ГЛАВА V.
ФИЗИКА АТОМНОГО ЯДРА И ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

НИУ МЭИ

Кафедра физики им. В. А. Фабриканта

§1. Атомное ядро

I. Нуклон

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

	Протон	Нейтрон
Электрический заряд		
Масса покоя		
Спин		
Магнитный момент		
Время жизни (период полураспада)		

II. Состав ядра и его характеристики

Заряд ядра: $\boxed{Q = Ze}$

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

Масса ядра: $\boxed{m = Am_1}$ $\boxed{A = Z + N}$

(A – массовое число, N – число нейтронов)

$$m_1 = \frac{m\left({}^{12}_{6}\mathrm{C}\right)}{12} = 1 \text{ а. е. м.} = 1{,}6606 \cdot 10^{-27} \text{ кг} = 931{,}50 \text{ МэВ}$$

– атомная единица массы

Обозначение ядра: ${}^{A}_{Z}\mathrm{X}$

Пример:

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

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

Пример:

Изотопы водорода

${}^{1}_{1}\mathrm{H}$ – протий, $T \to \infty$ ${}^{2}_{1}\mathrm{H} = {}^{2}_{1}\mathrm{D}$ – дейтерий, $T \to \infty$ ${}^{3}_{1}\mathrm{H} = {}^{3}_{1}\mathrm{T}$ – тритий, $T = 12$ лет

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

Примеры:

${}^{15}_{7}\mathrm{N}$ и ${}^{15}_{7}\mathrm{O}$, ${}^{3}_{1}\mathrm{H}$ и ${}^{3}_{2}\mathrm{He}$

III. Размер ядра

Радиус ядра $\boxed{r_0 = (1{,}2 \div 1{,}3)\sqrt[3]{A}\ \text{фм}}$

Размер атома $r \sim 10^{-10}\,\text{м} \Longrightarrow r_0 \approx \dfrac{r}{10^5}$

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

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

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, $m_{\text{Н}}$ – 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 $W = mc^2$;

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

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

Дефект масс $\boxed{\Delta = Zm_p + (A - Z)m_n - m}$

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

$$\boxed{w_{\text{св}} = \frac{W_{\text{св}}}{A}}$$

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

Примеры:

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

При синтезе ядер гелия ${}^{2}_{1}\text{D} + {}^{3}_{1}\text{T} \longrightarrow {}^{4}_{2}\text{He}$ выделяется ~ 17,6 МэВ.

§1. Атомное ядро

Зависимость удельной энергии связи от массового числа

VI. Ядерные силы

Сильное взаимодействие

Свойства ядерных сил

1) **Притяжение**; ядерные силы >> кулоновских сил отталкивания
2) **Короткодействие** $\left(r \sim 10^{-15}\,\text{м}\right)$. На расстояниях >> 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 сильновзаимодействующих 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; обусловливает 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 с состояний ядер.
Полностью заполненные оболочки образуют особо устойчивые структуры:
Z, N или оба этих числа = 2, 8, 20, 50, 82, 126 – **магические числа**.

§2. Радиоактивность

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

$$\mathrm{X} \longrightarrow \mathrm{Y} + a$$

Материнское ядро

Дочернее ядро

Радиоактивный распад происходит с выделением энергии: $m_{\mathrm{X}} > m_{\mathrm{Y}} + m_a$.

Радиоактивность

естественная

искусственная

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; $[\lambda] = \mathrm{c}^{-1}$

$N = N_0 e^{-\lambda t}$ – **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:

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

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

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

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

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

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 $z = -\lambda t$)

$$\boxed{\tau = \frac{1}{\lambda}} \qquad T = \tau \ln 2$$

II. α-распад

α-частица – ядро ${}^4_2\mathrm{He}$.

