

# ГЛАВА V. ФИЗИКА АТОМНОГО ЯДРА И ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

**НИУ МЭИ**

**Кафедра физики им. В. А. Фабриканта**

## I. Нуклон

Ядро атома состоит из протонов и нейтронов – *нуклонов*.  
Это одна частица в разных квантовых состояниях.

	Протон	Нейтрон
<i>Электрический заряд</i>		
<i>Масса покоя</i>		
<i>Спин</i>		
<i>Магнитный момент</i>		
<i>Время жизни (период полураспада)</i>		

## II. Состав ядра и его характеристики

**Заряд ядра:**  $Q = Ze$

( $Z$  – число протонов в ядре – порядковый номер элемента в таблице Менделеева)

**Масса ядра:**  $m = Am_1$        $A = Z + N$

( $A$  – массовое число,  $N$  – число нейтронов)

$$m_1 = \frac{m({}^{12}_6\text{C})}{12} = 1 \text{ а. е. м.} = 1,6606 \cdot 10^{-27} \text{ кг} = 931,50 \text{ МэВ}$$

– атомная единица массы

**Обозначение ядра:**  ${}^A_Z\text{X}$

**Пример:**

$${}^{40}_{19}\text{K}: A = 40, Z = 19, N = 40 - 19 = 21.$$

**Изотопы** – ядра одного химического элемента, имеющие разную массу (разные  $A$  при одинаковом  $Z$ ).

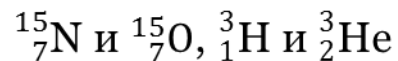
**Пример:**

**Изотопы водорода**

$${}^1_1\text{H} \text{ – протий, } T \rightarrow \infty \quad {}^2_1\text{H} = {}^2_1\text{D} \text{ – дейтерий, } T \rightarrow \infty \quad {}^3_1\text{H} = {}^3_1\text{T} \text{ – тритий, } T = 12 \text{ лет}$$

**Изобары** – ядра одинаковой массы, имеющие разный заряд (разные  $Z$  при одинаковом  $A$ ).

Примеры:



## III. Размер ядра

Радиус ядра

$$r_0 = (1,2 \div 1,3) \sqrt[3]{A} \text{ фМ}$$

Размер атома

$$r \sim 10^{-10} \text{ м} \Rightarrow r_0 \approx \frac{r}{10^5}$$

Объём ядра

$$V = \frac{4}{3} \pi r_0^3 \approx 9,2A \cdot 10^{-45} \text{ м}^3$$

Плотность ядра

$$\rho \approx 1,3 \cdot 10^{17} \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

## IV. Спин ядра

**Спин ядра**  $I$  равен сумме спинов и орбитальных моментов нуклонов.

В основном состоянии стабильных ядер  $I \leq 9/2$ . Моменты импульса большинства нуклонов в ядре компенсируют друг друга, располагаясь антипараллельно. У всех ядер с чётными числами нуклонов в основном состоянии  $I = 0$ .

## V. Масса и энергия связи ядра

$m_n$  – масса нуклона,  $m$  – масса ядра,  $m_H$  – масса атома водорода;  $m \neq \sum m_n$ !

**Энергия связи**  $W_{\text{св}}$  – работа, которую нужно совершить для полного разделения ядра на свободные нуклоны.

Полная энергия ядра  $W = mc^2$ ;

$$W_{\text{св}} = \sum m_n c^2 - mc^2 = [Zm_p + (A - Z)m_n - m]c^2$$

или  $W_{\text{св}} = [Zm_H + (A - Z)m_n - m]c^2$  с учётом массы электронов.

