

Физика часть 2 из 2

Лекция № 8

**ОСНОВЫ
ядерной физики**

Атомное ядро

В **опыте Резерфорда** (1909-1911 гг.) было доказано существование **ядра атома** – компактной положительно заряженной области, в которой сосредоточена практически вся масса атома.

В 1907-1908 гг. было обнаружено, что атомы урана U , а также тория Th , имеют неодинаковую массу. По предложению **Фредерика Содди** в 1910 г. такие атомы, одинаковые по химическим свойствам, но различные по массе, получили название «**изотопы**».

В период с 1910 по 1919 год методом масс-спектрометрии **Фрэнсис Астон** открыл 212 изотопов различных химических элементов и сформулировал правило целых чисел: массы изотопов выражаются целыми числами.

В 1919 г. **Резерфорд** установил, что ядро самого легкого изотопа водорода – протия – представляет собой элементарную частицу – **протон**, и предложил **протонно-электронную модель ядра**.

В 1930 г. **В.А. Амбарцумян и Д.Д. Иваненко** показали противоречия этой модели и предположили, что в состав ядра должны входить нейтральные частицы с массой близкой к массе протона.

В 1932 г. такая частица была открыта **Джеймсом Чедвиком** и получила название «**нейтрон**». В том же году **протонно-нейтронная модель ядра** была разработана **Д.Д. Иваненко и Вернером Гейзенбергом**.

Состав атомного ядра

Ядра атомов состоят из **нуклонов** (ядерных частиц) двух типов:

Протон (p)

заряд $q_p = +e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл

$$1 \text{ а.е.м.} = 931,5 \text{ МэВ}$$

масса $m_p = 1836m_e = 1.673 \cdot 10^{-27}$ кг = 1,0073 а.е.м. = 938,28 МэВ

Нейтрон (n)

заряд $q_n = 0$

масса $m_n = 1839m_e = 1.675 \cdot 10^{-27}$ кг = 1,0087 а.е.м. = 939,57 МэВ

Общее число нуклонов в ядре называется **массовое число A**

Число протонов в ядре совпадает с порядковым номером элемента в Периодической системе элементов Менделеева и называется **зарядовое число Z** .

Число нейтронов **$N = A - Z$** .

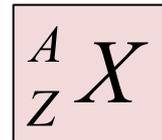
Ядро атома, состоящее из строго определенного числа протонов и нейтронов, находящееся в определенном энергетическом состоянии, называется **нуклид**

Изотопы – нуклиды с одинаковым числом протонов Z

Изотопы – нуклиды с одинаковым числом нейтронов N

Изобары – нуклиды с одинаковым числом нуклонов A

Изомеры – нуклиды с одинаковыми Z и N , находящиеся в различном энергетическом состоянии



Размер атомного ядра

Размеры ядра могут быть оценены на основании данных по рассеянию быстрых нейтронов.

В первом приближении ядро можно считать шаром, радиус которого довольно точно определяется формулой

$$R = R_0 A^{1/3}$$

где A – массовое число ядра, $R_0 = 1,5 \cdot 10^{-15}$ м.

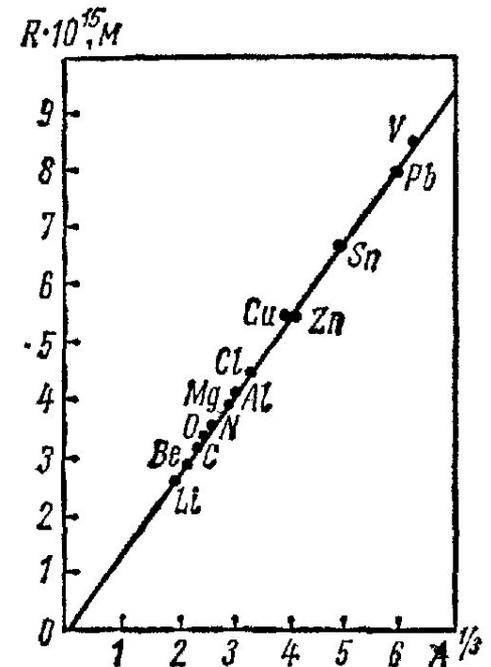
Необходимо учитывать, что вследствие принципа неопределенности ядро не имеет четкой границы.

Объем ядра пропорционален числу нуклонов в ядре.

$$V_{\text{я}} = \frac{4}{3} \pi R^3 = \frac{4}{3} \pi R_0^3 A \propto A$$

Плотность вещества во всех ядрах примерно одинакова.

$$\rho = \frac{M_{\text{я}}}{V_{\text{я}}} \approx \frac{m_n A}{\frac{4}{3} \pi R_0^3 A} = \frac{3m_n}{4\pi R_0^3} = 1,3 \cdot 10^{17} \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$



Спин и магнитный момент атомного ядра

Протон и нейтрон являются фермионами и имеют спиновое число $1/2$.

Собственный магнитный момент протона $\mu_p \approx 2,79\mu$,

где $\mu_n = \frac{e\hbar}{2m_p}$ – единица магнитного момента, называемая **ядерным магнетонам**.

Собственный магнитный момент нейтрона $\mu_n \approx -1,91\mu$

Отношение значений μ_p/μ_n равно $-3/2$.

Спин ядра складывается из спинов нуклонов и моментов импульса, обусловленных движением нуклонов в ядре. Спин ядра квантуется по закону

$$L_J = \hbar \sqrt{I(I+1)}$$

где I – спиновое ядерное квантовое число.

Ядра с четным A имеют целые значения I и являются бозонами.

Ядра с нечетным A имеют полуцелые значения I и являются фермионами.

Ядро имеет магнитный момент, связанный со спином ядра соотношением

$$\mu_J = g_J L_J$$

где g_J – ядерное гиромагнитное отношение

Дефект массы и энергия связи

Масса ядра $m_{\text{я}}$ всегда меньше суммы масс входящих в него частиц.

Дефект массы ядра:
$$\Delta m = [Zm_p + (A - Z)m_n] - m$$

Так как энергия покоя частицы связана с ее массой соотношением $W_0 = mc^2$, то при объединении нуклонов в ядро выделяется энергия.

Энергия связи нуклонов в ядре равна работе, которую нужно совершить, чтобы разделить образующие ядро нуклоны и удалить их друг от друга на такие расстояния, при которых они практически не взаимодействуют друг с другом.

