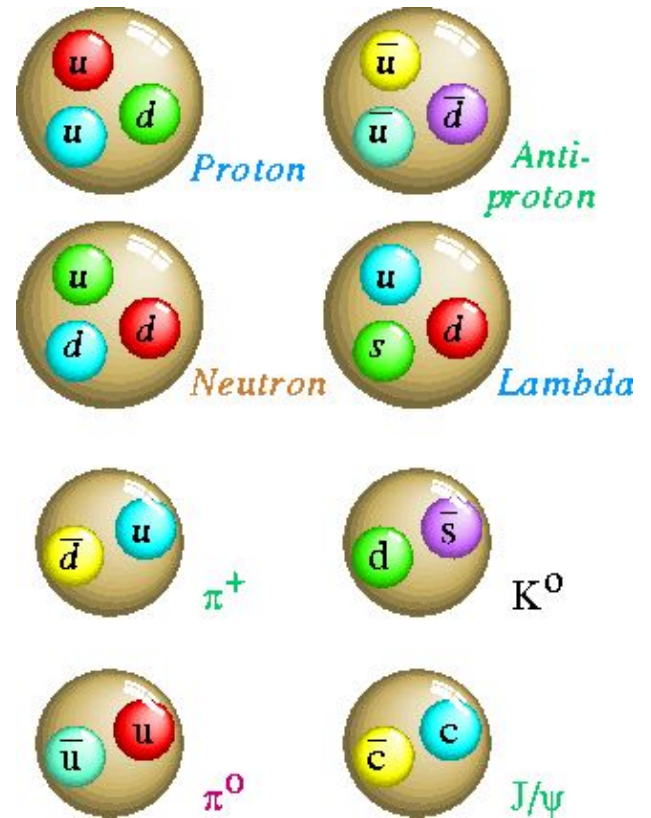


Элементарные частицы

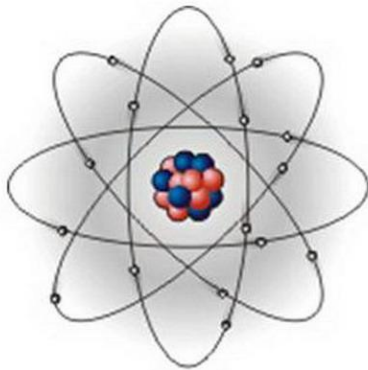
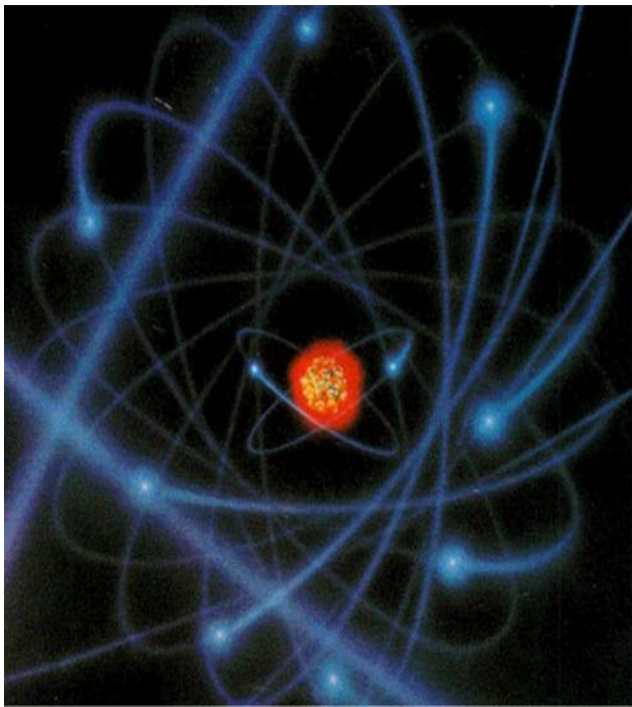


История открытия.

Физика элементарных частиц (ФЭЧ), часто называемая также **физикой высоких энергий** — раздел физики, изучающий структуру и свойства элементарных частиц и их взаимодействия.

