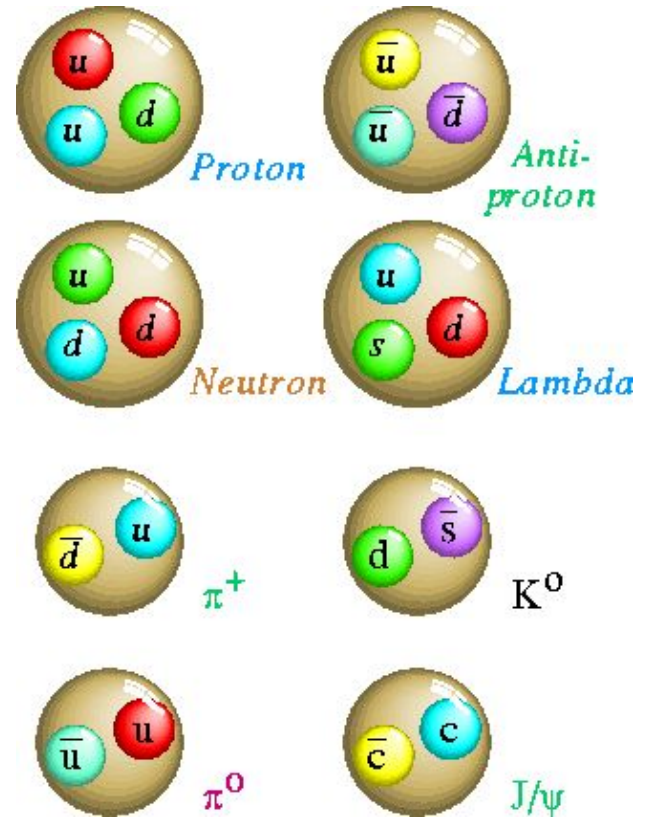


# Элементарные частицы

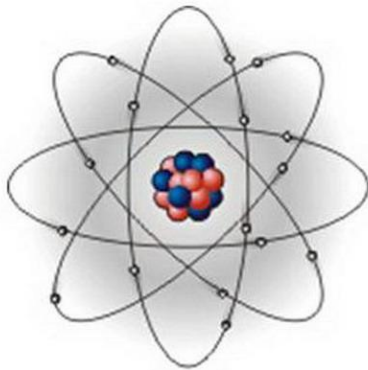
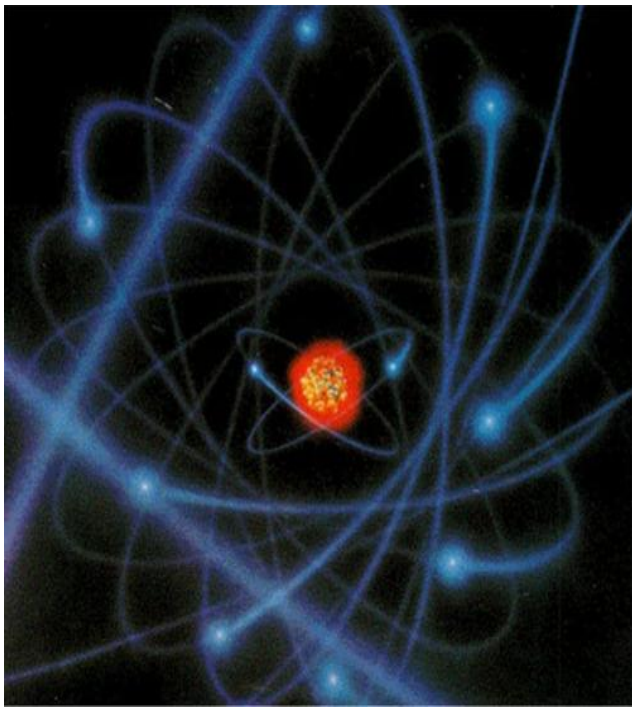