Дефект масс

$$\Delta = Zm_p + (A - Z)m_n - m$$

**Удельная энергия связи** – энергия связи ядра, приходящаяся на один нуклон:

$$w_{\text{CB}} = \frac{W_{\text{CB}}}{A}$$

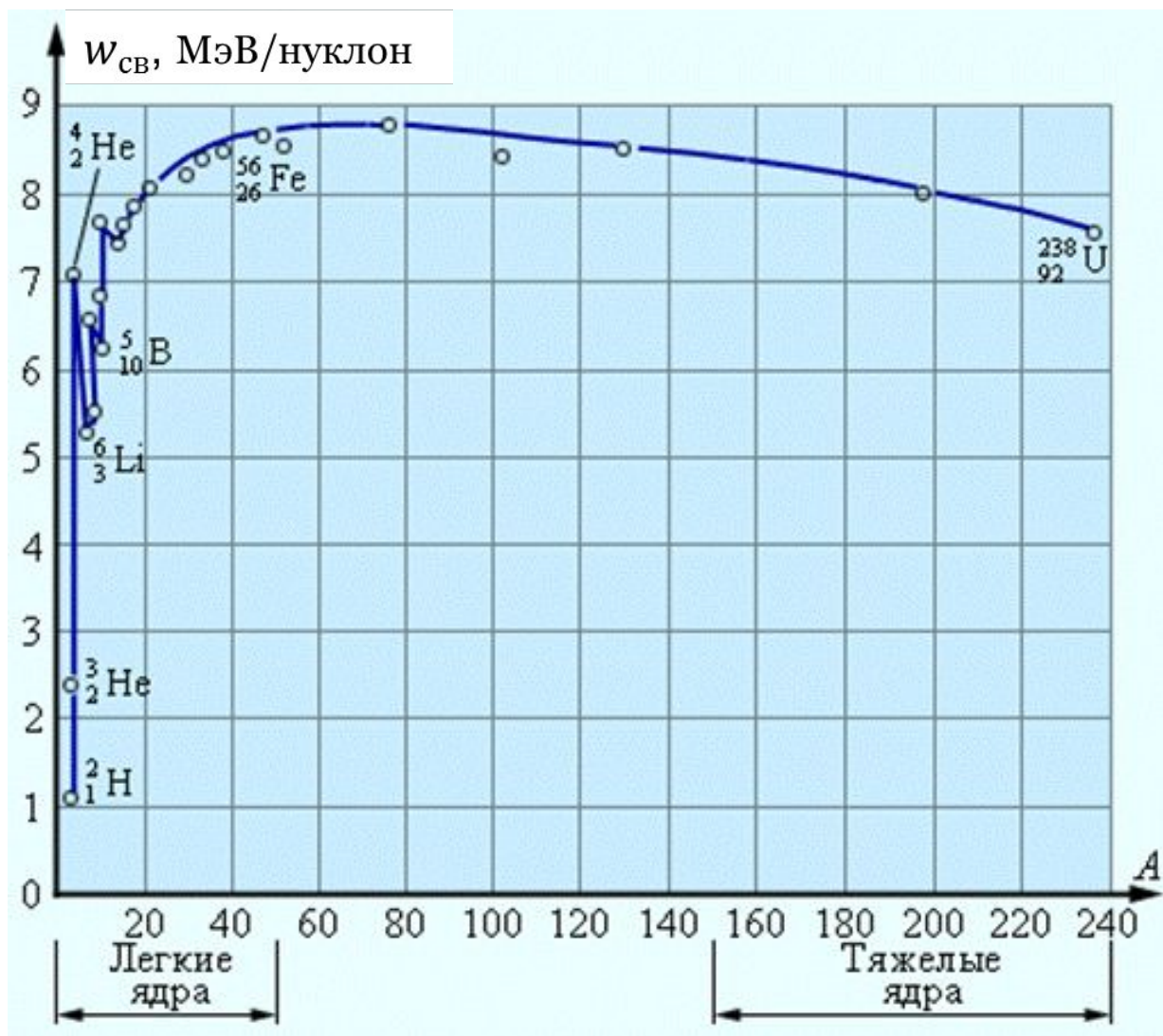
Тяжёлым ядрам энергетически выгодно *делиться* (**атомная энергия**), а лёгким – *сливаться* (**термоядерная энергия**).

**Примеры:**

При делении ядра  ${}_{92}^{235}\text{U}$  выделяется  $\sim 200$  МэВ.

При синтезе ядер гелия  ${}^2_1\text{D} + {}^3_1\text{T} \rightarrow {}^4_2\text{He}$  выделяется  $\sim 17,6$  МэВ.

Зависимость удельной энергии связи от массового числа



## VI. Ядерные силы

### Сильное взаимодействие

#### *Свойства ядерных сил*

- 1) **Притяжение**; ядерные силы  $\gg$  кулоновских сил отталкивания
- 2) **Короткодействие** ( $r \sim 10^{-15}$  м). На расстояниях  $\gg r$  притяжение нуклонов сменяется кулоновским отталкиванием.
- 3) **Зарядовая независимость**: силы взаимодействия  $p-p$ ,  $n-n$  и  $p-n$  одинаковы.
- 4) **Нецентральность**: ядерные силы не являются центральными.
- 5) **Насыщение**: каждый нуклон в ядре взаимодействует с ограниченным числом нуклонов.
- 6) Взаимодействие нуклонов наиболее эффективно, если их спины сонаправлены.



## VII. Виртуальные частицы

Частицы-переносчики – виртуальные  **$\pi$ -мезоны**.

**Виртуальные частицы** – частицы, испускание и поглощение которых происходит с кажущимся нарушением ЗСЭ.

Соотношения неопределённостей Гайзенберга:

$$\Delta W \Delta t \geq \frac{\hbar}{2} \Rightarrow \Delta t \sim \frac{\hbar}{W}, W = m_{\pi} c^2,$$

где  $m_{\pi}$  – масса  $\pi$ -мезона;  $m_{\pi} \sim 270 m_e$ .

Если поблизости от нуклона нет других сильно взаимодействующих частиц, то все испущенные нуклоном  $\pi$ -мезоны поглощаются этим же нуклоном. Одиночный нуклон окружён т. н. «нуклонной шубой». Когда два нуклона сближаются и их мезонные шубы начинают соприкасаться, создаются условия для обмена виртуальными мезонами.

## VII. Модели атомного ядра

Атомное ядро – система многих частиц. Квантовомеханическая задача многих частиц сложна для решения.

### 1. Капельная модель

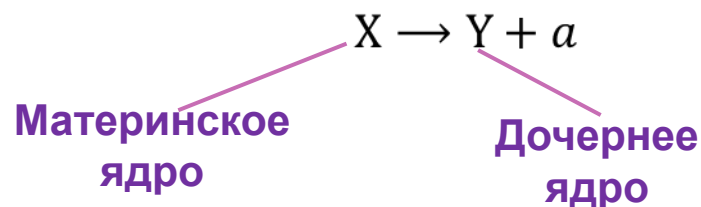
Ядро – капля заряженной несжимаемой жидкости с очень высокой плотностью. Эта модель позволяет вывести формулу для энергии связи ядра; обуславливает процесс деления ядер.

