

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).

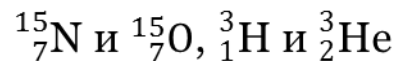
Пример:

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:

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

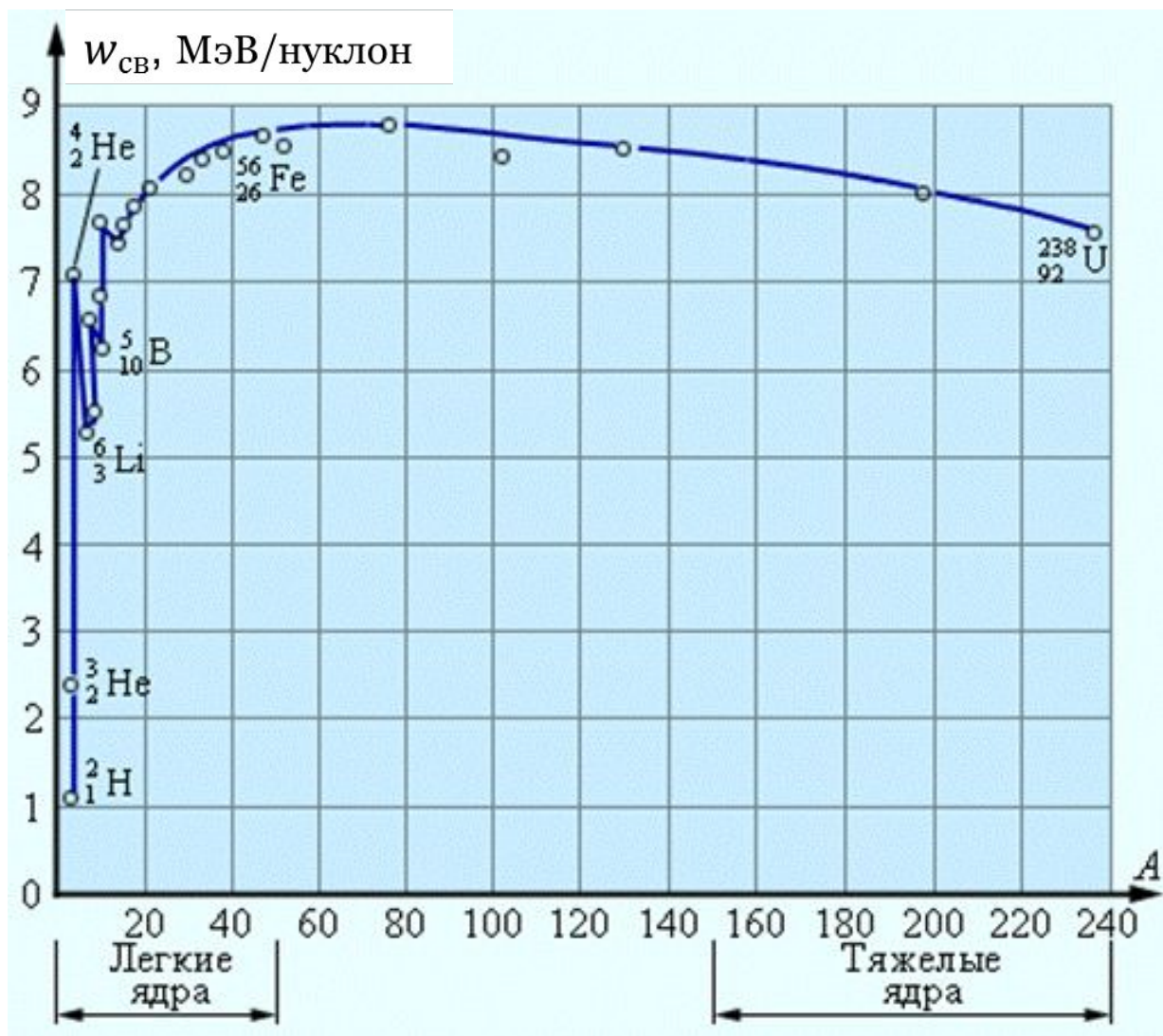
Тяжёлым ядрам энергетически выгодно *делиться* (**атомная энергия**), а лёгким – *сливаться* (**термоядерная энергия**).