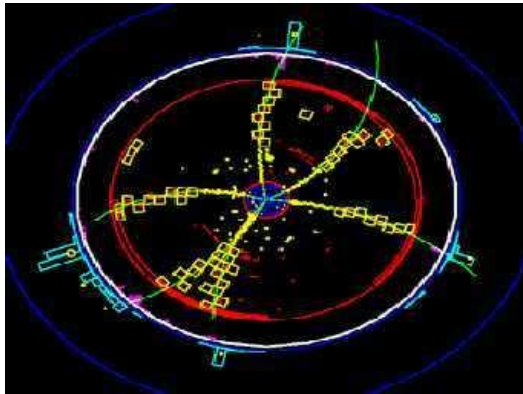
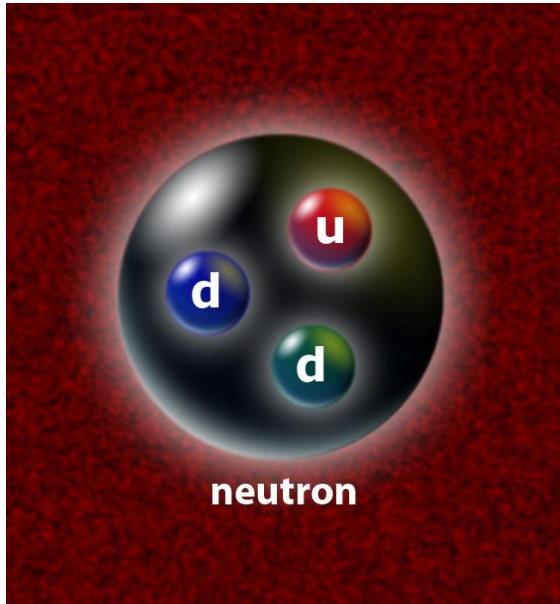
Физика элементарных частиц изучает самую глубинную суть нашего мира. Она пытается найти ответы (хотя бы приблизительные!) на очень фундаментальные вопросы о свойствах материи, сил, пространства-времени. Элементарные частицы живут совсем по другим законам, чем окружающий нас «макроскопический» мир.

История исследования элементарных частиц и фундаментальных взаимодействий насчитывает более двух с половиной тысяч лет и восходит к идеям древнегреческих натурфилософов о строении Мира. Однако серьезная научная разработка данного вопроса началась только в конце XIX-го века. В **1897** году выдающийся английский физик-экспериментатор Дж.Дж. Томсон определил отношение заряда электрона к его массе. Тем самым, **электрон** окончательно обрел статус реального физического объекта и стал первой известной элементарной частицей в истории человечества. За сто с небольшим лет физики провели тысячи сложнейших и точнейших экспериментов, призванных отыскать другие элементарные частицы и выявить фундаментальные взаимодействия между ними.



Результаты экспериментов
объяснялись серией
последовательно сменявших друг
друга теорий.

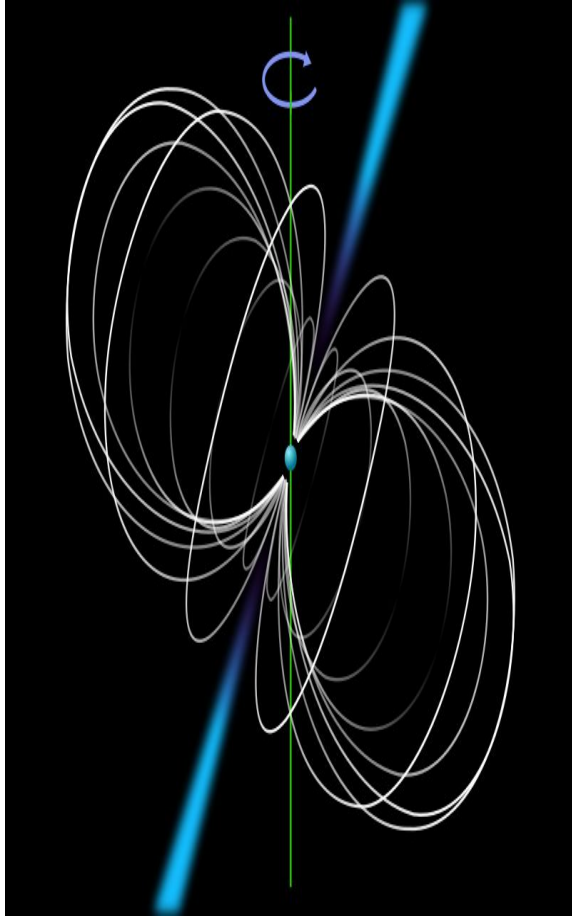
- Первой открытой элементарной частицей был **электрон**. Его открыл английский физик Томсон в 1897 году.
- Первой открытой **античастицей** был **позитрон** - частица с массой электрона, но положительным электрическим зарядом. Это античастица была обнаружена в составе космических лучей американским физиком Андерсоном в 1932 году.



