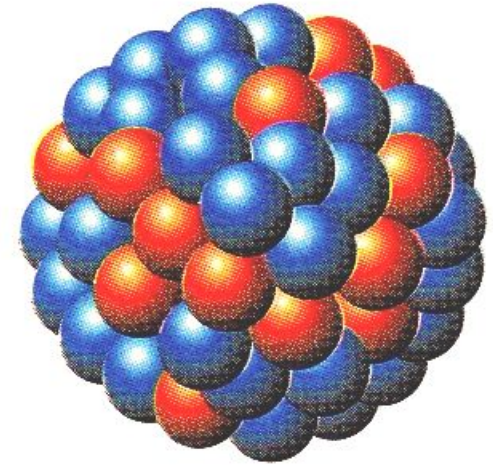


# Физика атомного ядра



Ядро – квантовый  
объект

Состав ядра: **протоны**,  
**нейтроны**

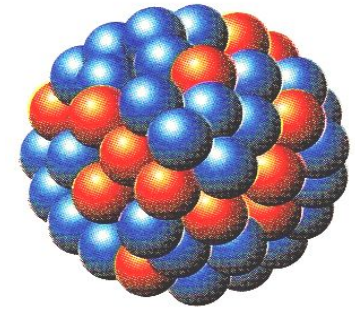
Пионная теория ядерного  
взаимодействия между  
нуклонами

**Радиоактивность. Закон радиоактивного  
распада**

**Ядерные  
реакции**

# Состав и характеристики атомных ядер.

Атомное ядро состоит из нуклонов: протонов и нейтронов, обозначается символом  ${}^A_Z X$ , где  $X$  – обозначение химического элемента из Периодической таблицы,  $Z$  – зарядовое число (количество протонов в ядре),  $A=Z+N$  – массовое число (количество нуклонов),  $N$  – число нейтронов.



Атомное ядро

$Z \cdot e$  – заряд ядра равен  $1,6 \cdot 10^{-19}$ , где  $e$  – элементарный заряд.

**Протон** – стабильная частица с зарядом  $e$  и массой  $m_p = 1836 \cdot m_e$ , где  $m_e = 0,9 \cdot 10^{-30}$  кг – масса электрона. Протон имеет полуцелый спин  $\sigma = 1/2$ , собственный магнитный момент  $\mu_p \approx +2,8 \mu_N$ , где  $\mu_N = \frac{e\hbar}{2m_p} = 5,05 \cdot 10^{-27}$  Дж/Тл – ядерный магнетон Бора.

**Нейтрон** – электрически нейтральная частица (открыта в 1932г, Дж.Чэдвик, Англия). Масса нейтрона  $m_n \approx m_p \approx 1,67 \cdot 10^{-27}$  кг, спин  $\sigma = 1/2$ , магнитный момент  $\mu_n = -1,9 \mu_N$ . **Нейтрон устойчив только в составе ядра. Свободный нейтрон – нестабильная частица и самопроизвольно распадается** примерно через 15 минут на протон ( $p$ ), электрон ( $e$ ) и электронное антинейтрино ( $\bar{\nu}_e$ ):

$$n \rightarrow p + e + \bar{\nu}_e$$

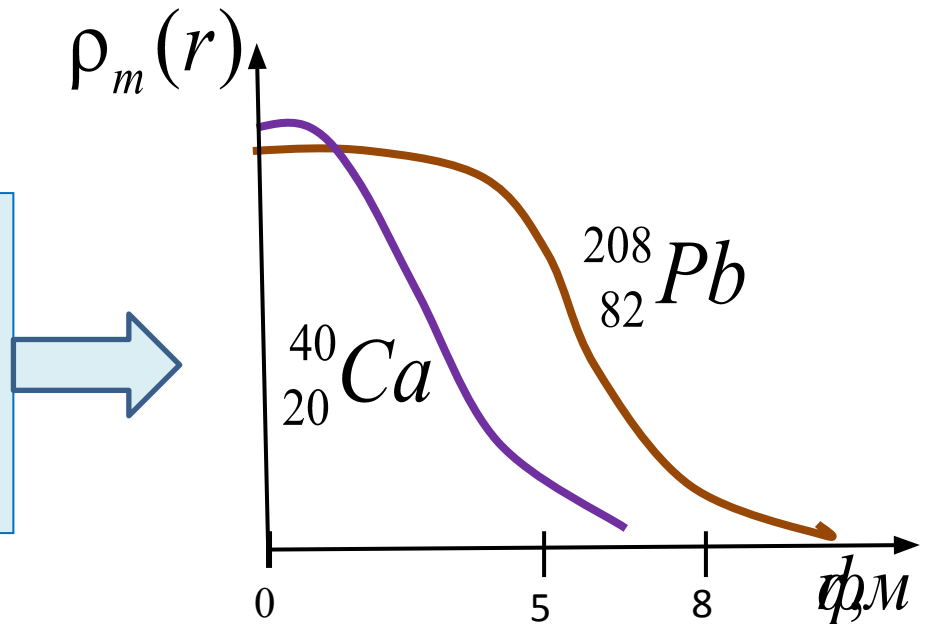
# Плотность ядерного

Пример: **вещества** Плотность ядра золота  ${}_{79}^{196}\text{Au}$  радиуса  $\approx 5 \cdot 10^{-14}$

$$\rho = \frac{M}{V} = \frac{A m_n}{(4/3)\pi r_{\text{я}}^3} \approx \frac{196 \cdot 1,67 \cdot 10^{-27}}{4 \cdot (5 \cdot 10^{-14})^3} \approx 10^{15} \text{ кг/м}^3$$

Для сравнения: **Плотность металла золота**  $\rho_{\text{Au}} = 19 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$

Радиальная плотность нуклонов (концентрация) в ядре уменьшается с увеличением радиуса.



**Ядро – квантовый объект.** Это утверждение следует из сравнения длины волны де Бройля ядерных частиц с размером ядра. Для вылетающих из ядра альфа-частиц с энергией

$$\lambda_{\text{Бр}} = \frac{2\pi \hbar}{\sqrt{2m_{\alpha} E_{\alpha}}} \approx \frac{2\pi \cdot 1,05 \cdot 10^{-34}}{\sqrt{2 \cdot 4 \cdot 1,6 \cdot 10^{-27} \cdot 5 \cdot 10^6 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}}} \approx 6 \cdot 10^{-15} \text{ м}$$

- \* **Длина волны де Бройля альфа-частицы близка по порядку величины к размерам ядер.**
- \* Как и любой квантовый объект, ядро характеризуется моментом импульса (спин ядра), зарядом и его распределением по объёму ядра, магнитным моментом, ... .
- \* Ядро, как квантово-механический объект, не имеет определенной границы в силу соотношения неопределенностей.
- \* Эксперименты показали, что в атомном ядре отчетливо различаются внутренняя область почти постоянной плотности и поверхностный слой толщиной  $\sim 10^{-15}$  м фемтометра



# Изотопы, изобары, изотоны.

**Изотопы** – ядра одного химического элемента с одинаковым числом протонов  $Z$ , но различным числом нейтронов.

Примеры: *Изотопы* водорода:  ${}^1_1\text{H}$  (протон),  ${}^2_1\text{H}$  (дейтон),  ${}^3_1\text{H}$  (тритон). *Изотопы* урана:  ${}^{238}_{92}\text{U}$ ,  ${}^{235}_{92}\text{U}$ ,  ${}^{234}_{92}\text{U}$ .

**Изобары** – ядра с одинаковым массовым числом

Примеры:  ${}^{40}_{18}\text{Ar}$  (аргон) и  ${}^{40}_{20}\text{Ca}$  (кальций).

**Изотоны** – ядра с одинаковым числом нейтронов  $N$ .

Примеры:  ${}^{13}_6\text{C}$  (углерод) и  ${}^{14}_7\text{N}$  (азот).

# Ядерные силы между

**Ядерные силы** – мощные короткодействующие силы притяжения, они удерживают нуклоны вместе, несмотря на кулоновское отталкивание протонов.

**Зарядовая независимость и короткодействие ядерных сил.** При сближении, например, двух протонов до расстояний порядка  $10^{-14}$  м действуют только электромагнитные силы, и лишь **на расстояниях порядка  $10^{-15}$  м** над кулоновским отталкиванием протонов начинает преобладать их **сильное ядерное притяжение**.

**Свойство насыщения:** в сферу силового действия одного нуклона может попасть лишь ограниченное число соседних нуклонов, а не все нуклоны ядра. **Этим свойством ядро напоминает жидкость.**

**Нецентральный характер:** Силы зависят от ориентации спина во взаимодействующих нуклонах. Оказывается, что нейтрон и протон могут образовать **ядро дейтерия – дейтрон, если их спины параллельны**. В случае, когда спины у них антипараллельны, интенсивности ядерного взаимодействия недостаточно для образования ядра.

# Пионная теория ядерного взаимодействия

**Сильное (ядерное) взаимодействие** объясняется тем, что нуклоны обмениваются между собой виртуальными **пионами**:  $\pi^+$ ,  $\pi^-$ ,  $\pi^0$ , масса которых примерно в **280 раз больше массы электрона**. Нуклон на короткое время испускает пион, который поглощается соседним нуклоном. **Такой обмен частицами, как показывает квантовая теория, всегда приводит к появлению сил взаимодействия.**

Испускание пиона нуклоном приводит к тому, что энергия системы «**нуклон + пион**» оказывается больше начальной энергии нуклона, что, на первый взгляд, приводит к нарушению закона сохранения энергии. Однако, в соответствии с соотношением неопределенностей, нуклон может испустить пион **виртуально**, на короткое время

$$\tau \approx \Delta t \approx \hbar / \Delta E \approx \hbar / m_\pi c^2 \approx 0,5 \cdot 10^{-23} \quad (\text{ядерное время}).$$

Неопределенность в энергии примерно равна энергии покоя пиона ( $\Delta E \approx m_\pi c^2$ )

За время  $\tau$  пион пройдет расстояние  $r_\pi \approx c \cdot \tau \approx \hbar / (m_\pi c)$

Таким образом, **радиус действия ядерных сил** должен иметь порядок

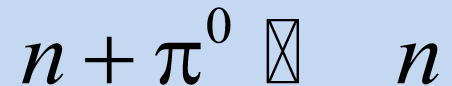
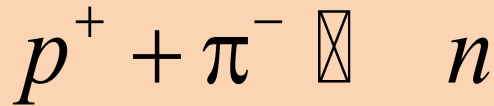
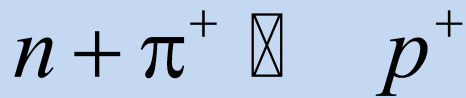
**КОМПТОНОВСКОЙ ДЛИНЫ ВОЛНЫ ПИОНА**

$$r_\pi \approx \hbar / m_\pi c \approx \Lambda_\pi$$

# Взаимные превращения нуклонов в

## ядре

В результате **непрерывных** процессов виртуального рождения и поглощения (уничтожения) пионов, каждый нуклон окружён «облаком» этих пионов. В процессах обмена пионами нейтрон **В ядре** может превращаться в протон, и наоборот.