Примеры:

При делении ядра ${}_{92}^{235}\text{U}$ выделяется ~ 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 **π -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_{π} – масса π -мезона; $m_{\pi} \sim 270 m_e$.

Если поблизости от нуклона нет других сильно взаимодействующих частиц, то все испущенные нуклоном π -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

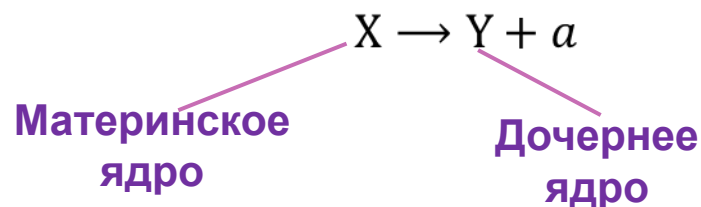
Ядро – капля заряженной несжимаемой жидкости с очень высокой плотностью. Эта модель позволяет вывести формулу для энергии связи ядра; обуславливает процесс деления ядер.

2. Оболочечная модель

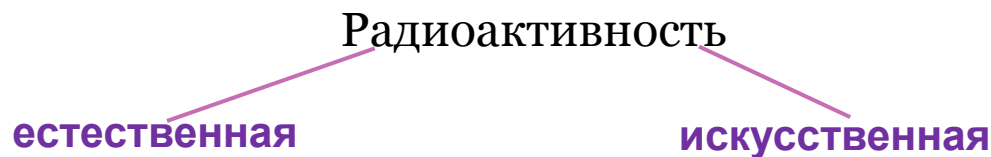
Каждый нуклон движется в поле остальных нуклонов ядра. Энергетические уровни системы заполняются с учётом принципа Паули и группируются в **оболочки**. Эта модель объясняет спины и магнитные моменты основных и возбуждённых состояний ядер.

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

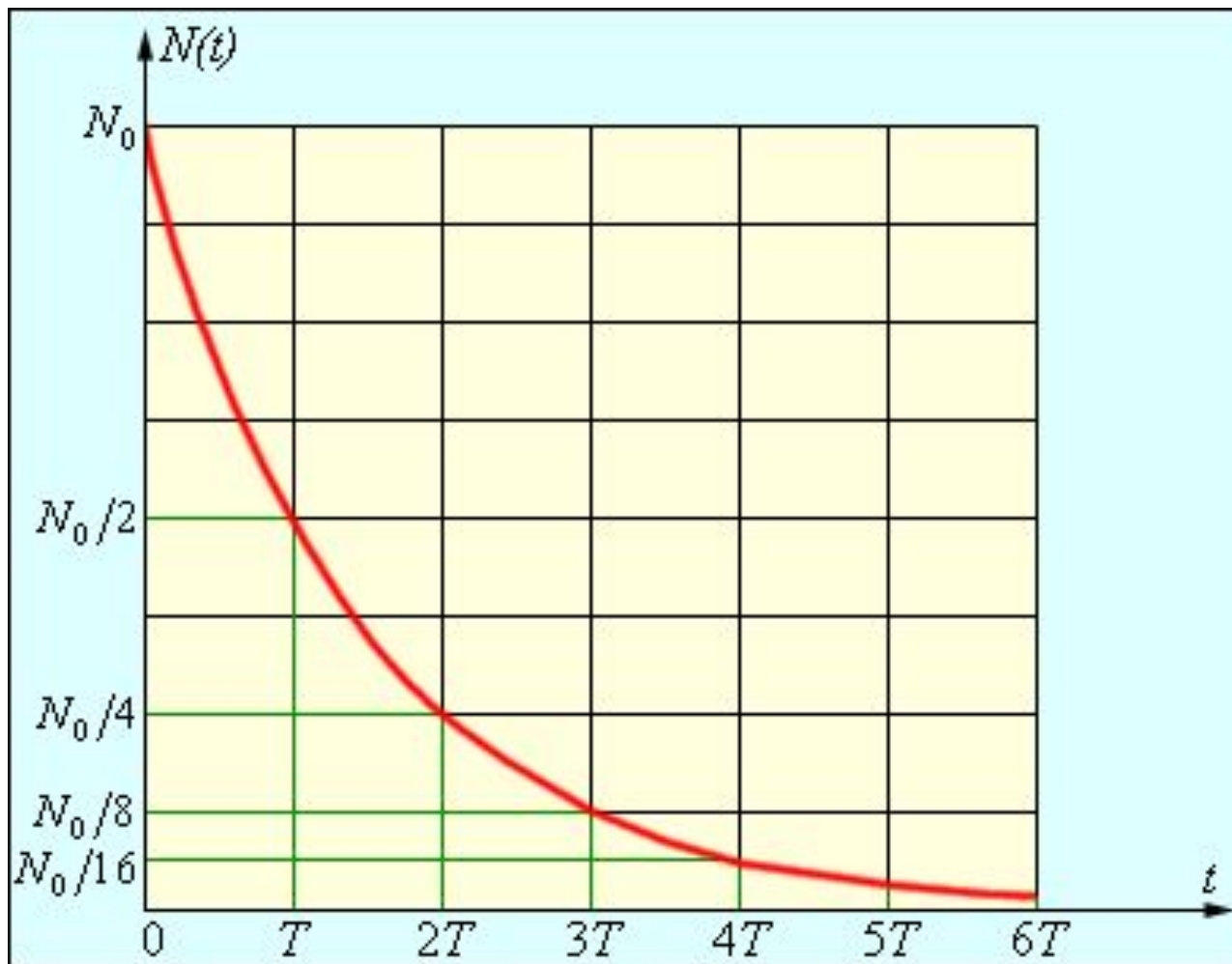
Число ядер dN , распадающихся за малый промежуток времени dt , пропорционально числу ядер N и dt :

