Рождение и жизнь атомных ядер

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)
- Программа курса "Физика ядра и частиц"
- Лекции профессора Б.С. Ишханова 2015
- Лекции профессора И.М. Капитонова 2015
- Частицы и атомные ядра (основные вопросы по курсу)
- Обязательные вопросы для допуска к экзамену
- Семинары по физике ядра и частиц
- Частицы и атомные ядра. Семинары. Задачи
- Задачи и решения
- Описания задач общего ядерного практикума физического факультета МГУ
- Темы курсовых работ для студентов второго курса

Материалы спецкурсов

- Рождение и жизнь атомных ядер
- Ядерная физика и человек
- Микромир и Вселенная
- История атомного ядра
- Модели атомных ядер
- 12 лекций по физике атомного ядра
- Ядерные реакции
- Ядерные реакции (задачи)
- Квантовая теория столкновений
- Фотоядерные реакции. Современный статус экспериментальных данных
- Взаимодействие фотонов и электронов с атомными ядрами
- Симметрии фотоядерных реакций
- Гигантский дипольный резонанс атомных ядер
- Ядерная резонансная флуоресценция
- Электромагнитные взаимодействия ядер
- Рассеяние электронов на ядрах и нуклонах
- Экзотические ядра
- Деление ядер

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

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
- Биографии физиков
- Фотографии физиков
- Ссылки на ресурсы по ядерной физике
- Школы, семинары, рабочие совещания, конференции
- Физика атомного ядра и частиц в УФН
- Рефераты студентов
- Интерактивные проекты
- Физики шутят
- О сайте

Справочные материалы

- Частицы и атомные ядра. Основные понятия
- Карта атомных ядер
- Характеристики нуклида
- База данных по ядерным реакциям
- База ядерно-спектроскопических данных
- Ядерные данные (CDFE)
- Ядерные данные (BNL)
- Физика атомного ядра и частиц в Физической энциклопедии
- Обзор по физике частиц
- Таблицы частиц
- Константы и единицы измерений
- Греческий алфавит
- Таблица Менделеева

Природа материи

Строение материи

Вселенная
Галактики
Звезды
Планеты
Вещество
Молекулы
Атомы
Атомные ядра – электрон
Протон, нейтрон
Частицы (π, K, Λ, Σ…)
Кварки, лептоны
Переносчики взаимодействий (γ, 8g, $W^{\pm}$, Z)

2 этапа развитии 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

10^{30} — Граница видимой Вселенной 10^{28} см, $13{,}7\cdot10^{9}$ световых лет

10^{25} — Ближайшая галактика Магеллановы Облака $2{,}2\cdot10^{6}$ световых лет

Радиус нашей галактики – Млечный путь 10^{4} световых лет

10^{20} — Расстояние от Солнца до ближайшей звезды Проксима Центавра 5 св. лет

Радиус орбиты Плутона 39,44 а.е.

10^{15} — Расстояние от Солнца до Земли $1{,}4\cdot10^{13}$ см = 1 а.е.

10^{10} — Радиус Солнца $7\cdot10^{10}$ см = $7\cdot10^{5}$ км

Расстояние от Земли до Луны $3{,}8\cdot10^{10}$ см = $3{,}8\cdot10^{5}$ км

Радиус Земли $6{,}4\cdot10^{8}$ см = 6400·км

10^{5} — Рост человека $1{,}7\cdot10^{2}$ см

10^{0} — 1 см – единица измерения длины

1 св. год = $9{,}5\cdot10^{17}$ см

1 Å = 10^{-8} см

1 Фм = 10^{-13} см

10^{-5} — Радиус атома водорода $0{,}53\cdot10^{-8}$ см = 0,5 Å

10^{-10} — Радиус атомного ядра $(1\div6)\cdot10^{-13}$ см = (1÷6) Фм

Размер протона $0{,}8\cdot10^{-13}$ см = 0,8 Фм

10^{-15}

Диапазон временных интервалов во Вселенной

сек

10^{20} Возраст Вселенной 13,7 млрд. лет

10^{15} Возраст Солнечной системы, возраст Земли 5 млрд. лет

10^{10} Появление первобытного человека 2 млн. лет

Среднее время жизни человека 70 лет

1 год = $3{,}156 \cdot 10^{7}$ с

10^{5} 1 день = $8{,}64 \cdot 10^{4}$ с

Свет идёт от Солнца до Земли 8 минут

10^{0} Интервал между ударами сердца ~1 секунда

1 секунда – единица измерения времени

10^{-5}

10^{-10} Свет проходит расстояние 1 см $0{,}3 \cdot 10^{-10}$ сек

$$E = h\nu$$

10^{-15}

10^{-20} Свет проходит расстояние, равное радиусу атома 10^{-18} сек

10^{-25} Свет проходит расстояние, равное размеру атомного ядра 10^{-24} сек

Диапазон масс во Вселенной

грамм

10^{50} — Масса вещества и энергии Вселенной 10^{56} г

Масса галактики Млечный путь $200 \cdot 10^{9}$ звезд

10^{40}

Масса Солнца $2 \cdot 10^{33}$ г

10^{30}

Масса Земли $6 \cdot 10^{27}$ г

Масса Луны $7{,}3 \cdot 10^{25}$ г

10^{20}

$$E = mc^2$$

10^{10}

Масса человека 70 кг

10^{0} — 1 г – единица измерения массы

10^{-10}

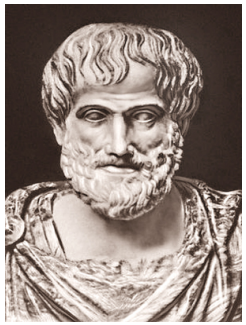
10^{-20} — Масса атома урана $5 \cdot 10^{-23}$ г ≈ 240 масс протона

Масса протона $1{,}67 \cdot 10^{-24}$ г $mc^2 = 938{,}3$ МэВ

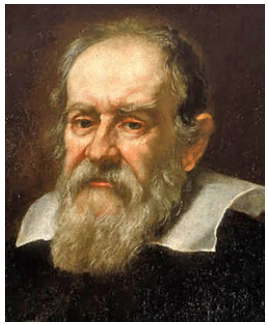
10^{-30} — Масса электрона $9{,}1 \cdot 10^{-29}$ г $mc^2 = 0{,}511$ МэВ

Масса нейтрино - ?

