

Тайны атомных ядер

2017

Ядерная физика в Интернете



Учебные материалы курса

"Физика атомного ядра и частиц"

- ▶ [Физика ядра и частиц. XX век](#)
- ▶ [Частицы и атомные ядра](#)
- ▶ [Шпаргалка для отличника \(Частицы и ядра\)](#)
- ▶ [Лекции профессора Б.С. Ишханова \(2016 г.\)](#)
- ▶ [Лекции профессора И.М. Капитонова \(2016 г.\)](#)
- ▶ [Программа курса "Физика ядра и частиц"](#)
- ▶ [Частицы и атомные ядра \(основные вопросы по курсу\)](#)
- ▶ [Обязательные вопросы для допуска к экзамену Гончарова. Семинары по физике ядра и частиц](#)
- ▶ [Семинары по физике частиц и атомного ядра](#)
- ▶ [Задачи и решения](#)
- ▶ [Описания задач общего ядерного практикума физического факультета МГУ](#)
- ▶ [Темы курсовых работ для студентов второго курса](#)

Материалы спецкурсов

- ▶ [История атомного ядра](#)
- ▶ [Микромир и Вселенная](#)
- ▶ [Модели атомных ядер](#)
- ▶ [12 лекций по физике атомного ядра](#)
- ▶ [Ядерные реакции](#)
- ▶ [Ядерные реакции \(задачи\)](#)
- ▶ [Квантовая теория столкновений](#)
- ▶ [Фотоядерные реакции. Современный статус](#)

Проект кафедры общей ядерной физики
физического факультета МГУ
осуществляется при поддержке **НИИЯФ МГУ**.

Материалы курсов МФК

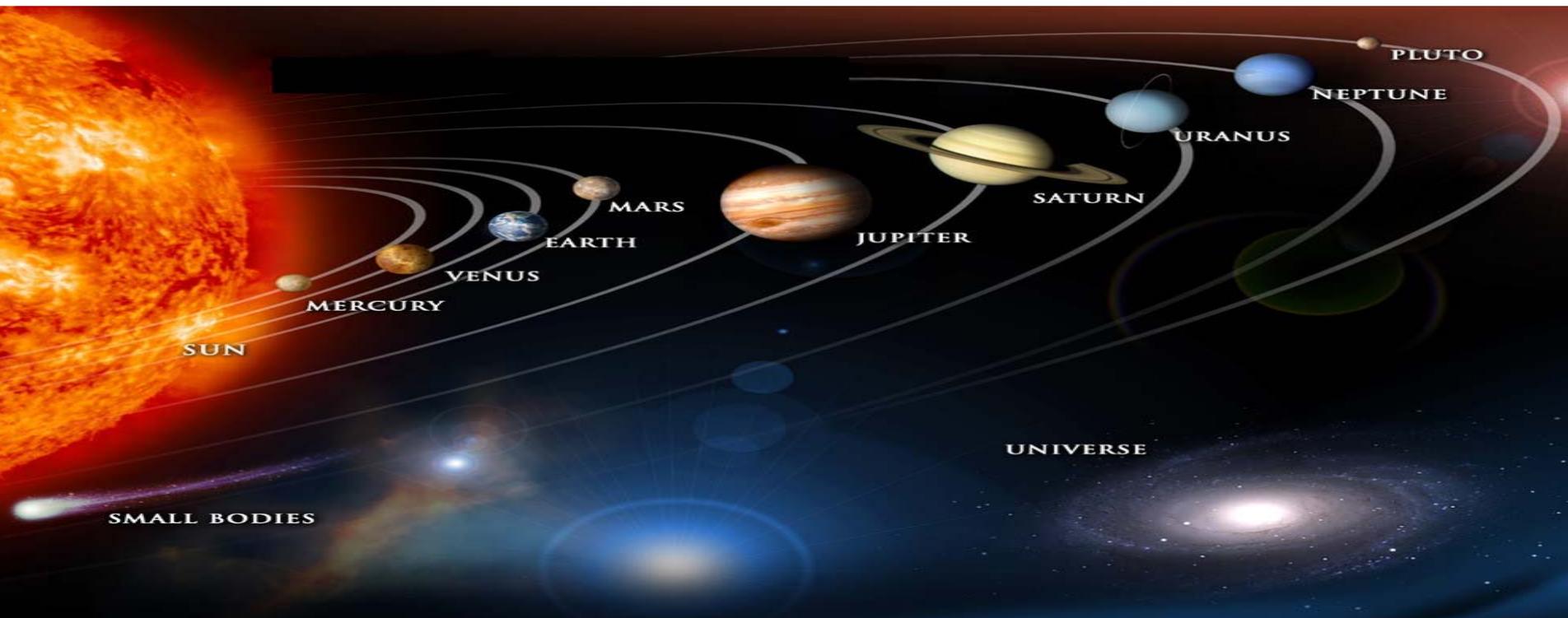
- ▶ [Тайны атомных ядер \(2017 г.\)](#)
- ▶ [Рождение и жизнь атомных ядер \(2016 г.\)](#)
- ▶ [Ядерная физика и человек \(2016 г.\)](#)
- ▶ [Мир атомных ядер \(2015 г.\)](#)
- ▶ [Рождение и жизнь атомных ядер \(2015 г.\)](#)
- ▶ [Ядерная физика и человек \(2014 г.\)](#)
- ▶ [Микромир и Вселенная \(2014 г.\)](#)

Разное

- ▶ [Поиск по сайту](#)
- ▶ [Материалы научного семинара по ядерной физике НИИЯФ МГУ](#)
- ▶ [Что нового на сайте](#)
- ▶ [100-летие открытия атомного ядра. Резерфорд](#)
- ▶ [Нобелевские лауреаты по физике](#)
- ▶ [Хроника открытий в физике ядра и частиц](#)
- ▶ [Фотографии и биографии физиков](#)
- ▶ [Cosmic ray / Gamma ray / Neutrino and similar experiments](#) (гигантское количество полезных ссылок)
- ▶ [Ссылки на ресурсы по ядерной физике](#)
- ▶ [Школы, семинары, рабочие совещания,](#)

Природа материи

Планеты Солнечной системы



Планета	Среднее расстояние от Солнца, а.е.	Период обращения	Период вращения	Плотность, г/см ³	Диаметр, км	Масса, кг	Кол-во спутников	Температура
Меркурий	0,387	88 сут	58,6 сут	5,44	4878	$3,3 \cdot 10^{23}$	0	350
Венера	0,72	224,7 сут	243 сут	5,5	6050	$4,9 \cdot 10^{24}$	0	480
Земля	1,00	365,24 сут	24 час	5,52	12756,3	$6 \cdot 10^{24}$	1	22
Марс	1,52	687 сут	24,5 час	3,95	6780	$6,4 \cdot 10^{23}$	2	-23
Юпитер	5,2	11,9 лет	10 час	1,33	142600	$1,9 \cdot 10^{27}$	16	-150
Сатурн	9,54	29,5 лет	10,2 час	0,68	120600	$5,7 \cdot 10^{26}$	30	-180
Уран	19,18	84 года	17 час	1,26	51200	$8,7 \cdot 10^{25}$	15	-215
Нептун	30,06	164,8 лет	17,8 час	1,67	49500	$1,03 \cdot 10^{26}$	6	-217
Плутон	39,44	247,7 лет	6,4 сут	0,17	3000	$1,79 \cdot 10^{22}$	1	-223

2 этапа развития физики

Классическая физика

Механика. Термодинамика. Электричество. Магнетизм

XX век

Современная физика.

Квантовая физика. Релятивистская физика

Классическая физика	Релятивистская физика $c = 3 \cdot 10^{10}$ см/сек
Квантовая физика $h = 4,1 \cdot 10^{-15}$ эВ/сек	Релятивистская квантовая физика