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

λ – **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 τ :

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

(здесь $z = -\lambda t$)

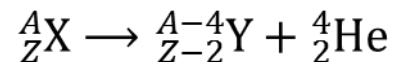
$$\tau = \frac{1}{\lambda}$$

$$T = \tau \ln 2$$

II. α -распад

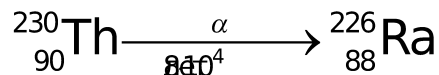
α -частица – ядро ${}^4_2\text{He}$.

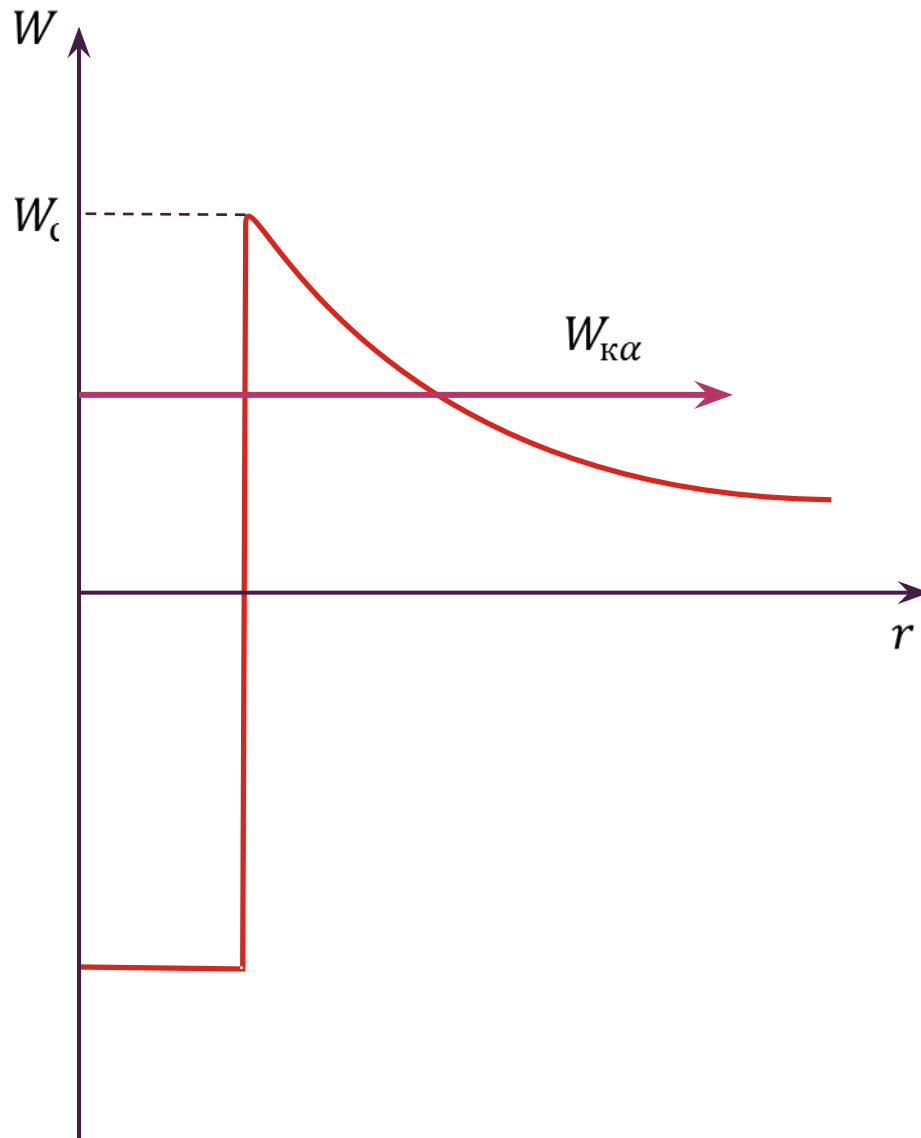
α -распад – самопроизвольное испускание ядром α -частицы:



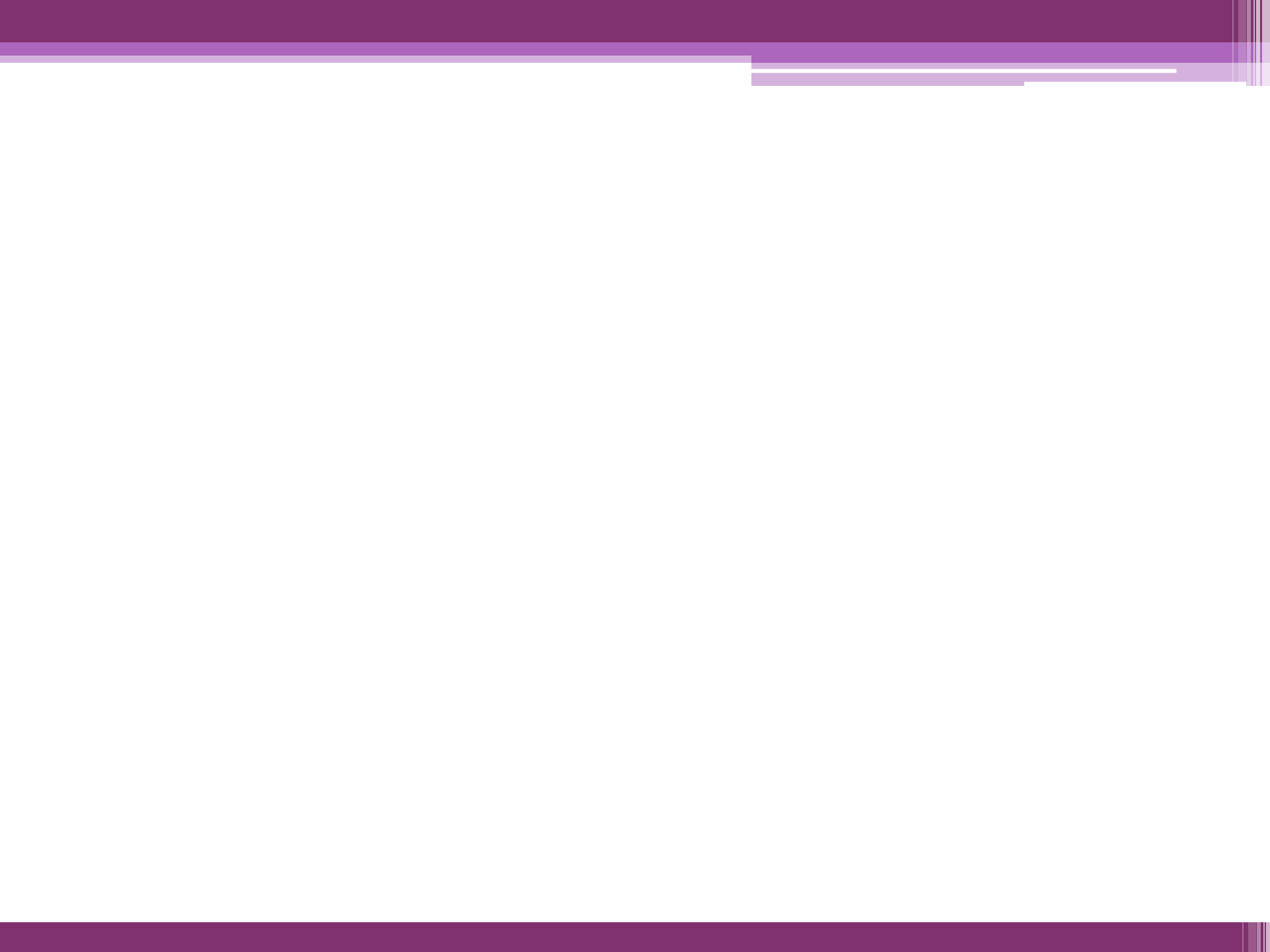
α -частицы испускают только тяжёлые ядра ($Z > 82$). Энергия α -частицы $W_{\text{к}\alpha} \sim 1$ МэВ.

