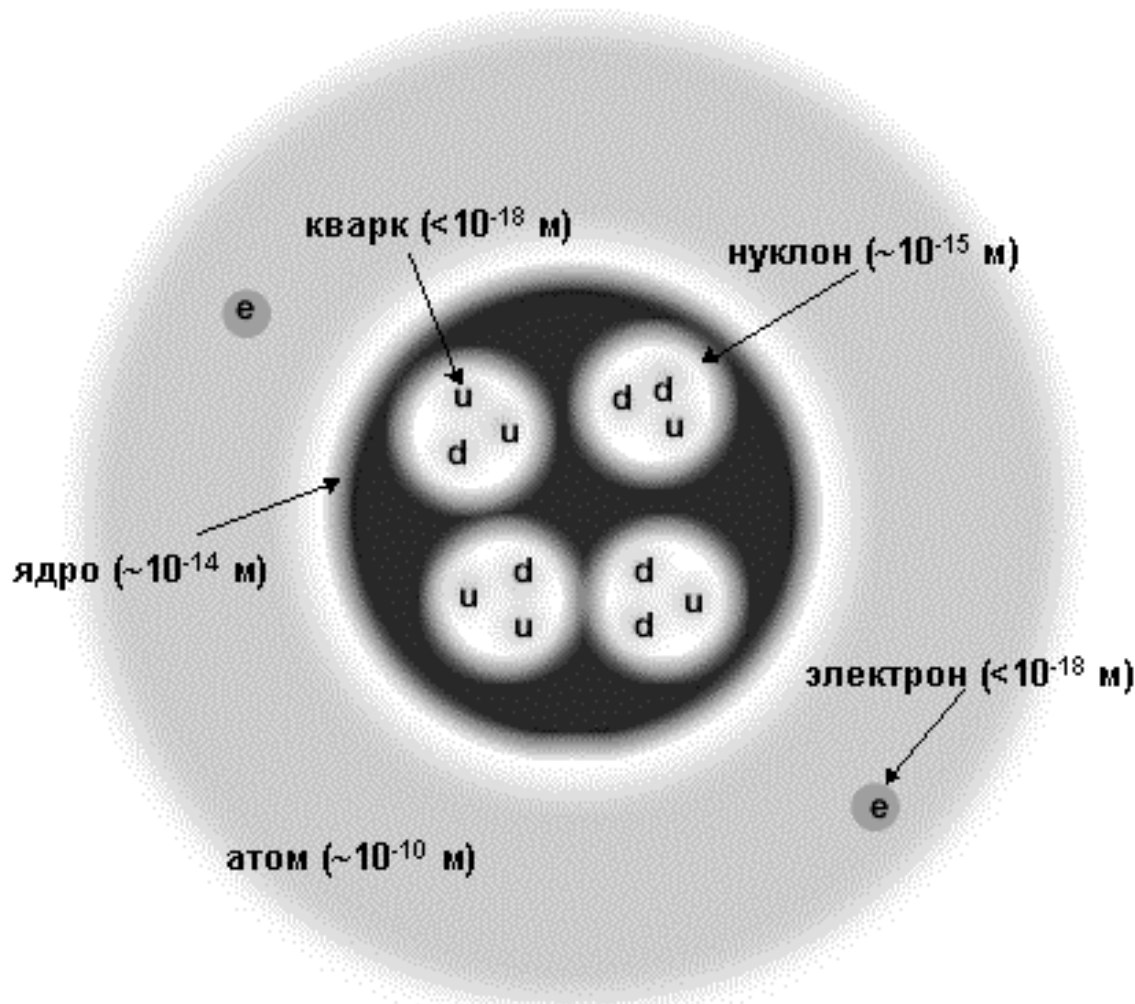


АТОМНОЕ ЯДРО

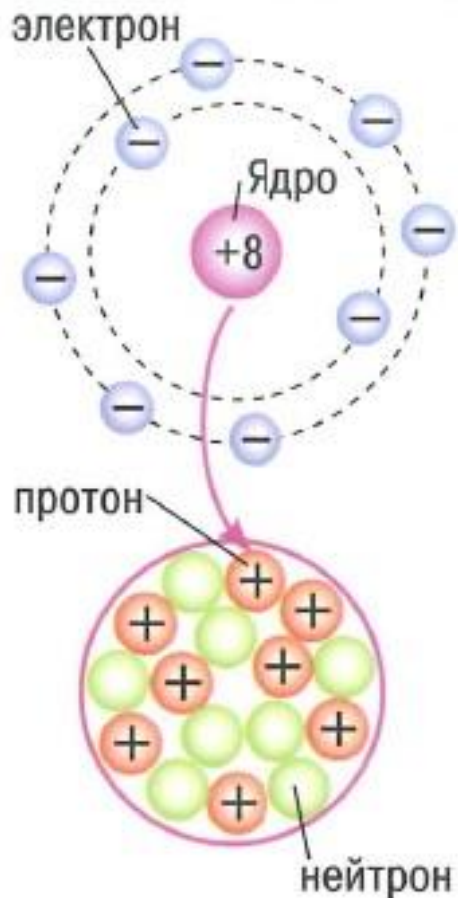
Атомное ядро

Ядро – центральная часть атома, в которой сосредоточена практически вся масса атома и его положительный электрический заряд.