Основные понятия классической физики

Классическая механика

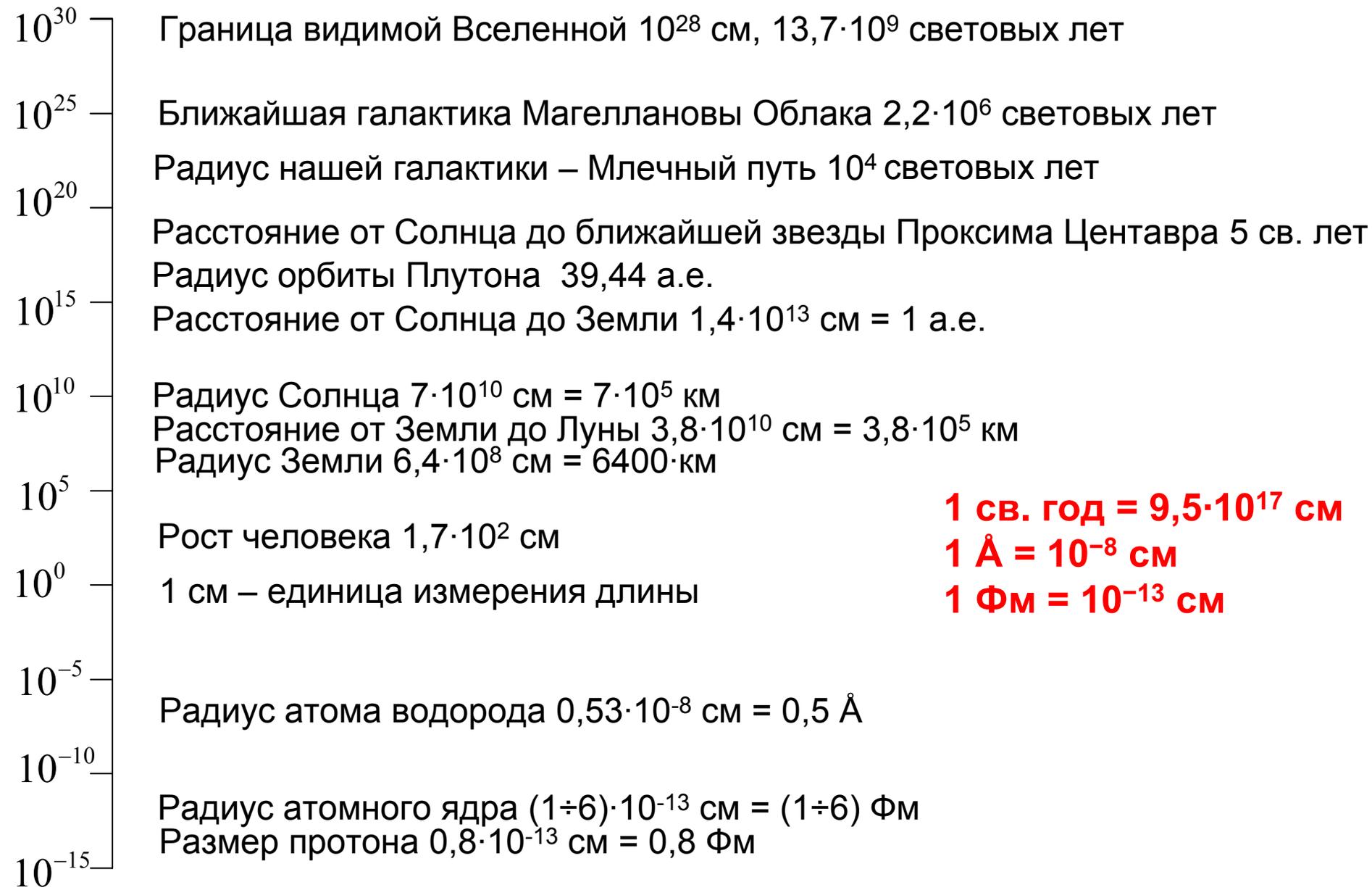
- Длина
- Время
- Масса

Электромагнетизм

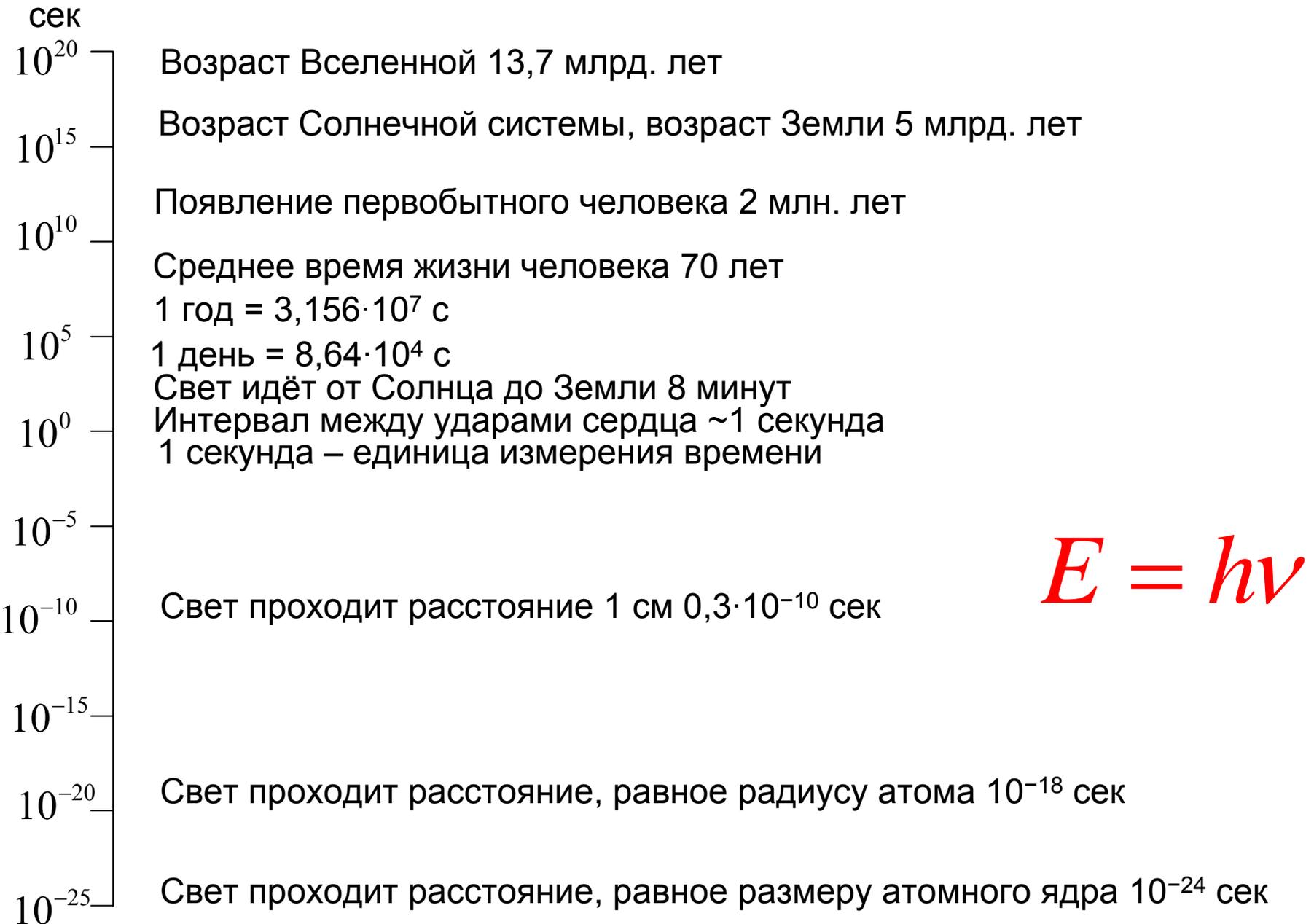
- Электрические заряды
- Электрические поля
- Магнитные поля
- Электромагнитное поле

Диапазон расстояний во Вселенной

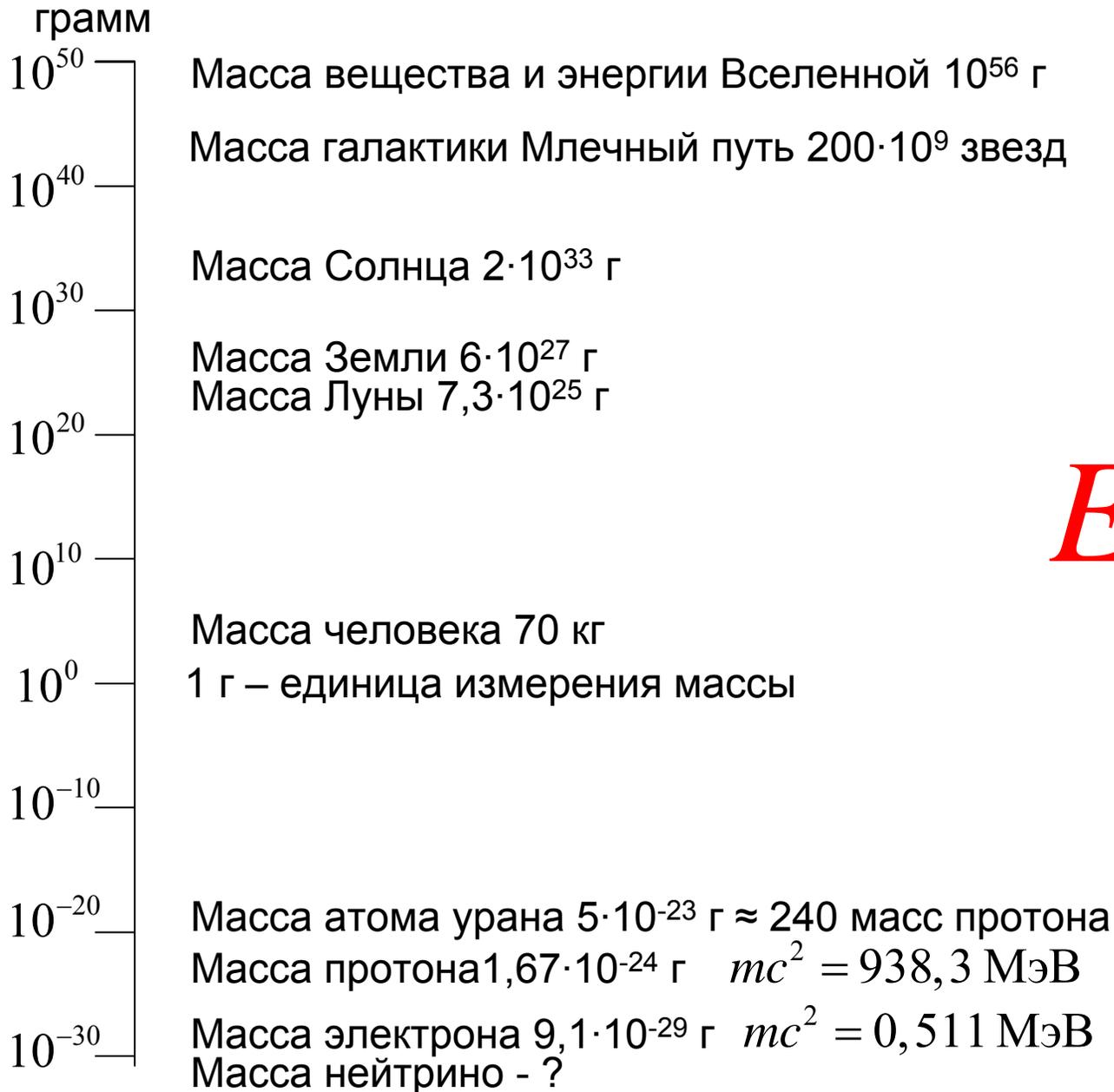
см



Диапазон временных интервалов во Вселенной

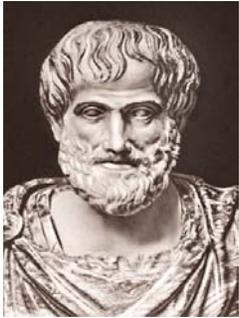


Диапазон масс во Вселенной

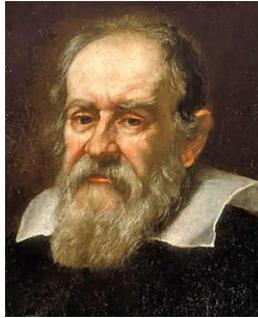


$$E = mc^2$$

Классическая механика. Движение



Аристотель
384–322 до н.э.