Пример:

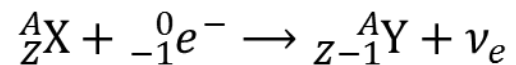




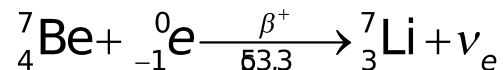
Покидая ядро, α -частица преодолевает кулоновский потенциальный барьер, высота которого $W_c > W_{\kappa\alpha}$. α -распад происходит благодаря туннельному эффекту.



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



Пример:



β -распад – внутринуклонный, а не внутриядерный процесс. Он обусловлен следующими процессами:

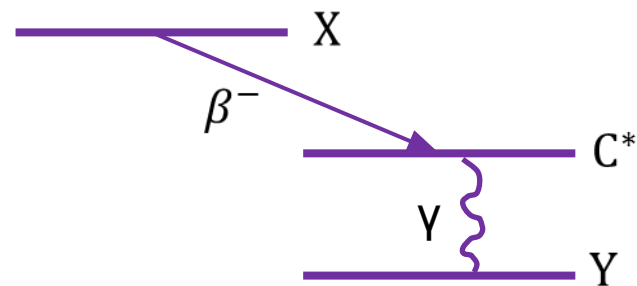


IV. γ -радиоактивность

γ -радиоактивность – испускание γ -квантов возбуждённым ядром при переходе его в основное состояние.

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

Спектр γ -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, α, γ . Ядерная реакция может иметь несколько **каналов**, которым соответствуют разные вероятности.

I. Выход ядерной реакции

Эффективное сечение реакции σ – 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 $P = 1 - e^{-\sigma n}$.

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

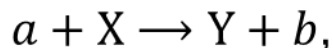
II. Типы ядерных реакций

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



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

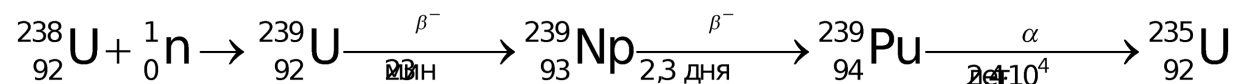
2) Реакции, вызываемые **быстрыми** частицами ($W_a \geq 10^2$ МэВ):



Это прямая реакция.