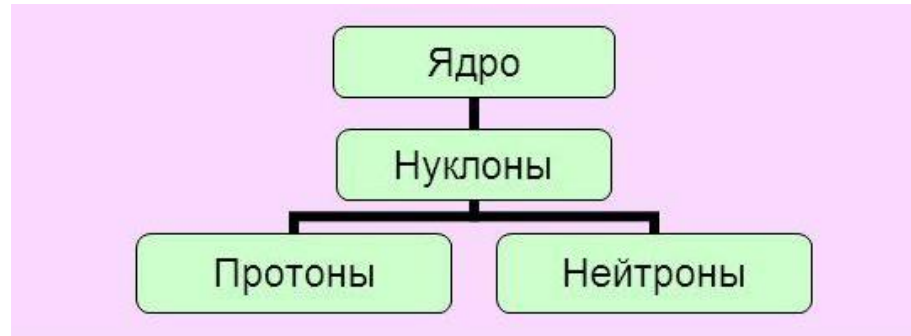


Атомное ядро

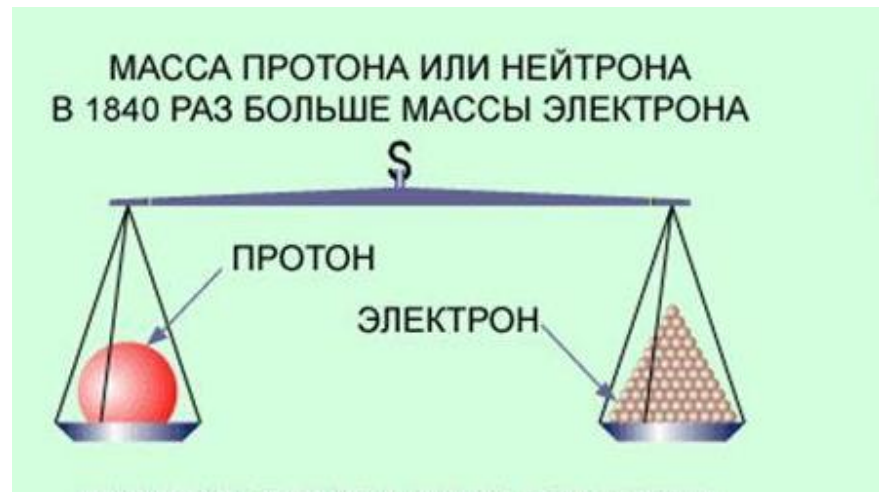
В состав атомного ядра входят элементарные частицы: **протоны** и **нейтроны** (нуклоны).



$$A = Z + N$$



Протон имеет положительный заряд $e^+ = 1,60 \cdot 10^{-19}$ Кл и массу покоя $m_p = 1,673 \cdot 10^{-27}$ кг = $1836 m_e$.



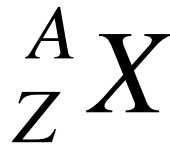
Состав атомного ядра

Заряд ядра равен Ze ,

где e – заряд протона, Z – зарядовое число, равное порядковому номеру химического элемента в периодической системе элементов Менделеева, т.е. числу **протонов** в ядре.

В настоящее время известны ядра с $Z = 1$ до $Z = 107 - 118$.

$A = Z + N$ называется **массовым числом** (число нуклонов в ядре).



Ядра с одинаковым Z , но различными A называются **изотопами**.

Ядра, которые при одинаковом A имеют разные Z называются **изобарами**.

Ядра с одинаковым числом N называются **изотонами**.

$$R = R_0 A^{1/3} - \text{радиус ядра, где } R_0 = (1,3 \div 1,7) \cdot 10^{-15} \text{ м.}$$

Состав атомного ядра

Протоны и нейтроны являются **фермионами**, так как имеют спин $\hbar/2$. Ядро атома имеет собственный момент импульса – **спин ядра**, равный

$$L_{\text{яд}} = \hbar \sqrt{I(I + 1)}$$

I – внутреннее (полное) спиновое квантовое число.

Единицей измерения магнитных моментов ядер служит **ядерный магнетон** $\mu_{\text{яд}}$:

$$\mu_{\text{яд}} = \frac{e\hbar}{2m_p}$$

Состав атомного ядра

Ядерное сильное взаимодействие – притяжение – обеспечивающее устойчивость ядер несмотря на отталкивание одноименно заряженных протонов.