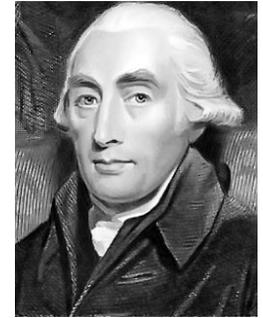
Галилео Галилей
1564 – 1642



Иоганн Кеплер
1571 – 1630



Исаак Ньютон
1642 – 1727



Генри Кавендиш
1731 – 1810

Законы Ньютона

1. Закон инерции

$$F = 0, \quad a = 0, \quad \vec{v} = const$$

2. Ускоренное движение

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

3. Если тело 1 действует на тело 2 с какой-либо силой, то тело 2 действует на тело 1 с равной противоположно направленной силой

$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$$

Закон всемирного тяготения

$$\vec{F} = G \frac{m_1 m_2}{r^3} \vec{r}$$

Электромагнетизм



Шарль Кулон
1736 – 1806



Андре Мари
Ампер
1775 – 1836



Георг Ом
1789 – 1854



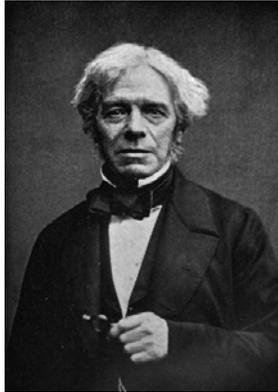
Алессандро
Вольта
1745 – 1827



Ханс Кристиан
Эрстед
1777 – 1851



Гендрик Лоренц
1853 – 1928



Майкл Фарадей
1791 – 1867



Генрих Герц
1857 – 1894



Джеймс Максвелл
1831 – 1879

Уравнения Максвелла

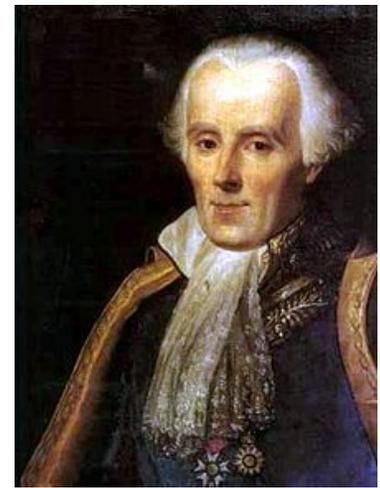
$$\operatorname{div} E = 4\pi\rho$$

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

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

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

Детерминизм

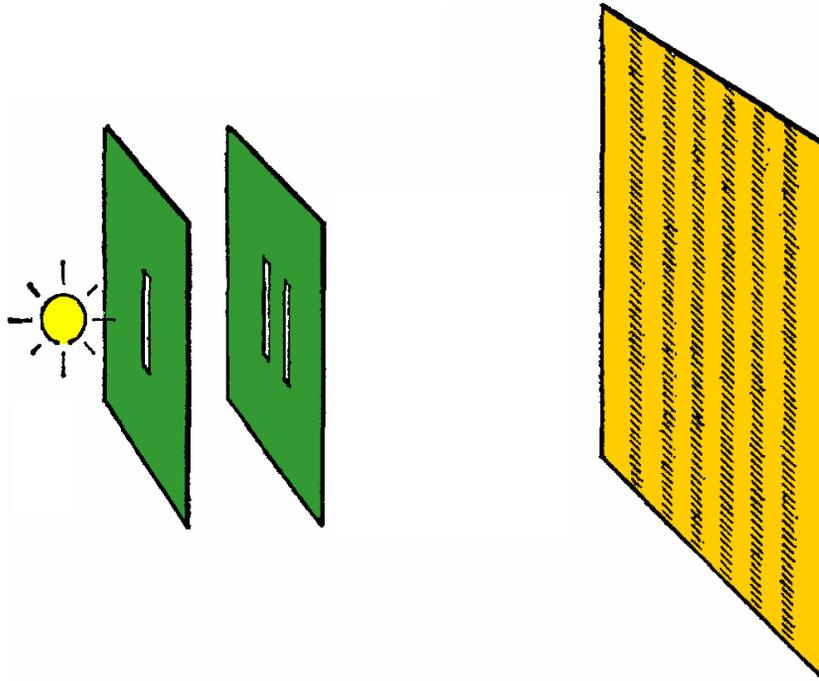


Пьер Лаплас
1749 - 1827

«Мы можем рассматривать настоящее состояние Вселенной как следствие его прошлого и причину его будущего. Разум, которому в каждый определённый момент времени были бы известны все силы, приводящие природу в движение, и положение всех тел, из которых она состоит, будь он также достаточно обширен, чтобы подвергнуть эти данные анализу, смог бы объять единым законом движение величайших тел Вселенной и мельчайшего атома; для такого разума ничего не было бы неясного и будущее существовало бы в его глазах точно так же, как прошлое».

Свет. Волна? Частица?

1801 г. Т. Юнг. Волновая теория света



В опыте Юнга свет от источника падал на непрозрачный экран с двумя близко расположенными щелями. Оказалось, что изображение на экране состоит из нескольких интерференционных полос, что наглядно демонстрируют волновую природу света. Интерференционная картина явно зависит от двух щелей порождающих две волны, которые накладываются друг на друга. Если закрыть одну из щелей интерференционная картина исчезнет.

В то же время, если заменить экран детектором, способным к регистрации отдельных частиц (например, фотопластинкой), то обнаружится, что свет, вызывающий почернение фотозмульсии в определённом месте, состоит из отдельных частиц – фотонов.

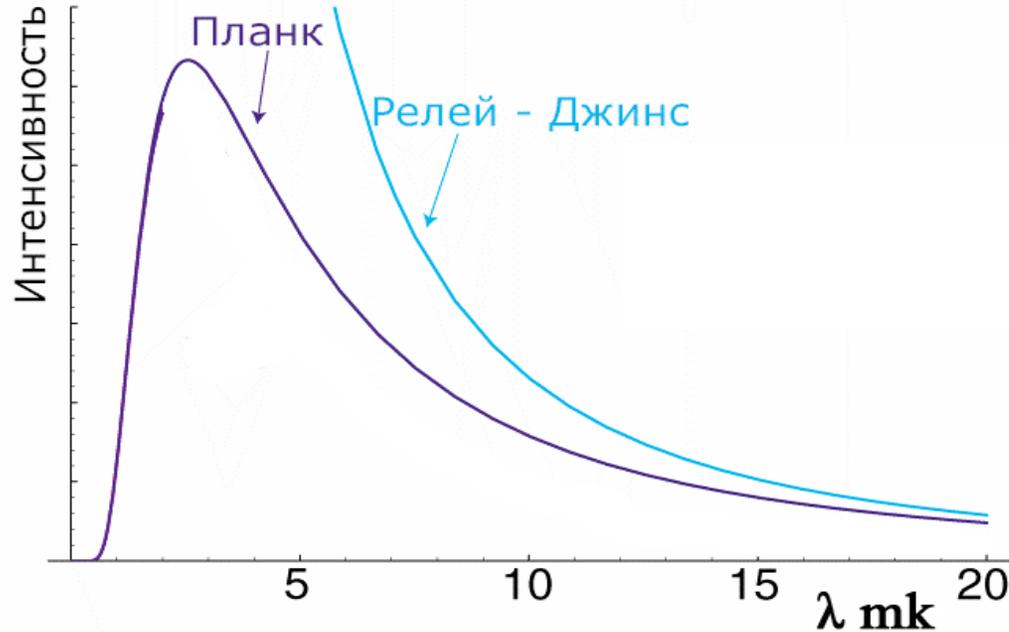
В этом проявилась волновая и корпускулярная природа света.

1900 г. М. Планк. Излучение черного тела

Распределение плотности энергии излучения в полости

$$U(T, \nu) = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} \frac{1}{\exp(h\nu/kT) - 1}, \quad U(T, \lambda) = \frac{8\pi h c \lambda^{-5}}{\exp(hc/\lambda kT) - 1}$$

$$\hbar = \frac{h}{2\pi}$$



$$\hbar = 6.58 \cdot 10^{-22} \text{ МэВ} \cdot \text{с}$$

Нобелевская премия по физике

1918 г. – М. Планк.

За открытие кванта энергии

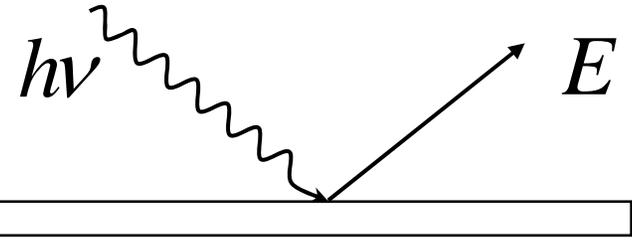
Фотоэффект

1887 г. Г. Герц, А. Столетов.

1905 г. А. Эйнштейн.

$$E = h\nu - W$$

W - работа выхода электронов



- Число высвобождаемых электронов прямо пропорционально интенсивности падающего света.
- Максимальная кинетическая энергия электронов E зависит от частоты ν и не зависит от интенсивности падающего света.
- Энергия электронов E является линейной функцией частоты падающего света ν .
- Существует граничная частота света ν_0 , ниже которой фотоэффект невозможен.