Классическая механика. Движение



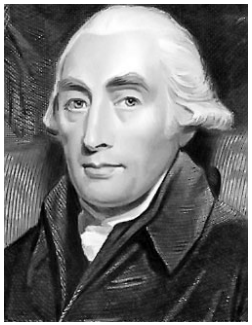
Аристотель
384–322 до н.э.



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

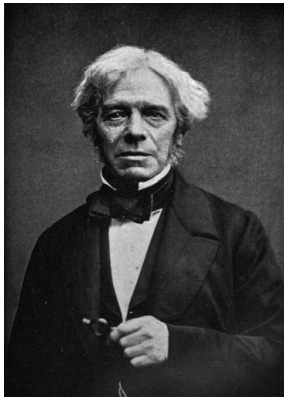
Андре Мари Ампер
1775 – 1836

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

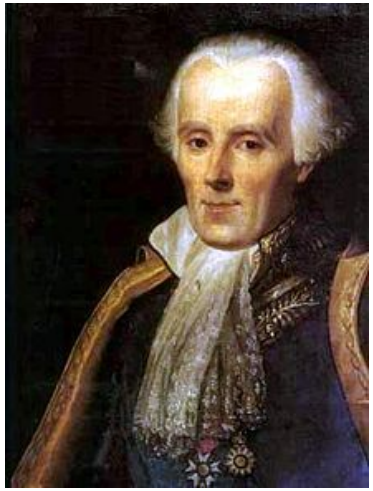
$$\mathrm{div}\, \boldsymbol{E} = 4\pi\rho$$

$$\mathrm{div}\, \boldsymbol{B} = 0$$

$$\mathrm{rot}\, \boldsymbol{E} = -\frac{1}{c}\frac{\partial \boldsymbol{B}}{\partial t}$$

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

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».

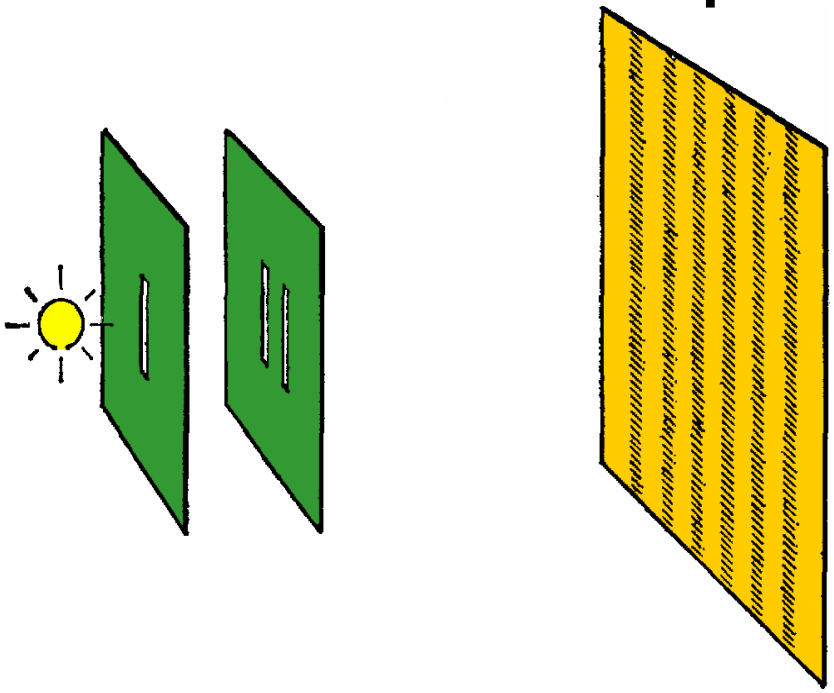
Квантовый мир

- 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

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

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.

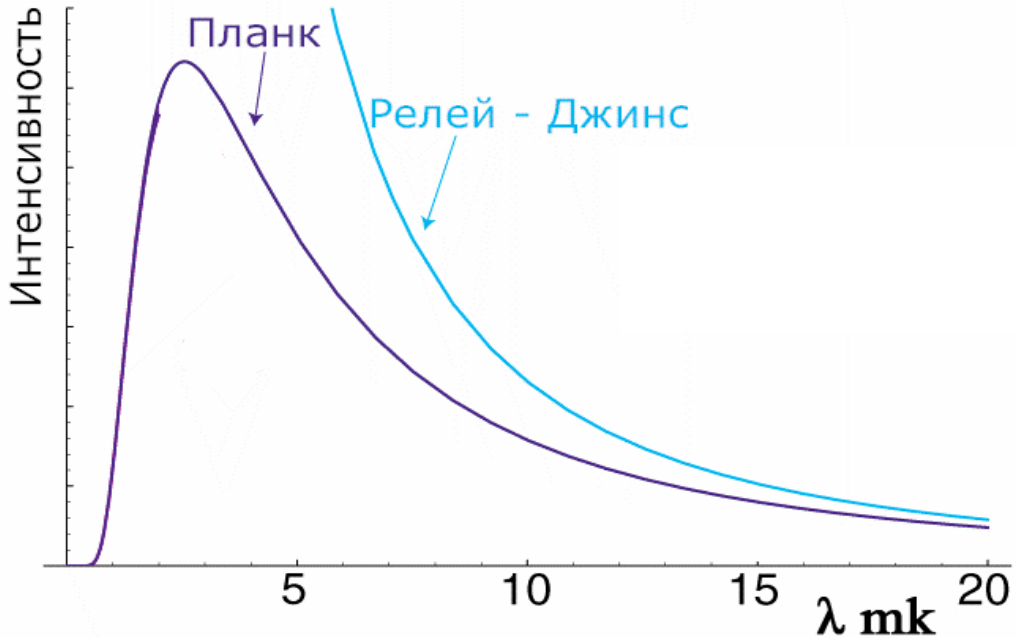
В то же время, если заменить экран детектором, способным к регистрации отдельных частиц (например, фотопластинкой), то обнаружится, что свет, вызывающий почернение фотоэмульсии в определённом месте, состоит из отдельных частиц – фотонов.