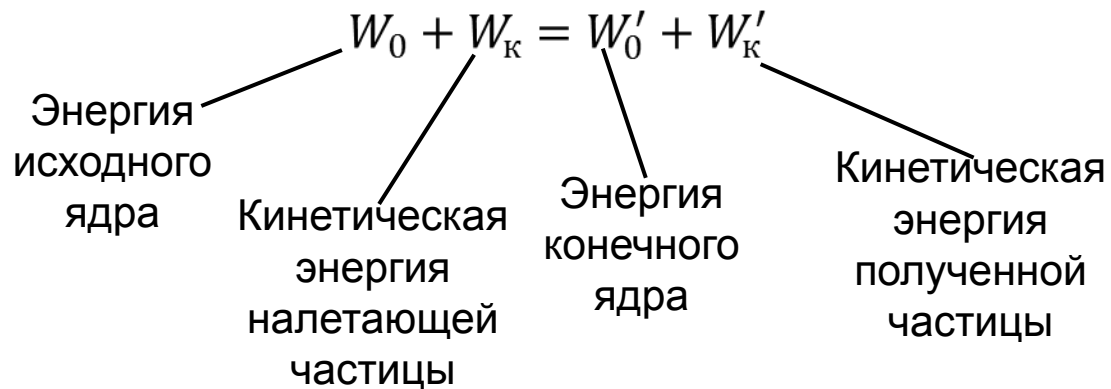
Пример:

Синтез трансурановых химических элементов

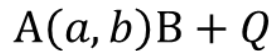


Здесь имеет место резонансный захват теплового нейтрона.

III. Энергия реакции



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



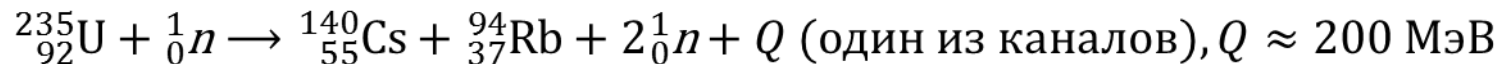
Экзоэнергетическая реакция: $Q > 0$

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.

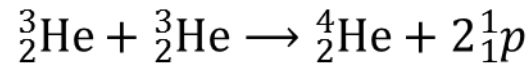
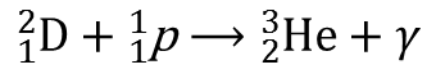
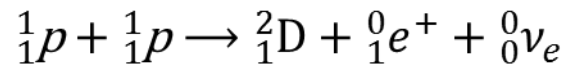
Для ${}_{92}^{235}\text{U}$ $R_{\text{кр}} = 6$ см, $m_{\text{кр}} = 20$ кг.

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

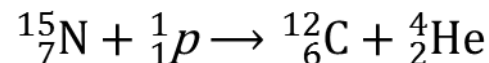
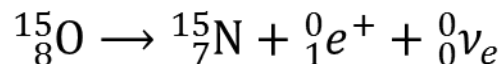
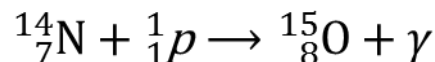
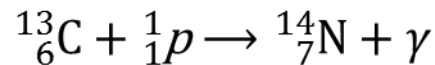
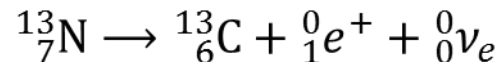
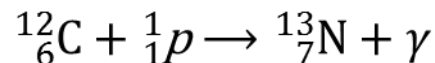
Для осуществления **управляемой реакции** нужно поддерживать число нейтронов внутри образца постоянным.

V. Реакция синтеза

1) Протон-протонный цикл

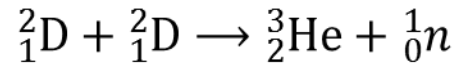
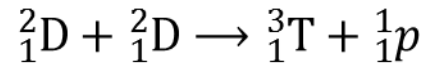
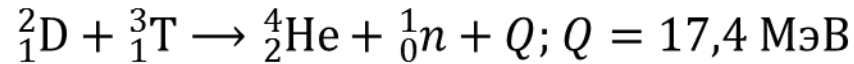


2) Углеродно-азотный цикл



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

з)



Реакция синтеза протекает в плазме.

