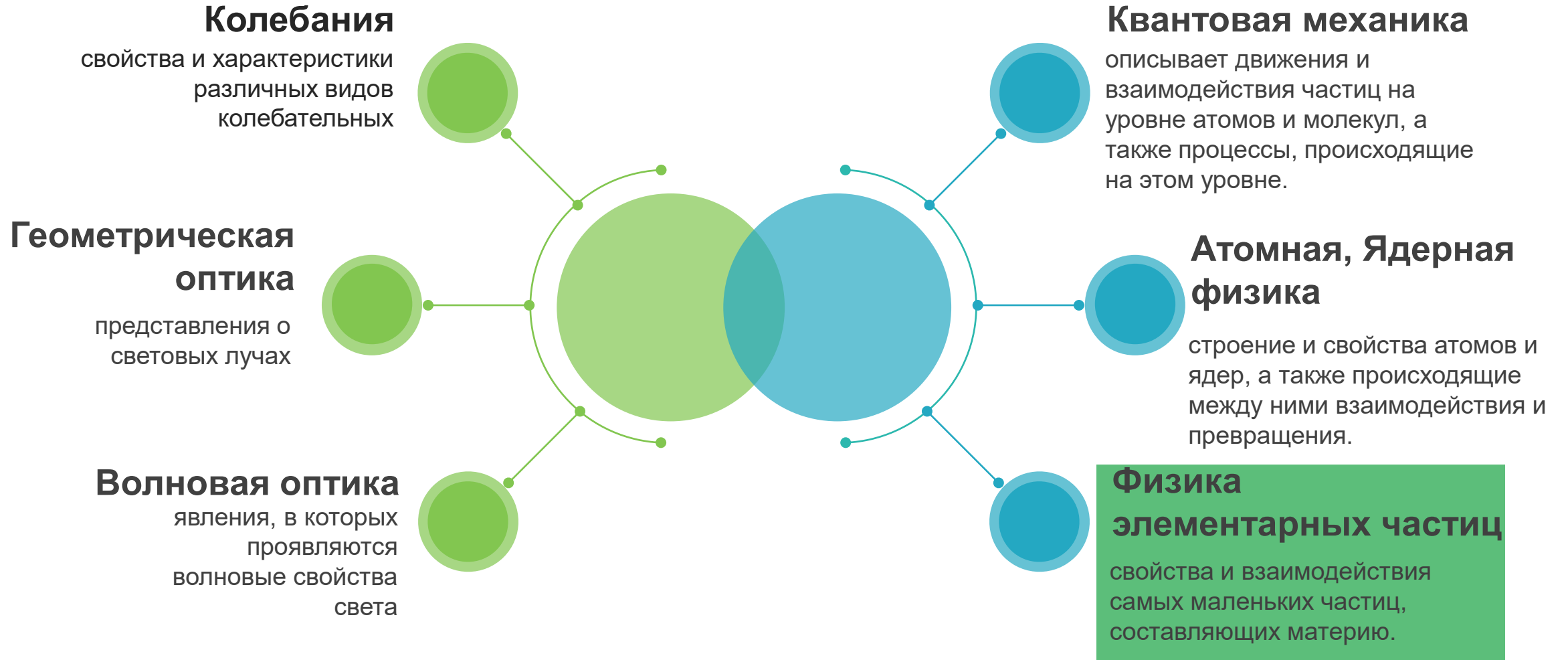


# Лекция 16. Физика элементарных частиц

---

# Физика 3



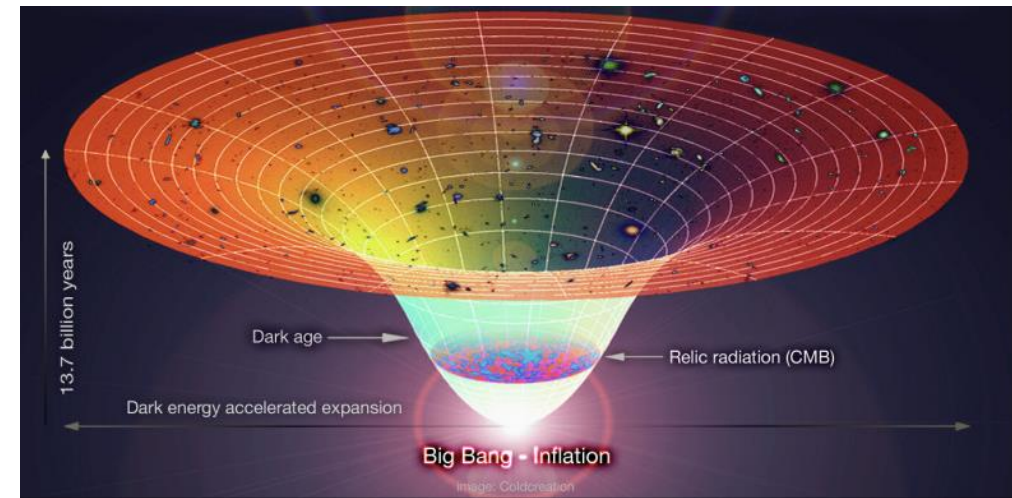
# Рождение Вселенной

В начальный момент Вселенная имела очень большую плотность и высокую температуру. Плотность вещества во Вселенной превышала  $10^{90}$  г/см<sup>3</sup>, а температура была выше  $10^{32}$  К.  
Не известны законы физики, с помощью которых можно описывать вещество в этих условиях.

Каждая частица имела двойника – античастицу.

Для того, чтобы происходило рождение частицы и античастицы энергия сталкивающихся частиц **должна превышать их удвоенную энергию покоя.**

**Аннигиляция** – процесс столкновения частицы и античастицы, при котором появляются другие частицы, отличные от исходных.



Расширение Вселенной в 1929 г. Э. Хаббл,

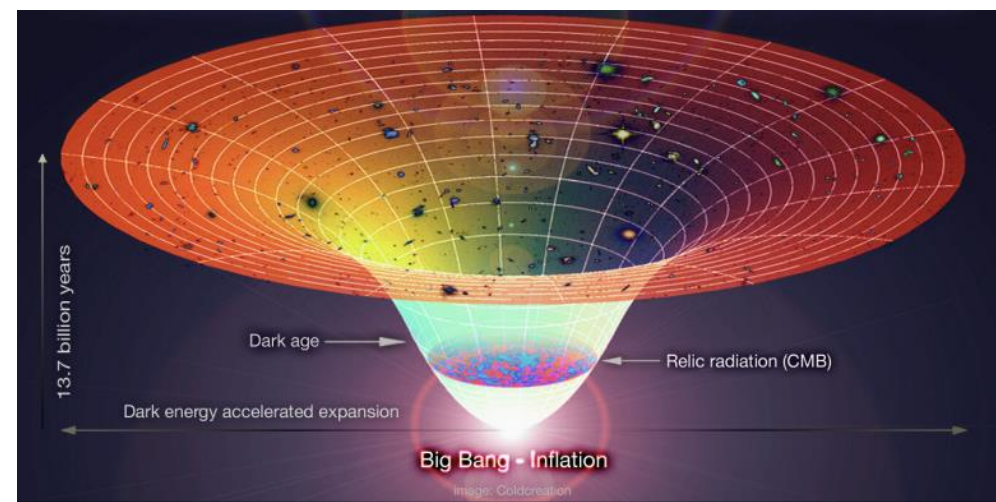
# Частицы и античастицы

**Античастицы** – двойники обычных элементарных частиц, которые отличаются от последних знаком электрического заряда и знаками некоторых других характеристик. У частицы и античастицы совпадают массы, спины, времена жизни.

Идея античастиц была впервые высказана П. Дираком. Он обнаружил, что кроме решений, соответствующих обычным электронам, автоматически получались решения, соответствующие частицам с такой же массой как у электрона, но с отрицательной энергией и с положительным электрическим зарядом  $+e$ . Эта частица была названа **позитроном**.

К. Андерсон 1933 г. подтвердил правильность идеи П. Дирака.

Позитрон был первой обнаруженной античастицей.



Расширение Вселенной в 1929 г. Э. Хаббл,

# Виды взаимодействий

---

Виды взаимодействий между элементарными частицами: **сильное, электромагнитное, слабое и гравитационное** (перечислены в порядке убывания интенсивности).

$\alpha$  – константа взаимодействия – безразмерный параметр, определяющий вероятность процессов, обусловленных данным видом взаимодействия.

Для электромагнитного взаимодействия константа:

$$\alpha = \frac{E}{m_0 c^2},$$

где  $E$  – энергия взаимодействия двух электронов, находящихся на расстоянии  $\lambda$ .

Если

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{\lambda} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2 m_e c}{\hbar}.$$

# Виды взаимодействий

где  $E$  – энергия взаимодействия двух электронов, находящихся на расстоянии  $\lambda$ .