В этом проявилась волновая и корпускулярная природа света.

1900 г. М. Планк. Излучение черного тела

Распределение плотности энергии излучения в полости

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



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

$$\hbar=6.58\cdot10^{-22}\ \text{МэВ}\cdot\text{с}$$

Нобелевская премия по физике

1918 г. – М. Планк.

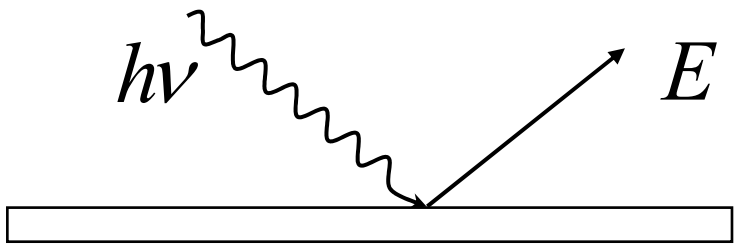
За открытие кванта энергии

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.**

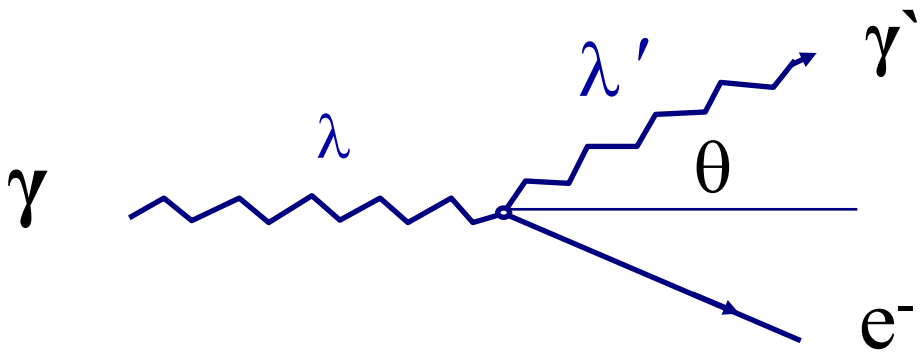
Нобелевская премия по физике

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 $\lambda`$**
- **Длина волны $\lambda`$ всегда больше λ**
- **Длина волны $\lambda`$ 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.

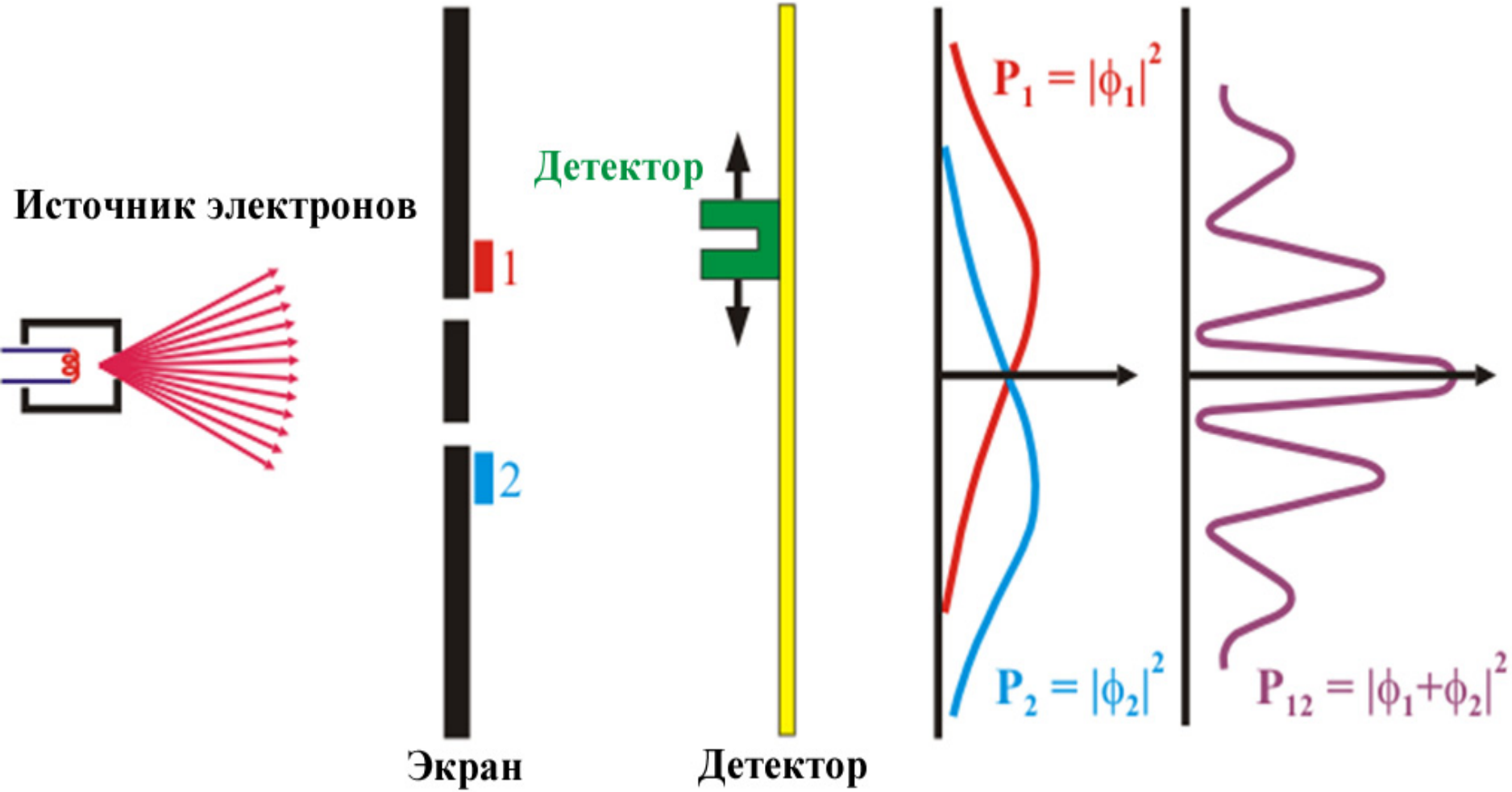
За открытие эффекта, названного его именем