Другая частица, входящая в состав ядра, - **нейтрон** - была открыта в 1932 Дж.

Чедвиком при исследованиях взаимодействия α -частиц с бериллием. Нейтрон имеет массу, близкую к массе протона, но не обладает электрическим зарядом. Открытием нейтрона завершилось выявление частиц - структурных элементов атомов и их ядер.

В 1947 также в космических лучах группой С. Пауэрла были открыты **p^+ и p^- -мезоны** с массой в 274 электронные массы, играющие важную роль во взаимодействии протонов с нейтронами в ядрах. Существование подобных частиц было предположено Х. Юкавой в 1935.



Конец 40-х - начало 50-х гг. ознаменовались открытием большой группы частиц с необычными свойствами, получивших название **"странных"**. Первые частицы этой группы K^+ - и K^- -мезоны, L^- , S^+ -, S^- -, X^- - гипероны были открыты в космических лучах, последующие открытия странных частиц были сделаны на ускорителях - установках, создающих интенсивные потоки быстрых протонов и электронов. При столкновении с веществом ускоренные протоны и электроны рожают новые Э. ч., которые и становятся предметом изучения.

В 1964 был открыт **самый тяжёлый гиперон Σ^-** (с массой около двух масс протона).

В 1960-х гг. на ускорителях было открыто большое число крайне неустойчивых (по сравнению с др. нестабильными Э. ч.) частиц, получивших название "**резонансов**". Массы большинства резонансов превышают массу протона. Первый из них $\Delta_1(1232)$ был известен с 1953. Оказалось, что резонансы составляют основная часть Э. ч.

В 1962 было выяснено, что существуют два разных нейтрино: электронное и мюонное. В 1964 в распадах нейтральных K -мезонов. было обнаружено несохранение т, н. комбинированной чётности (введённой Ли Цзун-дао и Ян Чжэнь-нином и независимо Л. Д. Ландау в 1956; см. Комбинированная инверсия), означающее необходимость пересмотра привычных взглядов на поведение физических процессов при операции отражения времени

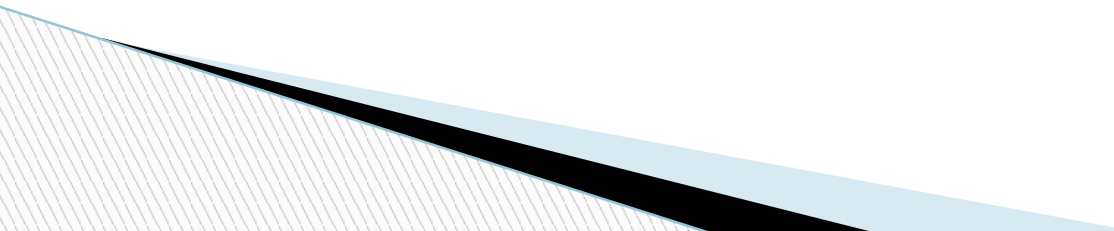
В 1974 были обнаружены массивные (в 3-4 протонные массы) и в то же время относительно устойчивые **у-частицы**, с временем жизни, необычно большим для резонансов. Они оказались тесно связанными с новым семейством Э. ч. - **"очарованных"**, первые представители которого (D^0 , D^+ , L_c) были открыты в 1976. В 1975 были получены первые сведения о существовании тяжёлого аналога электрона и мюона (тяжёлого лептона t). В 1977 были открыты j -частицы с массой порядка десятка протонных масс.

Основные свойства элементарных частиц

- **Являются объектами исключительно малых масс и размеров.** У большинства из них массы имеют порядок величины массы протона, равной $1,6 \times 10^{-24}$ г (заметно меньше лишь масса электрона: 9×10^{-28} г).
- **Многочисленность.** В настоящее время известно около **400** субъядерных частиц, которые принято называть элементарными.
 - Подавляющее большинство этих частиц **являются нестабильными.**
 - Являются **ускорителями** процессов.
 - **Способность к взаимным превращениям** – это наиболее важное свойство всех элементарных частиц. Элементарные частицы способны рождаться и уничтожаться (испускаться и поглощаться).