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

Соотношение не нарушится, если заменить массу протона массой атома водорода m_H , а массу ядра – массой нейтрального атома m_a .

$$\Delta m = [Zm_H + (A - Z)m_n] - m$$

$$W_{\text{св}} = \Delta m c^2 = \left\{ [Zm_H + (A - Z)m_n] - m_a \right\} c^2$$

Удельная энергия связи

Энергию связи можно записать в виде

$$W_{св} = \Delta m [(Z-1)m_p + (m_H - m_n) - (m_a -)]$$

или

$$M_{св} = 8,07A - 0,78Z - \Delta_a ()$$

где

$$\Delta_a = M_{св}(B_a - A) = 931,5(m_a - A)$$

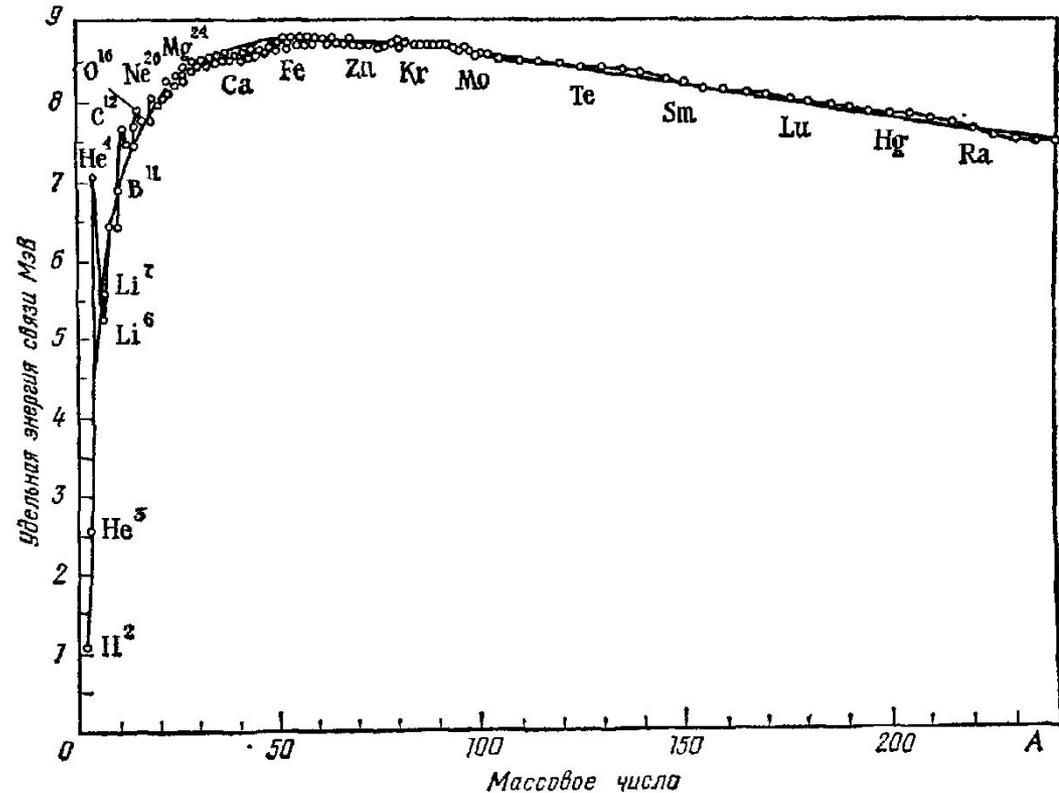
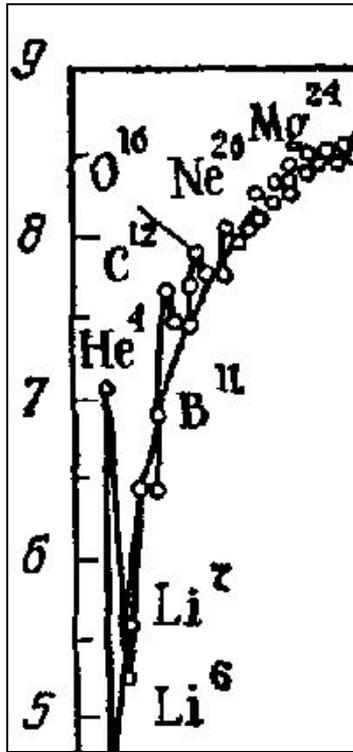
$\Delta_a = 0$ для ^{12}C $\Delta_a > 0$ для малых и больших A $\Delta_a < 0$ для средних A
 $|\Delta_a|$ составляет от долей МэВ для малых A и десятки МэВ для $A > 100$.

Таким образом, энергия связи в целом пропорциональна A .

Удельная энергия связи – это энергия связи, приходящаяся на один нуклон в ядре.

$$M_{св} = \frac{W_{св}}{A} = 8,07 - \frac{0,78Z + \Delta_a}{A} ()$$

Зависимость удельной энергии связи от A



Наибольшая удельная энергия связи наблюдается у ядер средней части таблицы Менделеева ($20 < A < 140$) и достигает 8,7 МэВ. В начале и конце таблицы Менделеева нуклоны связаны слабее (например, для урана 7,6 МэВ)

На графике наблюдаются резкие пики:

- в нечетно-нечетных ядрах $\left({}^6_3\text{Li}, {}^{10}_5\text{B}, {}^{14}_7\text{N} \right)$ нуклоны связаны слабее;
- в четно-четных $\left({}^4_2\text{He}, {}^{12}_6\text{C}, {}^{16}_8\text{O} \right)$ – сильнее.

Критерий устойчивости атомных ядер

Данные об удельной энергии связи позволили установить некоторые закономерности строения ядер.

Критерием устойчивости атомных ядер является соотношение между числом протонов Z и числом нейтронов N в наиболее устойчивом ядре (т.е. имеющем наибольшую удельную энергию связи) из всех возможных изобар ($A = const$).

$$Z_{уст} = \frac{A}{1,98 + 0,015A^{2/3}}$$

При малых и средних значениях A число протонов и нейтронов в устойчивом ядре примерно одинаково $Z \approx N$.

С ростом Z силы кулоновского отталкивания растут пропорционально $Z(Z-1) \approx Z^2$ и для компенсации этого отталкивания ядерным притяжением нуклонов число нейтронов должно расти быстрее числа протонов.

Ядерные силы

Притяжение нуклонов в ядре, удерживающее их вместе, несмотря на кулоновское отталкивание протонов, свидетельствует о существовании особых **ядерных сил**, не сводящихся к гравитационному и электромагнитному взаимодействию. Это взаимодействие получило название **сильного взаимодействия**.

Отличительные особенности ядерных сил:

- 1) Ядерные силы являются короткодействующими. Их радиус действия имеет порядок 10^{-15} м.
- 2) Ядерные силы являются зарядонезависимыми. Ядерные силы, действующие между двумя протонами, протоном и нейтроном и двумя нейтронами, имеют одинаковую величину.
- 3) Ядерные силы зависят от взаимной ориентации спинов нуклонов. Например, нейтрон и протон удерживаются вместе, образуя ядро тяжелого водорода только в том случае, если их спины параллельны друг другу.
- 4) Ядерные силы не являются центральными.
- 5) Ядерные силы обладают свойством насыщения. Это означает, что каждый нуклон в ядре взаимодействует с ограниченным числом нуклонов.

Виртуальные π -мезоны

Согласно современным представлениям квантовой теории поля все виды взаимодействия осуществляются с помощью обмена виртуальными частицами.