# История открытия.

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

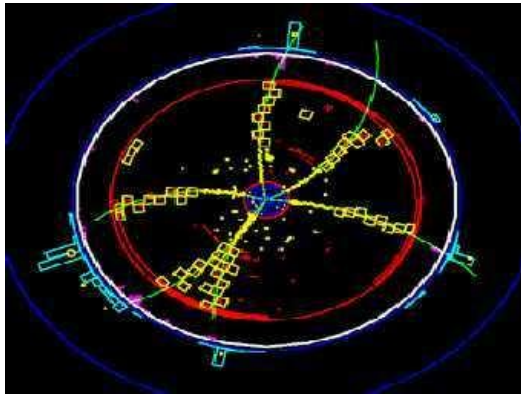
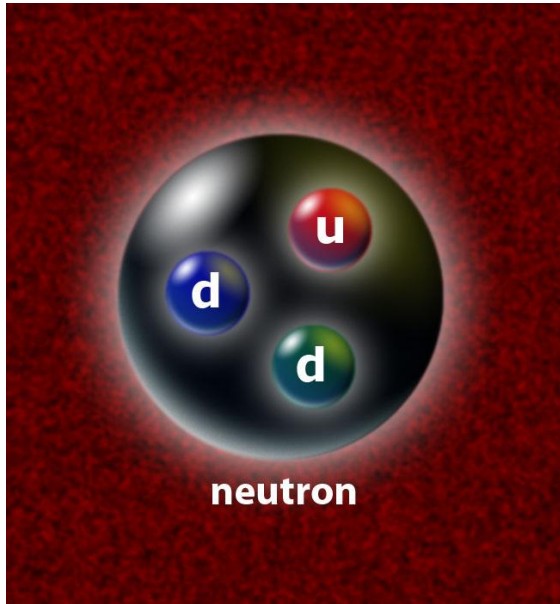
**Физика элементарных частиц** изучает самую глубинную суть нашего мира. Она пытается найти ответы (хотя бы приблизительные!) на очень фундаментальные вопросы о свойствах материи, сил, пространства-времени. Элементарные частицы живут совсем по другим законам, чем окружающий нас «макроскопический» мир.

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.

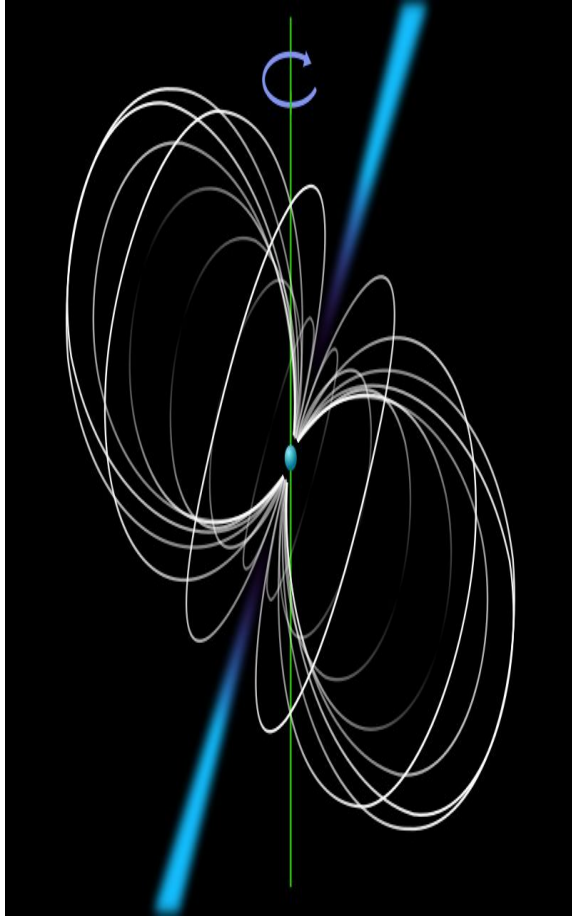
- Первой открытой элементарной частицей был **электрон**. Его открыл английский физик Томсон в 1897 году.
- Первой открытой **античастицей** был **позитрон** - частица с массой электрона, но положительным электрическим зарядом. Это античастица была обнаружена в составе космических лучей американским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



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

Чедвиком при исследованиях взаимодействия  $\alpha$ -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  $\Sigma^-$**  (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:  $9 \times 10^{-28}$  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  $\mu$ -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  $\approx 3$  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,  $\rho$ -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  $\pm 1$ .