Примером может служить **аннигиляция** (то есть **исчезновение**) электрона и позитрона, сопровождающаяся рождением фотонов большой энергии. Может протекать и обратный процесс – **рождение** электронно-позитронной пары, например, при столкновении фотона с достаточно большой энергией с ядром. Такой опасный двойник, каким для электрона является позитрон, есть и у протона. Он называется **антипротоном**.

В настоящее время **античастицы** найдены у всех частиц. Античастицы противопоставляются частицам потому, что при встрече любой частицы со своей античастицей происходит их аннигиляция, то есть обе частицы исчезают, превращаясь в кванты излучения или другие частицы.



Классификация ЭЧ.

В общей массе элементарных частиц можно выделить несколько характерных групп.

- **Фотоны** – кванты (частицы, порции) электромагнитного поля. Не обладают массой. Тем не менее могут переносить энергию и импульс.
- **Лептоны** В эту группу входят два сорта нейтрино (электронное и мюонное), электрон и μ -мезон и еще ряд частиц. Все лептоны имеют спин $\frac{1}{2}$. Лептоны не имеют внутренней структуры. Электрон имеет заряд Кл. и массу $m_e = 0.511 \text{ Мэв}$.
- **Адроны** Участвуют в сильных взаимодействиях и во всех остальных. Общее число около четырехсот.
- **Мезоны** – являются частицами с целочисленным спином (нулевым). Такие частицы называют бозонами.
- **Барионы** – адроны с полуцелым спином (фермионы) и массами не меньше массы протона. За исключением протона все нестабильны.

По величине спина

Все элементарные частицы делятся на два класса:
бозоны — частицы с целым спином (например, фотон, глюон, мезоны).

фермионы — частицы с полуцелым спином (например, электрон, протон, нейтрон, нейтрино);

По видам взаимодействий

Элементарные частицы делятся на следующие группы:

Составные частицы

адроны — частицы, участвующие во всех видах фундаментальных взаимодействий. Они состоят из кварков и подразделяются, в свою очередь, на:

мезоны — адроны с целым спином, то есть являющиеся бозонами;

барионы — адроны с полуцелым спином, то есть фермионы. К ним, в частности, относятся частицы, составляющие ядро атома, — протон и нейтрон.

Фундаментальные (бесструктурные) частицы

лептоны — фермионы, которые имеют вид точечных частиц (т. е. не состоящих ни из чего) вплоть до масштабов порядка 10^{-18} м. Не участвуют в сильных взаимодействиях. Участие в электромагнитных взаимодействиях экспериментально наблюдалось только для заряженных лептонов (электроны, мюоны, тау-лептоны) и не наблюдалось для нейтрино.

Известны 6 типов лептонов.

Кварки — дробнозаряженные частицы, входящие в состав адронов. В свободном состоянии не наблюдались (для объяснения отсутствия таких наблюдений предложен механизм конфайнмента). Как и лептоны, делятся на 6 типов и считаются бесструктурными, однако, в отличие от лептонов, участвуют в сильном взаимодействии.

калибровочные бозоны — частицы, посредством обмена которыми осуществляются взаимодействия:

фотон — частица, переносящая электромагнитное взаимодействие;

восемь глюонов — частиц, переносящих сильное взаимодействие;

три промежуточных векторных бозона W^+ , W^- и Z^0 , переносящие слабое взаимодействие;

гравитон — гипотетическая частица, переносящая гравитационное взаимодействие. Существование гравитонов, хотя пока не доказано экспериментально в связи со слабостью гравитационного взаимодействия, считается вполне вероятным; однако гравитон не входит в Стандартную модель элементарных частиц.

Адроны и лептоны образуют вещество. **Калибровочные бозоны** — это кванты разных типов взаимодействий.

Кроме того, в Стандартной модели с необходимостью присутствует хиггсовский бозон, который, впрочем, пока ещё не обнаружен экспериментально.

Общими характеристиками всех Э. ч. являются:

- *спин (J),*
- *масса (m),*
- *время жизни (t),*
- *электрический заряд (Q).*

В зависимости от **времени жизни** Э. ч. делятся на:

- **стабильные**

Стабильными, в пределах точности современных измерений, являются электрон ($t > 5 \times 10^{21}$ лет), протон ($t > 2 \times 10^{30}$ лет), фотон и нейтрино.