Если

$$E' = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{\lambda} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2 m_e c}{\hbar}.$$

Тогда характеристическое отношение имеет вид:

$$\alpha = \frac{E}{m_0 c^2} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 \hbar c} = \frac{1}{137} \quad \alpha = \frac{\text{Кл}^2 \cdot \text{м} \cdot \text{с}}{\text{Ф} \cdot \text{Дж} \cdot \text{с} \cdot \text{м}} = \frac{\text{Кл}^2 \cdot \text{В}}{\text{Кл} \cdot \text{Кл} \cdot \text{В}} = 1. \quad \text{– безразмерная величина:}$$

Константы других видов взаимодействий определяют относительно значения константы электромагнитного взаимодействия.

Отношение констант даёт относительную интенсивность соответствующих взаимодействий.

# Виды взаимодействий

---

**Сильное взаимодействие** – обеспечивает связь нуклонов в ядре. Константа сильного взаимодействия ( $\alpha$ ) имеет величину порядка 1–10. Наибольшее расстояние, на котором проявляется сильное взаимодействие (радиус действия), составляет примерно  $10^{-15}$  м.

**Электромагнитное взаимодействие.** Константа взаимодействия ( $\alpha$ ) равна  $1/137 \approx 10^{-2}$  (константа тонкой структуры). Радиус действия не ограничен ( $r = \infty$ ).

**Слабое взаимодействие** – ответственно за все виды  $\beta$ -распада ядер, за распады элементарных частиц, а также за все процессы взаимодействия нейтрона с веществом.  $\alpha$  равна порядка  $10^{-10}$  –  $10^{-14}$ . Слабое взаимодействие, как и сильное, является короткодействующим.

**Гравитационное взаимодействие.** Константа взаимодействия имеет значение порядка  $10^{-38}$ . Радиус действия не ограничен ( $r = \infty$ ). Гравитационное взаимодействие является универсальным, ему подвержены все без исключения элементарные частицы.

# Краткая классификация и свойства частиц



Четыре класса элементарных частиц: – фотоны, лептоны, адроны и калибровочные бозоны.

**Фотоны**  $\gamma$  (кванты электромагнитного поля) участвуют в электромагнитных взаимодействиях, но не обладают сильным и слабым взаимодействием.

**Лептоны** (греч. «лептос» – лёгкий) – частицы, участвующие в электромагнитных и слабых взаимодействиях. К ним относятся частицы, не обладающие сильным взаимодействием:

электроны ( $e^+$ ,  $e^-$ ), мюоны ( $\mu^+$ ,  $\mu^-$ ), таоны ( $\tau^+$ ,  $\tau^-$ ), а также электронные нейтрино ( $\nu_e$ ,  $\tilde{\nu}_e$ ), мюонные нейтрино ( $\nu_\mu$ ,  $\tilde{\nu}_\mu$ ) и тау-нейтрино ( $\nu_\tau$ ,  $\tilde{\nu}_\tau$ ).

- Все лептоны имеют спины, равные  $1/2\hbar$ , и следовательно являются фермионами.
- Все лептоны обладают слабым взаимодействием.



# Краткая классификация и свойства частиц

классы элементарных частиц

К первому классу относится только одна частица – фотон.

Элементарные частицы			
Лептоны	Калибровочные бозоны	Адроны	
$e^- \mu^- \tau^-$ $\nu_e \nu_\mu \nu_\tau$	$\gamma, W^+, W^-, Z, 8g$	Барионы ( $qqq$ ) $B = 1$	Мезоны ( $q\bar{q}$ ) $B = 0$
		$n, p,$ гипероны ( $\Lambda, \Sigma, \Xi, \Omega$ ) и др. Барионные резонансы	$\pi, K, J/\Psi$ и др. Мезонные резонансы

# Краткая классификация и свойства частиц

---

**Адроны** (греч. «адрос» – крупный, массивный) – частицы, участвующие в сильных, электромагнитных и слабых взаимодействиях. Сегодня известно свыше сотни адронов и их подразделяют на барионы и мезоны.

**Барионы** – адроны, состоящие из трёх кварков ( $qqq$ ) и имеющие барионное число  $B = 1$ .

Класс барионов объединяет в себе нуклоны ( $p, n$ ) и нестабильные частицы с массой большей массы нуклонов, получившие название гиперонов ( $\Lambda, \Sigma^+, \Sigma^0, \Sigma^-, \Xi^0, \Xi^-, \Omega^-$ ).

Спин всех барионов равен  $1/2h$  (фермионы). За исключением протона, все барионы нестабильны. При распаде бариона, наряду с другими частицами, обязательно образуется барион. Эта закономерность является одним из проявлений закона сохранения барионного заряда

# Краткая классификация и свойства частиц

## Адроны

**Мезоны** – адроны, состоящие из кварка и антикварка ( $q\bar{q}$ ) и имеющие барионное число  $B = 0$ .

Мезоны – сильно взаимодействующие нестабильные частицы, не несущие так называемого барионного заряда.