**Протон и нейтрон не являются независимыми друг от друга, а представляют собой два различных состояния одной частицы – нуклона.**

# Энергия связи

Энергия любого атомного ядра меньше суммы энергий свободных нейтронов и протонов:

$$M_{\text{я}} c^2 < (Z \cdot m_p + N \cdot m_n) c^2$$

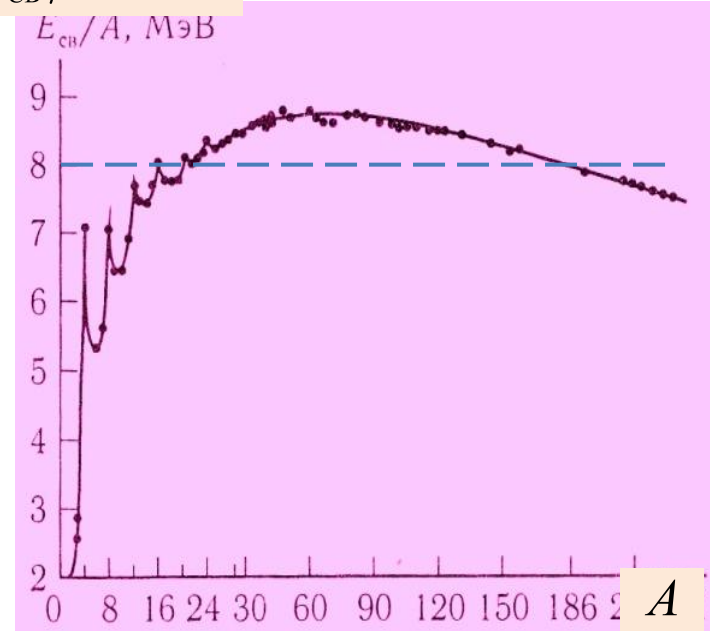
**Минимальная энергия**, которая требуется для разделения ядра на составные части

называется  $E_{\text{св}} = (Z \cdot m_p + N \cdot m_n - M_{\text{я}}) \cdot c^2$

На рис. показана зависимость удельной энергии связи ядер  $E_{\text{св}} / A$  от числа нуклонов  $A$ . Атомные ядра вблизи железа  ${}^{56}_{26}\text{Fe}$  наиболее устойчивые (наиболее сильно связанные) системы.

За исключением легких ядер ( $A < 20$ ) удельная энергия связи слабо зависит от  $A$  и составляет примерно  $8 \text{ МэВ}$ . Это свидетельствует о насыщении ядерных сил, то есть о взаимодействии нуклона только с ближайшими соседями. При некоторых числах  $A$  наблюдаются «всплески» устойчивости, что напоминает о свойстве химической инертности атомов при полном заполнении оболочек электронов.

$\text{МэВ} \cdot A,$

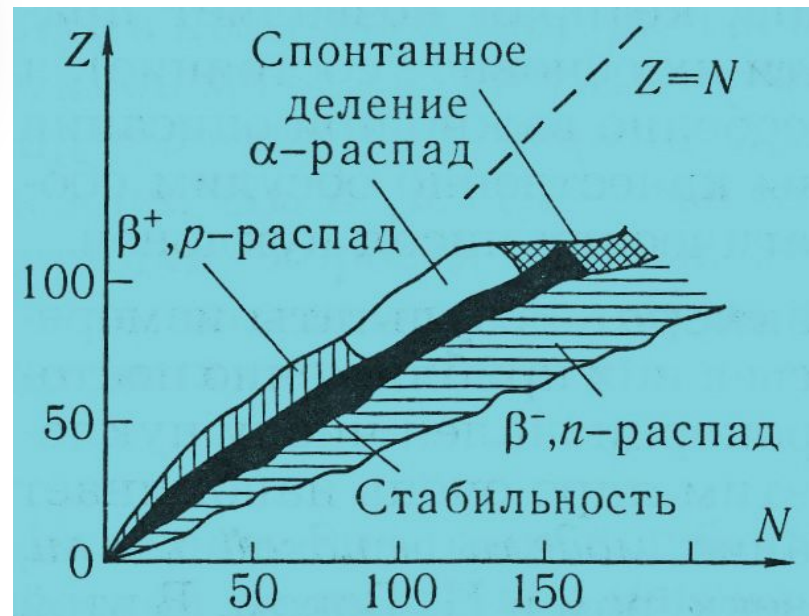


# Радиоактивность

**ь**

Далеко не все комбинации из протонов и нейтронов являются стабильными (устойчивыми).

На координатной плоскости  $ZN$  стабильным ядрам соответствует лишь узкая полоска с определенными соотношениями между  $Z$  и  $N$ .



Координатная плоскость  
 $ZN$

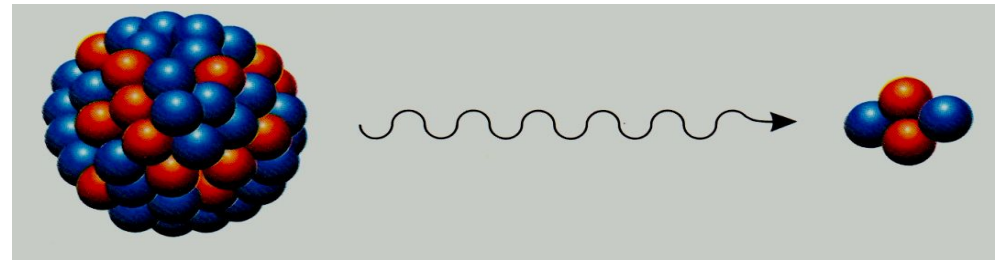
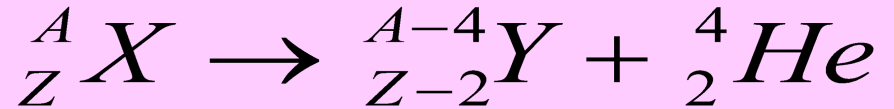
**Радиоактивность** – самопроизвольное превращение (распад) одних атомных ядер в другие с испусканием одной или нескольких частиц.

**Распад ядер** может происходить **естественным путём** или **искусственно** при бомбардировке стабильных ядер быстрыми

# Альфа - распад – испускание ядер

гелия

Дочернее ядро  ${}_{Z-2}^{A-4}Y$   
может образоваться  
не только в основном,  
но и в возбуждённом  
состоянии со  
временем жизни  
 $10^{-7} - 10^{-15}$  с.

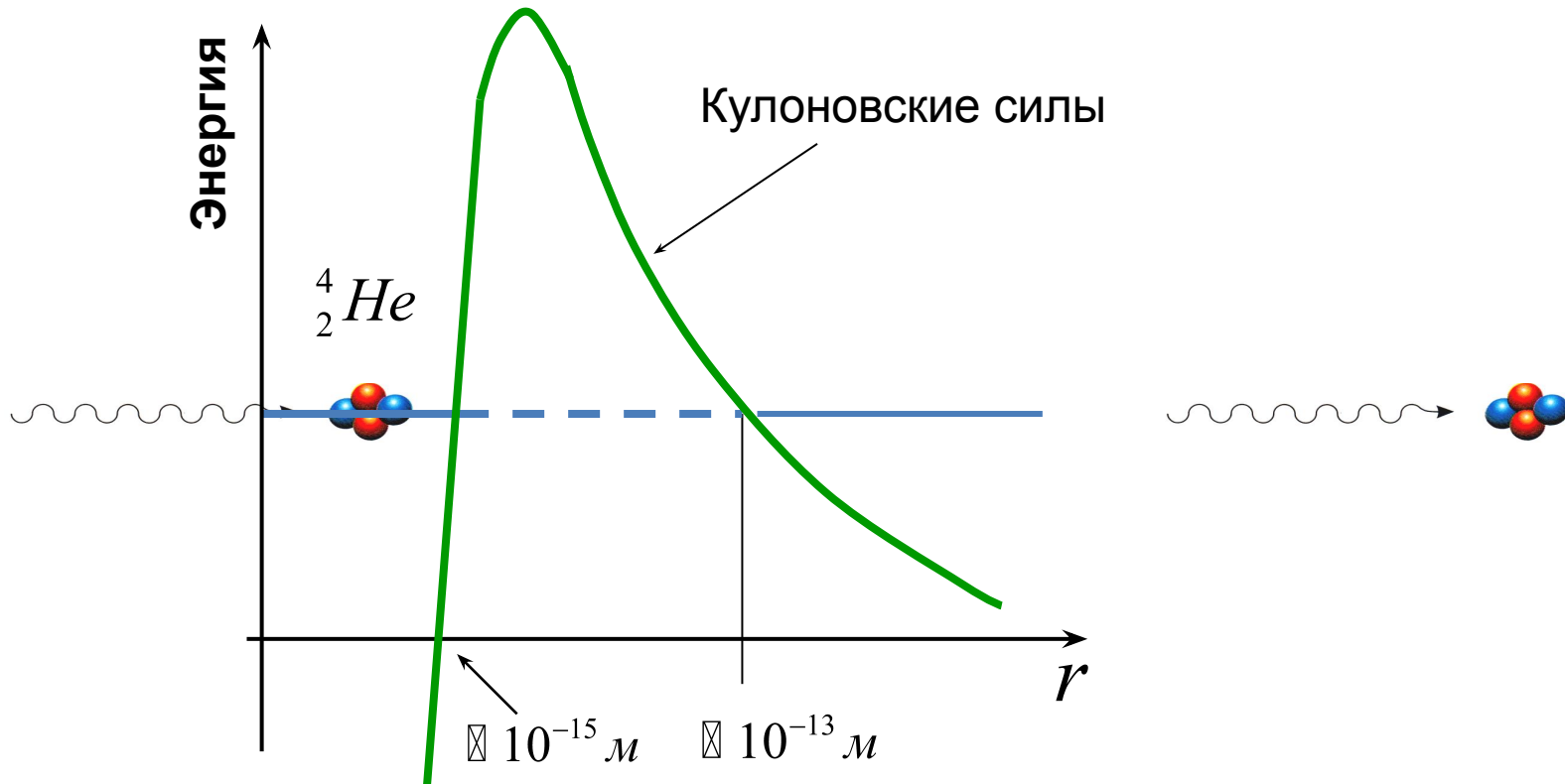


Альфа-  
распад

Избыток энергии при переходе ядра из возбужденного в основное состояние расходуется на испускание гамма-фотонов и других частиц.