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

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

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

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

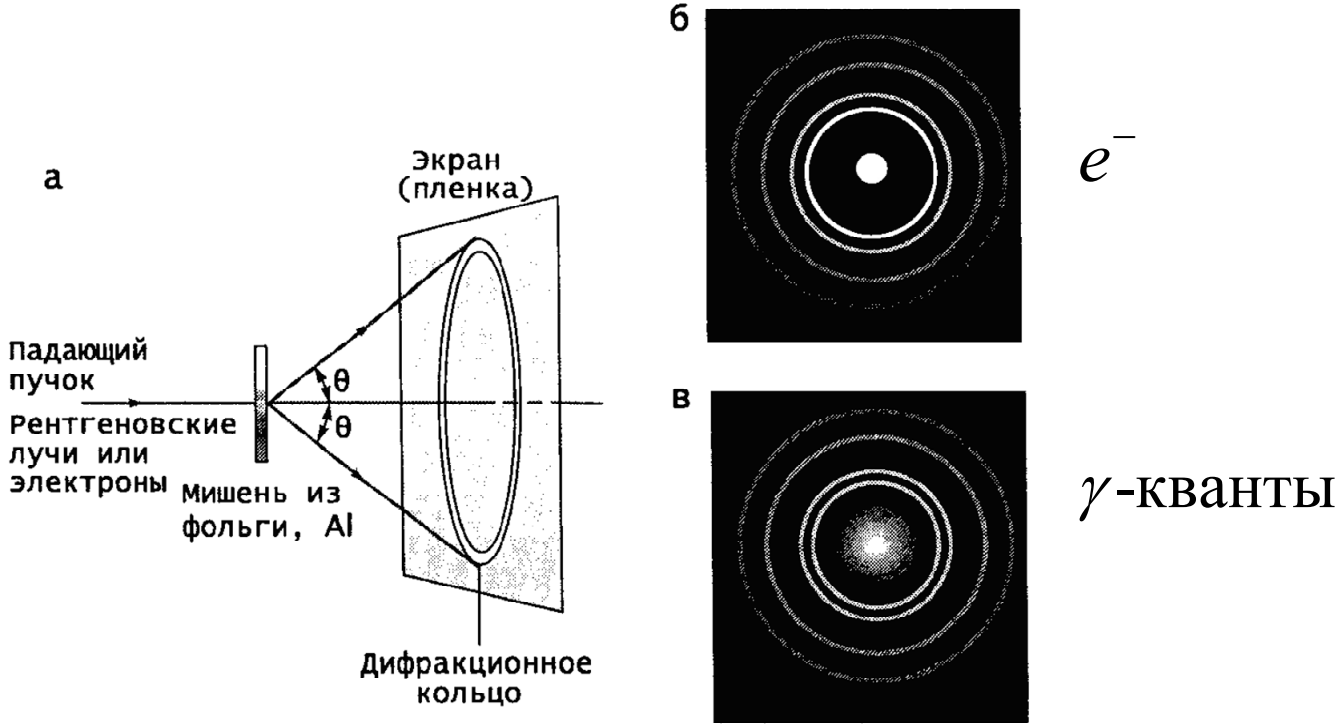
Нобелевская премия по физике

1929 г. - Л. де Бройль.

За открытие волновой природы электронов

Проверка гипотезы де Бройля

1927 г. Опыты Дж. П. Томсона.



(*а*) Схема установки для наблюдения дифракции на поликристаллической алюминиевой мишени. (*б*) Дифракционная картина, полученная при рассеянии рентгеновских лучей с длиной волны 0,071 нм на мишени из алюминиевой фольги. (*в*) Дифракционная картина, полученная при рассеянии электронов с энергией 600 эВ (длина волны де Бройля равна примерно 0,05 нм) на мишени из алюминиевой фольги. Эта дифракционная картина была увеличена в 1,6 раза для удобства сравнения с (*б*).

Дж. П. Томсон исследовал прохождение электронов с энергией 10–40 кэВ через тонкую алюминиевую мишень и также наблюдал интерференционную картину, соответствующую волновой природе 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.