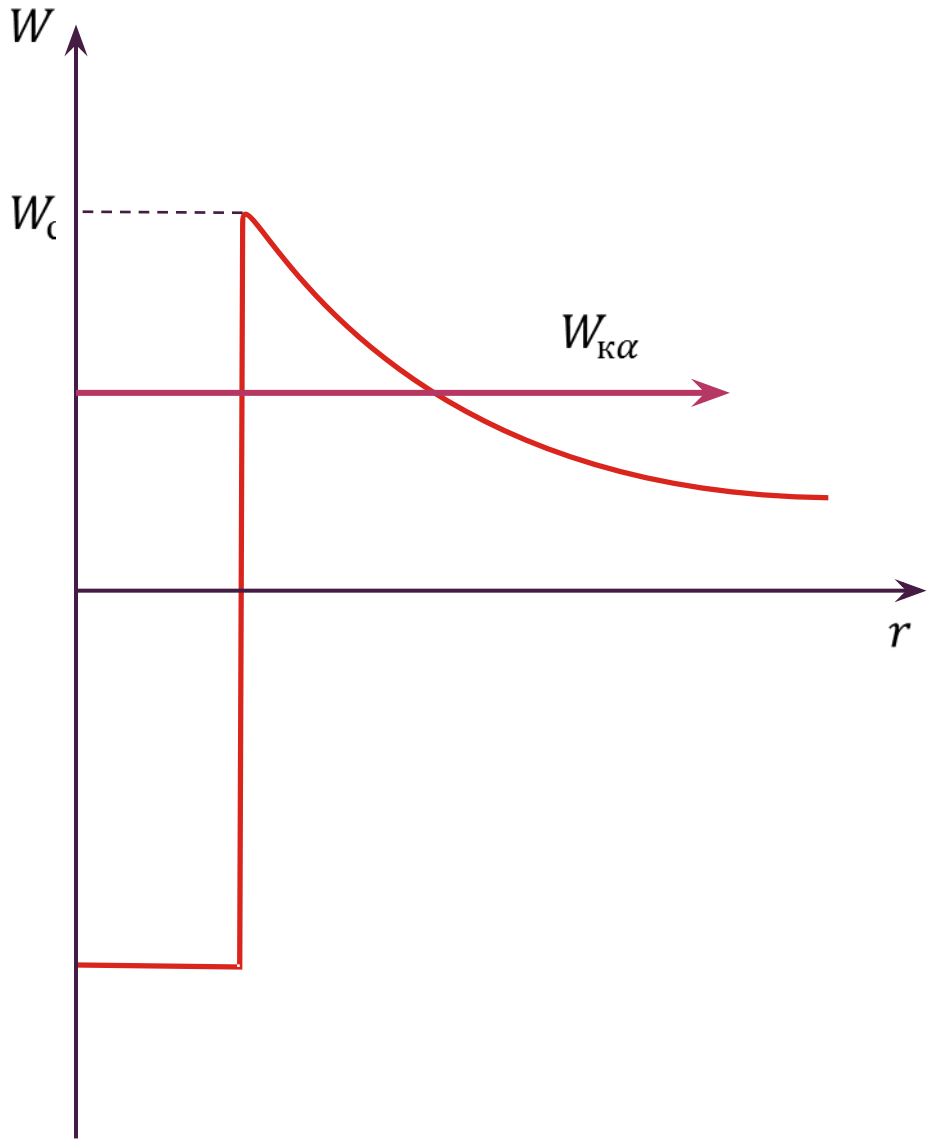
α-распад – самопроизвольное испускание ядром α-частицы:

$$\boxed{{}^A_Z\mathrm{X} \longrightarrow {}^{A-4}_{Z-2}\mathrm{Y} + {}^4_2\mathrm{He}}$$

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

Пример:

$${}^{230}_{90}\mathrm{Th} \xrightarrow[\text{распад}]{\alpha} {}^{226}_{88}\mathrm{Ra}$$



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

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

$$\boxed{{}^{A}_{Z}\mathrm{X} + {}^{0}_{-1}e^{-} \longrightarrow {}^{A}_{Z-1}\mathrm{Y} + \nu_e}$$