# Туннельный способ $\alpha$ - распада

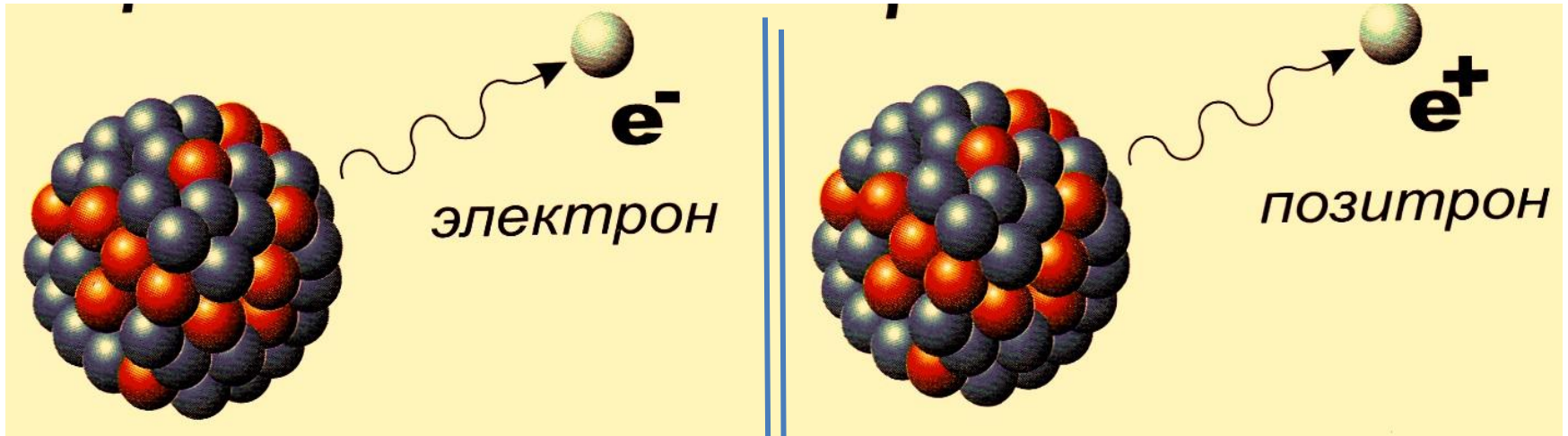
Спонтанному  $\alpha$  - распаду подвержены только тяжелые атомные ядра с  $Z > 83$  . Образовавшиеся внутри ядра  $\alpha$  - частицы на короткое время туннелируют через кулоновский потенциальный барьер. Энергия вылетающих частиц находится в пределах  $4 \div 9 \text{ МэВ}$  .



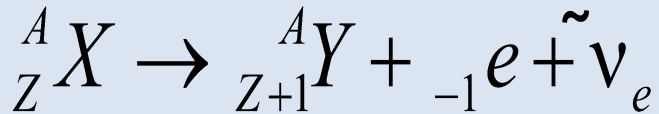


## Бета – распад.

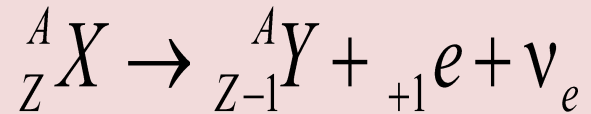
**Бета – распад** – превращение ядер , когда испускаются *электроны* ( ${}_{-1}e$ ) с *антинейтрино* ( $\tilde{\nu}_e$ ) ,  
или *позитроны* ( ${}_{+1}e$ ) с *нейтрино* ( $\nu_e$ ) :



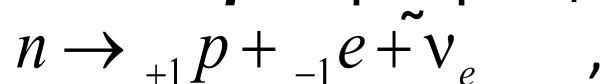
$\beta^-$  – распад



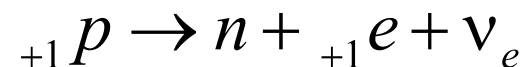
$\beta^+$  – распад



Отметим, что  $\beta$  – **распад – процесс** не внутриядерный, а **внутринуклонный процесс**. В процессе распада один из нейтронов **в ядре** превращается в протон:



или один из протонов превращается в нейтрон:

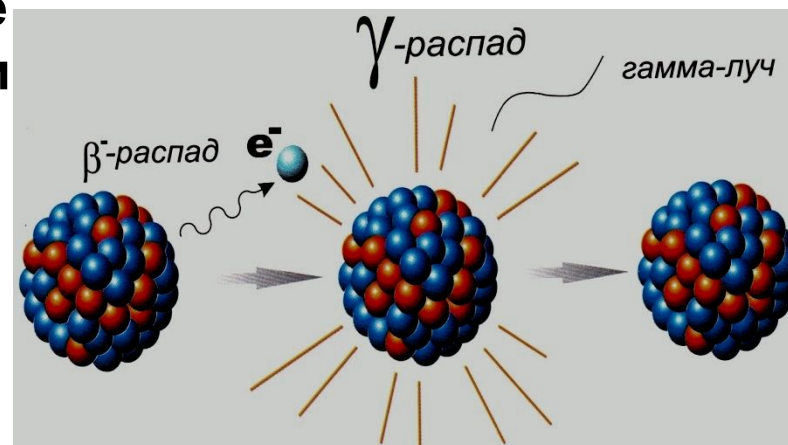


## Гамма-излучение –

коротковолновое электромагнитное излучение, испускаемое ядрами при самопроизвольном переходе из возбужденного состояния в состояние с меньшей энергией.

Спектр излучения дискретен, поскольку ядро – квантовая система с дискретным набором энергетических уровней. Энергия гамма - фотонов, излучаемых различными ядрами, находится в диапазоне от 100 кэВ до 5 МэВ.

Ядра в возбужденном состоянии часто образуются ,например, при бета-распаде .



$$100 \text{кэВ} \leq E_{\gamma} \leq 5 \text{МэВ}$$

**Протонная радиоактивность** – испускание протона из ядра в основном состоянии, наблюдается у искусственно полученных ядер с большим дефицитом нейтронов.

**Деление ядер** – расщепление массивных ядер с порядковым номером  $Z \geq 90$ , начиная с тория  ${}_{90}^{232}\text{Th}$ , на два ядра-осколка. Процесс может происходить самопроизвольно, или при облучении нейтронами. При делении освобождается большая энергия, равная примерно 200 МэВ. На этом процессе основана работа ядерных реакторов.

# Закон радиоактивного

## распада

Закономерности радиоактивного распада имеют **вероятностный характер** и выполняются тем точнее, чем больше радиоактивных ядер.

Изменение  $dN$  числа ядер из-за распада определяется только количеством ядер в момент времени и пропорционально интервалу времени  $dt$ :

$$-dN = \lambda N dt ,$$

где  $\lambda$  - **постоянная распада**, характеризующая скорость распада. Интегрируя, найдем число не распавшихся ядер в момент времени  $t$ :

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$$

где  $N_0$  - исходное число ядер в момент времени  $t = 0$ ,

$\tau = 1/\lambda$  - **среднее время жизни** радиоактивного ядра.

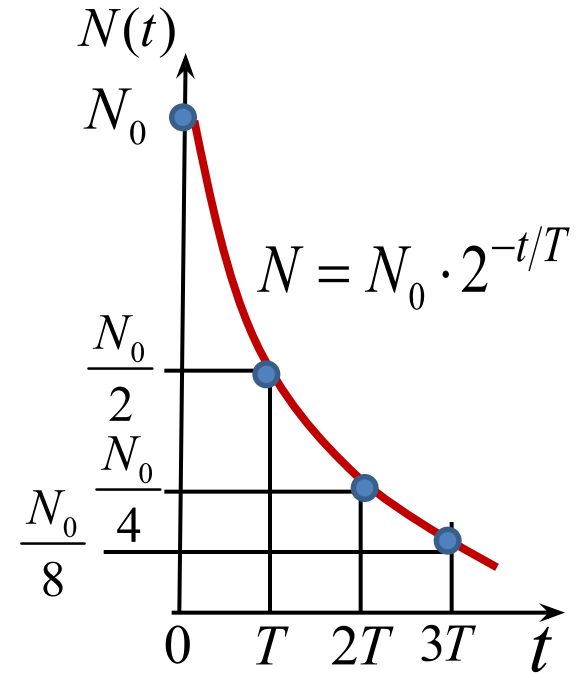
# Период полураспада. Активность

Для радиоактивного вещества существует также определённый интервал времени (**период полураспада  $T$** ), по истечении которого распадается половина ядер:  $N_0/2 = N_0 e^{-\lambda T}$ , или

$$T = \ln 2 / \lambda = 0,693 / \lambda$$

Математически закон распада, выраженный через период полураспада, записывается так:

$$N = N_0 \cdot 2^{-t/T}$$



Число распадов, происходящих в радиоактивном препарате за 1с,

$$A = -dN/dt = \lambda N$$

называют **активностью препарата**. Активность является характеристикой определенного количества распадающегося вещества, а не отдельного ядра. **Единица активности – Беккерель** (1 Бк = 1-му распаду в секунду). Используется также внесистемная единица **кюри (Ки)**, равная активности одного грамма изотопа радия  ${}_{88}^{226}\text{Ra}$ ;

$$1\text{Ки} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк}$$

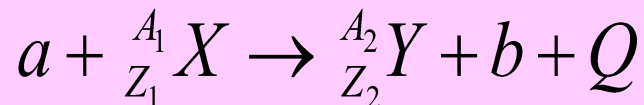
Активность единицы массы радиоактивного препарата называется **удельной активностью**.  $a_{\text{уд}} = A/m$

# Ядерные реакции

Ядерные реакции – превращение ядер одних химических элементов в ядра других элементов в результате взаимодействия ядер с элементарными частицами или друг с другом, а также при их самопроизвольном (спонтанном) делении.

При сближении двух сильно взаимодействующих частиц (ядро и нуклон, два ядра, два нуклона) до расстояния, на котором действуют ядерные силы, они вступают между собой в ядерную реакцию.

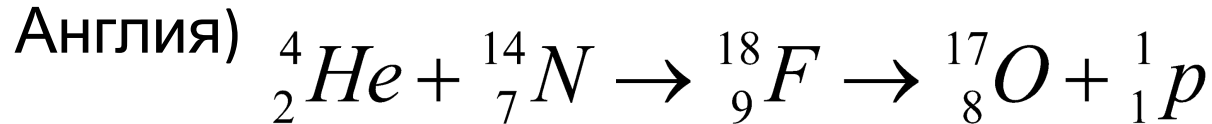
Ядерные реакции при бомбардировке мишеней ускоренными частицами записываются в виде:



Реакции могут быть **экзотермическими**, с выделением энергии при реакции ( ) и **эндотермическими**, с поглощением энергии налетающей частицы ( ).