К их числу принадлежат  $\pi$ -мезоны или пионы ( $\pi^+, \pi^-, \pi^0$ ), K-мезоны, или каоны ( $K^+, K^-, K^0, \bar{K}^0$ ), и  $\eta$ -мезоны.

В отличие от лептонов, мезоны обладают не только слабым (и если они заряжены, электромагнитным), но также и сильным взаимодействием, проявляющимся при взаимодействии их между собой, а также при взаимодействии между мезонами и барионами.

Спин всех мезонов равен нулю, так что они являются бозонами.

# Краткая классификация и свойства частиц



**Калибровочные бозоны** – частицы, осуществляющие взаимодействие между фундаментальными фермионами (кварками и лептонами). Это частицы  $W^+$ ,  $W^-$ ,  $Z^0$  и восемь типов глюонов  $g$ . Сюда же можно отнести и фотон  $\gamma$ .

# Свойства элементарных частиц



**Масса частицы,  $m$ .** Массы частиц меняются в широких пределах от 0 (фотон) до 90 ГэВ (Z-бозон). Z-бозон – наиболее тяжелая из известных частиц. Однако могут существовать и более тяжелые частицы. Массы адронов зависят от типов входящих в их состав кварков, а также от их спиновых состояний.

**Время жизни  $\tau$ .** В зависимости от времени жизни частицы делятся на стабильные частицы, имеющие относительно большое время жизни, и нестабильные.

Стабильные – частицы, распадающиеся по слабому или электромагнитному взаимодействию.

Поэтому к стабильным частицам принадлежат такие частицы, как электрон, протон, для которых в настоящее время распады не обнаружены, так и  $\pi^0$  – мезон ( $\tau = 0,8 \cdot 10^{-16}$  с.).

Нестабильные – частицы, распадающиеся в результате сильного взаимодействия. Их обычно называют резонансами ( $\tau = 10^{-23} - 10^{-24}$  с.).

# Свойства элементарных частиц



**Спин  $J$ .** Величина спина измеряется в единицах  $\hbar$  и может принимать 0, полуцелые и целые значения. Например, спин  $\pi^-$ ,  $K$ -мезонов равен 0. Спин электрона, мюона равен  $1/2$ . Спин фотона равен 1. Частицы с полуцелым спином подчиняются статистике Ферми–Дирака, с целым спином – Бозе–Эйнштейна

**Электрический заряд  $q$ .** Электрический заряд является целой кратной величиной от  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл, называемой элементарным электрическим зарядом. Частицы могут иметь заряды 0,  $\pm 1$ ,  $\pm 2$ .

**Внутренняя четность  $P$ .** Квантовое число  $P$  характеризует свойство симметрии волновой функции относительно пространственных отражений. Квантовое число  $P$  имеет значение  $+1$ ,  $-1$ .

# Свойства элементарных частиц



приписывают только отдельным группам частиц:

**Квантовые числа:** барионное число  $\underline{B}$ , странность  $\underline{s}$ , очарование (charm)  $\underline{c}$ , красота (bottomness или beauty)  $\underline{b}$ , истинность (topness)  $t$ , изотопический спин  $I$  приписывают только сильновзаимодействующим частицам – адронам.

**Лептонные числа**  $L_e, L_\mu, L_\tau$ . Лептонные числа приписывают частицам, образующим группу лептонов. Лептоны  $e, \mu, \tau$  участвуют только в электромагнитных и слабых взаимодействиях. Лептоны  $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$  участвуют только в слабых взаимодействиях.

Лептонные числа имеют значения  $L_e, L_\mu, L_\tau = 0, +1, -1$ . Например,  $e^-$ , электронное нейтрино  $\nu_e$  имеют  $L_e = \pm 1$ ,  $e_\mu^+, \tilde{\nu}_e$  имеет  $L_e = 1$ . Все адроны имеют  $L_e = L_\mu = L_\tau = 0$ .

# Свойства элементарных частиц



**Барионное число  $B$ .** Барионное число имеет значение  $B = 0, +1, -1$ . Барионы, например,  $n, p, \Lambda, \Sigma$ , нуклонные резонансы имеют барионное число  $B = +1$ . Мезоны, мезонные резонансы имеют  $B = 0$ , антибарионы имеют  $B = -1$ .