Пример:

$${}^{7}_{4}\mathrm{Be} + {}^{0}_{-1}\mathrm{e} \xrightarrow[53{,}3]{\beta^{+}} {}^{7}_{3}\mathrm{Li} + \nu_e$$

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

β⁻-распад: $n \longrightarrow p + e^{-} + \tilde{\nu}_e$

β⁺-распад: $p \longrightarrow n + e^{+} + \nu_e$

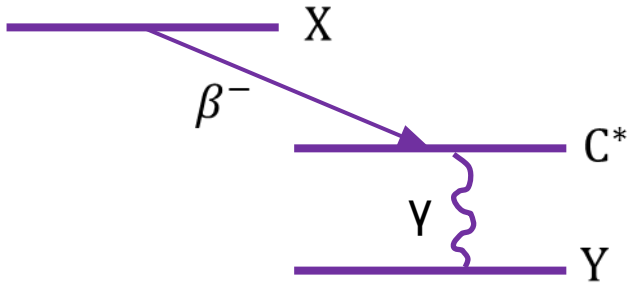
K-захват: $p + e \longrightarrow n + \nu_e$

IV. γ-радиоактивность

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

$W_\gamma = 10$ кэВ ÷ 5 МэВ

Спектр γ-излучения – дискретный.



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

$$a + \mathrm{X} \longrightarrow b + \mathrm{Y} \text{ или } \mathrm{X}(a, b)\mathrm{Y}$$

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**

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

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

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

II. Типы ядерных реакций

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

$$a + \mathrm{X} \longrightarrow \mathrm{C}^* \longrightarrow \mathrm{Y} + b,$$

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):

$$a + \mathrm{X} \longrightarrow \mathrm{Y} + b,$$

Это прямая реакция.

Пример:

Синтез трансурановых химических элементов

$$^{238}_{92}\mathrm{U} + ^{1}_{0}\mathrm{n} \rightarrow ^{239}_{92}\mathrm{U} \xrightarrow[23\text{ мин}]{\beta^-} ^{239}_{93}\mathrm{Np} \xrightarrow[2{,}3\text{ дня}]{\beta^-} ^{239}_{94}\mathrm{Pu} \xrightarrow[2{,}4\cdot 10^4\text{ лет}]{\alpha} ^{235}_{92}\mathrm{U}$$

Здесь имеет место резонансный захват теплового нейтрона.

III. Энергия реакции

$$W_0 + W_к = W_0' + W_к'$$

Энергия исходного ядра

Кинетическая энергия налетающей частицы

Энергия конечного ядра

Кинетическая энергия полученной частицы

$$\boxed{W_0 - W_0' = W_к' - W_к = Q}$$ – **энергия реакции**

$$\boxed{\mathrm{A}(a,b)\mathrm{B} + Q}$$

Экзоэнергетическая реакция: $Q > 0$

Эндоэнергетическая реакция: $Q < 0$

$$Q = \begin{cases} [(m_a + m_\mathrm{A}) - (m_b + m_\mathrm{B})]c^2 \\ (\Delta_a + \Delta_\mathrm{A}) - (\Delta_b + \Delta_\mathrm{B}) \end{cases}$$

IV. Реакция деления

Реакция типа 1 – ядро проходит через ряд промежуточных состояний.

$$^{235}_{92}\mathrm{U} + ^{1}_{0}n \longrightarrow ^{140}_{55}\mathrm{Cs} + ^{94}_{37}\mathrm{Rb} + 2^{1}_{0}n + Q \text{ (один из каналов)}, Q \approx 200 \text{ МэВ}$$

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 $^{235}_{92}\mathrm{U}$ $R_{\text{кр}} = 6$ 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

$$^{1}_{1}p + ^{1}_{1}p \longrightarrow ^{2}_{1}\mathrm{D} + ^{0}_{1}e^{+} + ^{0}_{0}\nu_e$$

$$^{2}_{1}\mathrm{D} + ^{1}_{1}p \longrightarrow ^{3}_{2}\mathrm{He} + \gamma$$

$$^{3}_{2}\mathrm{He} + ^{3}_{2}\mathrm{He} \longrightarrow ^{4}_{2}\mathrm{He} + 2\,^{1}_{1}p$$