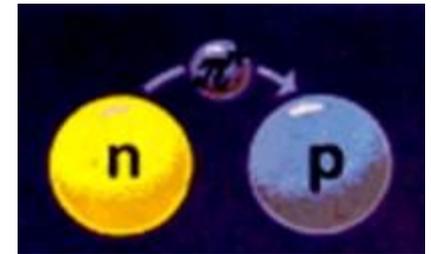
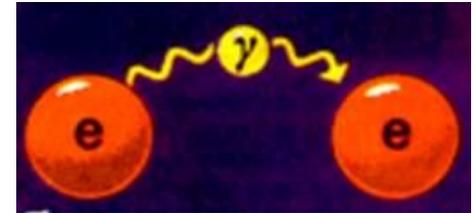
Например, фотон является квантом электромагнитного поля. В соответствии с принципом неопределенности $\Delta W \Delta t > h$, поэтому на промежуток времени $t \approx \Delta t$ взаимодействующими может быть порожден фотон, энергия которого $h\nu \approx \Delta W$.

В отличие от фотонов, виртуальные частицы ядерных сил имеют массу покоя, так как радиус взаимодействия имеет величину порядка комптоновской длины волны виртуальной частицы

$$R_{\text{взаим}} = \Lambda = \frac{h}{mc}$$

Эти частицы – **π -мезоны (пионы)** – предсказаны в 1935 г. Хидеки Юкавой и обнаружены в 1947 г.

Существуют **положительный (π^+)**, **отрицательный (π^-)** и **нейтральный (π^0)** мезоны. Заряд π^+ и π^- -мезонов равен элементарному заряду e . Масса заряженных пионов одинакова и равна $273m_e$, масса ρ^0 -мезона равна $264m_e$. Спин всех трех равен нулю. Все три частицы нестабильны. Время жизни: π^+ и π^- -мезонов – $2,6 \cdot 10^{-8} \text{ с}$, ρ^0 -мезона – $8,2 \cdot 10^{-17} \text{ с}$



Модели ядра

В связи со сложным характером ядерных сил и трудностью точного решения уравнений движения нуклонов в ядре прибегают к упрощенным моделям ядра, которые довольно хорошо описывают только определенные свойства ядра и допускают более-менее простую математическую трактовку.

Такие модели используют подобранные произвольные параметры, согласующиеся с экспериментом.

Наиболее распространенные модели ядра:

- 1) капельная;
- 2) оболочечная;
- 3) обобщенная;
- 4) оптическая.

Каждая модель имеет свою сферу применения.

Капельная модель ядра

Капельная модель ядра создана в 1936 году Я.И. Френкелем и Н. Бором.

Модель основана на аналогии поведения нуклонов в ядре и молекул в капле жидкости: короткодействующие силы; объем, пропорциональный числу частиц; постоянная плотность.

Модель трактует ядро как каплю электрически заряженной несжимаемой жидкости, подчиняющейся законам квантовой механики.

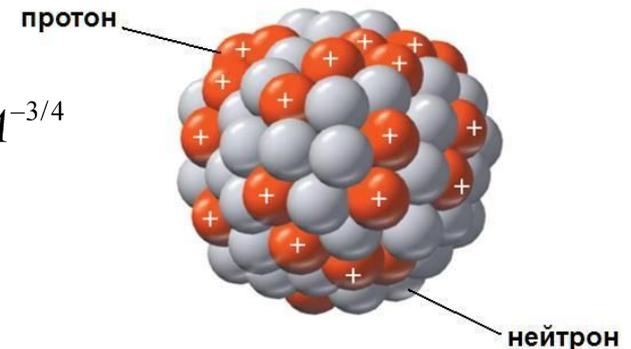
Капельная модель позволила:

- ✓ получить полуэмпирическую формулу для энергии связи ядра (формула Вайцзеккера)

$$W_{св} = a_1 A - a_2 A^{2/3} - a_3 (A - 2Z)^2 A^{-1} - a_4 Z^2 A^{-1/3} \pm a_5 A^{-3/4}$$

- ✓ объяснить механизм деления ядер

Капельная модель хорошо подходит для описания средних и тяжелых ядер



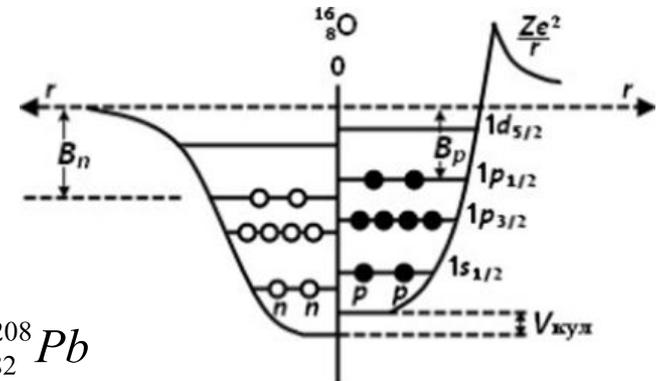
Оболочечная модель ядра

Оболочечная модель ядра создана в 1949 году М. Гёпперт-Майер и Х. Йенсеном.

Модель предполагает распределение нуклонов в ядре по дискретным энергетическим уровням (оболочкам), заполняемым нуклонами согласно принципу Паули.

Оболочечная модель позволила:

- ✓ объяснить спины и магнитные моменты ядер;
- ✓ объяснить периодичность свойств ядер;
- ✓ объяснить особую устойчивость ядер, у которых число протонов или нейтронов является «магическим» (2, 8, 20, 28, 50, 82, 126 и 152) – это ядра с полностью заполненными оболочками. Наиболее устойчивые ядра – «дважды магические» – ${}^4_2\text{He}$, ${}^{16}_8\text{O}$, ${}^{40}_{20}\text{Ca}$, ${}^{48}_{20}\text{Ca}$, ${}^{208}_{82}\text{Pb}$



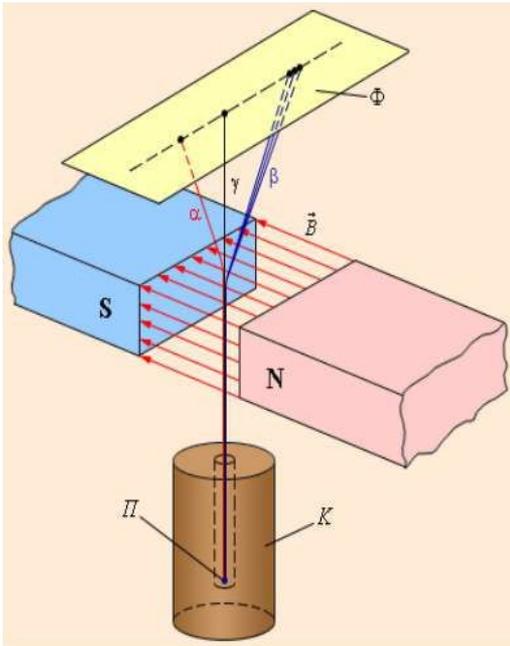
Оболочечная модель хорошо подходит для описания легких и средних ядер

Радиоактивность

Радиоактивностью называется самопроизвольное превращение одних атомных ядер в другие, сопровождаемое испусканием различных видов **радиоактивных излучений**. Радиоактивность, наблюдающаяся у ядер, существующих в природных условиях, называется **естественной**.