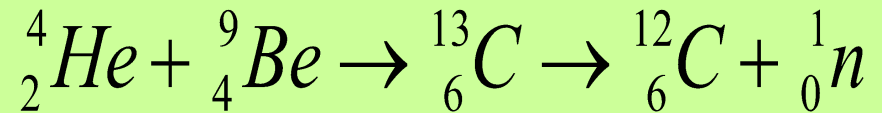
## Примеры ядерных реакций:

1. Превращение ядер азота в ядра изотопа кислорода при столкновении с альфа-частицей( Э.Резерфорд, 1919г,

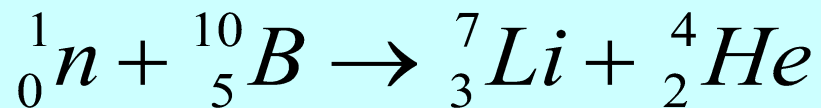


2. Открытие нейтрона

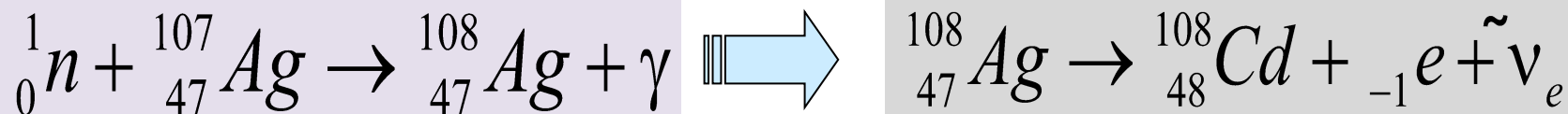
(Дж.Чадвик, 1932г, Англия):



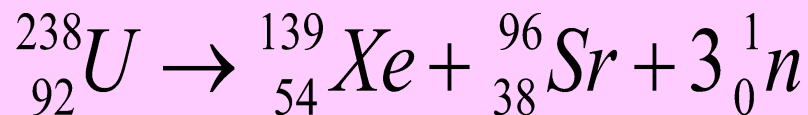
3. Расщепление бора быстрыми и медленными нейтронами на литий и гелий:



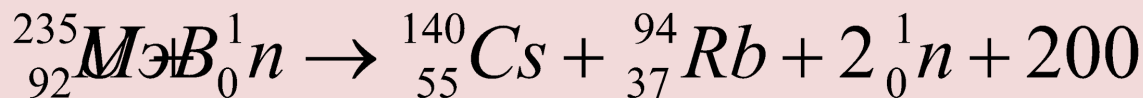
4. Искусственная радиоактивность с образованием радиоактивного изотопа серебра ( $T=2,3$  мин) с последующим  $\beta^-$  – распадом



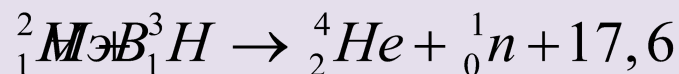
5. Спонтанное деление тяжелых ядер:



Деление при облучении не



6. Термоядерная реакция слияния лёгких ядер дейтерия и трития в более массивное ядро гелия:





# Законы сохранения в ядерных

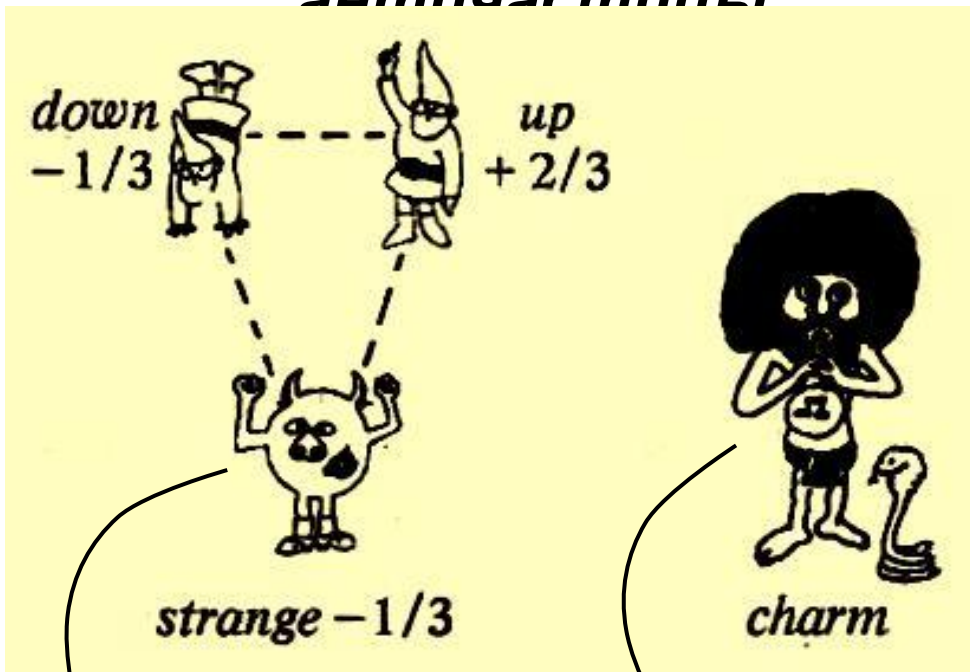
**реакциях**  
**Законы сохранения энергии и импульса.** Большое удаление атомных ядер друг от друга при их малых размерах позволяет считать систему взаимодействующих ядерных частиц замкнутой (изолированной). В изолированной системе сохраняется полная энергия (кинетическая энергия плюс энергия покоя) и суммарный импульс частиц.

**Закон сохранения электрического заряда:**  
алгебраическая сумма зарядов до реакции (столкновения частиц) должна быть равна алгебраической сумме зарядов продуктов реакции.

**Закон сохранения числа нуклонов:** количество нуклонов до и после реакции (столкновения) должно быть неизменным.

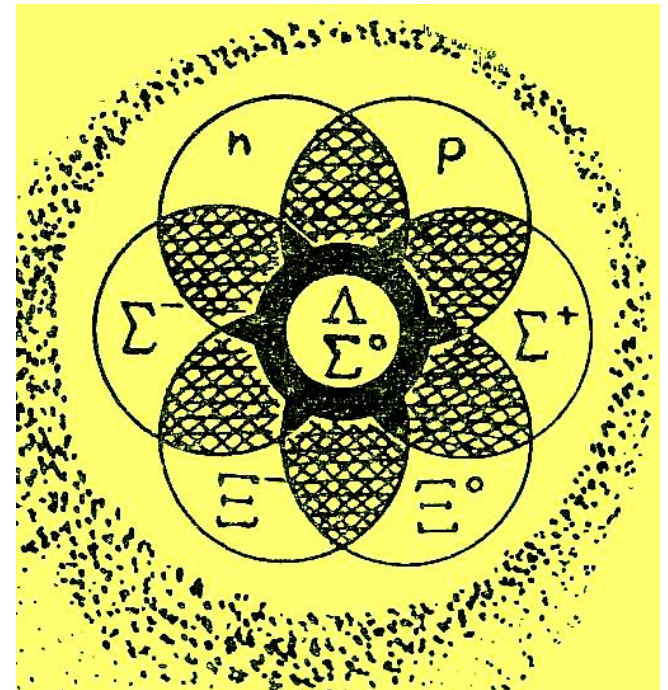
# Элементарные Фундаментальные Частицы.

Взаимодействия  
Частицы и  
античастицы



«Странный»  
кварк

Кварк  
очарования

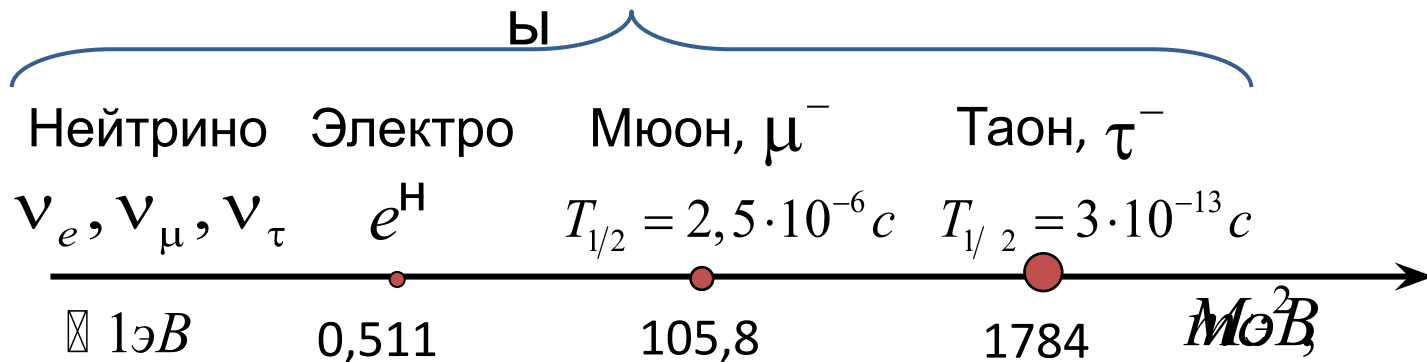


Лептоны и  
адроны  
Кварки и  
глюоны

# Лептоны

**Лептоны:** три заряженные частицы: **электрон**, **мюон**, **таон** и нейтральные нейтрино – **электронное**, **мюонное** и **таонное**, а также их **античастицы**. Все лептоны участвуют в слабом взаимодействии. Лептоны, имеющие электрический заряд, наряду со слабым испытывают также

электромагнитное взаимодействие. Лептоны - ферми-частицы, их спин равен  $1/2$ .



Лептоны – частицы, не участвующие в сильном взаимодействии.

Кроме электрического заряда лептоны обладают **лептонным зарядом**  $L$

для лептонов,  $L = 1$       для антилептонов  $L = -1$        $L = 0$

**Все остальные частицы имеют**

# Закон сохранения лептонного

**заряда**  
**Во всех взаимодействиях элементарных частиц суммарный лептонный заряд остается неизменным, т.е.**

При этом сохраняется мюонный лептонный заряд  $L_\mu = 1$  для  $\bar{\nu}_\mu$  ;  
 $L_\mu = -1$  для античастиц  $\mu^+$  и  $\nu_\mu$  ; **для всех остальных частиц  $L_\mu = 0$**  ;  
 ).

Аналогичные значения принимают электронный  $L_e$  и таонный  $L_\tau$   
 лептонные заряды.

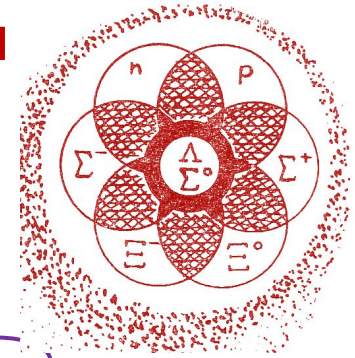
**Пример:** 1.  $\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$  2.  $\nu_e + p \not\rightarrow n + e^+$

Реакция 1 разрешена и действительно происходит ( $L_e : -1 + 0 = 0 + (-1)$  ).  
 В реакции 2 электронный лептонный заряд не сохраняется ( $L_e : 1 + 0 = 0 + (-1)$  ),  
 такая реакция запрещена и не наблюдается в экспериментах.

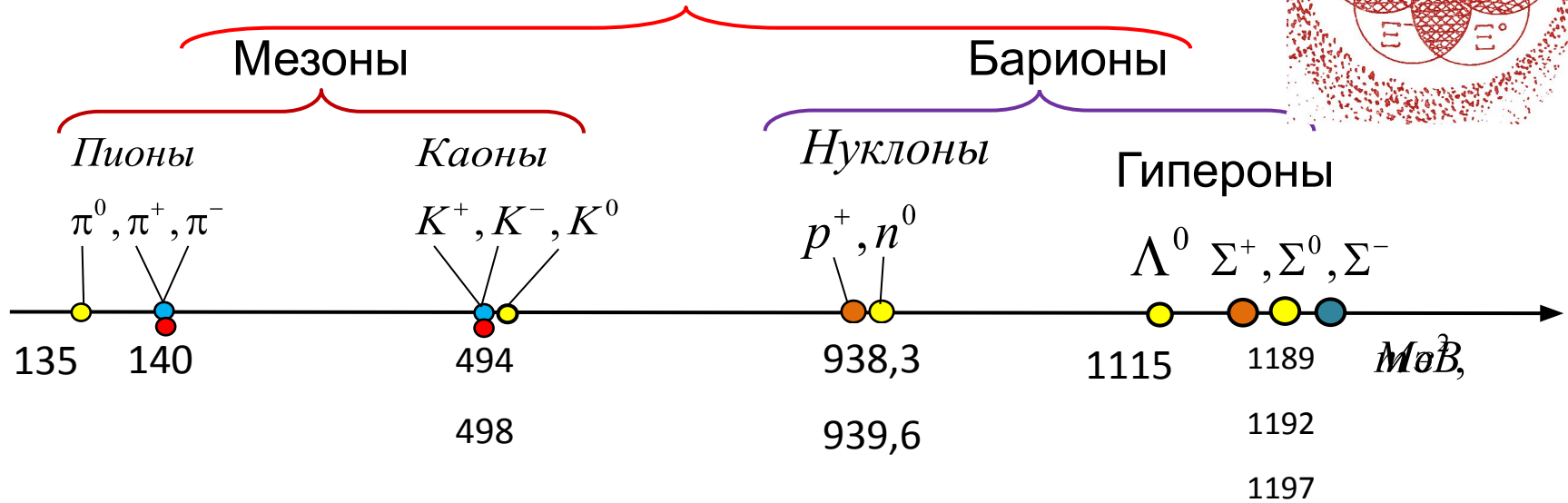
Среди лептонов имеются стабильные и нестабильные частицы. Мюоны  
 распадаются по схеме:  $\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$  ;  $\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$  .