В. Гейзенберг
1901 – 1976

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

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

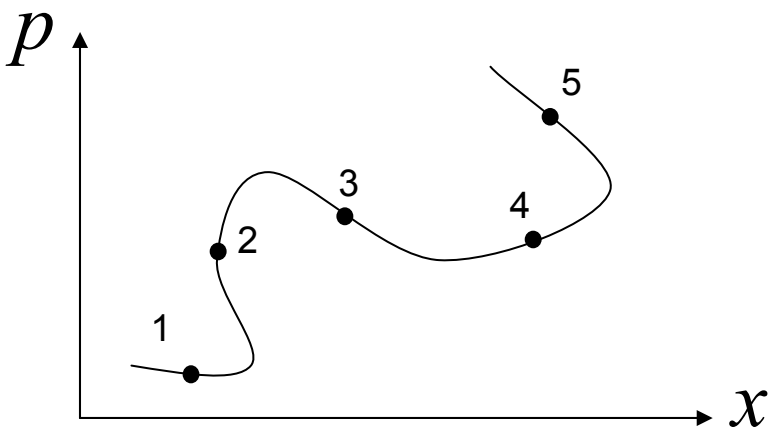
Классическая физика

$$x, p, t$$

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

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

$$H = U + E$$



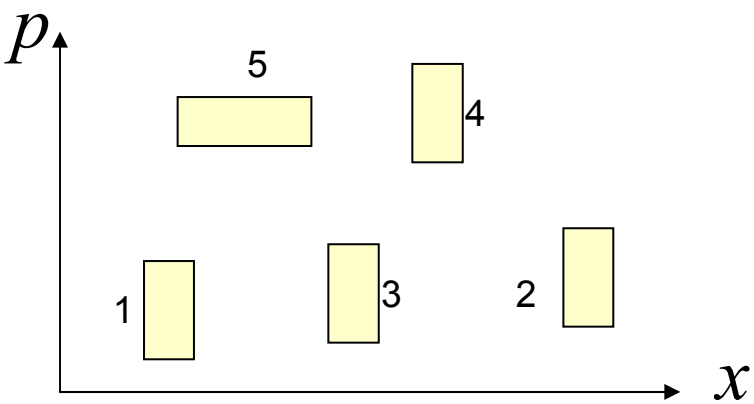
Квантовая физика

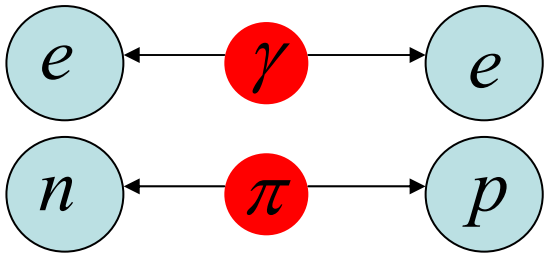
$$\psi(x,t)$$

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

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

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

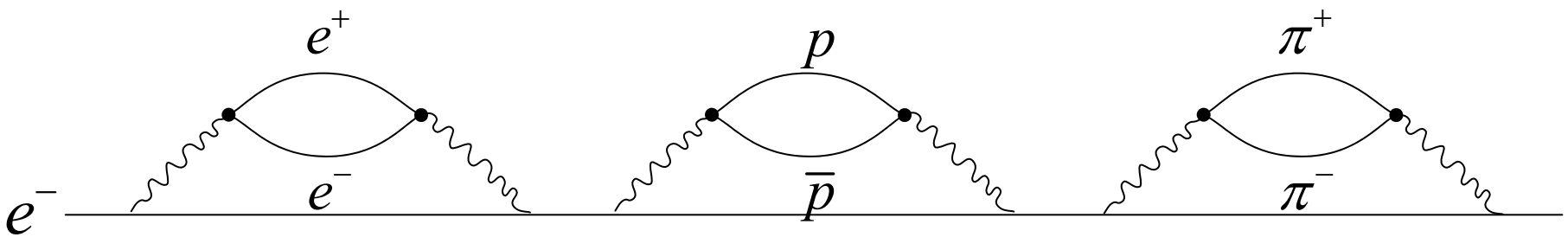


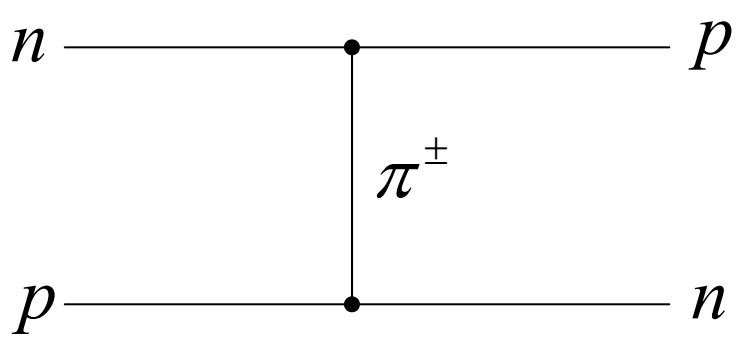


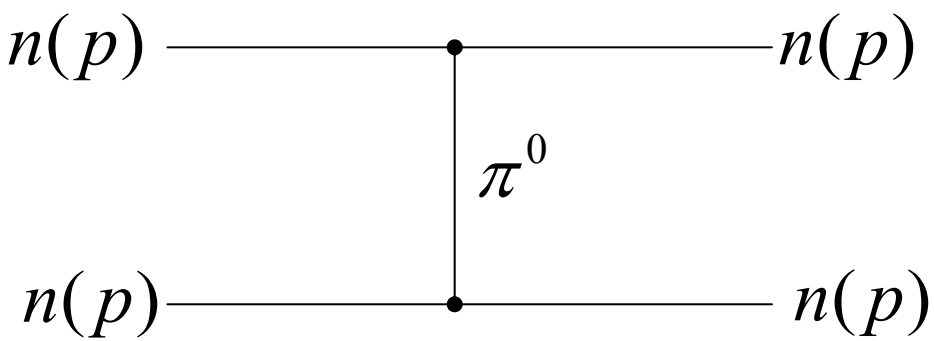
Соотношение неопределённостей. Виртуальная частица