### 2. Оболочечная модель

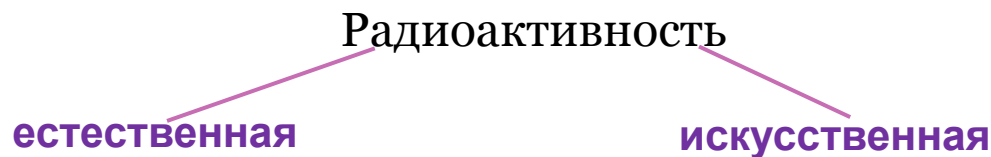
Каждый нуклон движется в поле остальных нуклонов ядра. Энергетические уровни системы заполняются с учётом принципа Паули и группируются в **оболочки**. Эта модель объясняет спины и магнитные моменты основных и возбуждённых состояний ядер.

Полностью заполненные оболочки образуют особо устойчивые структуры:  $Z, N$  или оба этих числа = 2, 8, 20, 50, 82, 126 – **магические числа**.

**Радиоактивность** – явление самопроизвольного распада атомных ядер с испусканием одной или нескольких частиц. Самопроизвольно распадающиеся ядра называются **радиоактивными**.



Радиоактивный распад происходит с выделением энергии:  $m_X > m_Y + m_a$ .



## I. Закон радиоактивного распада

Число ядер  $dN$ , распадающихся за малый промежуток времени  $dt$ , пропорционально числу ядер  $N$  и  $dt$ :

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

$\lambda$  – **постоянная распада** – характеристика радиоактивного вещества;  
 $[\lambda] = \text{с}^{-1}$

$N = N_0 e^{-\lambda t}$  – основной закон радиоактивного распада

$N_0$  – число ядер при  $t = 0$ ;  $N$  – число нераспавшихся ядер в момент времени  $t$



**Активность препарата** – число ядер, распадающихся за единичный промежуток времени:

$$\left| \frac{dN}{dt} \right| = \lambda N \quad \boxed{A = \lambda N}$$

$$[A] = \text{Бк (беккерель)} = \frac{\text{распад}}{\text{с}}$$

Внесистемная единица: **кюри** (Ки);  $1 \text{ Ки} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк}$

**Удельная активность** – активность в расчёте на единичную массу радиоактивного препарата:

$$\boxed{a = \frac{A}{m}} \quad [a] = \frac{\text{Бк}}{\text{кг}}; \frac{\text{Ки}}{\text{кг}}$$

**Период полураспада**  $T$  – время, за которое распадается половина первоначального числа радиоактивных ядер.

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda t} \Rightarrow T = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda}$$

Среднее время жизни  $\tau$ :

$$\tau = \frac{1}{N_0} \int_0^{\infty} t dN(t) = -\frac{1}{N_0} \int_0^{\infty} \lambda N dt = -\frac{N_0}{N_0} \int_0^{\infty} \lambda e^{-\lambda t} t dt = \frac{1}{\lambda} \int_0^{\infty} z e^z dz = \frac{1}{\lambda}$$

(здесь  $z = -\lambda t$ )

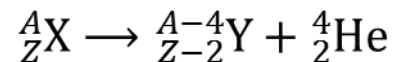
$$\tau = \frac{1}{\lambda}$$

$$T = \tau \ln 2$$

## II. $\alpha$ -распад

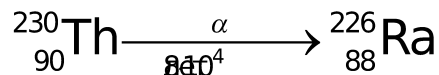
$\alpha$ -частица – ядро  ${}^4_2\text{He}$ .

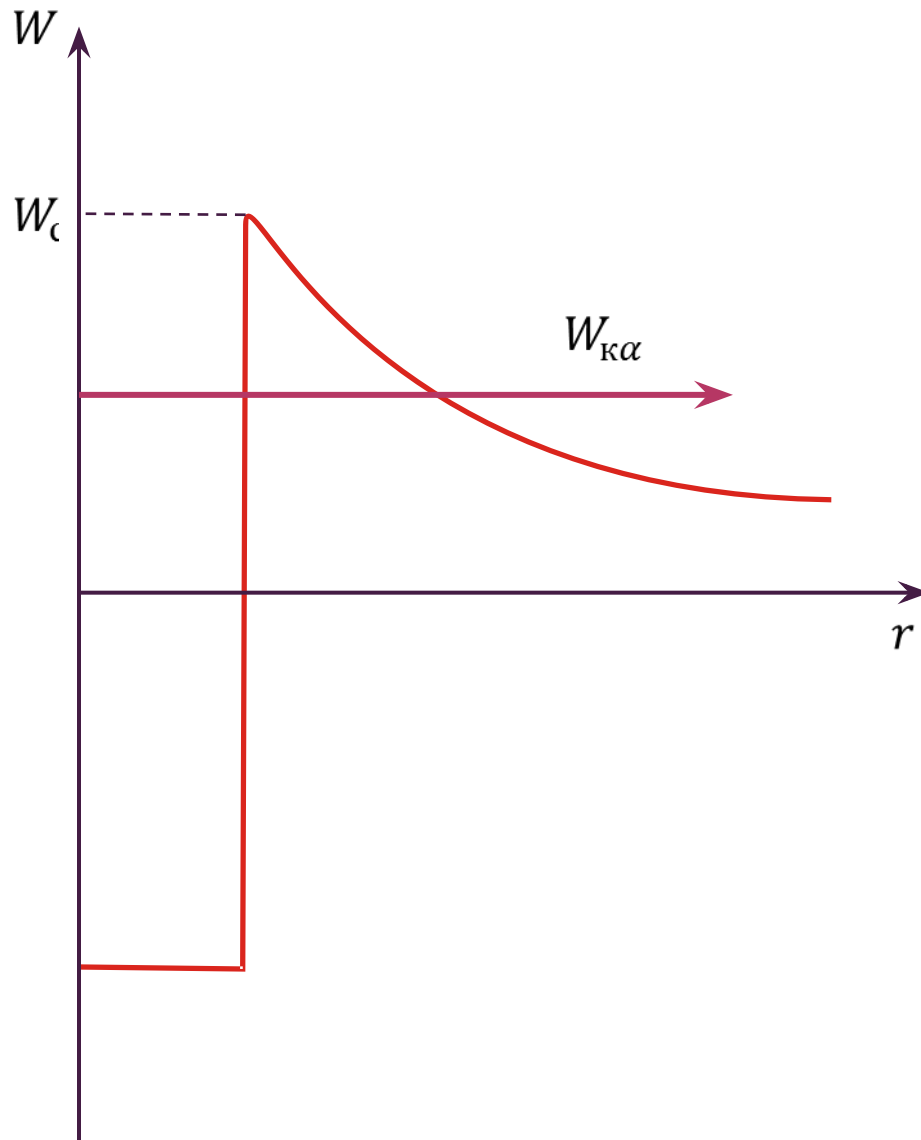
$\alpha$ -распад – самопроизвольное испускание ядром  $\alpha$ -частицы:



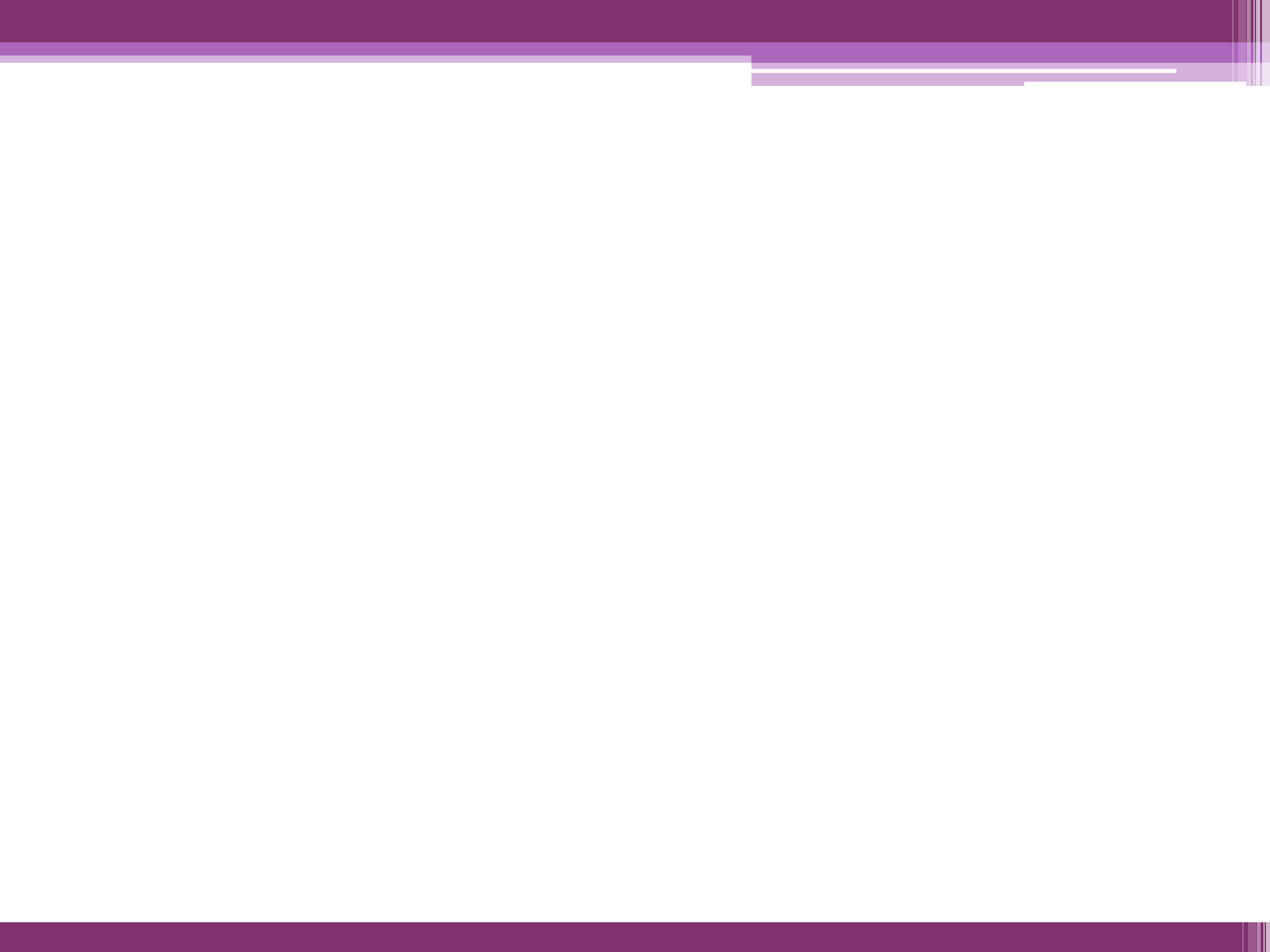
$\alpha$ -частицы испускают только тяжёлые ядра ( $Z > 82$ ). Энергия  $\alpha$ -частицы  $W_{\text{к}\alpha} \sim 1$  МэВ.