2) Углеродно-азотный цикл

$$^{12}_{6}\mathrm{C} + ^{1}_{1}p \longrightarrow ^{13}_{7}\mathrm{N} + \gamma$$

$$^{13}_{7}\mathrm{N} \longrightarrow ^{13}_{6}\mathrm{C} + ^{0}_{1}e^{+} + ^{0}_{0}\nu_e$$

$$^{13}_{6}\mathrm{C} + ^{1}_{1}p \longrightarrow ^{14}_{7}\mathrm{N} + \gamma$$

$$^{14}_{7}\mathrm{N} + ^{1}_{1}p \longrightarrow ^{15}_{8}\mathrm{O} + \gamma$$

$$^{15}_{8}\mathrm{O} \longrightarrow ^{15}_{7}\mathrm{N} + ^{0}_{1}e^{+} + ^{0}_{0}\nu_e$$

$$^{15}_{7}\mathrm{N} + ^{1}_{1}p \longrightarrow ^{12}_{6}\mathrm{C} + ^{4}_{2}\mathrm{He}$$

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

3)

$$^{2}_{1}\mathrm{D} + ^{3}_{1}\mathrm{T} \longrightarrow ^{4}_{2}\mathrm{He} + ^{1}_{0}n + Q;\ Q = 17{,}4\ \text{МэВ}$$

$$^{2}_{1}\mathrm{D} + ^{2}_{1}\mathrm{D} \longrightarrow ^{3}_{1}\mathrm{T} + ^{1}_{1}p$$

$$^{2}_{1}\mathrm{D} + ^{2}_{1}\mathrm{D} \longrightarrow ^{3}_{2}\mathrm{He} + ^{1}_{0}n$$

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

I. Классификация элементарных частиц

Элементарные частицы – частицы, ведущие себя как безструктрурные.

Элементарные частицы

- источники взаимодействий
  - лептоны
    - ν_e, e
    - ν_μ, μ
    - ν_τ, τ
  - адроны
    - барионы
      - нуклон
      - гипероны
    - мезоны
- переносчики взаимодействий

II. Фундаментальные взаимодействия

Взаимодействие	Радиус	Относ. величина	Источники	Переносчики
Гравитационное	∞		все	гравитон
Электромагнитное	∞		лептоны, адроны	фотон
Слабое			лептоны, адроны	
Сильное		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:

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

IV. Законы сохранения

Законы сохранения

точные
(выполняются для всех фундаментальных взаимодействий)
ЗСЭ
ЗСИ
ЗСМИ
ЗСЭЗ
ЗС лептонных зарядов

приближённые
(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:

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

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

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

2. Барионный заряд

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

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

$$\boxed{B = \text{const}}$$

Пример:

$p + p \longrightarrow p + p + p + \tilde{p}$ ——— 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:

$p + p \longrightarrow p + \Lambda^0 + K^+$ — K^+-мезон, $S = +1$

лямбда-гиперон, $S = -1$

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 m

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
Пион			139,6 135,0	+1 0	0 0	0 0		
Каон			493,7 497,7 497,7	+1 0 0	0 0 0	0 +1 +1		
η-мезон			548,8	0	0	0		

Барионы

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

VI. Лептоны

Название частицы	Обозначение	Античастица		Электр. заряд *Q*	Время жизни, с	Основные каналы распада
Электрон			0,511		Стабилен	
Электронное нейтрино			0	0	Стабильно	
Мюон			105,7			
Мюонное нейтрино			0	0	Стабильно	
τ-лептон			1784,0			
τ-нейтрино			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 = ½, *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

§5. Кварковая модель адронов

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:

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

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

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

Пример:

Распад нейтрона $n \longrightarrow p + e^- + \tilde{\nu}_e$

сводится к β-распаду d-кварка

$d \longrightarrow u + e^- + \tilde{\nu}_e$

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.