- **квазистабильные**

Относятся к частицам, распадающимся за счёт электромагнитных и слабых взаимодействий. Их времена жизни $> 10^{-20}$ сек.

- **нестабильные (резонансы).**

Резонансами называются Э. ч., распадающиеся за счёт сильных взаимодействий. Их характерные времена жизни $10^{-23} - 10^{-24}$ сек. В некоторых случаях распад тяжёлых резонансов (с массой ≈ 3 ГэВ) за счёт сильных взаимодействий оказывается подавленным и время жизни увеличивается до значений $\sim 10^{-20}$ сек.

Спин Э. ч. является целым или полуцелым кратным от величины \hbar . В этих единицах спин р- и К-мезонов равен 0, у протона, нейтрона и электрона $J = 1/2$, у фотона $J = 1$. Существуют частицы и с более высоким спином. Величина спина Э. ч. определяет поведение ансамбля одинаковых (тождественных) частиц, или их статистику (В. Паули, 1940).

- Частицы **полуцелого спина** подчиняются Ферми - Дирака статистике (отсюда название фермионы), которая требует антисимметрии волновой функции системы относительно перестановки пары частиц (или нечётного числа пар) и, следовательно, "запрещает" двум частицам полуцелого спина находиться в одинаковом состоянии (Паули принцип).

- Частицы **целого спина** подчиняются Бозе - Эйнштейна статистике (отсюда название бозоны), которая требует симметрии волновой функции относительно перестановок частиц и допускает нахождение любого

числа частиц в одном и том же состоянии. Статистические свойства Э. ч. оказываются существенными в тех случаях, когда при рождении или распаде образуется несколько одинаковых частиц. Статистика Ферми - Дирака играет также исключительно важную роль в структуре ядер и определяет закономерности заполнения электронами атомных оболочек, лежащие в основе периодической системы элементов Д. И. Менделеева.

● **Электрические заряды изученных** Э. ч. являются целыми кратными от величины $e = 1,6 \times 10^{-19}$ к, называются элементарным электрическим зарядом. У известных Э. ч.

$$Q = 0, \pm 1, \pm 2.$$

Помимо указанных величин Э. ч. дополнительно характеризуются ещё **рядом квантовых чисел**, называются **внутренними**.

Лептоны несут специфический **лептонный заряд L двух типов:**

- **электронный** (L_e)

$L_e = +1$ для электрона и электронного нейтрино.

- **мюонный** (L_m);

$L_m = +1$ для отрицательного мюона и мюонного нейтрино.

- **Тяжёлый лептон t** ; и связанное с ним нейтрино, по-видимому, являются носителями нового типа лептонного заряда L_t .

Для адронов $L = 0$, и это ещё одно проявление их отличия от лептонов.

В свою очередь, значительные части адронов следует приписать особый **барионный заряд B** ($|E| = 1$).

- **Адроны с $B = +1$** образуют подгруппу **барионов** (сюда входят протон, нейтрон, гипероны, барионные резонансы).
- **Адроны с $B = 0$** - подгруппу **мезонов** (p- и K- мезоны, бозонные резонансы).

Название подгрупп адронов происходит от греческих слов *barús* - тяжёлый и *mésos* - средний, что на начальном этапе исследований Э. ч. отражало сравнительные величины масс известных тогда барионов и мезонов. Более поздние данные показали, что **массы барионов и мезонов сопоставимы.**

Для лептонов $B = 0$. Для фотона $B = 0$ и $L = 0$.

Барионы и мезоны подразделяются совокупности:

- **обычных (нестранных)** частиц (протон, нейтрон, ρ -мезоны),
- **странных частиц** (гипероны, K -мезоны) и очарованных частиц.

Этому разделению отвечает наличие у адронов особых квантовых чисел: **странности S** и **очарования** (английское charm) **Ch** с допустимыми значениями: $S = 0, 1, 2, 3$ и $|Ch| = 0, 1, 2, 3$.

- Для обычных частиц $S = 0$ и $Ch = 0$.
- Для странных частиц $|S| \geq 1$, $Ch = 0$.
- Для очарованных частиц $|Ch| \geq 1$, а $|S| = 0, 1, 2$.