Естественная радиоактивность была открыта в 1896 г. А. Беккерелем в дальнейшем установлено существование трех видов радиоактивных излучений:

- 1) **α -излучение** — отклоняется магнитным полем, обладает высокой ионизирующей и малой проникающей способностью, представляет собой поток ядер ${}^4\text{He}$;
- 2) **β -излучение** — отклоняется магнитным полем, обладает средней ионизирующей и проникающей способностью, представляет собой поток быстрых электронов;
- 3) **γ -излучение** — не отклоняется магнитным полем, обладает малой ионизирующей и высокой проникающей способностью, представляет собой коротковолновое электромагнитное излучение с ярко выраженными корпускулярными свойствами.



Закон радиоактивного распада

Радиоактивным распадом называется самопроизвольное превращения ядер. Атомное ядро, испытывающее распад, называется *материнским*, возникающее ядро – *дочерним*.

В виду самопроизвольности распада естественно предположить, что число ядер dN , распадающихся в интервале времени от t до $t+dt$, пропорционально числу имеющихся ядер N и величине промежутка времени dt :

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

где λ – постоянная распада.

Интегрируя получим

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

где N_0 – количество ядер в начальный момент времени, N – количество нераспавшихся атомов в момент времени t .

Необходимо учитывать, что закон радиоактивного распада является статистическим.

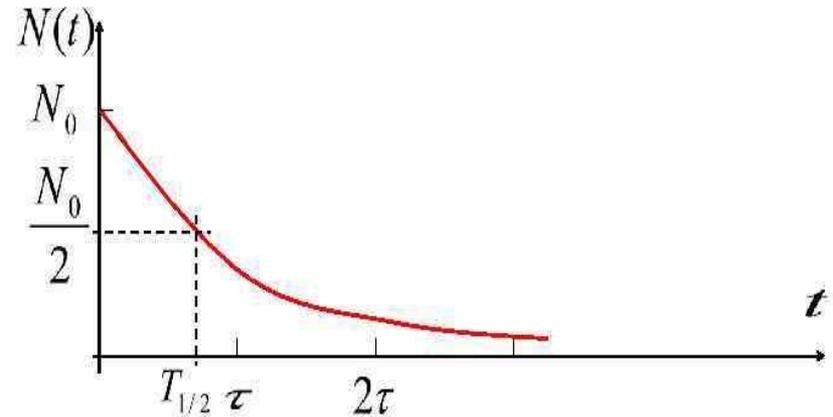
Период полураспада и среднее время жизни

Время, за которое распадается половина начального количества ядер называется **период полураспада $T_{1/2}$**

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T_{1/2}}$$

откуда

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda}$$



Суммарная продолжительность времени жизни $|dN|$ ядер, распавшихся на интервале времени от t до $t+dt$, равна $t|dN|=t\lambda Ndt$. Сумма времен жизни всех N_0 ядер получается путем интегрирования. Разделив эту сумму на N_0 получим **среднее время жизни**

$$\tau = \frac{1}{N_0} \int_0^{\infty} t \lambda N(t) dt = \frac{1}{N_0} \int_0^{\infty} t \lambda N_0 e^{-\lambda t} dt = \lambda \int_0^{\infty} t e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda} = 1,44 T_{1/2}$$

Радиоактивные ряды

Образующиеся при естественном радиоактивном распаде дочерние ядра подчиняются **закону радиоактивных смещений Содди-Фаянса**:

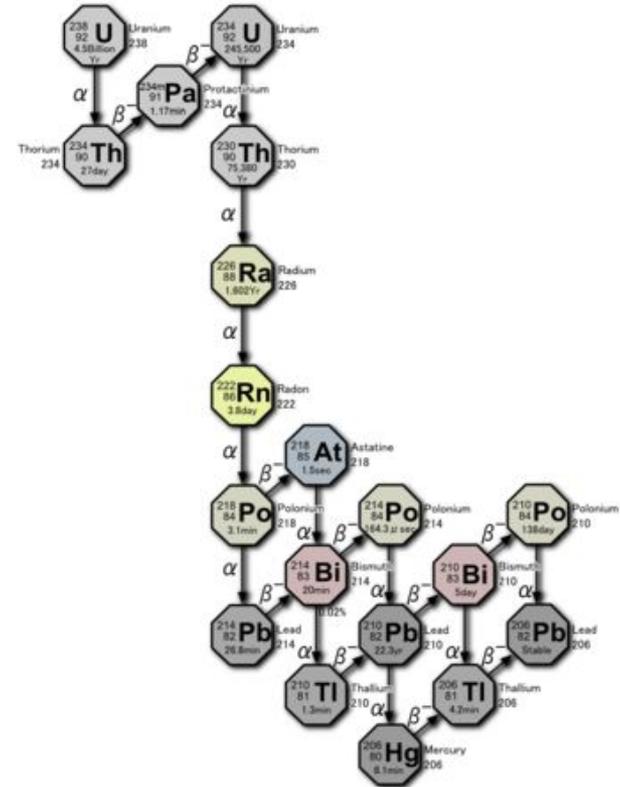


Если дочернее ядро оказывается радиоактивным, то радиоактивный распад продолжается далее. При этом образуются цепочки распадов – **радиоактивные ряды**.

В случае установления радиоактивного равновесия

$$\lambda_m N_m = \lambda_d N_d$$

Величина $A = \lambda N$ называется **активностью радиоактивного препарата**. Единицей активности является **беккерель (Бк)**. 1 Бк – это 1 распад в секунду. Широко применяется внесистемная единица **кюри (Ки)**, равная активности 1 г радия. 1 Ки = 37 ГБк

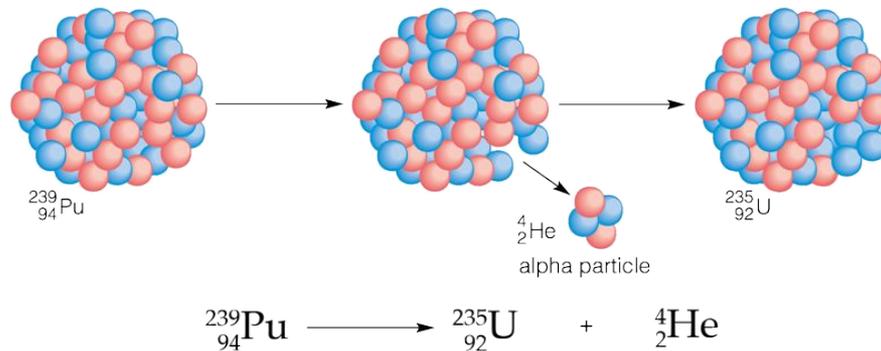
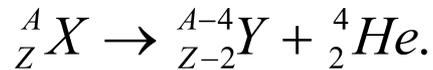


Ряд радия

Закономерности α -распада

α -распад является свойством тяжелых ядер с массовыми числами больше 200. Внутри такого ядра происходит объединение двух протонов и двух нейтронов в α -частицу, чему способствует свойство насыщения ядерных сил. α -частица слабее подвержена действию ядерных сил притяжения и сильнее кулоновскому отталкиванию.