В этих реакциях распада сохраняются и электронный и мюонный лептонные заряды.

# Адроны



## Адроны



Распределение адронов по

массам.

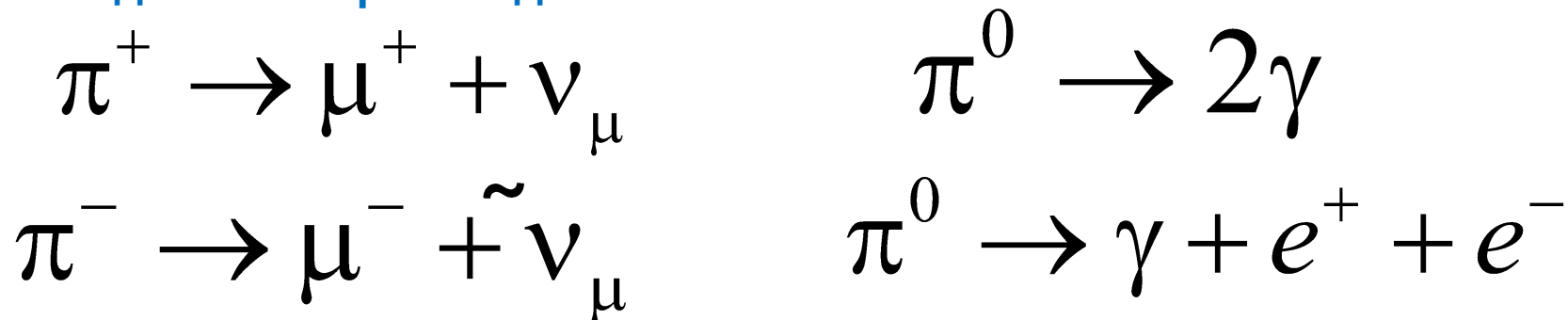
**Адроны** – частицы, участвующие в сильных взаимодействиях.

Адроны подразделяются на два класса: **мезоны и барионы**.

**Мезоны** – адроны с нулевым или целочисленным спином (бозе-частицы). Мезоны участвуют в сильном, электромагнитном, если имеют электрический заряд, и в слабом взаимодействии. Мезоны не стабильны и распадаются по законам слабого взаимодействия.

**Триплет пи-мезонов (пионы).** Время полураспада  $\pi^{\pm}$  — пионов  $T_{1/2} \approx 10^{-8} c$ .  
 . Время полураспада нейтрального  $\pi^0$  — пиона  $T_{1/2} \approx 10^{-16} c$ .

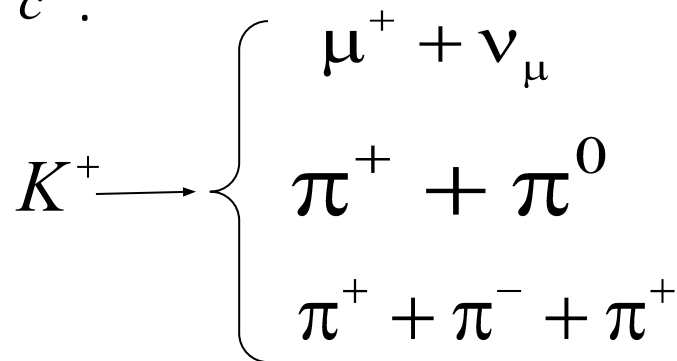
**Распад пионов происходит по схемам:**



**Триплет K-мезонов (каоны).** Время полураспада

$K^{\pm}$  — каонов составляет  $\approx 10^{-8} c$ ,  
 $K^0$  — каонов — порядка  $10^{-8} \div 10^{-10} c$ .

Справа показаны возможные  
 схемы распада — мезона  $K^+$



# Фундаментальные взаимодействия элементарных частиц:

**Сильное, электромагнитное, слабое, гравитационное.**

В таблице 1 приведены значения безразмерной силовой константы взаимодействия  $A$  (количественная относительная оценка интенсивности взаимодействий), радиусы действия сил и среднее время жизни частиц, распадающихся за счет данного вида взаимодействия (время распада). **Интенсивности взаимодействия**

**сравниваются при одном и том же расстоянии между частицами, равном  $10^{-15}$  м.**

| Взаимодействие                   | Сильное    | Электромагнитное | Слабое          | Гравитационное |
|----------------------------------|------------|------------------|-----------------|----------------|
| Константа взаимодействия ( $A$ ) | $1$        | $10^{-2}$        | $\cdot 10^{-6}$ | $10^{-38}$     |
| Радиус действия, $R$ , м         | $10^{-15}$ | $\infty$         | $10^{-18}$      | $\infty$       |
| Время распада, с                 | $10^{-23}$ | $10^{-16}$       | $10^{-8}$       |                |

Электрослабое взаимодействие

# Сильное взаимодействие

**Сильное взаимодействие** обуславливает связь протонов и нейтронов в ядрах атомов путем обмена виртуальными мезонами (пионами).

**Схема обмена:**  $p^+ - \pi^+ \rightarrow n$  (испускание виртуального пиона протоном и превращение его в нейтрон) и  $n - \pi^+ \rightarrow p^+$  (поглощение виртуального пиона нейтроном и превращение его в протон).

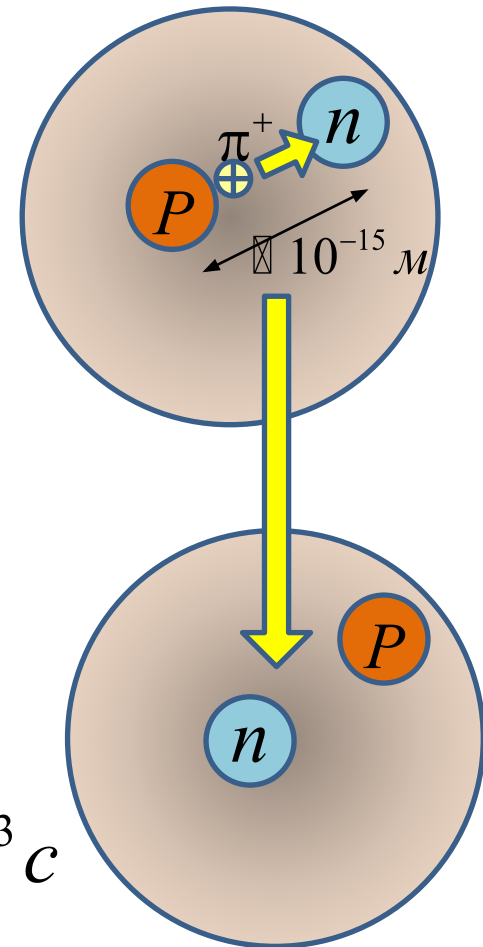
Аналогично происходит обмен  $\pi^-$  — пионами, когда они испускаются нейтронами и поглощаются протонами и обмен  $\pi^0$  — пионами между нейтронами.

## Частицы, обладающие сильным взаимодействием, получили название адронов.

Их общее число превышает 450.

**Сильные взаимодействия** проявляются и в высокоэнергичных столкновениях частиц (при энергиях  $\geq 100$  МэВ), при которых происходит рождение новых частиц.

**Характерное время взаимодействия**  $\approx 10^{-23}$  с





# Электромагнитное взаимодействие

*Электромагнитное взаимодействие* в 100 раз слабее сильного.

Это взаимодействие между заряженными частицами; между частицами, которые обладают магнитными моментами.

Все атомные явления сводятся к электромагнитному взаимодействию электронов между собой и с ядром.

Переносчиком электромагнитного взаимодействия в квантовой теории поля является **виртуальный фотон** – **квант электромагнитного поля**.

# Слабое

## взаимодействие

В слабом взаимодействии участвуют все частицы за исключением фотона, оно ещё более короткодействующее, чем сильное:

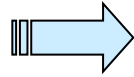
Время распада за счет слабого взаимодействия  $\tau \approx 10^{-8} \text{ с}$

Несмотря на свою слабую интенсивность и короткодействующий характер, слабое взаимодействие играет очень важную роль в природе. Оно ответственно за все виды распада, за распады **мюонов, пионов** и других частиц, за все процессы взаимодействия **нейтрино** с веществом, за реакции, протекающие на Солнце и других звездах.

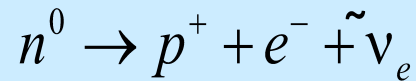
Наблюдаемые в экспериментах особенности распада частиц нельзя было объяснить ни электромагнитным, ни гравитационным, ни сильным взаимодействиями. Это привело к необходимости введения еще одного фундаментального

# Примеры реакций за счет слабого взаимодействия.

$\beta$ -распад



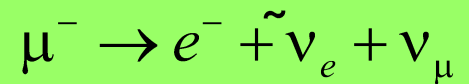
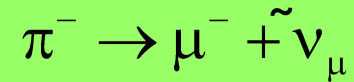
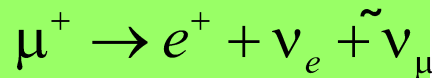
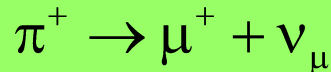
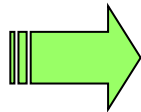
Электронный распад



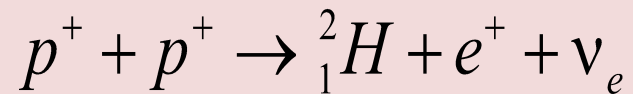
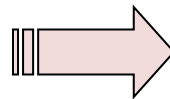
Позитронный распад



Распад пионов и мюонов



Синтез дейтерия  ${}^2_1H$



Эта реакция запускает цепочку ядерных реакций синтеза на Солнце, в результате которых образуется гелий и электронное нейтрино.

