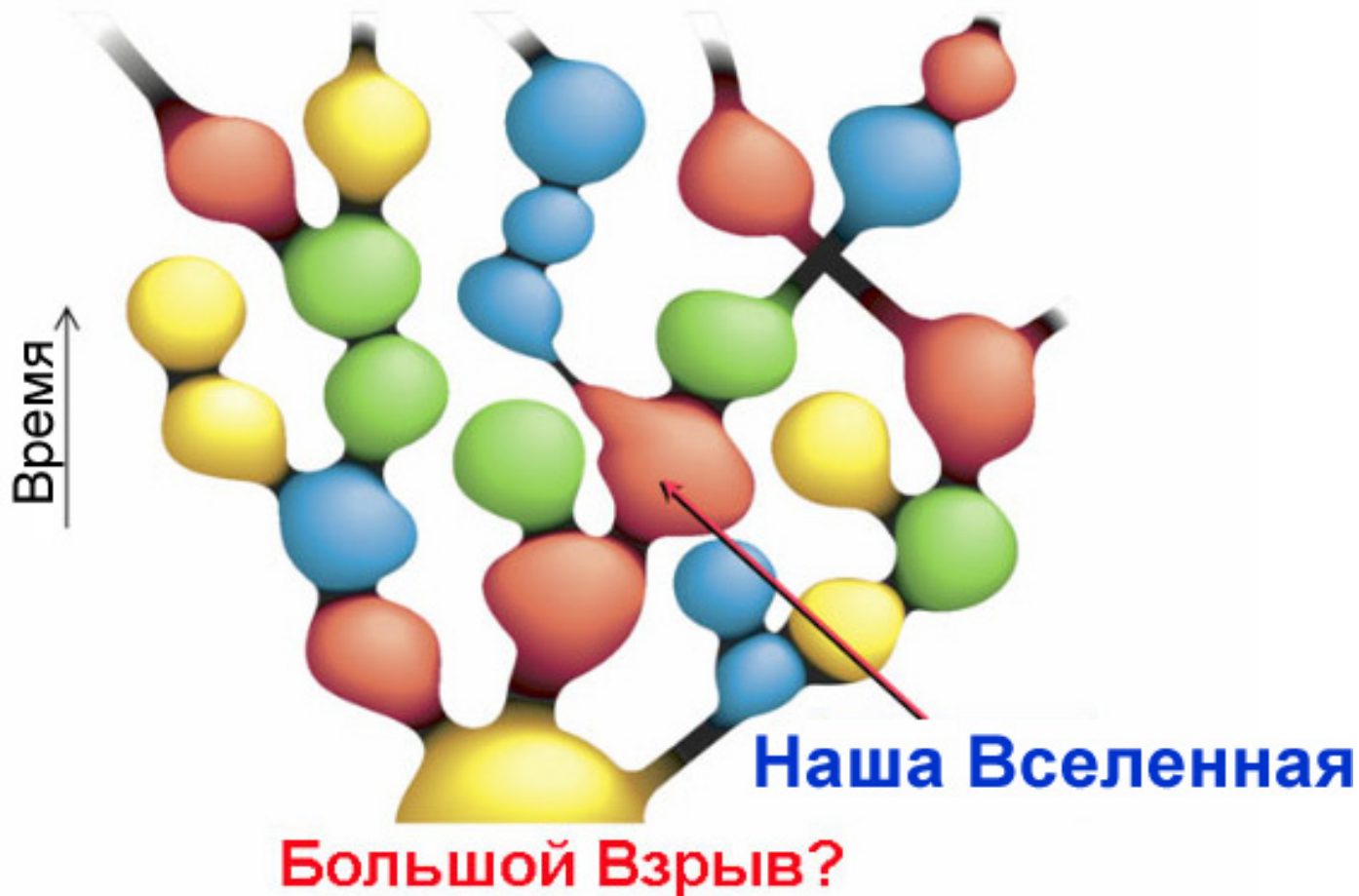


Рассматривая область пространства при все большем увеличении, можно исследовать свойства пространства на ультрамикроскопическом уровне. Попытки объединить общую теорию относительности и квантовую механику наталкиваются на кипящую квантовую пену, проявляющуюся при самом большем увеличении.

Струны. 10 + 1



Параллельные Вселенные



Из принципа неопределенности следует, что Вселенные могут иметь различные истории развития. Мы живём в одной из таких Вселенных.

Параметры Стандартной модели

Стандартная модель требует около 30 параметров, которые используются в расчетах.

1. Массы 6 кварков.
2. Массы трех заряженных лептонов.
3. Масса бозона Хиггса.
4. 4 параметра матрицы Кабибо-Кабаяши-Маскавы, описывающие смешивание кварков.
5. Константы связи слабых, электромагнитных и сильных взаимодействий.
6. Массы трёх типов нейтрино.
7. 4 параметра, описывающие смешивание нейтрино (аналог параметров матрицы Кабибо-Кабаяши-Маскавы).
8. Два параметра, описывающие вакуум в квантовой хромодинамике.

Вопросы? Вопросы!

Несмотря на впечатляющие успехи Стандартной модели, целый ряд вопросов сегодня не имеет убедительных ответов.

1. Почему существуют три поколения фундаментальных частиц, состоящих из пары кварков и лептонов?
2. Существуют ли четвертое, пятое, ... поколения фундаментальных частиц?
3. Почему существуют кварки и лептоны, и чем вызвано различие между ними?
4. Почему фундаментальными частицами вещества являются фермионы, в то время как фундаментальными переносчиками взаимодействия — бозоны?
5. Правильна ли гипотеза о механизме Хиггса?
6. Почему разные фундаментальные частицы имеют разные массы?
7. Почему различаются пространственная и временная степени свободы?
8. Живем ли мы в четырехмерном пространстве-времени, или оно имеет большее число измерений?
9. Существуют ли кванты пространства и времени?
10. ??????