Уравнение α -распада



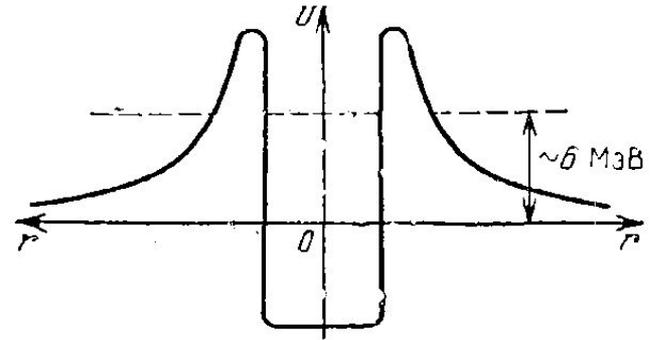
Для α -распада характерна сильная зависимость между периодом полураспада и энергией вылетающих α -частиц, определяющаяся эмпирическим **законом Гейгера-Неттола**

$$\ln T_{1/2} = \frac{A}{\sqrt{W_\alpha}} + B$$

Закономерности α -распада

Квантово-механическая теория α -распада была разработана Г.А. Гамовым.

Ядро представляет собой для α -частицы потенциальную яму с кулоновским барьером на границе. Энергия α -частицы в ядре меньше высоты потенциального барьера и α -распада представляет собой туннельный эффект.



Прозрачность ~~потенциального барьера~~

$$D = \exp\left(-\frac{2}{\hbar} \int_{x_1} \sqrt{2m_\alpha (U(x) - W_\alpha)} dx\right)$$

Частота ударов α -частицы о барьер определяется размером ядра и скоростью α -частицы

$$n = \frac{v}{2L} = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{2W_\alpha}{m_\alpha}}$$

Постоянная распада

$$\lambda = nD = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{2W_\alpha}{m_\alpha}} \exp\left(-\frac{2}{\hbar} \int_{x_1}^{x_2} \sqrt{2m_\alpha (U(x) - W_\alpha)} dx\right)$$

Логарифмируя это выражение получим закон Гейгера-Неттола

Закономерности α -распада

Энергетический спектр α -излучения дискретный, так как энергия отдачи дочернего ядра определяется отношением масс дочернего ядра и α -частицы и, как правило, мала.

В большинстве случаев радиоактивное вещество испускает несколько групп α -частиц близкой, но различной энергии. Это обусловлено тем, что дочернее ядро может возникать не только в нормальном, но и в возбужденных состояниях.

Среднее время жизни возбужденных состояний для большинства ядер лежит в пределах от 10^{-8} до 10^{-16} с. За это время дочернее ядро переходит в нормальное или более низкое возбужденное состояние, испуская γ -квант. Следовательно, α -распад сопровождается γ -излучением.

Закономерности β -распада

Бета-распад состоит в превращении ядра радионуклида в ядро-изобар с таким же массовым числом и зарядовым числом, отличающимся на ± 1 .

В этом процессе происходит **взаимопревращение нуклонов**: нейтрона в протон или протона в нейтрон. Таким образом, бета-распад является не внутриядерным, а **внутринуклонным процессом**, обусловленным слабым взаимодействием нуклонов.

Бета-распаду подвержены нуклиды практически всех химических элементов. Чем сильнее соотношение протонов и нейтронов в ядре отличается от заданного формулой

$$Z_{уст} = \frac{A}{1,98 + 0,015 A^{2/3}}$$

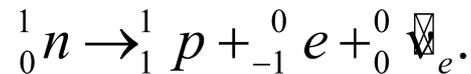
тем больше склонность нуклида к проявлению бета-активности и меньше период полураспада.

Существуют три разновидности β -распада. В одном случае ядро, претерпевающее превращение, испускает электрон, в другом – позитрон, в третьем случае, называемом электронным захватом (e -захватом), ядро поглощает электрон.

Закономерности β -распада

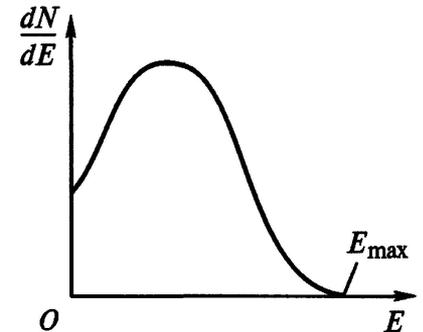
Электронный распад (β^- -распад) происходит как у естественных, так и искусственных радионуклидов, ядра которых *перегружены нейтронами*.

В этом случае, энергетически выгодным является самопроизвольное превращение одного из нейтронов ядра в протон по схеме:



При этом образуются электрон ${}^0_{-1}e$ и электронное антинейтрино ${}^0_0\bar{\nu}_e$. Все виды нейтрино являются нейтральными, обладают чрезвычайно малой массой и практически не взаимодействуют с веществом, поэтому их сложно обнаружить. На их появление в бета-распаде указывают два факта.

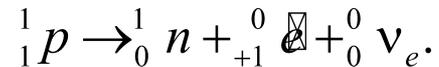
Во-первых, электроны, образующиеся при бета-распаде, имеют широкий спектр энергий от нуля до максимального значения E_{\max} , которое определяется разностью масс материнского ядра и продуктов распада. Таким образом, участие в бета-распаде еще одной частицы диктуется законом сохранения энергии.



Во-вторых, спин нейтрона, протона и электрона одинаков и равен $\frac{1}{2}$. Если в схеме распада убрать антинейтрино, то суммарный спин возникающих частиц будет отличаться от спина исходной частицы. Таким образом, участие в бета-распаде еще одной частицы диктуется законом сохранения момента импульса, причем этой частице необходимо приписать спин, равный $\frac{1}{2}$.

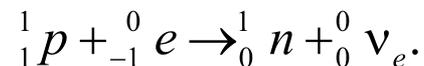
Закономерности β -распада

Позитронный распад (β^+ -распад) характерен только для искусственной радиоактивности. Он происходит **в нейтронодефицитных ядрах**, получаемых в ядерных реакциях. При β^+ -распаде протон превращается в нейтрон с образованием позитрона (античастица электрона) и электронного нейтрино



Для свободного протона такой процесс невозможен по энергетическим соображениям, так как масса протона меньше массы нейтрона. Однако протон в ядре может заимствовать требуемую энергию от других нуклонов, входящих в состав ядра.

Электронный захват заключается в том, что ядро поглощает электрон из внутренней электронной оболочки атома (обычно из K -, реже из L - или M -оболочек) своего атома, в результате чего один из протонов превращается в нейтрон, испуская при этом нейтрино:



Место в электронной оболочке, освобожденное захваченным электроном, заполняется электронами из вышележащих слоев, в результате чего возникает характеристическое рентгеновское излучение. Именно этим путем электронный захват и был открыт Л. Альваресом в 1937 г.

Закономерности β -распада

Таким образом, уравнения превращений нуклидов при β -распаде будут иметь вид:

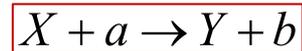


Возникшее дочернее ядро Y может оказаться в возбужденном состоянии. Переходя затем в более низкие энергетические состояния, оно испускает γ -кванты. Следовательно, β -распад, так же как и α -распад, сопровождается γ -излучением

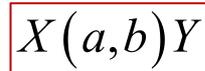
Ядерные реакции

Ядерной реакцией называется процесс сильного взаимодействия атомного ядра с элементарной частицей или с другим ядром, приводящий к преобразованию ядра (или ядер).