Энергией связи нуклона в ядре называется физическая величина, равная той работе, которую нужно совершить для удаления нуклона из ядра без сообщения ему кинетической энергии.

Энергия связи ядра определяется величиной той работы, которую нужно совершить, чтобы расщепить ядро на составляющие его нуклоны без придания им кинетической энергии.

Состав атомного ядра



Если ядро массой $M_{\text{яд}}$ образовано из Z протонов с массой m_p и из $(A - Z)$ нейтронов с массой m_n , то

$$\Delta m = Zm_p + (A - Z)m_n - M_{\text{яд}}$$

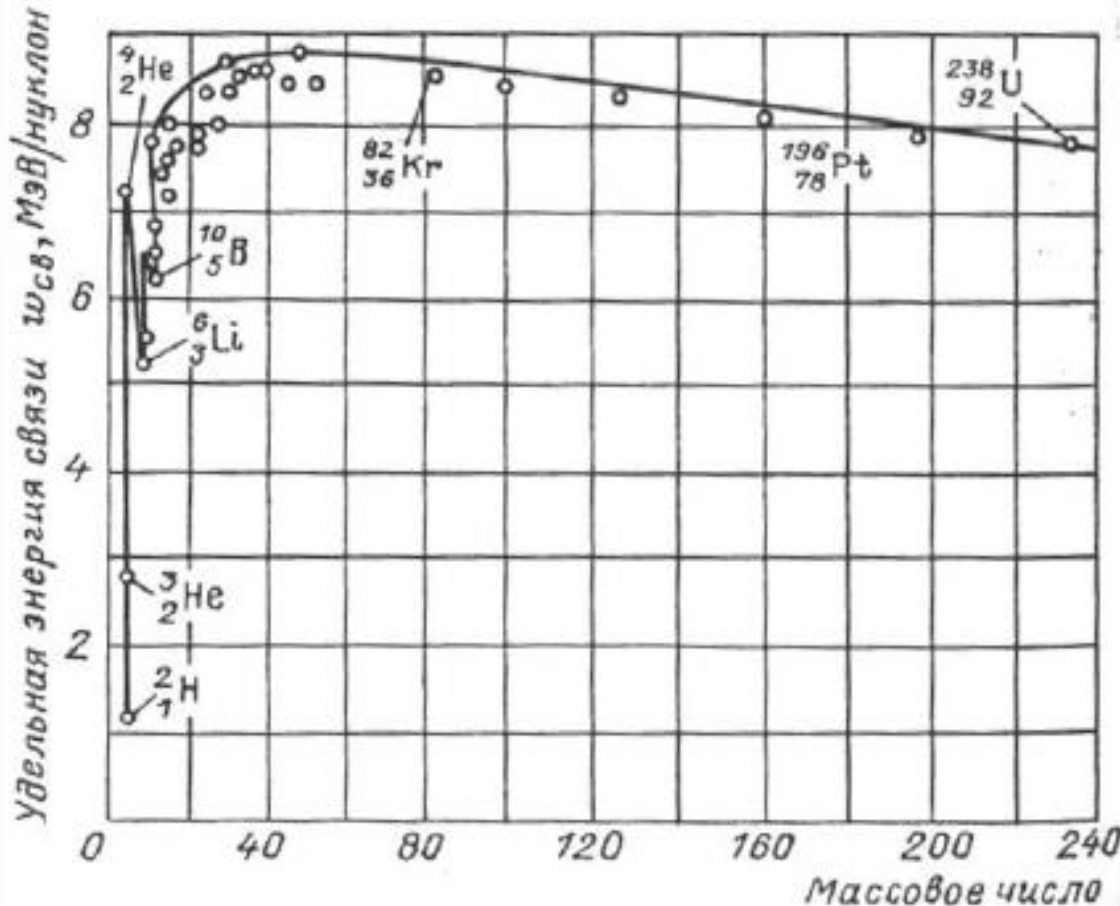
$$\Delta m = \frac{W_{\text{св}}}{c^2} - \text{называется дефектом масс.}$$

$W_{\text{св}}$ – величина энергии, выделяющейся при образовании ядра.

Состав атомного ядра

$$\Delta m = Zm_p + (A - Z)m_n - M_{\text{яд}} - \text{дефект масс.}$$

На эту величину уменьшается масса всех нуклонов при образовании из них атомного ядра.



Удельной энергией связи ядра $\omega_{\text{св}}$ называется энергия связи, приходящаяся на один нуклон:

$$\omega_{\text{св}} = \frac{W_{\text{св}}}{A}$$

Величина $\omega_{\text{св}}$ составляет в среднем 8 МэВ/нуклон.

Состав атомного ядра

Если ядро имеет наименьшую возможную энергию

$$W_{\min} = -W_{\text{св}},$$

то оно находится в **основном энергетическом состоянии**.