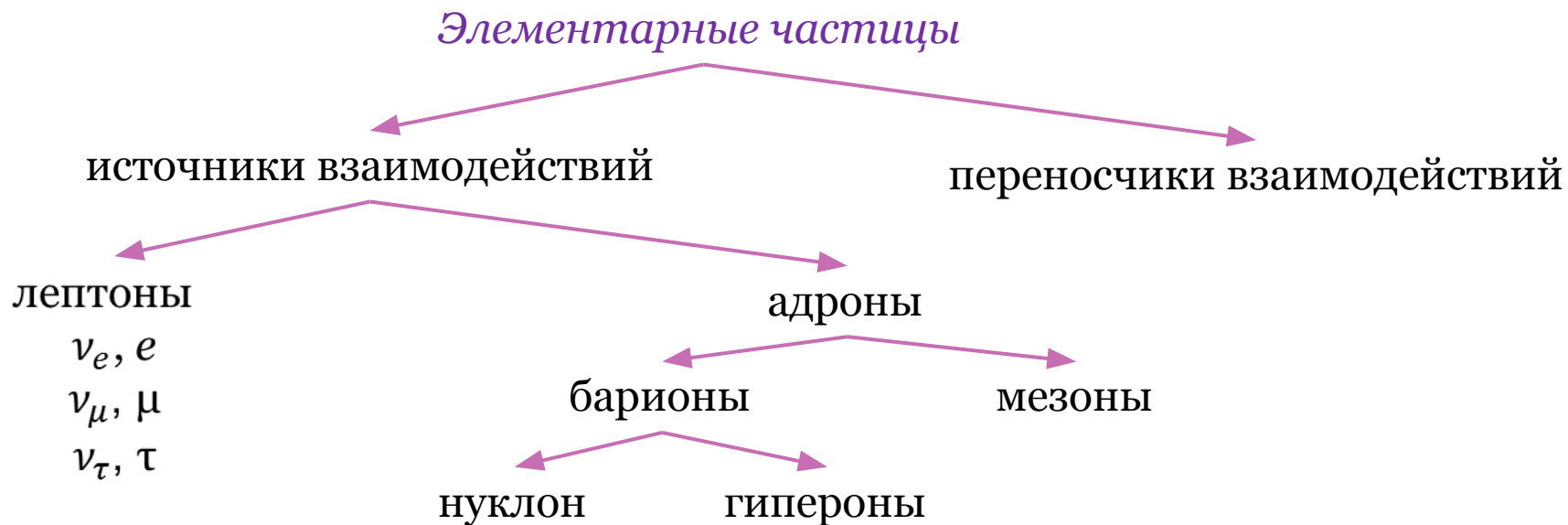
Требования к осуществлению реакции синтеза:

- минимальная температура;
- минимальная величина $n\tau$, где n – концентрация исходных частиц, τ – 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>	∞		все	гравитон
<i>Электромагнитное</i>	∞		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 (γ), π^0 -мезон, η^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

```
graph TD; A[Законы сохранения] --> B[точные]; A --> C[приблизжённые]; B --- B1["(выполняются для всех фундаментальных взаимодействий)"]; B --- B2[ЗСЭ]; B --- B3[ЗСИ]; B --- B4[ЗСМИ]; B --- B5[ЗСЭЗ]; B --- B6[ЗС лептонных зарядов]; C --- C1["(выполняются в некоторых взаимодействиях)"]; C --- C2[ЗС барионного заряда]; C --- C3[ЗС чётности]; C --- C4[ЗС изоспина]; C --- C5[ЗС странности]; C --- C6[ЗС очарования и красоты];
```

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:

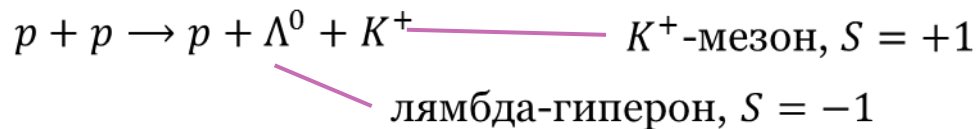
$p + p \rightarrow p + p + p + \tilde{p}$ — антипротон

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 ± 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 ± 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: $p + n$

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

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>τ-лептон</i>			1784,0			
<i>τ-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 β -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.