Наиболее распространенным видом ядерной реакции является взаимодействие легкой частицы a с ядром X , в результате которого образуется легкая частица b и ядро Y :

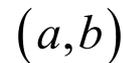


Уравнение таких реакций принято записывать сокращенно в виде:

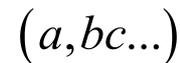


В качестве легких частиц a и b могут фигурировать нейтрон (n), протон (p), дейтрон (d), α -частица и γ -квант.

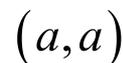
Для описания реакций, происходящих с различными ядрами по определенной схеме, применяется запись:



Если в результате реакции образуется несколько частиц, то все они указываются в скобках после запятой:



Если конечная частица совпадает с начальной, то такой процесс называется рассеянием:



Каналы ядерной реакции

Ядерная реакция часто может идти несколькими способами, например, при бомбардировке ядра протоном он может:

| | | |
|--------------------|---------------|------------------|
| рассеяться | (p, p) | } каналы реакции |
| поглотиться | (p, γ) | |
| выбить нейтрон | (p, pn) | |
| подхватить нейтрон | (p, d) | |

Различным каналам соответствуют различные вероятности. Вероятность взаимодействия принято характеризовать *эффективным сечением*:

$$\sigma = \frac{dN}{nNdx},$$

где N – число частиц, падающих по нормали за единицу времени на единицу площади поверхности вещества, имеющего концентрацию ядер n , dN – число этих частиц, вступающих в реакцию в слое толщиной dx .

Эффективное сечение ядерной реакции, имеющее размерность площади, измеряют в **барнах** ($1 \text{ барн} = 10^{-28} \text{ м}^2$)

Энергия ядерной реакции

В ядерных реакциях выполняются *законы сохранения энергии, импульса, момента импульса, массового и зарядового чисел*. Ядерные реакции могут сопровождаться как выделением, так и поглощением энергии.

Энергия реакции Q определяется изменением общей массы ядер и частиц, участвующих в реакции:

$$Q = c^2 [(m_X + m_a) - (m_Y + m_b)].$$

Если $Q > 0$, то реакция идет с выделением энергии и называется *экзотермической*

Если $Q < 0$, то реакция идет с поглощением энергии и называется *эндотермической*.

Эндотермические реакции обладают порогом – минимальной кинетической энергией относительного движения сталкивающихся частиц, начиная с которой становится возможным протекание ядерной реакции.

Классификация ядерных реакций

Ядерные реакции классифицируются по различным признакам:

- 1) по роду вызывающих их частиц* – реакции под действием нейтронов, реакции под действием заряженных частиц (протонов, дейтронов и др.), реакции под действием γ -квантов;
- 2) по энергии вызывающих их частиц* – реакции при малых энергиях (порядка эВ) происходят в основном с участием нейтронов, реакции при средних энергиях (до нескольких МэВ) вызываются так же заряженными частицами и γ -квантами; реакции при высоких энергиях, вызываемые тяжелыми ионами приводят к рождению отсутствующих в свободном состоянии элементарных частиц (мезонов, гиперонов и др.);
- 3) по характеру ядерных превращений* – прямые ядерные реакции, реакции с составным ядром, реакции захвата (при которых составное ядро не испускает никаких частиц), реакции деления, реакции синтеза.

Прямые ядерные реакции

Промежуток времени $\tau_{\text{я}}$, который требуется нуклону с энергией порядка 1МэВ (что соответствует скорости нуклона порядка 10^7м/с) для того, чтобы пройти расстояние, равное диаметру ядра 10^{-14}м , называется **ядерным временем** (**ядерным временем пролета**). Это время по порядку величины равно

$$\tau_{\text{я}} = \frac{10^{-14}}{10^7} = 10^{-21}\text{с}.$$

Если ядерная реакция протекает быстро, т. е. за время порядка ядерного, то такая реакция называется **прямой ядерной реакцией**.

К прямым реакциям относятся, например, реакции срыва (d, p), (d, n) и обратные им реакции подхвата (p, d), (n, d). В реакции срыва один из нуклонов дейтрона при пролете его вблизи ядра срывается ядром и застревает в нем. В реакции подхвата один из нуклонов ядра подхватывается налетающим нуклоном и вылетает вместе с ним из ядра в виде дейтрона..

Ядерные реакции с составным ядром

Существуют, однако, ядерные реакции, которые протекают за время, значительно превышающее время пролета ядра. В этом случае реакция проходит через стадию **составного ядра (компаунд-ядра)**. Механизм осуществления такой ядерной реакции предсказал в 1936 г. Н. Бор. Ядерная реакция такого типа протекает в два этапа:



На первом этапе в результате захвата частицы a образуется составное ядро B .

Составное ядро существует значительный с точки зрения ядерных масштабов промежуток времени ($10^{-12} - 10^{-16}$ с). За это время энергия налетающей частицы перераспределяется между всеми нуклонами возбужденного составного ядра, и оно «забывает» начальное состояние.

За счет флуктуации часть этой энергии может сконцентрироваться на одном или нескольких нуклонах этого ядра. Поэтому на втором этапе реакции эти нуклоны в виде частицы b испускаются составным ядром..

Ядерные реакции деления

Тяжелое составное ядро, возбужденное при захвате нейтрона, может разделиться на две приблизительно равные части – осколки деления. Эта реакция называется **реакцией деления тяжелых ядер**. Неустойчивости тяжелых ядер способствует большое количество в них протонов, испытывающих кулоновское отталкивание друг от друга.

Тяжелые ядра способны к делению, если их параметр деления . $Z^2/A \geq 17$

Это условие выполняется для всех ядер, начиная с серебра $^{108}_{47}\text{Ag}$

Осколки деления **имеют избыток нейтронов**, которые они испускают, переходя в более устойчивое состояние. Такие нейтроны, называемые **нейтронами деления**, сами могут вызывать реакции деления соседних ядер, что делает возможным осуществление **цепной реакции деления**. Важной характеристикой такой реакции является коэффициент размножения нейтронов k , равный отношению количества нейтронов в двух последующих поколениях. При $k > 1$ происходит взрывная цепная реакция, при $k = 1$ – стационарная (управляемая). Причиной уменьшения коэффициента размножения является наличие в среде неделящихся ядер, которые могут захватывать нейтроны, и выход нейтронов за пределы активной среды.

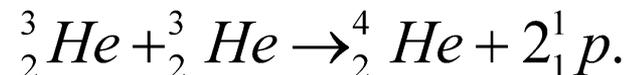
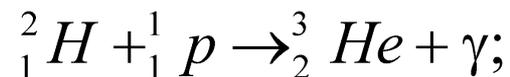
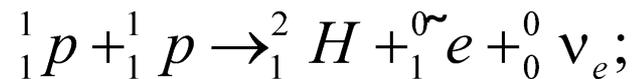
Ядерные реакции синтеза

Реакции слияния легких ядер с образованием более тяжелого ядра называются *реакциями синтеза*.

Ядра заряжены одноименным положительным зарядом, поэтому при их сближении необходимо преодолеть кулоновский потенциальный барьер высотой порядка 10 кэВ. Для преодоления такого высокого барьера ядрам следует сообщить достаточно высокую кинетическую энергию. Это можно сделать, разогрев смесь реагирующих ядер до температуры порядка десятков и даже сотен миллионов градусов.