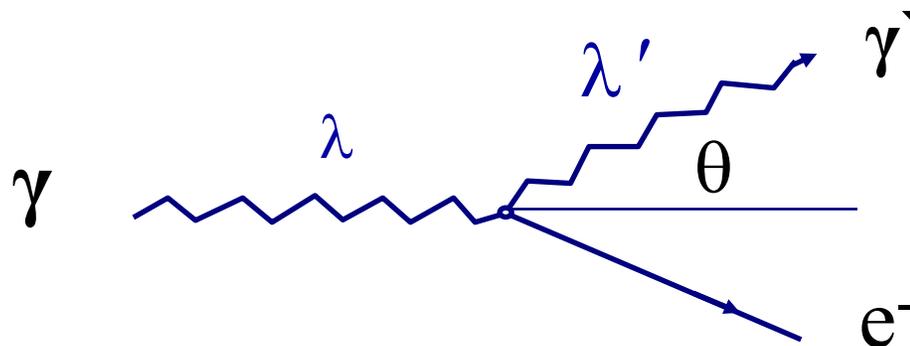
Нобелевская премия по физике

1921 г. – А. Эйнштейн.

За вклад в теоретическую физику и в особенности за открытие закона фотоэлектрического эффекта

1922 г. А. Комптон. Эффект Комптона

Упругое рассеяние фотона на свободном электроне



- В рассеянном излучении наблюдаются две длины волны — первоначальная длина волны λ и дополнительная λ'
- Длина волны λ' всегда больше λ
- Длина волны λ' зависит от угла рассеяния θ и не зависит от природы рассеивающего вещества

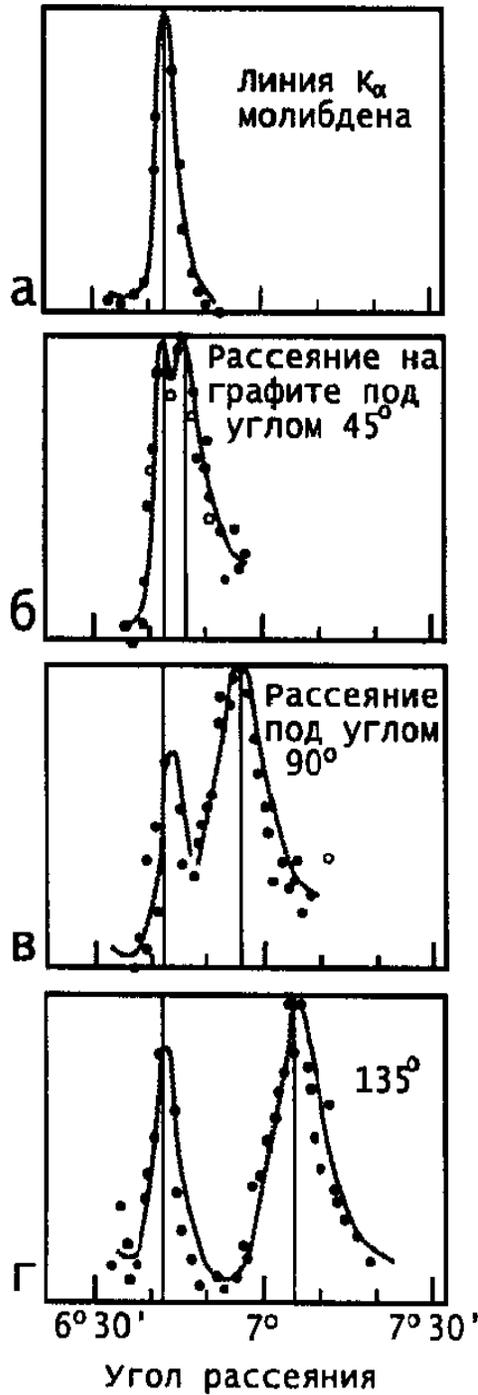
$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{mc}(1 - \cos\theta)$$

Нобелевская премия по физике

1927 г. – А. Комптон.

За открытие эффекта, названного его именем

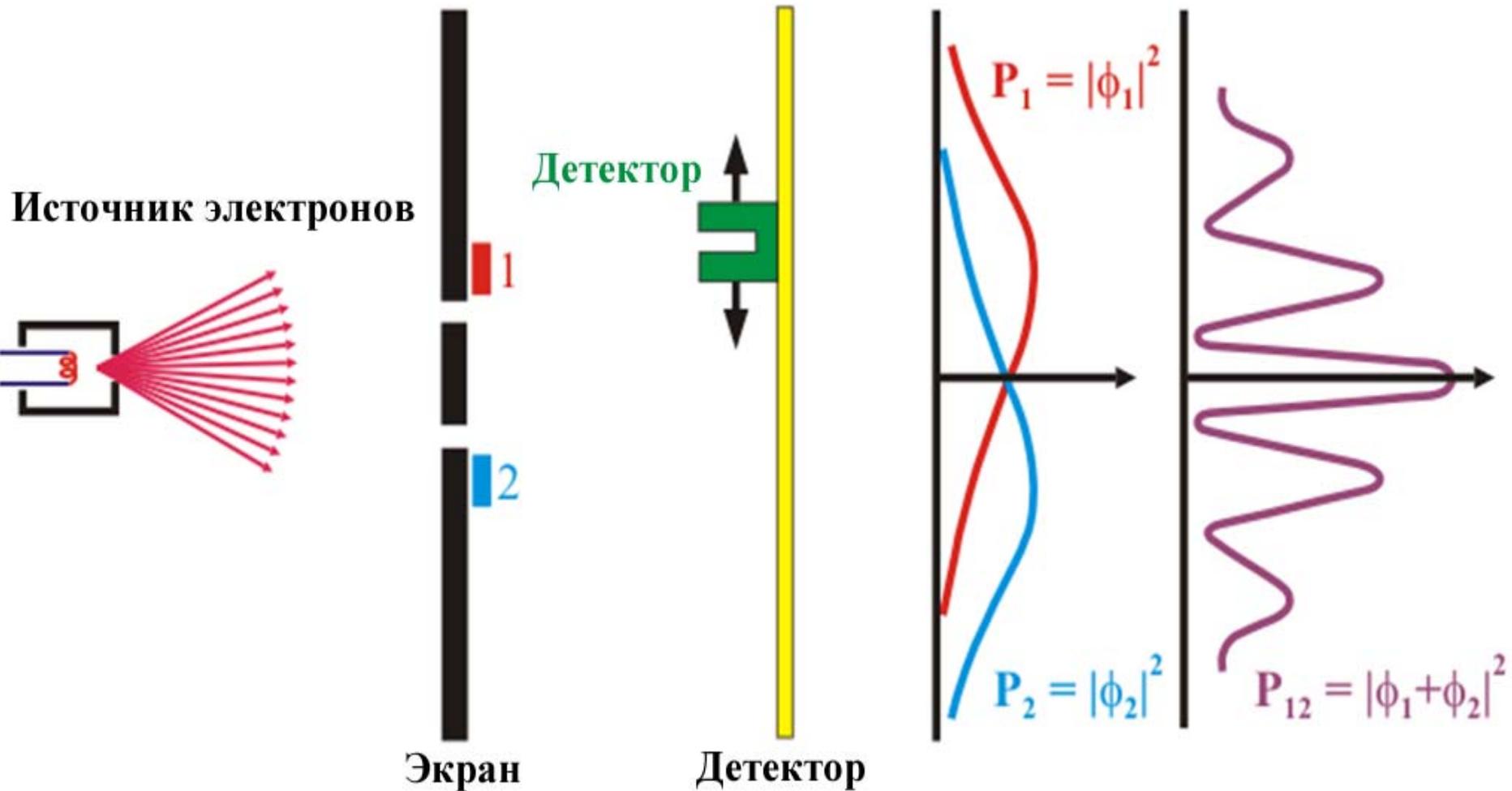
Эффект Комптона



$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{mc}(1 - \cos\theta)$$

Зависимость интенсивности комптоновского рассеяния от угла рассеяния фотона. Пики слева на всех графиках отвечают фотонам с исходной длиной волны, которые рассеиваются на сильно связанных электронах с эффективной массой, равной массе атома.

Интерференция электронов на двух щелях



1927 г.

К. Дэвиссон и Л. Джермер и независимо от них Дж. П. Томсон показали, что для пучка электронов, как и для светового пучка, наблюдается явление интерференции.

Волновые свойства частиц



(1892 – 1987)

1924 г. Луи де Бройль. «Когда закончилась первая мировая война, я много размышлял о квантовой теории и о корпускулярно-волновом дуализме. Именно тогда меня осенила блестящая идея. Корпускулярно-волновой дуализм Эйнштейна носит всеобщий характер и распространяется на все объекты».

Соотношения де Бройля

$$\nu = \frac{E}{h} \quad \lambda = \frac{h}{p}$$

В случае фотонов аналогичные соотношения следуют из условия квантования энергии и релятивистской связи между энергией и импульсом для частиц с нулевой массой покоя.

$$E = cp = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

Нобелевская премия по физике

1929 г. - Л. де Бройль.

За открытие волновой природы электронов

Корпускулярные и волновые свойства частиц.

Принцип неопределенности

Экспериментальное подтверждение идеи корпускулярно-волнового дуализма привело к пересмотру привычных представлений о движении частиц и способе описания частиц. Для классических материальных точек характерно движение по определенным траекториям, так, что их координаты и импульсы в любой момент времени точно известны. Для квантовых частиц это утверждение неприемлемо, так как для квантовой частицы импульс частицы связан с ее длиной волны, а говорить о длине волны в данной точке пространства бессмысленно. Поэтому для квантовой частицы нельзя одновременно точно определить значения ее координат и импульса. Неопределенность в значении координаты частицы Δx и неопределенность в значении компоненты импульса частицы Δp_x связаны соотношением неопределенности, установленным В. Гейзенбергом в 1927 году.