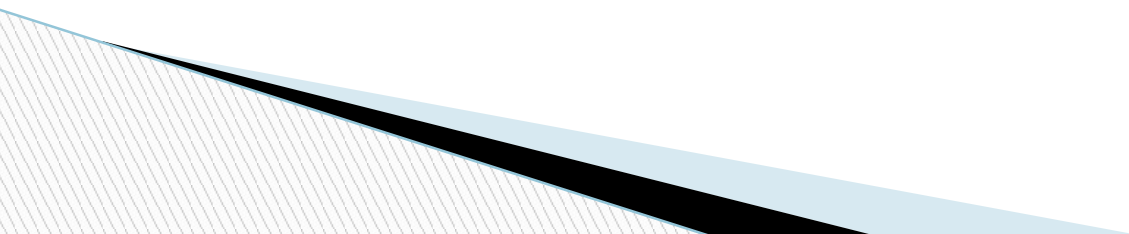
Вместо странности часто используется квантовое число **гиперзаряд $Y = S + B$** , имеющее, по-видимому, более фундаментальное значение.

Важной характеристикой адронов является также внутренняя **чётность P** , связанная с операцией пространств, инверсии: P принимает значения ± 1 .

Для всех Э. ч. с ненулевыми значениями хотя бы одного из зарядов O , L , B , Y (S) и очарования Ch существуют античастицы с теми же значениями массы m , времени жизни t , спина J и для адронов изотопического спина I , но с противоположными знаками всех зарядов и для барионов с противоположным знаком внутренней чётности P .

Частицы, не имеющие античастиц, называются **абсолютно** (истинно) **нейтральными**. Абсолютно нейтральные адроны обладают специальным квантовым числом - **зарядовой чётностью** (т. е. чётностью по отношению к операции зарядового сопряжения) C со значениями ± 1 ; примерами таких частиц могут служить фотон и p^0 .

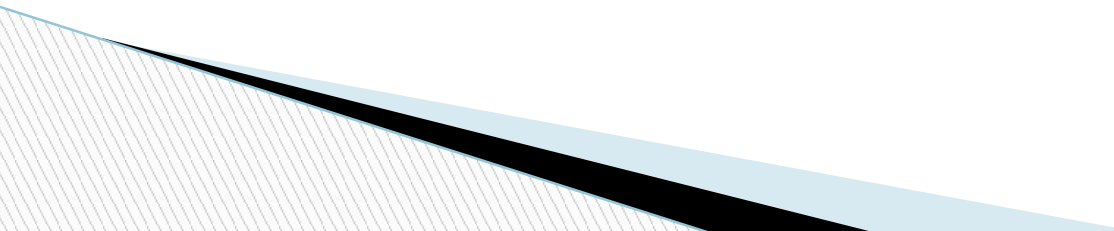
Сохранение или несохранение тех или иных квантовых чисел
- одно из существенных проявлений различий классов
взаимодействий Э. ч.



| Группа | Название частицы | Символ | | Масса | Заряд | Время жизни | |
|---------------------------------|-----------------------|----------------|------------------|-------------------|--------|----------------------|----------------------|
| | | Частица | Античастица | | | | |
| Фотоны | Фотон | γ | | 0 | 0 | ? | |
| Лептоны | Нейтринно электронное | ν_e | $\bar{\nu}_e$ | 0 | 0 | ? | |
| | Нейтринно мюонное | ν_μ | $\bar{\nu}_\mu$ | 0 | 0 | ? | |
| | Электрон | e^- | e^+ | 1 | -1,1 | ? | |
| | Мю-мезон | μ^- | μ^+ | 206,8 | -1,1 | $2,2 \cdot 10^{-6}$ | |
| А д р о н ы | Мезоны | Пи-мезоны | π^0 | | 264,2 | 0 | $2 \cdot 10^{-16}$ |
| | | | π^- | π^+ | 273,2 | 1,-1 | $2,55 \cdot 10^{-8}$ |
| | | К-мезоны | K^- | K^+ | 966,3 | 1,-1 | $1,23 \cdot 10^{-8}$ |
| | | | K^0 | \bar{K}^0 | 974,5 | 0 | $10^{-10} - 10^{-8}$ |
| | | Эта-нуль-мезон | η | | 1074 | 0 | $2,4 \cdot 10^{-19}$ |
| Б а р и о н ы | Нуклоны | Протон | p | \bar{p} | 1836,1 | 1,-1 | ? |
| | | Нейтрон | n | \bar{n} | 1838,6 | 0 | 1000 |
| | Гипероны | Лямбда-гиперон | Λ^0 | $\bar{\Lambda}^0$ | 2182 | 0 | $2,6 \cdot 10^{-10}$ |
| | | Сигма-гипероны | Σ^+ | $\bar{\Sigma}^-$ | 2327 | 1,-1 | $0,8 \cdot 10^{-10}$ |
| | | | Σ^0 | $\bar{\Sigma}^0$ | 2333 | 0 | $< 10^{-14}$ |
| | Σ^- | | $\bar{\Sigma}^+$ | 2342 | -1,1 | $1,6 \cdot 10^{-10}$ | |
| | Кси-гипероны | Ξ^0 | $\bar{\Xi}^0$ | 2572 | 0 | $3 \cdot 10^{-10}$ | |
| | | Ξ^- | $\bar{\Xi}^+$ | 2585 | -1,1 | $1,7 \cdot 10^{-10}$ | |
| | Омега-минус-гиперон | Ω^- | $\bar{\Omega}^+$ | 3278 | -1,1 | $\sim 10^{-10}$ | |
| | Резонансы | | | | | | 10^{-23} |