# Ядерные реакции с участием

**нейтрино** в ядерных реакциях нейтрино различных сортов **участвуют только в паре с соответствующими лептонами.**

Так, например, мюонное нейтрино  $\nu_\mu$  при взаимодействии с веществом рождает только отрицательные мюоны :

$$\nu_\mu + N \rightarrow \mu^- + \dots$$

$$\mu^+, e^\pm, \tau^\pm.$$

и не могут рождать лептоны:

Эта закономерность нашла свое отражение в присвоении «легким» частицам (лептонам) **«внутреннего» квантового числа (лептонного заряда):**

**электронный**  $L_e$ , **мюонный**  $L_\mu$  и **таонный**  $L_\tau$  .

# Электрослабое взаимодействие.

В период с конца 60-х по начало 70-х годов 20-го века была создана теория, объединяющая электромагнитное и слабое взаимодействия. Создатели теории: американские физики Ш. Глешоу, С. Вайнберг и пакистанский физик А. Салам.

В теории электрослабого взаимодействия электромагнитное поле и поле слабого взаимодействия – разные компоненты одного поля, с которым связаны четыре кванта-переносчика взаимодействия  $Z^0$  – фотон, две заряженные частицы  $W^\pm$  и нейтральная частица  $Z^0$  (промежуточные бозоны).

Все эти частицы имеют спин, равный единице ( в единицах  $\hbar$  ), и являются бозонами. Теория предсказывала для  $W^\pm$  и  $Z^0$  промежуточных бозонов значения  $m_W \approx 80 \text{ ГэВ}$  и  $m_Z \approx 90 \text{ ГэВ}$ .

В 1983 году эти бозоны были обнаружены экспериментально. Оказалось, что

$$\tau \approx 3 \cdot 10^{-25} \text{ с}$$

Эти бозоны нестабильны, их время жизни

## Переносчики взаимодействия

**Переносчиком электромагнитного взаимодействия** являются **фотоны**. Взаимодействие заряженных частиц  $A$  и  $B$  описывается как два последовательных процесса: (1) излучение фотона частицей  $A$  и (2) поглощение этого фотона частицей  $B$ .

**Переносчиками слабого взаимодействия** являются **промежуточные бозоны**  $W^{\pm}, Z^0$ . Например, - распад нейтрона - превращение нейтрона в протон ( $\rightarrow p + e^{-} + \tilde{\nu}_e$ ) в электрослабом взаимодействии происходит в две стадии (1)  $n \rightarrow p + W^{-}$  (рождение промежуточного бозона) и его распад (2)  $W^{-} \rightarrow e^{-} + \tilde{\nu}_e$ .

Рождение  $Z^0$  - бозона или обмен такими бозонами происходит без изменения заряда частиц. В этом смысле  $Z^0$  - бозон – **аналог**

**фотона.**

Электромагнитное и слабое объединяются в электрослабое взаимодействие  $\approx 10^{-17}$  м на очень малых расстояниях и меньше, на которых вступает в игру обмен массивными промежуточными бозонами.

**Гравитационное взаимодействие** – самое слабое из всех фундаментальных взаимодействий. Это взаимодействие испытывают все частицы без исключения, но в ядерных реакциях оно не имеет существенного значения. По-видимому, из всех фундаментальных сил природы гравитация отличается особым статусом.

Другие силы действуют в пространстве-времени, которое служит простымместищем физических событий. Гравитация скорее представляет собой искажение самого пространства-времени. С точки зрения А.Эйнштейна, гравитационное поле – это «кривизна» пространства-времени.

# Квантовая гравитация

**Квантовая гравитация** – объединение в одну теорию специальной теории относительности, эйнштейновской теории гравитации и квантовой механики. Квантовый мир никогда не находится в состоянии покоя. Например, квантовый осциллятор совершает нулевые колебания в основном состоянии с наименьшей энергией – даже при температуре  $K$ , значения электромагнитных полей непрерывно флуктуируют в вакууме. В квантовой гравитации кривизна пространства-времени и даже сама его структура тоже должны флуктуировать (совершать нулевые колебания). Естественный масштаб для квантовой гравитации – это система единиц, введенная еще М. Планком: длина, время, масса, энергия:

$$l_{пл} = \sqrt{\hbar G/c^3} \approx 10^{-35}$$

$$t_{пл} = l_{пл} / c \approx 10^{-43}$$

$$m_{пл} = \sqrt{\hbar c/G} \approx 10^{-8}$$

$$E_{пл} = m_{пл} c^2 \approx 10^{28}$$

Частицы, ассоциируемые с квантованием слабого гравитационного поля, получили название **«гравитон»**. Обычное вещество, даже если это целая галактика, почти абсолютно прозрачно для гравитонов. Только при планковских энергиях они могут заметно взаимодействовать с веществом.



## О квантовых числах адронов: Барионное, Странность, Изотопический спин.

Общими характеристиками всех элементарных частиц являются масса  $m$ , электрический заряд  $Q$ , время жизни  $\tau$  и спин  $M_s$ .

Накопление экспериментальных данных и их систематизации привело к новым закономерностям реакций между элементарными частицами, разнообразию их распадов и взаимопревращений.

Теоретические исследования элементов симметрии в мире элементарных частиц, возможность их группировки в мультиплеты и объяснения наблюдаемых явлений привело к появлению новых дискретных квантовых чисел элементарных частиц, описывающих их свободу преобразований в особых внутренних пространствах.

## Барионный заряд (барионное квантовое число)

**Барионы** – адроны с полуцелым спином (ферми-частицы).

К барионам относятся **нуклоны** (дублет из протона и нейтрона) и **гипероны** (синглет, триплет). **Все барионы, кроме протона, не стабильны.**  $\tau \approx 10^{-10} \div 10^{-19} \text{ с}$

**Гипероны** (время жизни  $\tau \approx 10^{-10} \div 10^{-19} \text{ с}$ ) распадаются с образованием нуклонов и легких частиц: пионов, электронов, нейтрино и фотонов. Спин всех гиперонов равен  $3/2$  исключением  $1/2$

Для барионов вводится барионный заряд  $B$  (барионное квантовое число): для барионов  $B = 1$ , для антибарионов  $B = -1$ , для всех остальных частиц  $B = 0$ .

**Во всех взаимодействиях элементарных частиц суммарный барионный заряд сохраняется:**

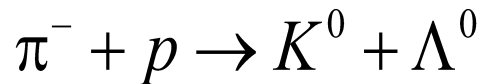
$$\sum_i B_i = \text{const}$$

В нерелятивистской ядерной физике закон сохранения барионного заряда становится законом сохранения числа нуклонов, то есть сохранения массового числа  $A$ .

# Странные

## адроны

Такие частицы, как  $K$ -мезоны и гипероны  $\Lambda$ ,  $\Sigma$ , относятся к группе **странных частиц**. Странность (необычность) поведения этих частиц заключалась в том, что рождались они в сильных взаимодействиях с характерным временем  $\sim 10^{-23}$  с, а время жизни их оказалось порядка  $10^{-8} \div 10^{-10}$  с, что указывало на распад в результате слабых взаимодействий. Было непонятно, почему странные частицы являются «долгожителями» и что им мешает распадаться путем сильного взаимодействия. Пример рождения и распада странных частиц:



**Рождение:**



**Распад:**

В рождении и в распаде  $\Lambda^0$  - гиперона участвуют одни и те же частицы, и было удивительно, что **характерные времена и вероятности процессов столь различны.**

## Странность. Закон сохранения странности.

В дальнейшем было выяснено, что **странные частицы рождаются только парами**. Чтобы объяснить запрет рождения одной странной частицы, сильно взаимодействующим частицам присвоили **новое квантовое число (заряд)  $S$**  – странность. Для  $K$ -мезонов  $S = +1$ , для  $\Lambda^0$  - и  $\Sigma$  - гиперонов  $S = -1$ , для  $\Xi$ -гиперона  $S = -2$ .

**Закон сохранения странности:**

**В процессах сильного и электромагнитного**

**взаимодействий**

**, то есть суммарное значение странности по всем адронам сохраняется.**

**В слабых взаимодействиях странность может не сохраняться.**

# Мультиплеты. Изотопический спин

Группы частиц с почти одинаковыми массами называются **мультиплетами**.

**Нуклоны** образуют дублет (мультиплет из двух частиц). Еще в 1932 г. Гейзенберг выдвинул гипотезу, что **протон и нейтрон – разные состояния одной и той же частицы, названной им нуклоном**.

Среди гиперонов имеется  $\Lambda^0$  – синглет (одна частица), триплет (три частицы с разными зарядами). О триплетных мезонах говорилось ранее.

Сильновзаимодействующие частицы – адроны – разбиваются на группы:  $(p, n)$ ,  $(\pi^+, \pi^0, \pi^-)$ ,  $(K^+, K^0, K^-)$ ,  $(\Sigma^+, \Sigma^0, \Sigma^-)$ , и другие.

Частицы в каждой группе имеют **примерно одинаковые массы и одинаковые квантовые числа, такие как барионное число  $B$ , спин  $J$ , странность  $S$ , ..., но разный электрический заряд**.

# Изотопический спин.

Для объяснения закономерностей в мультиплетах вводится **квантовое число** , подобное спину электрона, которое называется **«изотопическим спином»**.

Изотопический спин характеризуется абсолютным значением «вектора»  $I$  и его проекцией на одну из осей некоторого **фиктивного, воображаемого пространства**.  
(Проекция  $I_3$ ), как и проекция обычного спина, принимает значений.

$$I = 1/2$$

Например для нуклонов квантовое число  $I_3 = +1/2$   
а проекции в единицах  $I_3$  равны для протона и для нейтрона.

# Кварковая модель адронов

Большое количество адронов и их разнообразие не могло вызвать сомнений об их «элементарности». Появилась гипотеза: все адроны построены из фундаментальных, первичных частиц, которые получили название: «кварки».

В настоящее время установлено, что существует **шесть типов кварков**:

|                                                         |                                                                     |                                                                 |
|---------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| Верхний (u) ( <b>up</b> )<br>Нижний (d) ( <b>down</b> ) | Странный (s) ( <b>strange</b> )<br>Очарованный (c) ( <b>charm</b> ) | Красивый (b) ( <b>beauty</b> )<br>Правдивый (t) ( <b>true</b> ) |
|---------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|



# Основные положения кварковой модели строения адронов.

**1. Адроны имеют сложную внутреннюю структуру и являются связанными системами из фундаментальных частиц – кварков.**

Самое многочисленное семейство элементарных частиц - это адроны, их количество более 450.

**Большинство этих частиц с характерным временем жизни  $\tau \approx 10^{-23} \text{ с}$  распадается на другие адроны из-за сильных взаимодействий.**

Распады других долгоживущих частиц, у которых  $\tau \approx 10^{-8} \div 10^{-13} \text{ с}$ , обусловлены слабыми взаимодействиями.

**Понятие «элементарная частица» для семейства адронов утратило свое первоначальное значение.**

В 1964 г. американские физики М. Гелл-Манн и Д. Цвейг выдвинули гипотезу о существовании в природе фундаментальных частиц, которые получили название «**кварки**». Кварки обладают необычными свойствами, они имеют дробные значения электрического и барионного зарядов.