Пример:



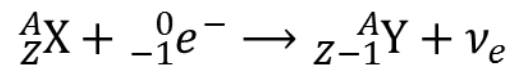


Покидая ядро,  $\alpha$ -частица преодолевает кулоновский потенциальный барьер, высота которого  $W_c > W_{\kappa\alpha}$ .  $\alpha$ -распад происходит благодаря туннельному эффекту.

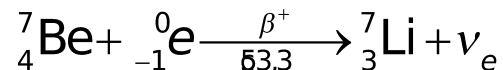




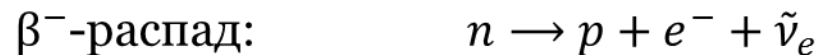
3) **K-захват** – захват ядром электрона K-оболочки



**Пример:**



$\beta$ -распад – внутринуклонный, а не внутриядерный процесс. Он обусловлен следующими процессами:

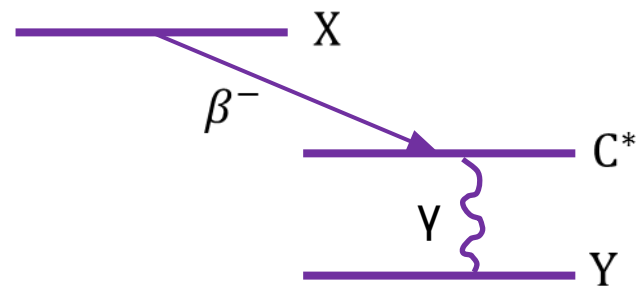


## IV. $\gamma$ -радиоактивность

**$\gamma$ -радиоактивность** – испускание  $\gamma$ -квантов возбуждённым ядром при переходе его в основное состояние.

$$W_{\gamma} = 10 \text{ кэВ} \div 5 \text{ МэВ}$$

Спектр  $\gamma$ -излучения – дискретный.



**Ядерная реакция** – процесс сильного взаимодействия атомного ядра с элементарной частицей или с другим ядром, сопровождающийся преобразованием ядер:



$a, b$  – чаще всего  $n, p, d, \alpha, \gamma$ . Ядерная реакция может иметь несколько **каналов**, которым соответствуют разные вероятности.

## I. Выход ядерной реакции

**Эффективное сечение реакции**  $\sigma$  – площадь сечения ядра  $X$ , попадая в которую, налетающая частица вызывает реакцию.

Если мишень **тонкая**, т. е. ядра не перекрывают друг друга, то доля площади  $S$  мишени, перекрытая ядрами  $X$ , равна  $\frac{\sigma n S}{S}$ , где  $n$  – число ядер на единицу площади мишени.

Вероятность реакции - **выход реакции**

$$\frac{\Delta N}{N} = P = \sigma n$$

Если мишень не тонкая, то  $P = 1 - e^{-\sigma n}$ .

$$\sigma \sim 10^{-28} \text{ м}^2; [\sigma] = \text{барн} = 1 \cdot 10^{-28} \text{ м}^2.$$

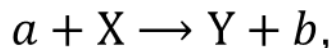
## II. Типы ядерных реакций

1) Реакции, вызываемые **медленными** частицами:



$C^*$  – **составное (промежуточное) ядро**.  $C^*$  находится в возбуждённом состоянии, время жизни  $\tau \sim 10^{-14}$  с.

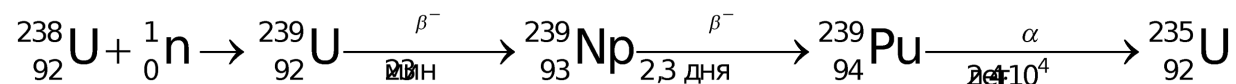
2) Реакции, вызываемые **быстрыми** частицами ( $W_a \geq 10^2$  МэВ):



Это прямая реакция.

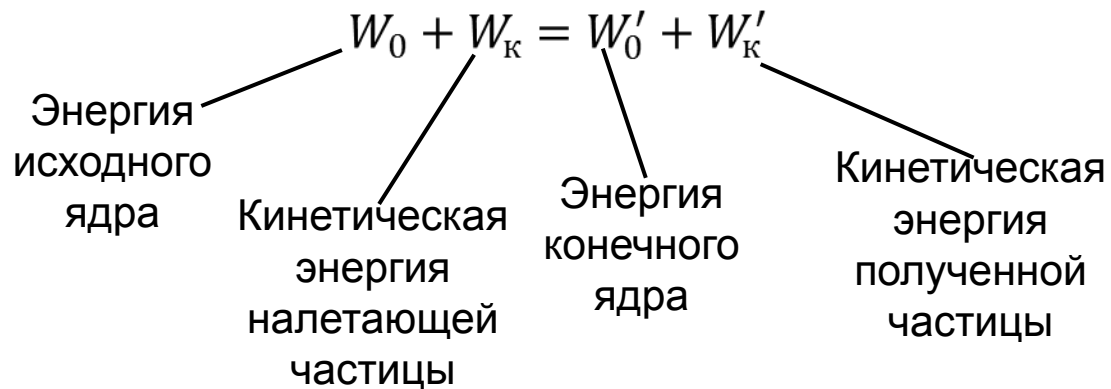
**Пример:**

### *Синтез трансурановых химических элементов*

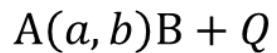


Здесь имеет место резонансный захват теплового нейтрона.