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

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







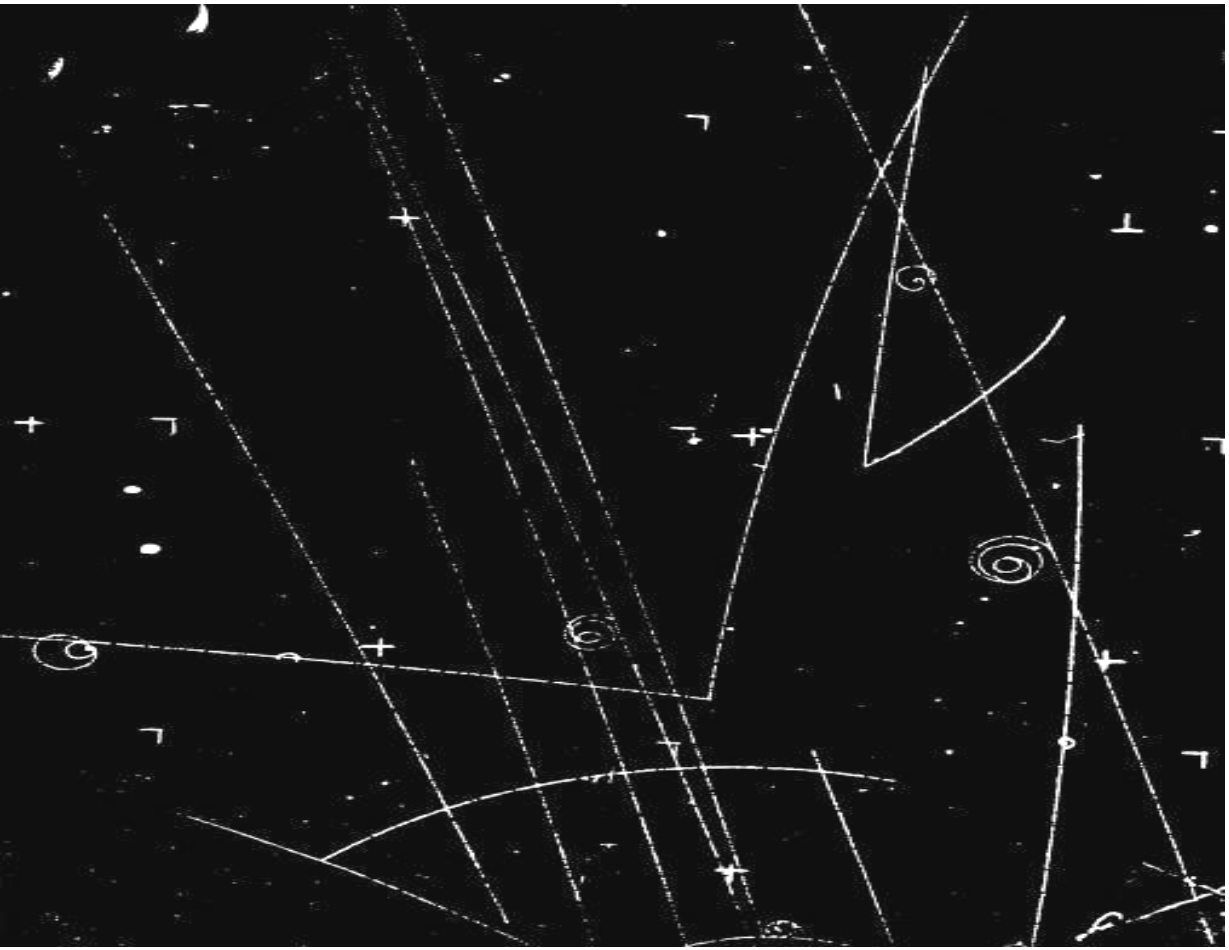
Как устроен Мир. 30-е годы XX века

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?

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

1947 Странные частицы



$$\pi^- + p \rightarrow \Lambda + K^0$$

$$\Lambda \rightarrow p + \pi^-$$

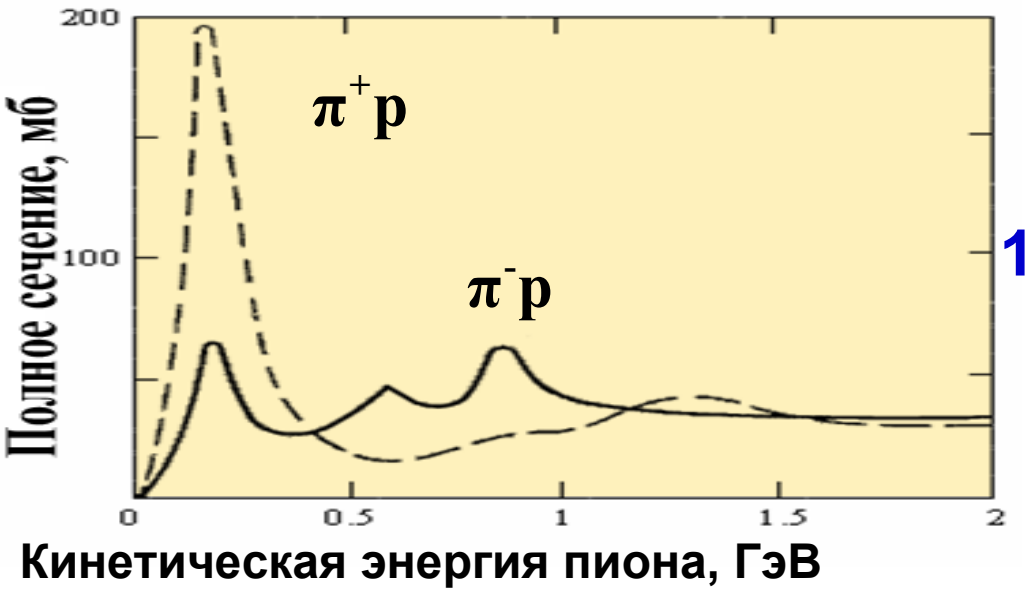
$$K^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$$

Нобелевская премия по физике

1960 г. – Д. Глезер.