Фундаментальные взаимодействия

Фундаментальные взаимодействия. Процессы, в которых участвуют различные элементарные частицы, сильно различаются по характерным временам их протекания и энергиям. Согласно современным представлениям, в природе осуществляется четыре типа взаимодействий, которые не могут быть сведены к другим, более простым видам взаимодействий: **сильное, электромагнитное, слабое и гравитационное.** Эти типы взаимодействий называют **фундаментальными.**



Сильное (или ядерное) взаимодействие – это наиболее

интенсивное из всех видов взаимодействий. Оно обуславливает исключительно прочную связь между протонами и нейтронами в ядрах атомов. В сильном взаимодействии могут принимать участие только тяжелые частицы – адроны (мезоны и барионы). Сильное взаимодействие проявляется на расстояниях порядка и менее 10^{-15} м. Поэтому его называют короткодействующим.

Электромагнитное взаимодействие. В этом виде взаимодействия могут принимать участие любые электрически заряженные частицы, а так же фотоны – кванты электромагнитного поля. Электромагнитное взаимодействие ответственно, в частности, за существование атомов и молекул. Оно определяет многие свойства веществ в твердом, жидком и газообразном состояниях. Кулоновское отталкивание протонов приводит к неустойчивости ядер с большими массовыми числами.

Электромагнитное взаимодействие обуславливает процессы поглощения и излучения фотонов атомами и молекулами вещества и многие другие процессы физики микро- и макромира.

Слабое взаимодействие – наиболее медленное из всех взаимодействий, протекающих в микромире. В нем могут принимать участие любые элементарные частицы, кроме фотонов. Слабое взаимодействие ответственно за протекание процессов с участием нейтрино или антинейтрино, например, β -распад нейтрона а также безнейтринные процессы распада частиц с большим временем жизни ($\tau \geq 10^{-10}$ с).

Гравитационное взаимодействие присуще всем без исключения частицам, однако из-за малости масс элементарных частиц силы гравитационного взаимодействия между ними пренебрежимо малы и в процессах микромира их роль несущественна. Гравитационные силы играют решающую роль при взаимодействии космических объектов (звезды, планеты и т. п.) с их огромными массами.

| <i>Взаимодействие</i> | <i>Текущее описание теорией</i> | <i>Заряд</i> | <i>Частица переносчик</i> | <i>Относительная сила</i> | <i>Зависимость от расстояния</i> | <i>Радиус воздействия (м)</i> |
|-------------------------|---|----------------------------|--|---------------------------|----------------------------------|-------------------------------|
| <i>Гравитация</i> | <i>Общая теория относительности (ОТО)</i> | <i>Масса</i> | <i>Гравитон (гипотетич.)</i> | <i>1</i> | | ∞ |
| <i>Слабое</i> | <i>Теория электрослабого взаимодействия (ТЭВ)</i> | <i>Слабый изоспин</i> | <i>W^+ W^- Z^0 бозоны</i> | 10^{25} | | 10^{-18} |
| <i>Электромагнитное</i> | <i>Квантовая электродинамика (КЭД)</i> | <i>Электрический заряд</i> | <i>Фотон</i> | 10^{36} | | ∞ |
| <i>Сильное</i> | <i>Квантовая хромодинамика (КХД)</i> | <i>Цветной заряд</i> | <i>Глюон</i> | 10^{38} | <i>1</i> | 10^{-15} |

Элементарные частицы