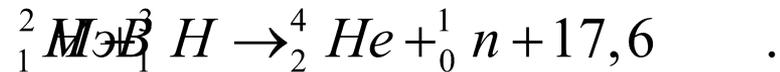
Именно поэтому такие ядерные реакции синтеза получили название *термоядерных реакций*.

Термоядерные реакции являются *источниками энергии звезд*. Такие реакции протекают в виде различных циклов, например, протонно-протонный цикл приводит к формированию ${}^4_2\text{He}$ из четырех протонов:

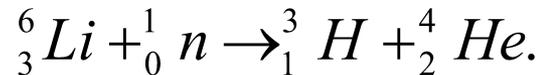


Ядерные реакции синтеза

Основой для управляемой термоядерной реакции является реакция синтеза в смеси дейтерия и трития:



Дейтерий является стабильным изотопом водорода, встречающимся в природе, а относительно короткоживущий тритий с периодом полураспада 12,3 года получают при облучении нейтронами лития:



Для практического осуществления реакции необходимо, чтобы тритий-дейтериевая плазма была достаточно сильно нагрета, а также, чтобы концентрация n частиц в ней и время τ удержания плазмы удовлетворяли критерию Лоусона:

$$n\tau > 10^{14} \text{ см}^3 \text{ при } T > 6 \text{ К}$$

Элементарные частицы

Древние представляли мир, состоящий из неделимых атомов.

В начале нынешнего века удалось изучить структуру атома, разложить его на элементарные частицы: протоны, нейтроны и электроны.

В тридцатых годах были открыты мезоны, нейтрино.

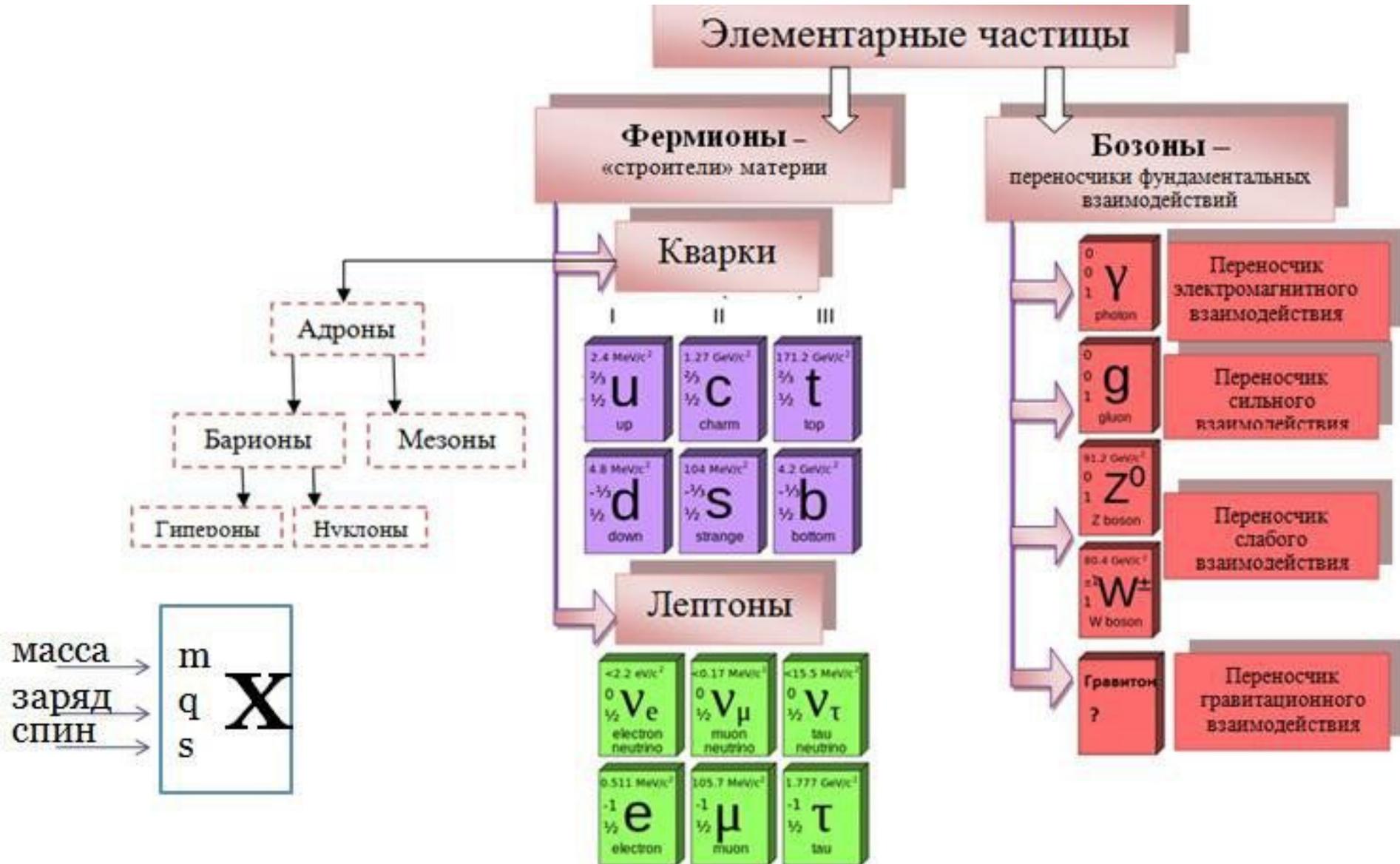
У каждой частицы в силу закона симметрии обнаружилась и античастица.

Затем перед глазами ученых оказалась целая «россыпь» частиц: их обнаруживали в лучах, приходящих из космоса, получали с помощью мощных ускорителей. Сейчас открыто уже более 400 частиц.

Одни из частиц стабильны, вроде протонов, другие живут мгновения ($\sim 10^{-23}$ с). Одни живут только в движении (фотон), другие могут находиться в состоянии покоя.

В элементарных частицах, известных к настоящему времени, обнаруживается более или менее стройная система классификации.

Классификация элементарных частиц



Лептоны

К *группе лептонов* (от греч. «лептос» – легкий) относятся электрон, его более тяжелые аналоги – мюон и таон, соответствующие им нейтрино, а также их античастицы. Они образуют три семейства – «поколения»:

электронный и позитронный дублеты $\begin{matrix} \mathbb{E} \\ \mathbb{E} \end{matrix} \begin{pmatrix} e^- \\ \nu_e \end{pmatrix} \sim = \begin{pmatrix} e^+ \\ \tilde{\nu}_e \end{pmatrix}$

мюонный и антимюонный дублеты $\begin{matrix} \mathbb{M} \\ \mathbb{M} \end{matrix} \begin{pmatrix} \mu^- \\ \nu_\mu \end{pmatrix} \sim = \begin{pmatrix} \mu^+ \\ \tilde{\nu}_\mu \end{pmatrix}$

таонный и антитаонный дублеты $\begin{matrix} \mathbb{T} \\ \mathbb{T} \end{matrix} \begin{pmatrix} \tau^- \\ \nu_\tau \end{pmatrix} \sim = \begin{pmatrix} \tau^+ \\ \tilde{\nu}_\tau \end{pmatrix}$

Масса мюона $m_\mu \approx 200m_e$, масса таона $m_\tau \approx 3500m_e$. Таким образом, таон тяжелее протона $m_p = 1836m_e$. Массы нейтрино не установлены, а определены только их верхние пределы. В то же время наличие нейтринных осцилляций – взаимопревращений нейтрино – указывает на ненулевую массу нейтрино.