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

Если время жизни некоторого состояния равно Δt , то неопределенность величины энергии этого состояния ΔE не может быть меньше $\Delta E / \hbar$.

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

Нобелевская премия по физике

1932 г. - В. Гейзенберг.

За создание квантовой механики



В. Гейзенберг
1901 – 1976

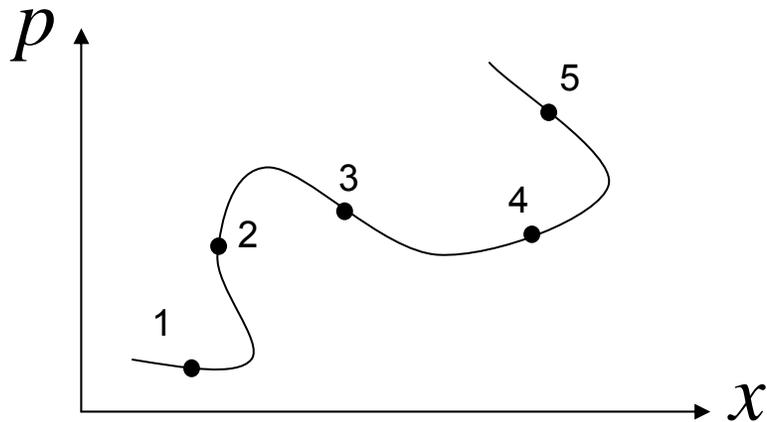
Классическая физика

x, p, t

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

$$\frac{dU}{dx} = m \frac{d^2x}{dt^2}$$

$$H = U + E$$



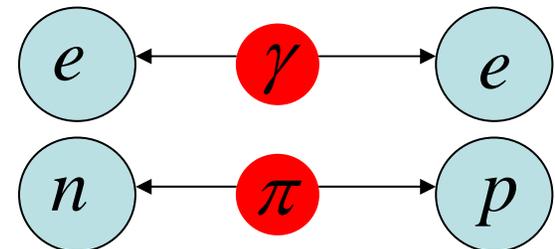
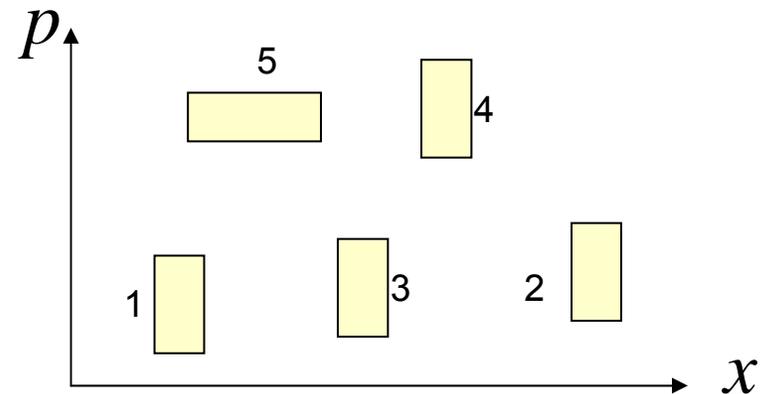
Квантовая физика

$\psi(x, t)$

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = (\hat{U} + \hat{E})\psi$$

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

$$\hat{H}\psi = E\psi$$



Радиоактивность

1898 г.

Мария и Пьер Кюри выделили и изучили радиоактивные элементы радий Ra ($Z=88$) и полоний Po ($Z=84$).

Нобелевская премия по физике

1903 г. - П. Кюри и М. Кюри-Склодовская
За исследования радиоактивности

Нобелевская премия по химии

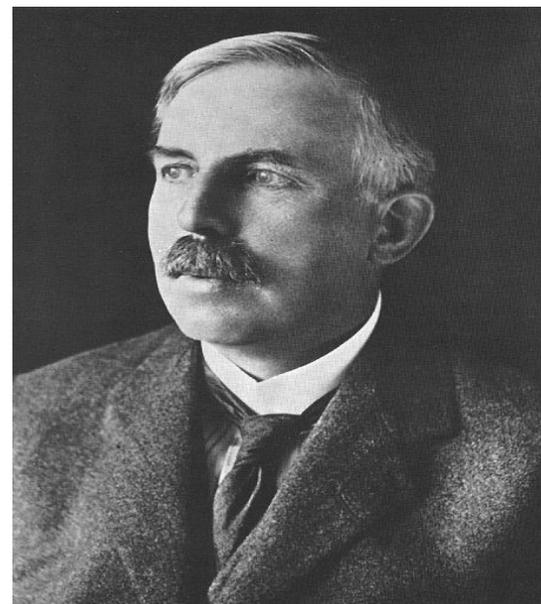
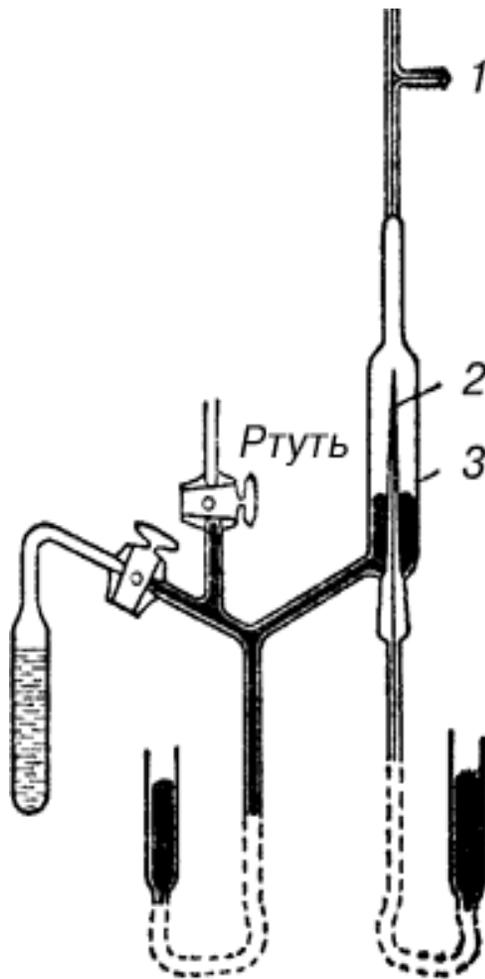
1911 г. – М. Кюри. За выдающиеся заслуги в развитии химии: открытие элементов радия и полония, выделение радия и изучение природы и соединений этого замечательного элемента



Мария и Пьер Кюри

1899 г.

Э. Резерфорд открыл, что уран излучает положительно заряженные α -частицы и отрицательно заряженные β -частицы.



Эрнест Резерфорд
1871 - 1937

Нобелевская премия по химии

1908 г. - Э. Резерфорд

За исследования по превращению элементов и за химические исследования радиоактивных веществ.

1911 г. Опыты по рассеянию α -частиц

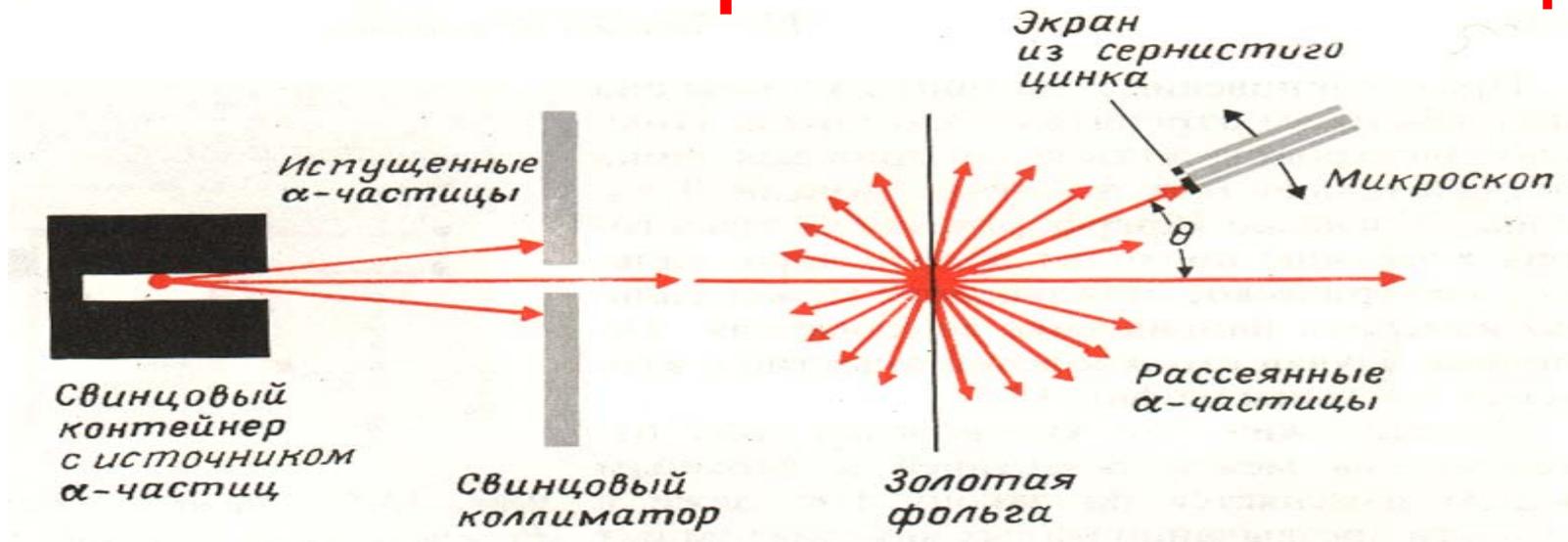
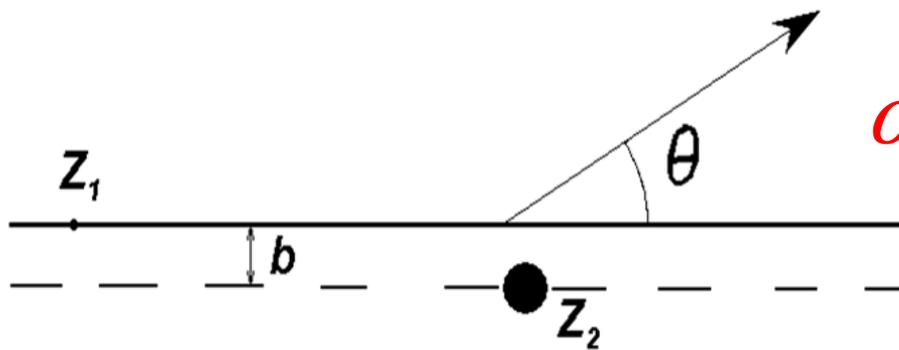