За изобретение пузырьковой камеры

1952 Резонансы



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

100 МэВ → 10^{-23} с

$$p + \pi^- \rightarrow \Delta^0(1232) \rightarrow n + \pi^0$$

	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

Л е п т о н ы

e^- μ^- τ^-

ν_e ν_μ ν_τ

Адроны

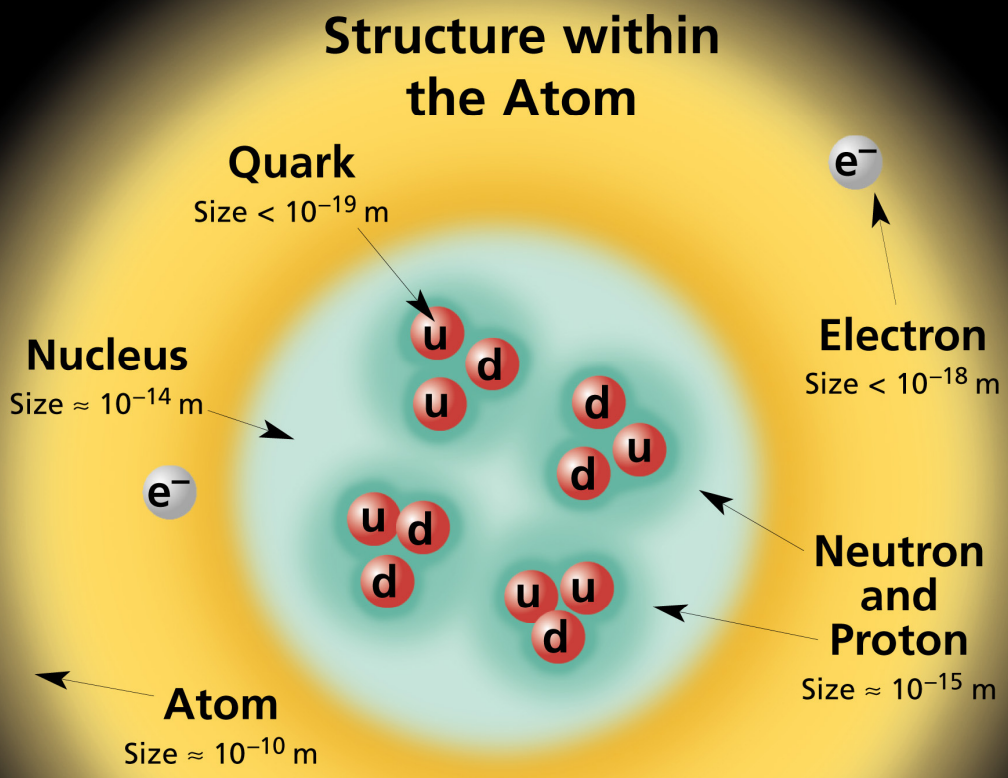
Барионы

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

Мезоны

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

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.

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	$<1\cdot10^{-8}$	**1 поколение**	u	up	0,003	2/3
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

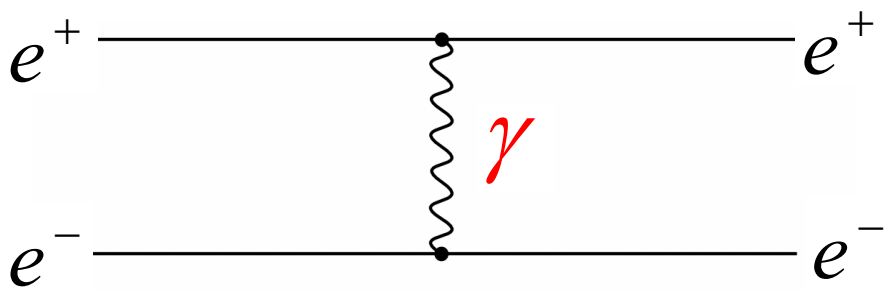
p — протон, $\bar{p}$ — антипротон

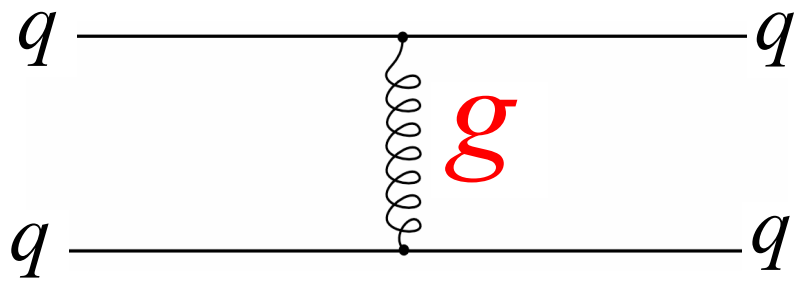
? ν_e, ν_μ, ν_τ, $\tilde{\nu}_e$, $\tilde{\nu}_\mu$, $\tilde{\nu}_\tau$