## III. Энергия реакции



$$W_0 - W'_0 = W'_K - W_K = Q \text{ — энергия реакции}$$



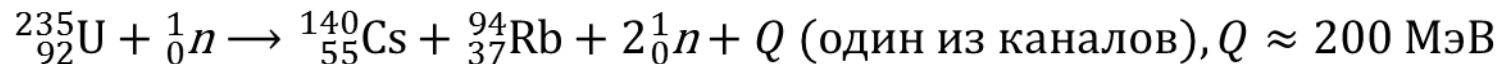
**Экзоэнергетическая реакция:**  $Q > 0$

**Эндоэнергетическая реакция:**  $Q < 0$

$$Q = \begin{cases} [(m_a + m_A) - (m_b + m_B)]c^2 \\ (\Delta_a + \Delta_A) - (\Delta_b + \Delta_B) \end{cases}$$

## IV. Реакция деления

Реакция типа 1 – ядро проходит через ряд промежуточных состояний.



При одном налетающем нейтроне образуются два. Если имеются другие исходные ядра, то возможна **цепная реакция** с лавинным возрастанием числа нейтронов.

Т. к. число выходящих из образца нейтронов пропорционально площади поверхности образца  $\sim R^2$  ( $R$  – радиус образца), а число рождающихся нейтронов пропорционально объёму образца ( $R^3$ ), то существует **критический радиус** (а также **критическая масса**): при  $R > R_{\text{кр}}$  начинается цепная реакция.

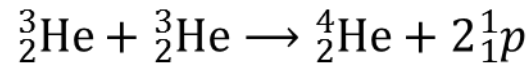
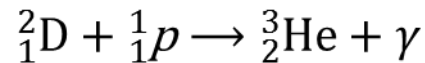
Для  ${}_{92}^{235}\text{U}$   $R_{\text{кр}} = 6$  см,  $m_{\text{кр}} = 20$  кг.

При превышении этих параметров происходит **неуправляемая реакция**, т. е. взрыв.

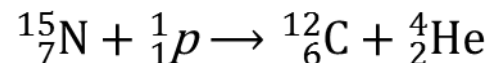
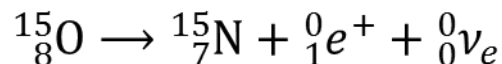
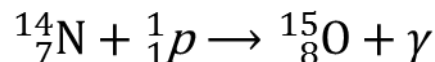
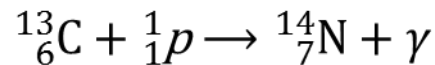
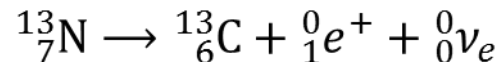
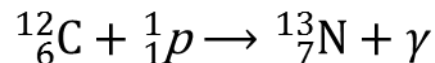
Для осуществления **управляемой реакции** нужно поддерживать число нейтронов внутри образца постоянным.

## V. Реакция синтеза

### 1) Протон-протонный цикл

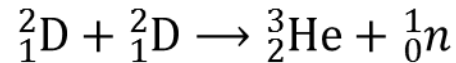
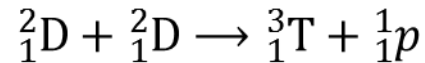
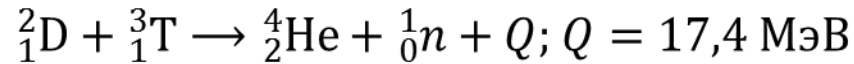


### 2) Углеродно-азотный цикл



Результат обоих циклов – превращение 4 протонов в ядро He с рождением 2 позитронов и  $\gamma$ -излучения. На 1 ядро He  $Q = 26,8$  МэВ.

з)



Реакция синтеза протекает в плазме.

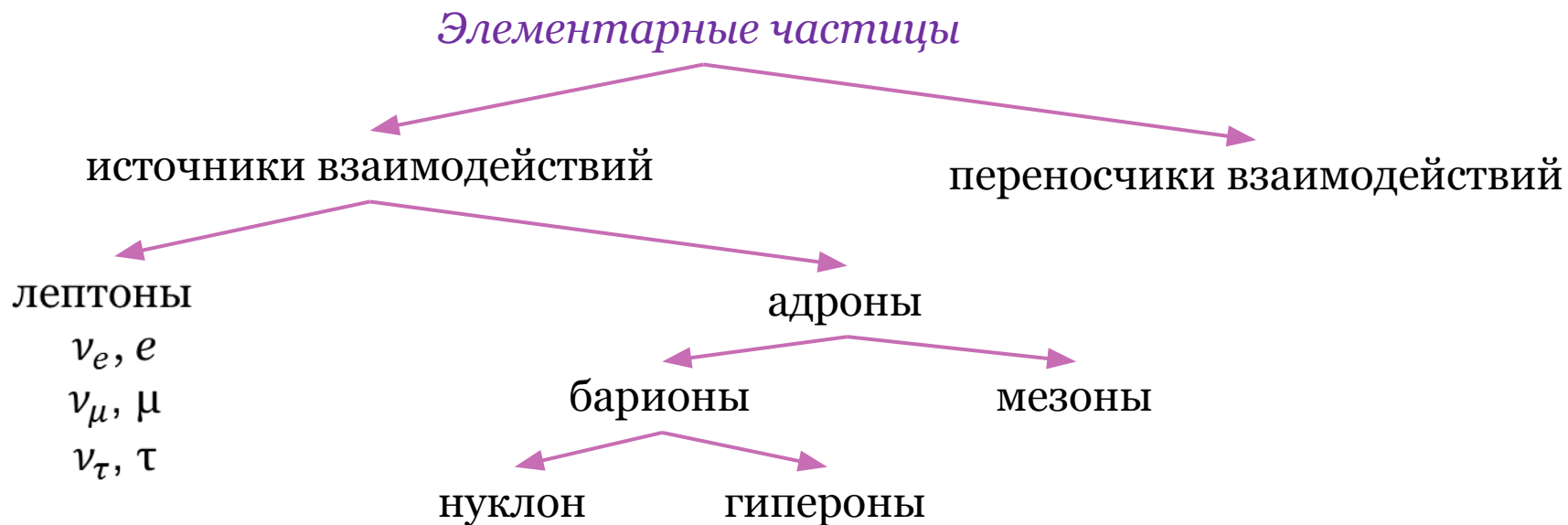
### Требования к осуществлению реакции синтеза:

- минимальная температура;
- минимальная величина  $n\tau$ , где  $n$  – концентрация исходных частиц,  $\tau$  – время удержания плазмы

Для реакции з)  $n\tau > 10^{16}$ ,  $T > 10^9$  К.

## I. Классификация элементарных частиц

**Элементарные частицы** – частицы, ведущие себя как безструктурные.





## II. Фундаментальные взаимодействия

Взаимодействие	Радиус	Относ. величина	Источники	Переносчики
<i>Гравитационное</i>	$\infty$		все	гравитон
<i>Электромагнитное</i>	$\infty$		лептоны, адроны	фотон
<i>Слабое</i>			лептоны, адроны	
<i>Сильное</i>		1	адроны	глюон

## III. Античастицы

Каждой (почти каждой) частице соответствует своя античастица.

**Античастица** отличается от частицы только знаками зарядов (электрического, лептонного, барионного, странности). Масса, спин и время жизни частицы и античастицы одинаковы.

**Истинно нейтральная частица** – та, которая совпадает со своей античастицей.

**Примеры:**

Фотон ( $\gamma$ ),  $\pi^0$ -мезон,  $\eta^0$ -мезон

**Аннигиляция** – превращение пары частица-античастица в истинно нейтральные частицы.

Обратный процесс – **рождение пары**.

Процессы аннигиляции и рождения пары происходят с соблюдением законов сохранения.

**Пример:**

$$e^+ + e^- \rightarrow 2\gamma$$

## IV. Законы сохранения

### *Законы сохранения*



#### *точные*

(выполняются для всех  
фундаментальных  
взаимодействий)

ЗСЭ

ЗСИ

ЗСМИ

ЗСЭЗ

ЗС лептонных зарядов

#### *приблизжённые*

(выполняются в некоторых  
взаимодействиях)

ЗС барионного заряда

ЗС чётности

ЗС изоспина

ЗС странности

ЗС очарования и красоты

## 1. Лептонные заряды

### Лептонный заряд

электронный

$$L_e = \begin{cases} +1 \text{ для } e^- \text{ и } \nu_e \\ -1 \text{ для } e^+ \text{ и } \tilde{\nu}_e \\ 0 \text{ для др. частиц} \end{cases}$$

мюонный

$$L_\mu = \begin{cases} +1 \text{ для } \mu^- \text{ и } \nu_\mu \\ -1 \text{ для } \mu^+ \text{ и } \tilde{\nu}_\mu \\ 0 \text{ для др. частиц} \end{cases}$$

таонный

$$L_\tau = \begin{cases} +1 \text{ для } \tau^- \text{ и } \nu_\tau \\ -1 \text{ для } \tau^+ \text{ и } \tilde{\nu}_\tau \\ 0 \text{ для др. частиц} \end{cases}$$

Примеры:

$$n \rightarrow p + e^- + \tilde{\nu}_e, p + \tilde{\nu}_\mu \rightarrow n + \mu^+$$

**Закон сохранения лептонных зарядов:** для всех процессов лептонные заряды системы сохраняются:

$$L_e = \text{const}, L_\mu = \text{const}, L_\tau = \text{const}$$

## 2. Барионный заряд

$$B = \begin{cases} +1 & \text{для барионов} \\ -1 & \text{для антибарионов} \\ 0 & \text{для др. частиц} \end{cases}$$

**Закон сохранения барионного заряда:** для всех процессов барионный заряд системы сохраняется:

$$B = \text{const}$$

**Пример:**

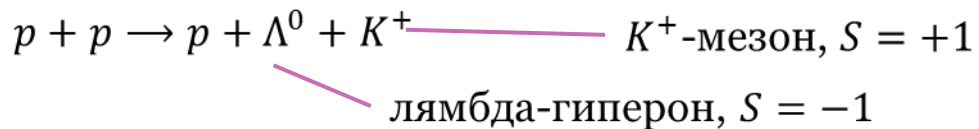
$p + p \rightarrow p + p + p + \tilde{p}$  — антипротон

## 3. Странность

**Странность**  $S$  – квантовое число, отличное от 0 для некоторых гиперонов и мезонов, распадающихся за счёт слабого взаимодействия.

**Закон сохранения странности:** в электромагнитном и сильном взаимодействиях странность сохраняется, а в слабом взаимодействии может изменяться на  $\pm 1$ .