Схема эксперимента, в котором исследовалось рассеяние альфа-частиц

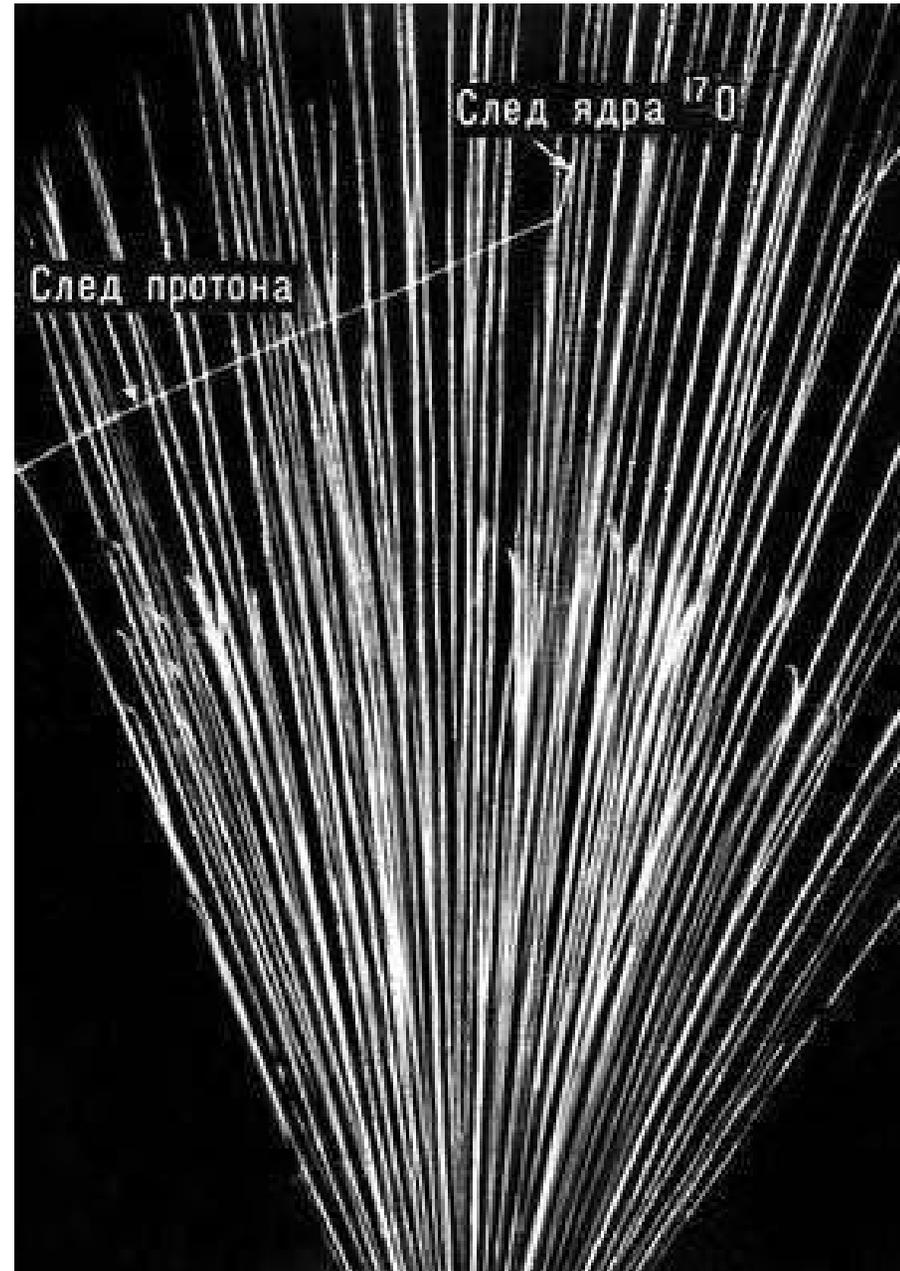


$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \left(\frac{Z_1 Z_2 e^2}{4T} \right)^2 \frac{1}{\sin^4 \frac{\theta}{2}}$$

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

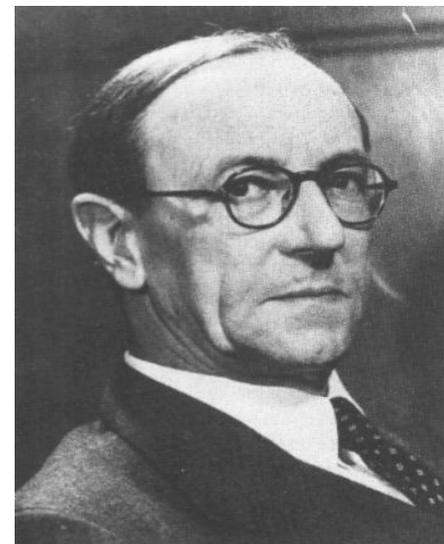
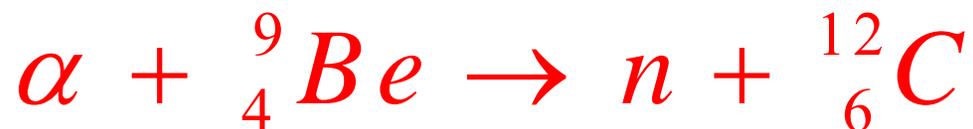
1919 г.

Э. Резерфорд осуществил первую искусственную ядерную реакцию $^{14}\text{N}(\alpha, p)^{17}\text{O}$ и доказал наличие в атомном ядре протонов.

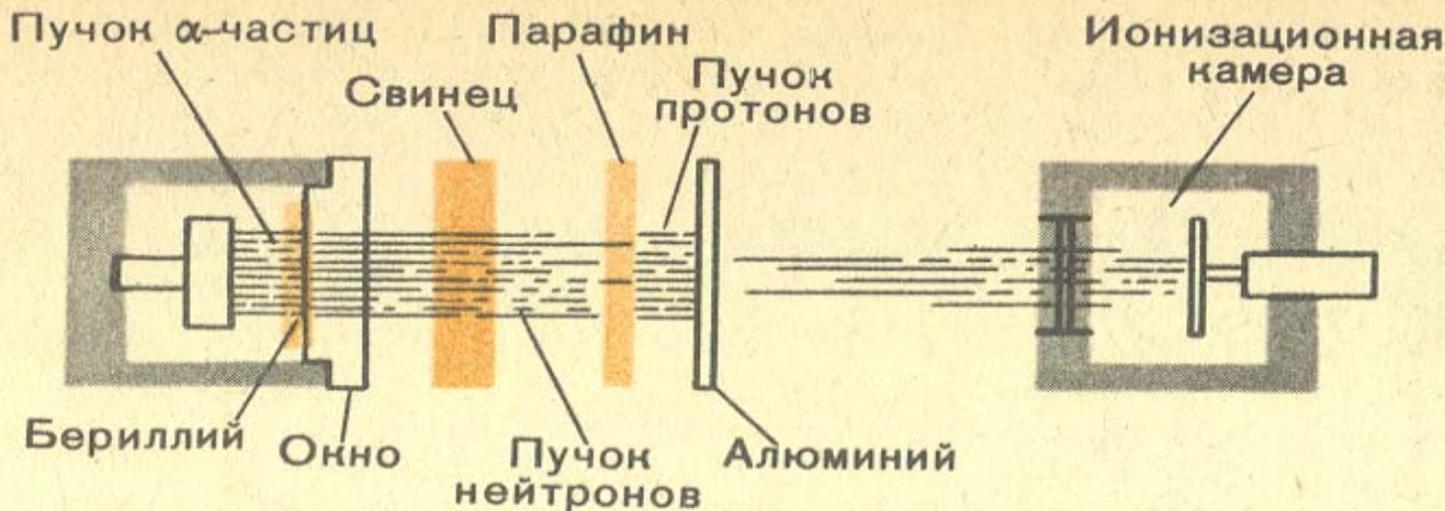


Открытие нейтрона

1932 г.



Дж. Чадвик
1891 - 1974



Нобелевская премия по физике

1935 г. – Дж. Чедвик

За открытие нейтрона

Атомное ядро



Атомное ядро состоит из протонов и нейтронов.

Z – заряд ядра, число протонов в ядре

N – число нейтронов в ядре

$A = N + Z$ – массовое число



$$Z = 82$$

$$N = 126$$

$$A = 208$$

Ядра с одним и тем же значением Z , но с разными значениями A называются *изотопами*. Различные изотопы данного элемента обозначают, приписывая к символу химического элемента верхний индекс — массовое число A .

Квантовый мир

- 1895 г. В. Рентген. Рентгеновские лучи
- 1896 г. А. Беккерель. Радиоактивность
- 1897 г. Дж. Томсон. Электрон
- 1911 г. Э. Резерфорд. Атомное ядро
- 1924 г. Луи Де Бройль. Волновые свойства частиц

$$E = h\nu \quad p = h / \lambda$$

Как устроен Мир. 30-е годы XX века



В середине 30-х годов XX века физическая картина мира строилась исходя из трёх элементарных частиц — **электрона**, **протона** и **нейтрона**. Вещество состоит из атомов и молекул, в состав атома входят электроны. Основную массу атома составляет атомное ядро, состоящее из протонов и нейтронов.