**Гипотеза кварков позволила понять внутреннюю структуру уже известных адронов и предсказать существование новых**



Теория электрослабого взаимодействия рассматривает 12 разных типов **фундаментальных фермионов** : **6 типов кварков** и **6 типов лептонов**, которые разбиваются на 3 схожие группы, именуемые **поколениями**.

| Частицы        | Поколения         |              |               | Электрический заряд |
|----------------|-------------------|--------------|---------------|---------------------|
|                | I                 | II           | III           |                     |
| <b>Лептоны</b> | $\nu_e$           | $\nu_\mu$    | $\nu_\tau$    | 0                   |
|                | $e$<br>(электрон) | $\mu$ (мюон) | $\tau$ (таон) | -1                  |
| <b>Кварки</b>  | u                 | c            | t             | +2/3                |
|                | d                 | s            | b             | -1/3                |

# Ароматы кварков.

Существует не менее 6 типов кварков ( и столько же антикварков), каждый из которых является носителем определенного **квантового числа (заряда) – адронного аромата**.

Носители изотопических ароматов: для  $u$ -кварка  $I_3 = +1/2$  , для  $d$ -кварка  $I_3 = -1/2$  .

Другие кварки являются носителями **своего аромата** (таблица ), например  $t$ -кварк – носитель истинности (правды)  $t=+1$ .

**Антикварки отличаются от кварков противоположными значениями всех зарядов (ароматов).**

Например,  **$s$ -кварк** имеет электрический заряд  $Q_s = -1/3$  , барионный  $B_s = +1/3$  , значение странности  $S = -1$  , остальные ароматы у него заряд  $I_3 = 0, C = 0, b = 0, t = 0$

отсутствуют

Для **анти- $s$ -кварка**  $Q_s = +1/3$  ;  $B_s = -1/3$  ;  $S = +1$  ;

остальные ароматы отсутствуют.

| <b>Кварк</b>                 | <b>Верхний</b><br><i>u-кварк</i><br>(up) | <b>Нижний</b><br><i>d-кварк</i><br>(down) | <b>Странный</b><br><i>s-кварк</i><br>(strange) | <b>Очарования</b><br><i>c-кварк</i><br>(charm) | <b>Красоты</b><br><i>b-кварк</i><br>(beauty) | <b>Правды</b><br><i>t-кварк</i><br>(true) |
|------------------------------|------------------------------------------|-------------------------------------------|------------------------------------------------|------------------------------------------------|----------------------------------------------|-------------------------------------------|
| <b>Масса (МэВ)</b>           | <b>300</b>                               | <b>300</b>                                | <b>500</b>                                     | <b>1500</b>                                    | <b>5000</b>                                  | <b>178000</b>                             |
| <b>Заряд Q</b>               | $+\frac{2}{3}e$                          | $-\frac{1}{3}e$                           | $-\frac{1}{3}e$                                | $+\frac{2}{3}e$                                | $-\frac{1}{3}e$                              | $+\frac{2}{3}e$                           |
| <b>Изотопический аромат</b>  | $I_3 = +1/2$                             | $I_3 = -1/2$                              |                                                |                                                |                                              |                                           |
| <b>Странность</b>            | $S = 0$                                  |                                           | $S = -1$                                       | $S = 0$                                        |                                              |                                           |
| <b>Очарование</b>            |                                          |                                           |                                                | $C = +1$                                       |                                              |                                           |
| <b>Заряд красоты</b>         |                                          |                                           |                                                |                                                | $b = +1$                                     |                                           |
| <b>Заряд правды (истины)</b> |                                          |                                           |                                                |                                                |                                              | $t = +1$                                  |
| <b>Барионный заряд</b>       | $B = 1/3$                                |                                           |                                                |                                                |                                              |                                           |

# Структура адронов.

Изучение состава и свойств изотопических групп (семейств) позволило установить, что все мезоны состоят из кварка ( $q$ ) и антикварка ( $\bar{q}$ ) и имеют структуру типа ( $q\bar{q}$ ),

а все известные барионы - структуру ( $q_1q_2q_3$ ), а антибарионы - структуру ( $\bar{q}_1\bar{q}_2\bar{q}_3$ ). Барионный заряд барионов равен  $B = +1$  (у антибарионов  $B = -1$ ), поэтому из их кварковой структуры следует, что кварки имеют дробное значение барионного заряда  $B_q = 1/3$  (у антикварков  $B_{\bar{q}} = -1/3$ ).

Электрический заряд кварков тоже дробный (в единицах элементарного заряда  $e$ ):  $2/3e$  или  $-1/3e$ .

## Только с помощью таких необычных свойств кварков можно объяснить квантовые числа и свойства адронов.

Кварки являются фермионами: спин всех кварков равен  $1/2$ . Ориентацию спинов ниже будем указывать стрелками:  $\uparrow$  - спин «вверх»,  $\downarrow$  - спин «вниз». У мезонов барионный заряд  $B=0$ , поэтому они могут состоять только из кварка и антикварка. Например,

$$\pi^+ = \bar{u}d(\uparrow\downarrow) \quad \pi^- = \bar{d}u(\uparrow\downarrow) \quad \pi^0 = (1/\sqrt{2})(\bar{u}u - \bar{d}d)$$

Для нейтрального  $\pi^0$  - мезона комбинации  $\tilde{u}u$   $\tilde{d}d$  равновероятны, поэтому выбрана их линейная суперпозиция.

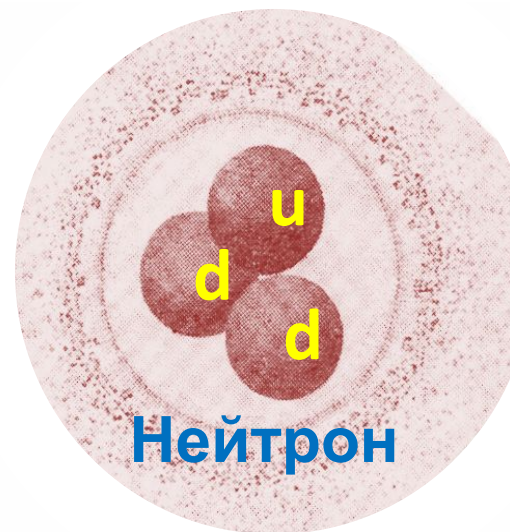
В структуре  $K$ -мезонов присутствует странный  $s$  - кварк:

$$K^+ = \tilde{u}s(\uparrow\downarrow) \quad K^0 = \tilde{d}s(\uparrow\downarrow) \quad K^- = \tilde{u}s(\downarrow\uparrow)$$

Кварковый состав некоторых барионов приведен в таблице, где также указаны электрический заряд и проекция изотопического спина.

| Частица                             | p     | n     | $\Lambda^0$ | $\Sigma^+$ | $\Sigma^0$ | $\Sigma^-$ | $\Omega^-$ |
|-------------------------------------|-------|-------|-------------|------------|------------|------------|------------|
| Электрический заряд $Q$             | +1    | 0     | 0           | +1         | 0          | -1         | -1         |
| Проекция изотопического спина $I_3$ | 1/2   | -1/2  | 0           | +1         | 0          | -1         | -1         |
| Кварковый состав                    | u u d | u d d | u d<br>s    | u u s      | u d s      | d d s      | s s s      |

# Кварквая структура протона и нейтрона



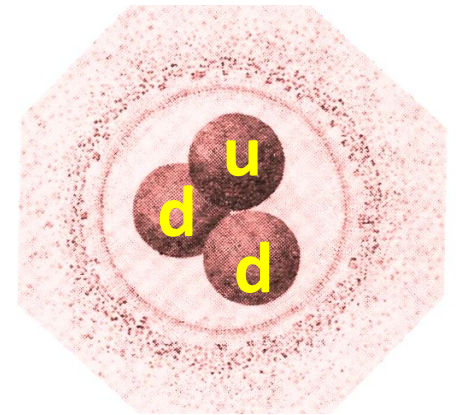
# Модель нейтрона в виде трех кварков плененных в «пузырьке» облаком

Кварков. Их состав нейтрона ( $udd$ ) обеспечивает его электронейтральность и спин, равный  $\frac{1}{2}$ .

Из нейтрона, как и из других адронов, кварки не вылетают даже при самых сильных столкновениях. Они не могут существовать в свободном состоянии, не могут «жить» друг без друга. Невозможность выделения кварков из адронов называют словом **конфайнмент** (от английского *confinement* – пленение, тюремное заключение, ограничение свободы).

Пока не существует ясного физического объяснения этого явления. Интерпретация конфайнмента сводится к следующему.

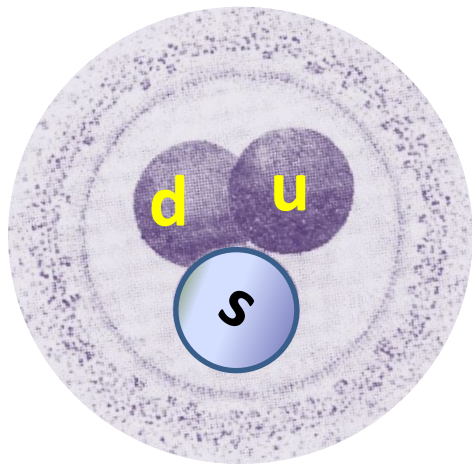
В ускорителе на встречных пучках при больших энергиях сталкиваются электрон и позитрон. Рождается пара кварк - антикварк, которые связаны сильным и электромагнитным взаимодействиями. Но если в электродинамике сила, с которой притягиваются два противоположных заряда убывает с расстоянием, то сила, скрепляющая кварк и антикварк не убывает, а остается примерно постоянной. При удалении они не освобождаются друг от друга, как, например электрон и позитрон.



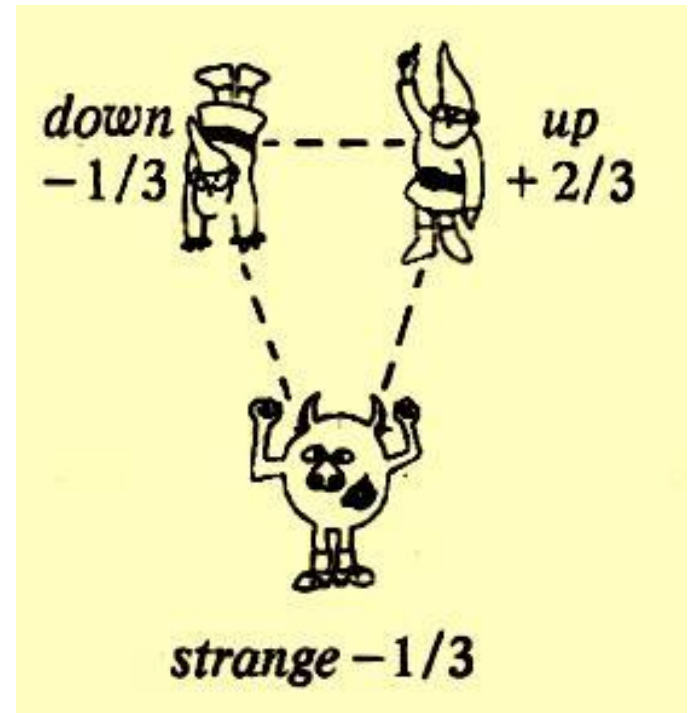
Нейтрон

$$n = udd(\uparrow\downarrow\uparrow)$$

# Кварковая структура гиперона $\Sigma_0$



Гиперон  
 $\Sigma_0$



**Гиперон** состоит из трех кварков, плененных в пузырьке облаком пионов:  
**нижний** d (*down*), **верхний** u (*up*) и **странный** s (*strange*).