**Пример:**



## 4. Шарм (очарование) $C$ , красота (прелесть) $b$ , истина $t$

Эти квантовые числа – аналог странности  $S$ .

**Законы сохранения шарма, красоты и истины:** в электромагнитном и сильном взаимодействиях шарм, красота и истина сохраняются, а в слабом взаимодействии могут изменяться на  $\pm 1$ .

### 5. Изоспин

Адроны, близкие по физическим свойствам, можно разбить на группы – **изотопические мультиплеты**.

*Характеристики частиц в изотопическом мультиплете:*

примерно равные  $t$

равные  $B, s, S$

различный  $Q$

равный **изотопический спин (изоспин)  $T$**

различные **проекции изотопического спина  $T_z$**

Общее число частиц в мультиплете:  $2T + 1$

Частице с большим  $Q$  соответствует большее  $T_z$ .

**Пример:**

**Нуклон:  $p + n$**

$$T = \frac{1}{2} \quad T_z(p) = +\frac{1}{2} \quad T_z(n) = -\frac{1}{2}$$

## V. Стабильные и долгоживущие адроны

### *Мезоны*

Название частицы	Обозначение	Античастица		Q	B	S	Время жизни, с	Основные каналы распада
<i>Пион</i>			139,6	+1	0	0		
			135,0	0	0	0		
<i>Каон</i>			493,7	+1	0	0		
			497,7	0	0	+1		
			497,7	0	0	+1		
<i>η-мезон</i>			548,8	0	0	0		



## Барионы

Название частицы	Обозначение	Античастица		$Q$	$B$	$S$	Время жизни, с	Основные каналы распада
<i>Протон</i>	$p$		938,3	+1	+1	0	Стабилен	
<i>Нейтрон</i>	$n$		938,3	0	+1	0	920	
<i>Лямбда</i>			1115,6	0	+1			
<i>Сигма</i>			1189,4 1192,5 1197,3		+1 +1 +1			
<i>Кси</i>			1315 1321		+1 +1			
<i>Омега</i>			1672		+1			

## VI. Лептоны

Название частицы	Обозначение	Античастица		Электр. заряд $Q$	Время жизни, с	Основные каналы распада
<i>Электрон</i>			0,511		Стабилен	
<i>Электронное нейтрино</i>			0	0	Стабильно	
<i>Мюон</i>			105,7			
<i>Мюонное нейтрино</i>			0	0	Стабильно	
<i><math>\tau</math>-лептон</i>			1784,0			
<i><math>\tau</math>-нейтрино</i>			0	0	Стабильно	

(Лептонные заряды указаны на слайде 28.)

## I. Кварки и их характеристики

Все адроны состоят из сильновзаимодействующих частиц – **кварков**.  
Кварки не наблюдаются в свободном состоянии – **конфайнмент**.

### *Характеристики кварков*

Для всех кварков: *спин*  $s = 1/2$ , *барионный заряд*  $B = 1/3$

Обозначение (аромат) кварка	Электр. заряд $Q$	Странность $S$	Шарм $C$	Красота $b$	Истина $t$
$u$		0	0	0	0
$d$		0	0	0	0
$s$			0	0	0
$c$		0	+1	0	0
$b$		0	0	+1	0
$t$		0	0	0	+1

**Антикварки** отличаются от кварков знаками  $Q, B, S, C, b, t$ .

## II. Цвет

Каждый кварк характеризуется ещё одним квантовым числом – **цвет**. Антикварк имеет цвет, дополнительный к цвету кварка.

Цвет кварка	Цвет антикварка
Жёлтый	Фиолетовый
Синий	Оранжевый
Красный	Зелёный

## III. Взаимодействие кварков и образование адронов

Сильное взаимодействие между кварками осуществляется через обмен **глюонами**.

Глюон характеризуется цветом. При испускании и поглощении глюона кварк не меняет аромат, но меняет цвет.

**Мезон = кварк + антикварк**

**Барион = 3 кварка**

**Принцип бесцветности адронов:** возможны только те сочетания кварков разных цветов, смесь которых бесцветна.

## Примеры:

$$\pi^+ : u\bar{d} (\downarrow\uparrow) \quad p : uud (\downarrow\uparrow\downarrow)$$

$$\pi^- : \bar{u}d (\downarrow\uparrow) \quad n : udd (\downarrow\uparrow\downarrow)$$

Распад лептонов и кварков, несохранение ароматов и вследствие этого нарушение закона сохранения барионного заряда, странности и др. происходит благодаря слабому взаимодействию.

## Пример:

Распад нейтрона  $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$

сводится к  $\beta$ -распаду  $d$ -кварка

$$d \rightarrow u + e^- + \bar{\nu}_e$$

# Использованная литература

1. Окунь Л. Б. Элементарное введение в физику элементарных частиц. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006.
2. Джанколи Д. Физика: В 2-х т. Т. 2: Пер. с англ. – М.: Мир, 1989.
3. Кобзарев И. Ю., Манин Ю. И. Элементарные частицы. Диалоги физика и математика. – 2-е изд., испр. – М.: ФАЗИС, 2000.
4. Мухин К. Н. Занимательная ядерная физика. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1985.
5. Савельев И. В. Курс физики: Учеб.: В 3-х т. Т. 3: Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твёрдого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989.
6. Физические величины: Справочник. Под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. – М.: Энергоатомиздат, 1991.