Все лептоны имеют спин, равный $1/2$, и, следовательно, являются **фермионами**, подчиняясь статистике Ферми – Дирака.

Лептонам приписывают лептонное число (лептонный заряд) L . Для лептонов $L = +1$, для антилептонов $L = -1$, для всех остальных элементарных частиц $L = 0$. Введение L позволяет сформулировать закон сохранения лептонного числа: **в замкнутой системе при всех процессах взаимного превращения элементарных частиц лептонное число сохраняется.**

Адроны

Основную часть элементарных частиц составляют *адроны* (от греч. «адрос» – крупный, сильный).

Адроны *с целыми спинами* образуют подгруппу *мезонов* (от греч. «мезос» – средний). Мезоны являются *бозонами* и подчиняются статистике Бозе – Эйнштейна.

Адроны *с полуцелыми спинами* образуют подгруппу *барионов* (от греч. «барис» – тяжелый). Барионы, как и лептоны, являются *фермионами*.

Барионы принято делить на нуклоны (протон и нейтрон), входящие в состав ядер и гипероны, которые были обнаружены в космических лучах и могут образовываться при столкновении частиц высоких энергий.

Стабильным адроном является только протон. *Метастабильные адроны* имеют время жизни свыше 10^{-21} с. Крайне нестабильные адроны (как мезоны, так и барионы) с чрезвычайно малым временем жизни (менее 10^{-21} с) называются *резонансами*.

Барионам приписывают барионное число (барионный заряд) B . Если принять для барионов $B = +1$, для антибарионов $B = -1$, а для всех остальных частиц $B = 0$, то можно сформулировать закон сохранения барионного числа: **в замкнутой системе при всех процессах взаимного превращения элементарных частиц барионное число сохраняется.**

Свойства кварков

Кварки являются фермионами и имеют спин $\frac{1}{2}$, поскольку только из фермионов можно сконструировать как фермионы (нечетное число кварков), так и бозоны (четное число кварков).

Мезоны состоят из пары кварк — антикварк. Например, пи-мезоны

$$\pi^+ = \frac{1}{\sqrt{2}} (\tilde{u}u - \tilde{d}d)$$

Барионы состоят из трех кварков. Например, нуклоны

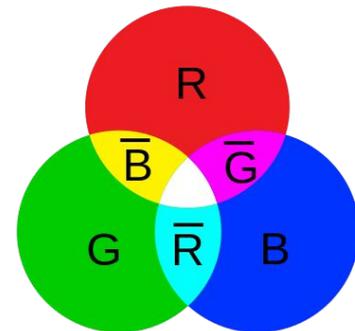
$$p = uud \quad n = udd$$

Недавно в экспериментах на БАК было подтверждено существование адронов из четырех кварков — **тетракварков** и получены данные о возможном существовании адронов из пяти кварков — **пентакварков**.

Заряд кварка равен не кратен элементарному заряду! У верхнего, очарованного и истинного кварков заряд равен $+\frac{2}{3}e$, а у нижнего, странного и прелестного равен $-\frac{1}{3}e$. Для антикварков $-\frac{2}{3}e$ и $+\frac{1}{3}e$ соответственно.

Так как некоторые адроны состоят из одинаковых кварков, то в соответствии с принципом Паули они должны иметь различающую их характеристику, которая получила название «**цвет**»: красный, зеленый и синий для кварков, антикрасный, антизеленый и антисиний (для антикварков).

Кварки не могут существовать в свободном состоянии (**конфаймент**), а обязательно входят в состав частиц нейтрального цвета.



Фундаментальные взаимодействия

Известны четыре вида взаимодействий между элементарными частицами: **сильное**, **электромагнитное**, **слабое** и **гравитационное**.

Интенсивность взаимодействия принято характеризовать с помощью **константы взаимодействия** A , которая представляет собой безразмерный параметр, определяющий вероятность процессов, обусловленных данным видом взаимодействия. Отношение значений констант дает относительную интенсивность соответствующих взаимодействий.

Константа A для сильного взаимодействия условно принята за единицу. Константы для остальных видов взаимодействий определяются относительно сильного взаимодействия. В таблице приведены значения константы разных видов фундаментальных взаимодействий и их радиусы действия сил.

| Вид взаимодействия | Константа взаимодействия | Радиус действия сил r , м |
|--------------------|--------------------------|-----------------------------|
| Сильное | 1 | 10^{-15} |
| Электромагнитное | 10^{-2} | ∞ |
| Слабое | 10^{-6} | 10^{-18} |
| Гравитационное | 10^{-38} | ∞ |

Фундаментальные взаимодействия

Два взаимодействия имеют ограниченный радиус действия и проявляются только в микромире.

Сильное взаимодействие. Наиболее интенсивное взаимодействие, существующее в природе. В сильное взаимодействие вступает подавляющее большинство всех известных элементарных частиц.

Сильное взаимодействие обеспечивает связь нуклонов (протонов и нейтронов) в ядре и удерживает кварки внутри барионов. Сильное взаимодействие передается квантами поля – **глюонами**. Всего существует восемь сортов глюонов.

Сильное взаимодействие отвечает за устойчивость ядер и распространяется только в пределах размеров ядра – 10^{-15} м.

Слабое взаимодействие – это фундаментальное физическое взаимодействие, существующее только в микромире. Оно способствует превращению одних частиц (кварков и лептонов) в другие и отвечает за β -распад ядер, за многие распады элементарных частиц и за все процессы взаимодействия нейтрино с веществом. Имеет наименьший среди всех взаимодействий радиус действия – 10^{-18} м.

Переносчиками слабого взаимодействия являются **векторные бозоны Z^0 и W^\pm**

Фундаментальные взаимодействия

Два взаимодействия имеют неограниченный радиус действия и проявляются в макромире.

Электромагнитное взаимодействие обладает универсальным характером и существует между любыми телами. Благодаря электромагнитному взаимодействию возникают атомы, молекулы и макроскопические тела. Все химические реакции – это проявление электромагнитных взаимодействий, которые приводят к перераспределению химических связей между атомами и молекулами.

Переносчиком гравитационного взаимодействия является квант электромагнитного поля – **фотон**.

Гравитационное взаимодействие является самым слабым из всех физических взаимодействий. Оно описывается законом тяготения Ньютона. В макромире оно тем сильнее, чем больше массы взаимодействующих тел. В микромире гравитационное взаимодействие теряется на фоне более мощных сил. Гравитационные взаимодействия обуславливают образование всех космических систем, а также концентрацию рассеянной материи звезд и галактик.

Переносчиком гравитационного взаимодействия является квант гравитационного поля – **гравитон**. Гравитационные волны были впервые зафиксированы в 2015 г.