## **Законы сохранения ароматов в сильных и электромагнитных взаимодействиях.**

Сильные и электромагнитные взаимодействия не могут изменить значений кварковых ароматов. В этих взаимодействиях имеют место законы сохранения ароматов, аналогичные закону сохранения барионного заряда. В процессах, обусловленных сильными и электромагнитными взаимодействиями, может происходить либо перегруппировка кварков, либо образование пар «кварк-антикварк» с определенными ароматами (или их уничтожение), либо и то и другое вместе.

**Внутри адронов кварки удерживает особое поле, которое назвали **ГЛЮОННЫМ** (от английского glue - клей).**

**Согласно квантовой механике энергия глюонного поля изменяется порциями, порция его энергии называется **ГЛЮОНОМ**, подобно порции электромагнитного поля – **фотону**.**

**Но если фотоны не взаимодействуют между собой, то **ГЛЮОНЫ** – **сильновзаимодействующие объекты**. В отличие от фотона глюон никогда не бывает реальным. **Глюон - виртуальный переносчик сильного взаимодействия**. **Это - электронейтральная частица, бозон со спином, равным 1.****

**Электрическое поле кварка распределено вокруг него сферически симметрично, как вокруг любого точечного заряда. В отличие от этого глюонное поле, создаваемое кварком, сосредоточено в узкой трубке. Между кварком и антикварком протягивается **струна глюонного поля**. Энергия растёт пропорционально расстоянию между кварком и антикварком. Чтобы их раздвинуть достаточно далеко, нужна громадная энергия.**

# Цвет кварков и глюонов. Принцип бесцветности адронов

$\Omega^-$  — гиперон: спин 3/2, должен состоять из трех s-кварков с параллельной ориентацией спинов. Они должны подчиняться принципу Паули. В гипероне три одинаковых кварка одном квантовом состоянии.

Аналогичное противоречие наблюдалось и в других гиперонах.

Чтобы снять это противоречие было введено новое **квантовое число** – **ЦВЕТ**, которое может принимать три значения для кварков:

красны

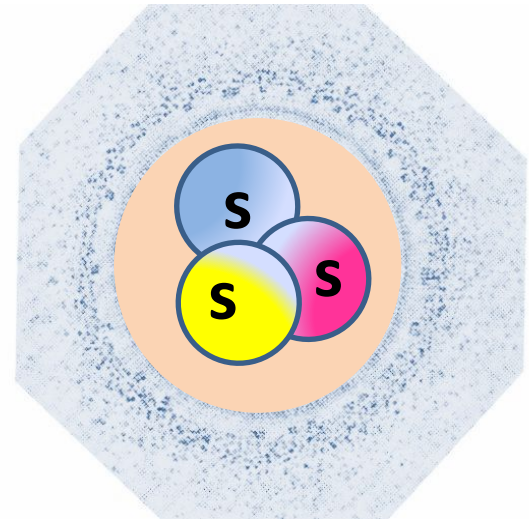
синий

желтый

й,

,

и три значения для антикварков: антикрасный, антисиний,



$\Omega^-$  — гиперон

$$\Omega^- = sss(\uparrow\uparrow\uparrow)$$

## Принцип бесцветности адронов:

Все наблюдаемые в природе адроны бесцветны, т.е. в адронах кварки разного цвета образуют бесцветные комбинации.

**Антицвет антикварка является дополнительным к цвету соответствующего кварка.** Цвет кварка изменяется при испускании и поглощении глюона. Глюоны являются переносчиками сильного взаимодействия между кварками. Всего существует 8 разновидностей глюонов, которые переносят цвет.

**Теория, описывающая динамику и взаимодействие кварков и глюонов, называется**

**КВАНТОВОЙ**

# Логическое родство квантовой электродинамики и

квантовой хромодинамики

| <b>Квантовая электродинамика</b>  | <b>Квантовая хромодинамика</b>    |
|-----------------------------------|-----------------------------------|
| <b>Электроны</b>                  | <b>Кварки</b>                     |
| <b>Электрический заряд</b>        | <b>Цвет</b>                       |
| <b>Фотоны</b>                     | <b>Глюоны</b>                     |
| <b>Атом водорода</b>              |                                   |
| <b>Позитроний</b>                 | <b>Кварконий</b>                  |
| <b>Атомные спектры</b>            | <b>Спектры адронов, резонансы</b> |
| <b>Молекулы</b>                   | <b>Атомные ядра</b>               |
| <b>Молекулярная спектроскопия</b> | <b>Ядерная спектроскопия</b>      |
| <b>Силы Ван-дер-Ваальса</b>       | <b>Ядерные силы</b>               |
| <b>Электронная плазма</b>         | <b>Кварковая плазма</b>           |
| <b>Фазовые переходы</b>           | <b>Фазовые переходы</b>           |
|                                   |                                   |

**В теории электрослабого взаимодействия лептоны и кварки – очень похожие частицы.**

**Наблюдается определенная кварк-лептонная симметрия. Просматривается наличие кварк-лептонных дублетов:**

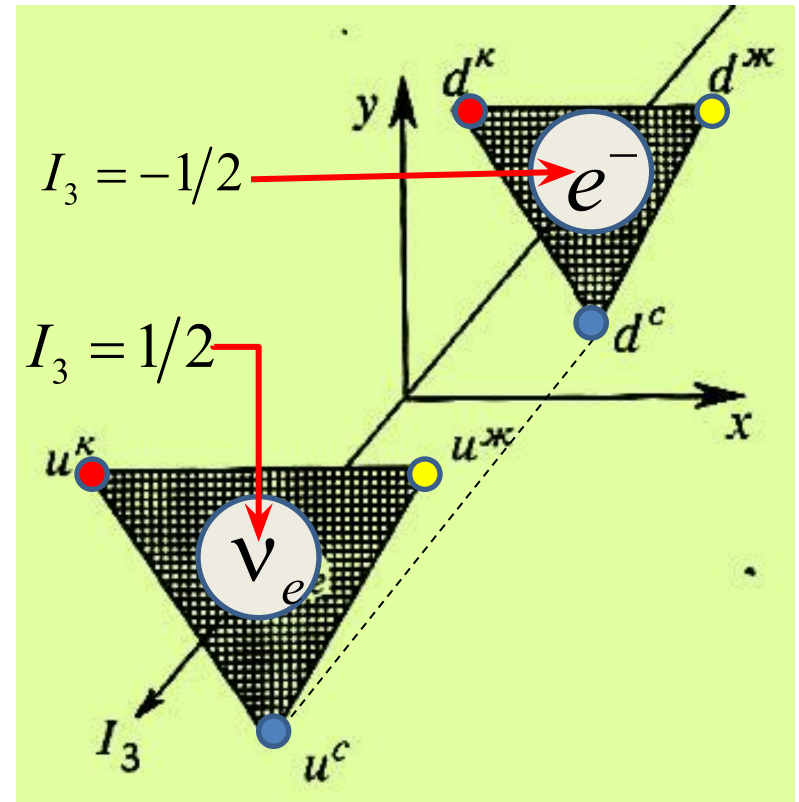
$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix} \Rightarrow \begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix} ; \quad \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu^- \end{pmatrix} \Rightarrow \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix} ; \quad \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau^- \end{pmatrix} \Rightarrow \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix} .$$

**Каждое поколение содержит четыре частицы, обладающие своим лептонным зарядом. В каждом последующем поколении масса заряженных частиц больше, чем в предыдущем.**

# Трёхмерное представление фермионов 1 – го поколения

Лептоны и значения изоспина  $I_3$  размещаются на оси  $z$  при координатах  $z = \pm 1/2$  в центре равностороннего треугольника.

Кварки находятся в вершинах треугольников

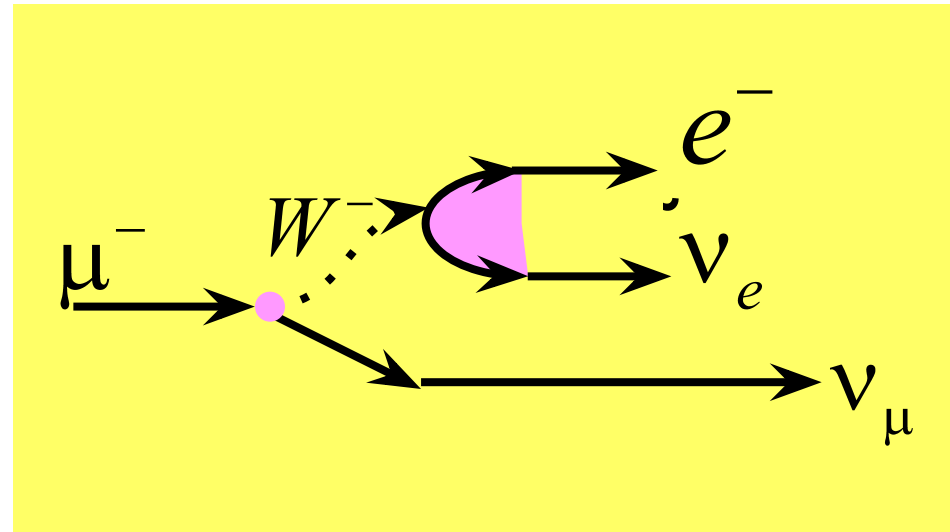


**Лептоны и кварки I – го поколения в трёхмерном представлении**

# Примеры распадов частиц в теории электрослабого взаимодействия

Распад отрицательного мюона с участием  $W^-$  –  
бесцвета

$$\mu^- = e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$$





# Стандартная модель объединения взаимодействий

Электрослабое взаимодействие и квантовая электродинамика совместно описывают сильное, электромагнитное и слабое взаимодействие кварков и лептонов и образуют теоретическую схему, которую называют **Стандартной Моделью**.

В этой модели имеется возможность объяснения возникновения массы элементарных частиц в рамках механизма **спонтанного нарушения симметрии**, предложенного **П.В.Хиггсом** в 1964г. В этом механизме постулируется **существование нейтральных бесспиновых частиц Н-бозонов Хиггса**, участвующих в появлении массы у элементарных частиц.

## Спонтанное нарушение симметрии –

самопроизвольное нарушение симметрии, связанное с тем, что состояние с нарушенной симметрией может быть энергетически более

**выгодным**. В теории электрослабого взаимодействия существуют 4 поля, электромагнитное, описывающее фотоны (спин равен 1), и три поля, описывающие безмассовые бозоны со спином, равным 1

( ). Все 4 частицы виртуальны.

Кроме того, приходится предположить существование **скалярного поля Хиггса**, которое обладает необычными свойствами – оно выпадает в «конденсат», то есть имеет постоянное слагаемое во всем пространстве.

Слова «поле описывает частицы» означают, что частицы возникают как возбужденные состояния квантованного поля.

# О нарушении симметрии

Капля воды на поверхности стола – пример нарушения симметрии. Взаимодействие молекул воды между собой и с молекулами стола допускает более симметричное состояние воды в виде тонкой пленки, но оно менее выгодно энергетически.

Кристалл твердого тела – пример нарушения симметрии относительно сдвигов и симметрии относительно поворотов. Симметрию взаимодействия полнее бы отражало хаотичное расположение атомов, как в жидкости.

Атомное ядро, представляющее собой «каплю» нуклонной жидкости – пример нарушения трансляционной (относительно сдвигов) симметрии.