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  $\pm 1$ ; 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.

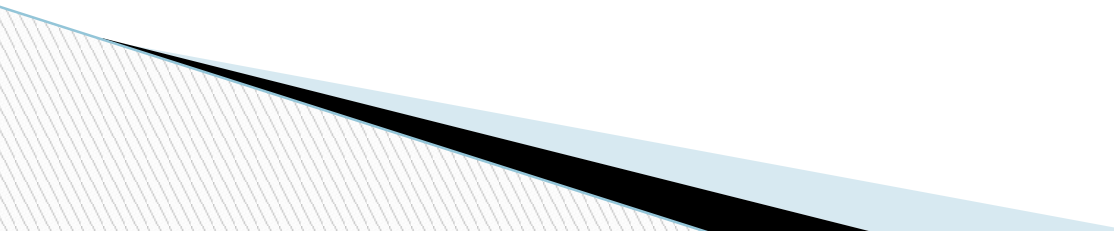


Группа	Название частицы	Символ		Масса	Заряд	Время жизни	
		Частица	Античастица				
Фотоны	Фотон	$\gamma$		0	0	?	
Лептоны	Нейтринно электронное	$\nu_e$	$\bar{\nu}_e$	0	0	?	
	Нейтринно мюонное	$\nu_\mu$	$\bar{\nu}_\mu$	0	0	?	
	Электрон	$e^-$	$e^+$	1	-1,1	?	
	Мю-мезон	$\mu^-$	$\mu^+$	206,8	-1,1	$2,2 \cdot 10^{-6}$	
А д р о н ы	Мезоны	Пи-мезоны	$\pi^0$		264,2	0	$2 \cdot 10^{-16}$
			$\pi^-$	$\pi^+$	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	$\eta$		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	$\Lambda^0$	$\bar{\Lambda}^0$	2182	0	$2,6 \cdot 10^{-10}$
		Сигма-гипероны	$\Sigma^+$	$\bar{\Sigma}^-$	2327	1,-1	$0,8 \cdot 10^{-10}$
			$\Sigma^0$	$\bar{\Sigma}^0$	2333	0	$< 10^{-14}$
			$\Sigma^-$	$\bar{\Sigma}^+$	2342	-1,1	$1,6 \cdot 10^{-10}$
		Кси-гипероны	$\Xi^0$	$\bar{\Xi}^0$	2572	0	$3 \cdot 10^{-10}$
			$\Xi^-$	$\bar{\Xi}^+$	2585	-1,1	$1,7 \cdot 10^{-10}$
		Омега-минус-гиперон	$\Omega^-$	$\bar{\Omega}^+$	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,  $\beta$ -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>		$\infty$
<i>Слабое</i>	<i>Теория электрослабого взаимодействия (ТЭВ)</i>	<i>Слабый изоспин</i>	<i><math>W^+</math> <math>W^-</math> <math>Z^0</math> бозоны</i>	$10^{25}$		$10^{-18}$
<i>Электромагнитное</i>	<i>Квантовая электродинамика (КЭД)</i>	<i>Электрический заряд</i>	<i>Фотон</i>	$10^{36}$		$\infty$
<i>Сильное</i>	<i>Квантовая хромодинамика (КХД)</i>	<i>Цветной заряд</i>	<i>Глюон</i>	$10^{38}$	<i>1</i>	$10^{-15}$

# Элементарные частицы