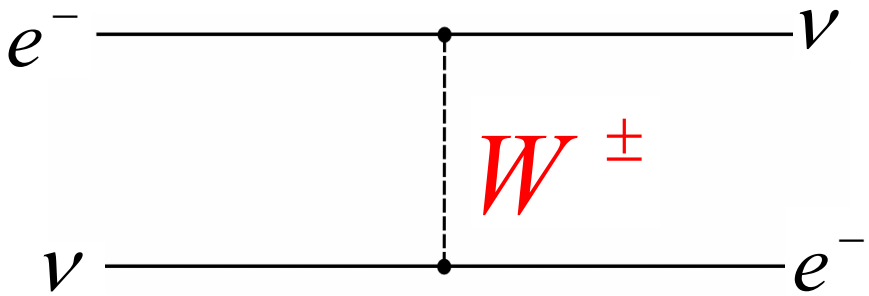
Взаимодействия

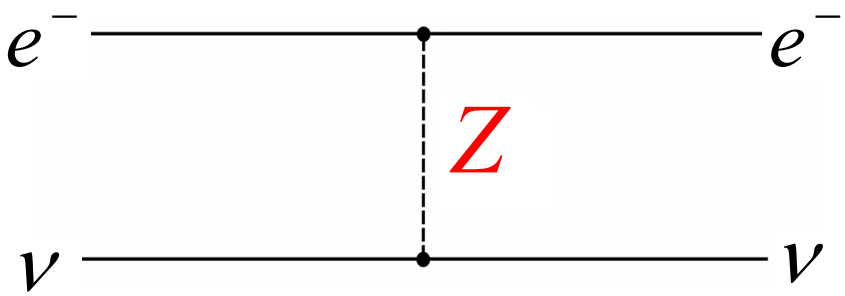
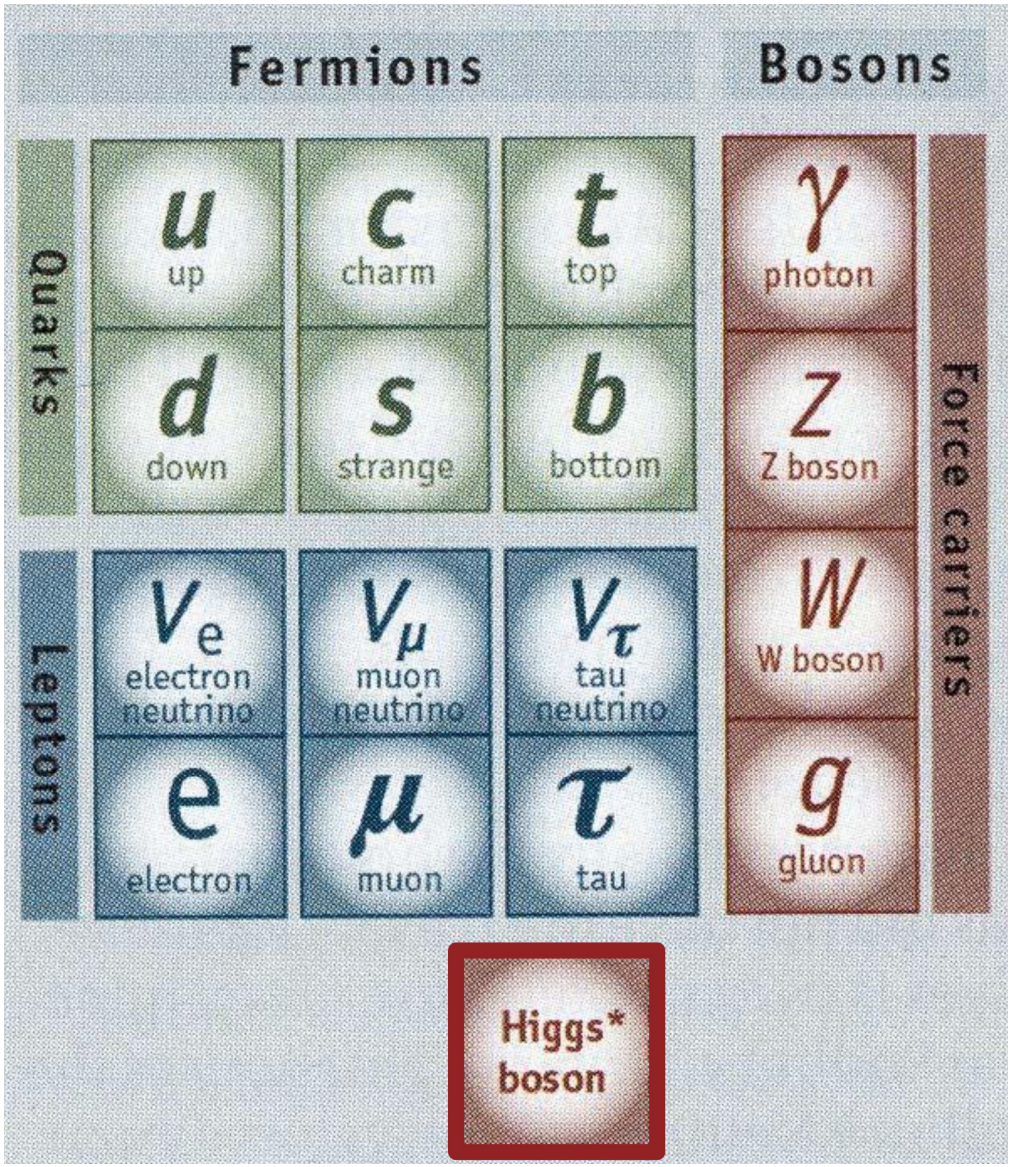
Спин J=1

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, $m(W^\pm) = 80$ Гэв, $m(Z) = 91$ Гэв.	$10^{-2}\ \text{Фм} = 1/m_W$	~1/30
Гравитационное	Все массивные частицы	Гравитон, спин $J = 2$, безмассовый	∞	10^{-38}









Стандартная модель