**Странность  $s$ .** Квантовое число  $s$  может принимать значения  $-3, -2, -1, 0, +1, +2, +3$  и определяется кварковым составом адронов. Например, гипероны  $\Lambda, \Sigma$  имеют  $s = -1$ ;  $K^+, K^-$  мезоны имеют  $s = +1$ .

**Charm  $c$ .** Квантовое число  $c$  может принимать значения  $-3, -2, -1, 0, +1, +2, +3$ . В настоящее время обнаружены частицы, имеющие  $c = 0, +1$  и  $-1$ . Например, барион  $\Lambda^+$  имеет  $c = +1$ .

**Красота  $b$ .** Квантовое число  $b$  может принимать значения  $-3, -2, -1, 0, +1, +2, +3$ . В настоящее время обнаружены частицы, имеющие  $b = 0, +1, -1$ . Например,  $B^+$  мезон имеет  $b = +1$ .



# Краткая классификация и свойства частиц

---

**Истинность  $t$ .** Квантовое число  $t$  может принимать значения  $-3, -2, -1, 0, +1, +2, +3$ . В настоящее время обнаружено всего одно состояние с  $t = +1$ .

**Изоспин  $I$ .** Сильновзаимодействующие частицы можно разбить на группы частиц, обладающих схожими свойствами (одинаковое значение спина, чётности, барионного числа, странности и др. квантовых чисел, сохраняющихся в сильных взаимодействиях) – изотопические мультиплеты. Величина изоспина  $I$  определяет число частиц, входящих в один изотопический мультиплет,  $n$  и  $p$  составляет изотопический дуплет  $I = 1/2$ .  $\Sigma^+, \Sigma^-, \Sigma^0$ , входят в состав изотопического триплета  $I = 1$ ,  $\Lambda$  – изотопический синглет  $I = 0$ , число частиц, входящих в один изотопический мультиплет,  $2I + 1$ .

**G – четность** – это квантовое число, соответствующее симметрии относительно одновременной операции зарядового сопряжения  $c$  и изменения знака третьего компонента  $I$  изоспина. G-четность сохраняется только в сильных взаимодействиях.

# Странные частицы



K, Λ, Σ , ведут себя необычно:

- Во-первых, они всегда рождаются парами.
- Во-вторых, хотя рождение странных частиц (как их стали называть) было обусловлено сильным взаимодействием (т.е. происходило с большой вероятностью), их распады не имели характерного для сильного взаимодействия времени жизни, хотя они и распадались на сильновзаимодействующие частицы. Вместо величин порядка  $10^{-23}$  с, как следовало ожидать для частиц, распадающихся за счёт сильного взаимодействия, их время жизни оказалось в пределах от  $10^{-10}$  до  $10^{-8}$  с, что характерно для слабого взаимодействия.

# Странные частицы



Предполагается, что странность сохраняется в сильном взаимодействии и не сохраняется в слабом взаимодействии.

Хотя закон сохранения запрещает распад странных частиц на более лёгкие, нестранные частицы, за счёт сильного взаимодействия, такие распады происходят и за счёт слабого взаимодействия. Но слабые распады происходят гораздо медленнее, что соответствует большим временам жизни.

Сохранение странности оказалось первым примером «частично сохраняющейся величины», странность сохраняется в сильном и не сохраняется в слабом взаимодействии.

# Кварки и очарование



Почти все наблюдаемые частицы принадлежат одному из двух семейств: лептонам и адронам.

Лептоны считаются элементарными частицами, т.к. они, насколько известно, не распадаются на составные части, не обнаруживают никакой внутренней структуры и не имеют определённого размера. С другой стороны, адроны оказались более сложными частицами. Эксперименты показали, что адроны обладают внутренней структурой, и их обилие наводит на мысль, что адроны совсем не элементарны построены из трёх более фундаментальных точечных объектов, называемых **кварками**.

Подобно лептонам кварки представляют собой истинно элементарные частицы.

# Кварки и очарование

---

Три «сорта» кварков:

u (up – вверх),

d (down – вниз),

s (strange – странный).

Предполагается, что кварки имеют дробный электрический заряд (равный  $1/3$  или  $2/3$  заряда электрона).

Все известные в то время адроны теоретически можно было построить из кварков трёх видов: u, d, s.

Мезоны состоят из сочетания кварк-антикварк. Например,  $\pi^+$ -мезон представляет собой пару  $ud$ .

Барионы состоят из трёх кварков. Например, нейтрон  $n = ddu$ , а антипротон  $\bar{p} = uud$

В 1964 г. ряд физиков высказали предположение о существовании четвертого кварка.

Четвертый кварк получил название **очарованный**. Его электрический заряд должен быть равен  $2/3e$ .