Зачем нужны ускорители?

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



1947 Странные частицы



Нобелевская премия по физике

1960 г. – Д. Глезер.

За изобретение пузырьковой камеры

1963 Кварки

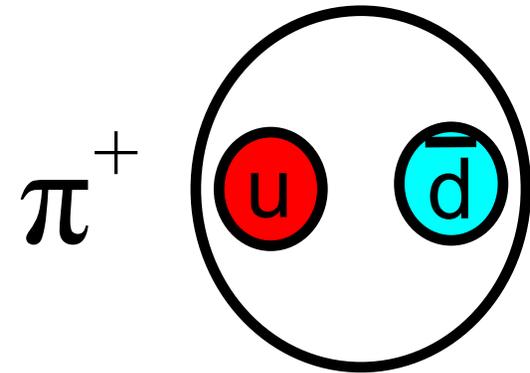
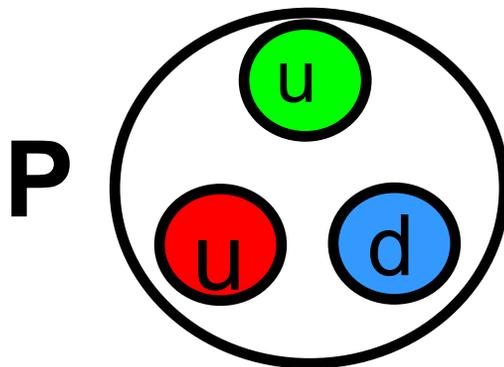


Murray Gell-Mann



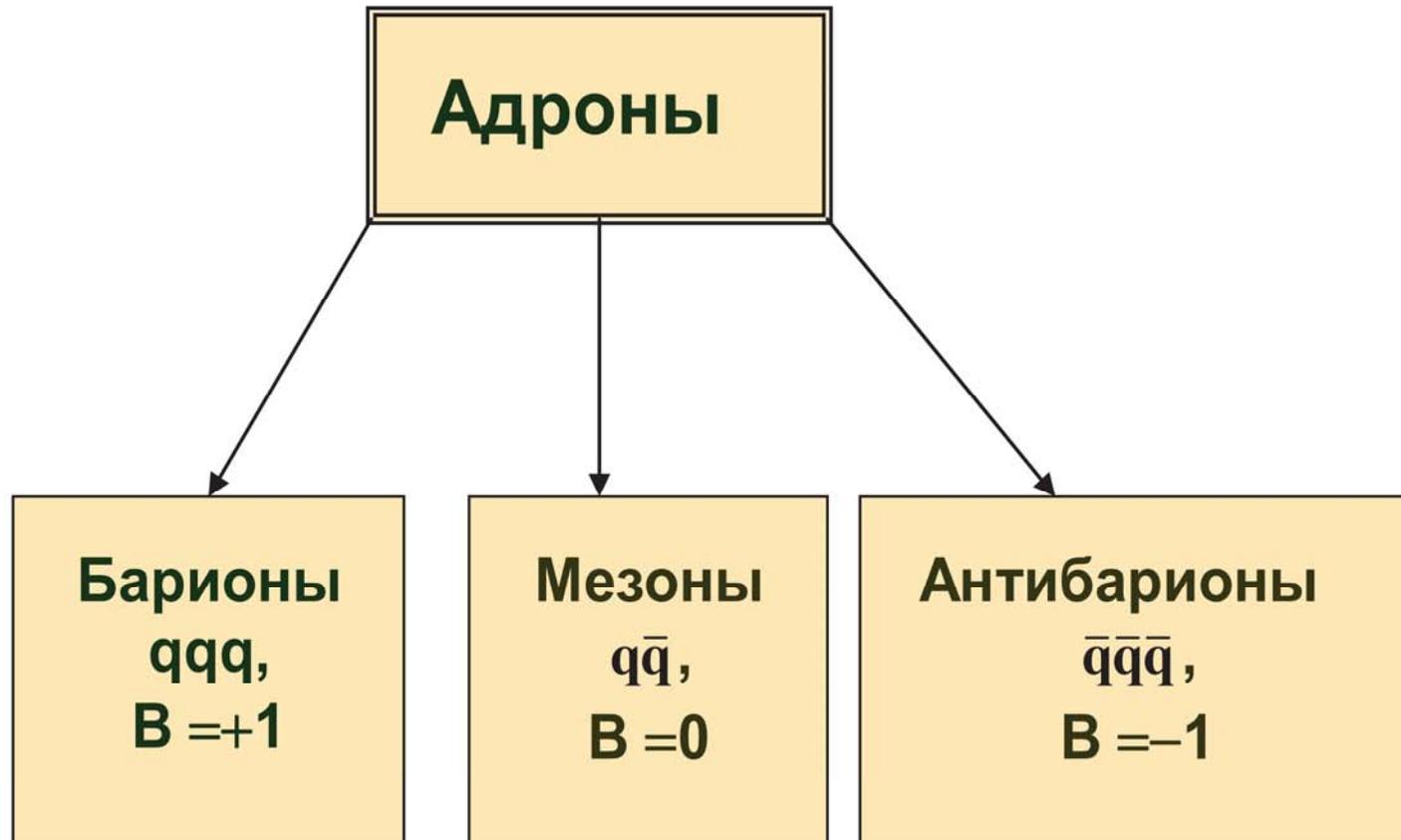
George Zweig

М. Гелл-Манн и Г. Цвейг предложили кварковую модель адронов. Барионы “конструировались” из трёх кварков, мезоны – из кварка и антикварка.



Нобелевская премия по физике
1969 г. – М. Гелл-Манн. За вклад и открытия в классификации элементарных частиц и их взаимодействий

Адроны – системы связанных кварков

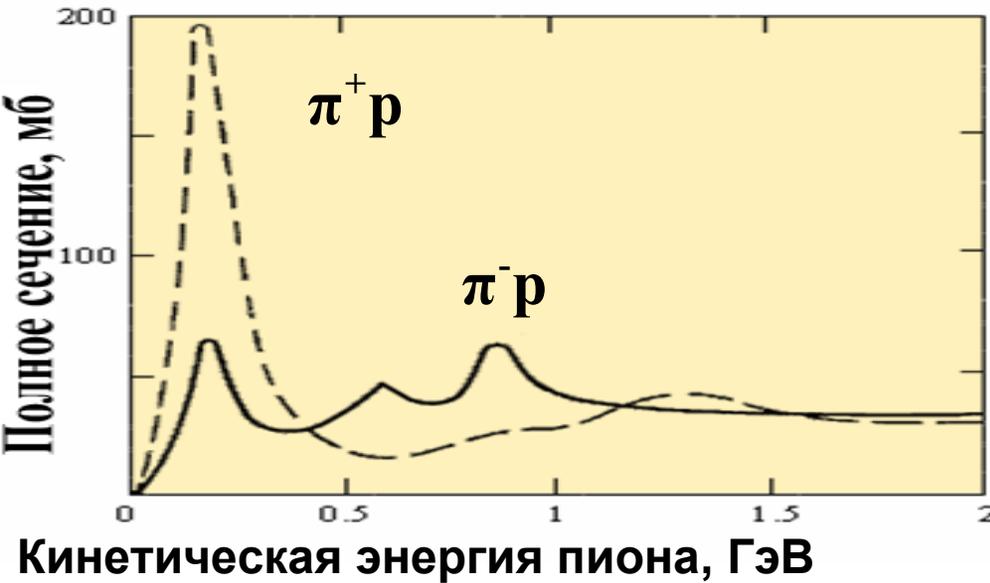


Кварки объединяются в частицы, называемые адронами.

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.

1952 Резонансы



$$\Gamma \cdot \tau = \hbar$$

100 МэВ

10^{-23} с



	масса	ширина распада
Δ^{++} (uuu)	1232 МэВ	120 МэВ
Δ^+ (uud)	1232 МэВ	120 МэВ
Δ^0 (udd)	1232 МэВ	120 МэВ
Δ^- (ddd)	1232 МэВ	120 МэВ
Σ^+ (uus)	1382 МэВ	85 МэВ
Ξ^- (dds)	1535 МэВ	9.9 МэВ

Как устроен Мир. 60-е годы XX века

Лептоны

e^-

μ^-

τ^-

ν_e

ν_μ

ν_τ

Адроны

Барионы

$$J = \frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \dots$$

Мезоны

$$J = 0, 1, 2, \dots$$

Как устроен Мир

ФЕРМИОНЫ

Спин $J = 1/2$

Лептоны (спин = 1/2)			Кварки (спин = 1/2)				
Аромат		Масса, ГэВ/с ²		Аромат		Масса, ГэВ/с ²	Электрический заряд
ν_e	электронное нейтрино	$< 1 \cdot 10^{-8}$		1 поколение	u	up	0,003
e	электрон	0,0005111	d		down	0,006	-1/3
ν_μ	мюонное нейтрино	$< 0,0002$	2 поколение	c	charm	1,3	2/3
μ	мюон	0,106		s	strange	0,1	-1/3
ν_τ	тау-нейтрино	$< 0,02$	3 поколение	t	top	175	2/3
τ	тау	1,7771		b	bottom	4,3	-1/3

Стабильные частицы

e^- — электрон, e^+ — позитрон

p — протон, \bar{p} — антипротон

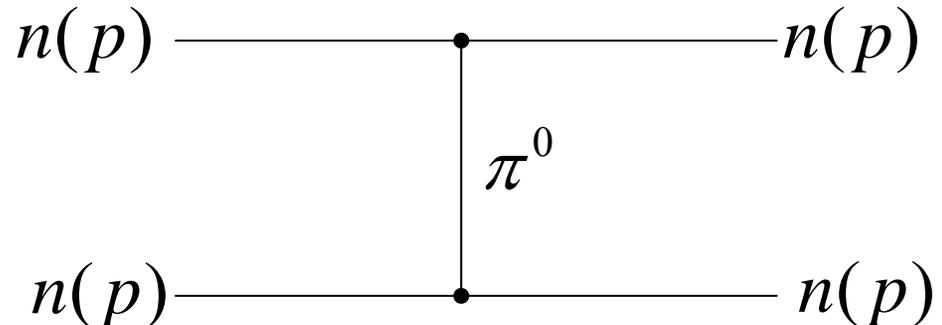
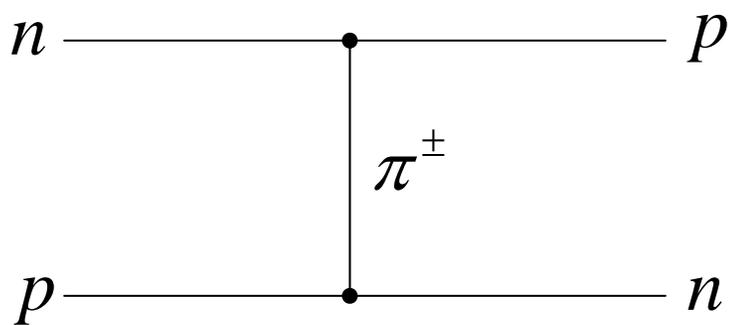
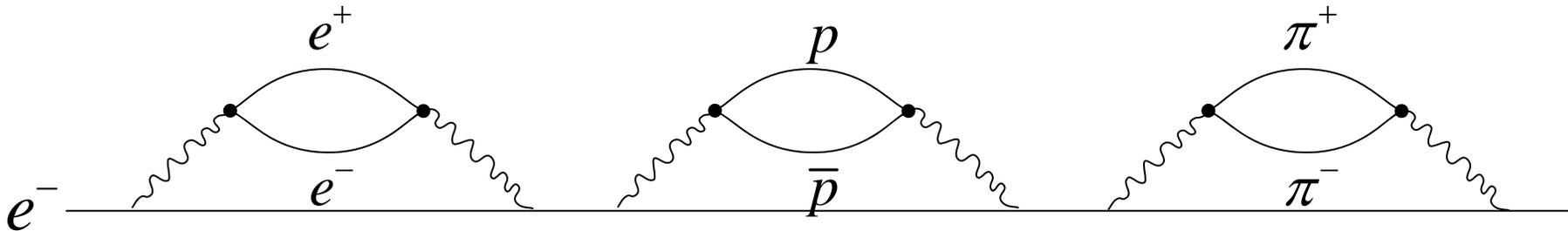
? $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau, \tilde{\nu}_e, \tilde{\nu}_\mu, \tilde{\nu}_\tau$

Соотношение неопределённостей.

Виртуальная частица

$$\Delta E \cdot \Delta T \approx \hbar$$

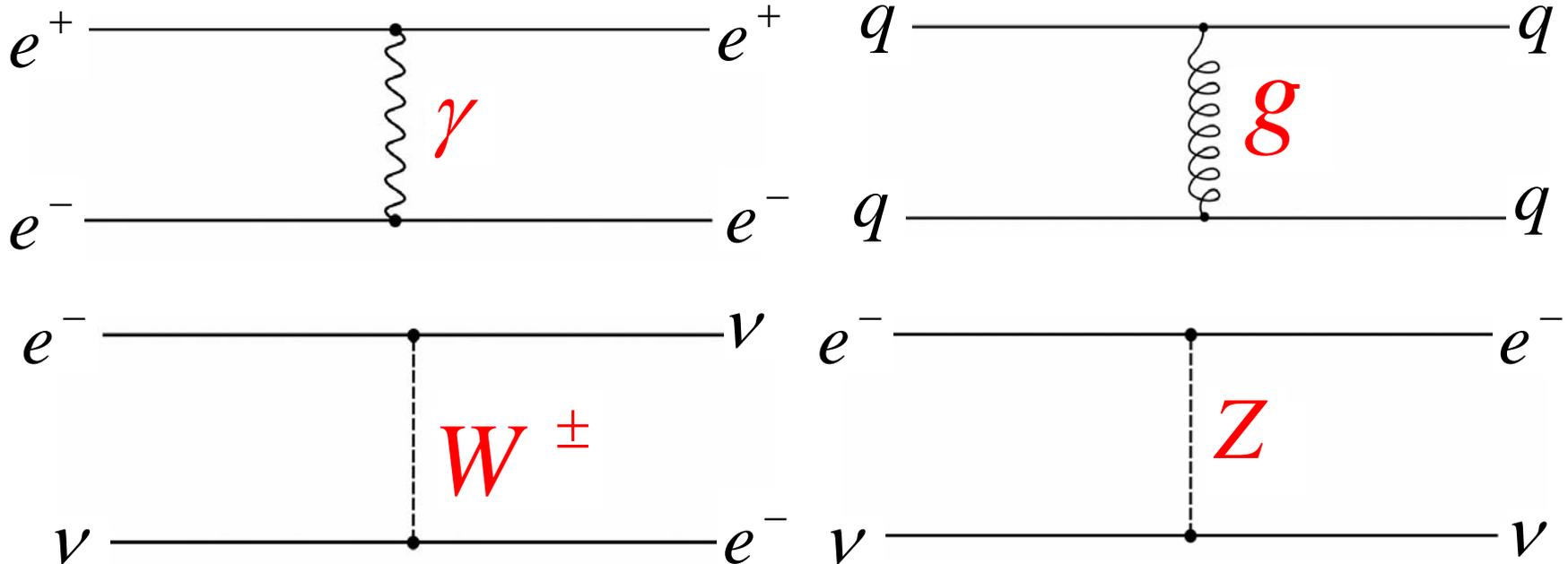
$$\Delta p \cdot \Delta x \approx \hbar$$



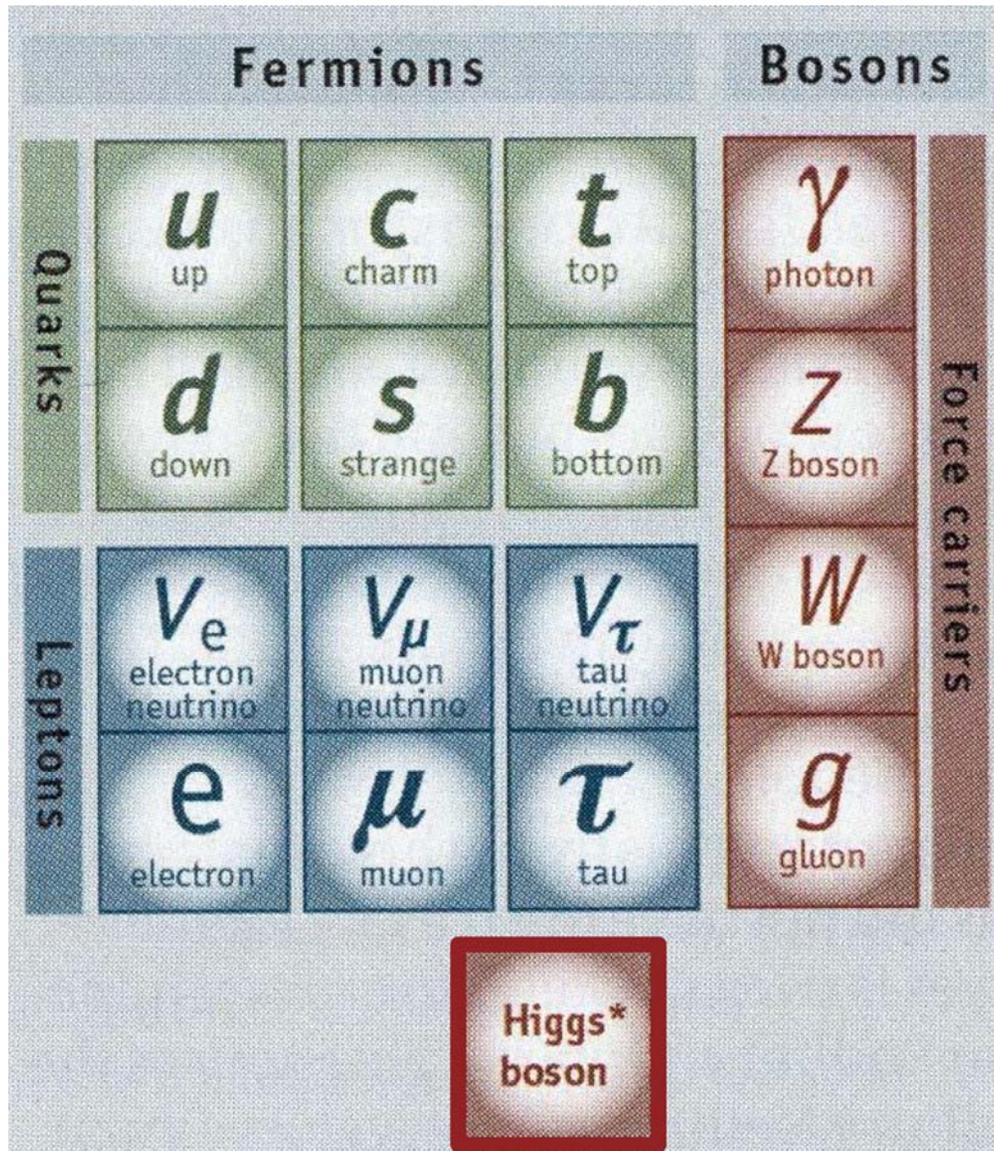
Взаимодействия

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}



Стандартная модель



Строение материи

Вселенная

Галактики

Звезды

Планеты

Вещество

Молекулы

Атомы

Атомные ядра – электрон

Протон, нейтрон

Частицы (π , K , Λ , Σ ...)

Кварки, лептоны

Переносчики взаимодействий (γ , g , W^\pm , Z)