Если ядро имеет энергию $W > W_{\min}$,

то оно находится в **возбужденном энергетическом состоянии**.

Случай $W = 0$ соответствует **расщеплению ядра** на составляющие его нуклоны.

Ядерные силы

Между составляющими ядро нуклонами действуют особые, специфические для ядра силы, значительно превышающие кулоновские силы отталкивания между протонами – **ядерные силы**.

Ядерные силы являются **короткодействующими силами**. Они проявляются лишь на весьма малых расстояниях между нуклонами в ядре 10^{-15} м.

Длина $(1,5 \div 2,2) \cdot 10^{-15}$ м называется **радиусом действия ядерных сил**.

Ядерные силы обнаруживают **зарядовую независимость**: притяжение между двумя нуклонами одинаково независимо от зарядового состояния нуклонов – протонного или нейтронного.

Ядерные силы относят к классу **сильных взаимодействий**.

Ядерные силы

Свойства ядерных сил:

- ядерные силы являются **силами притяжения**;
- ядерным силам свойственна **зарядовая независимость**: ядерные силы, действующие между двумя протонами или двумя нейтронами, или между протоном и нейтроном, одинаковы по величине. Отсюда следует, что ядерные силы имеют неэлектрическую природу;
- ядерные силы являются **короткодействующими** – их действие проявляется только на расстоянии 10^{-15} м. При увеличении расстояния между нуклонами ядерные силы быстро уменьшаются до нуля, а при расстояниях, меньших их радиуса действия, оказываются примерно в 100 раз больше кулоновских сил, действующих между протонами на том же расстоянии;

Ядерные силы

Свойства ядерных сил:

- ядерным силам свойственно **насыщение**, т.е. каждый нуклон в ядре взаимодействует только с ограниченным числом ближайших к нему нуклонов. Насыщение проявляется в том, что удельная энергия связи нуклонов в ядре при увеличении числа нуклонов не растет, а остается приблизительно постоянной;
- ядерные силы зависят от взаимной ориентации спинов взаимодействующих нуклонов;
- ядерные силы не являются центральными, т.е. действующими по линии, соединяющей центры взаимодействующих нуклонов.

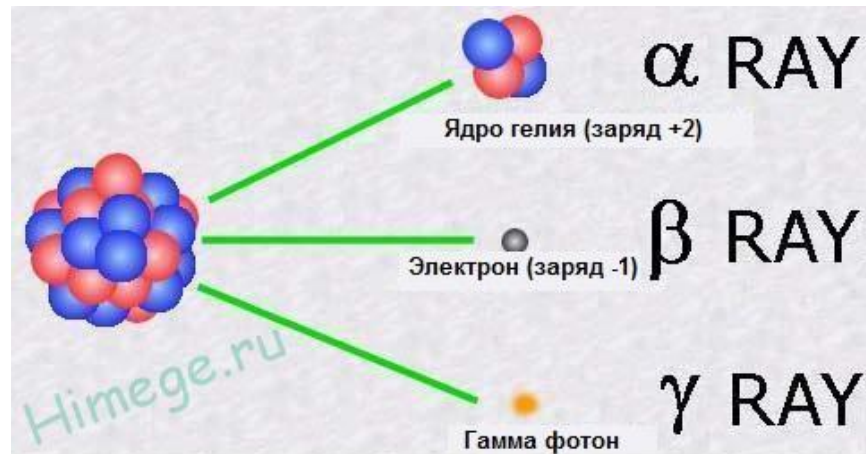
Ядерные силы

Свойства ядерных сил:

- Малый радиус действия ядерных сил ($a \sim 1$ фм).
- Притяжение между нуклонами на больших расстояниях ($r > 1$ фм) сменяется отталкиванием на малых ($r < 0,5$ фм).
- Длина $(1,5 \div 2,2) \cdot 10^{-15}$ м называется **радиусом действия ядерных сил**.
- Зависимость ядерных сил от спинов взаимодействующих частиц.
- Ядерное взаимодействие обладает свойством насыщения.
- Зарядовая независимость ядерных сил ($n-n$, $p-p$, $n-p$).
- Ядерные силы зависят от взаимной ориентации спинового и орбитального моментов нуклона (спин-орбитальные силы).

Радиоактивность

Радиоактивностью называется превращение неустойчивых изотопов одного химического элемента в изотопы другого элемента, сопровождающееся **испусканием некоторых частиц.**



Радиоактивные процессы:

- α - распад
- β – распад (в том числе электронный захват)
- γ – излучение ядер
- спонтанное деление тяжелых ядер
- протонная радиоактивность

Радиоактивность

Радиоактивностью называется превращение неустойчивых изотопов одного химического элемента в изотопы другого элемента, сопровождающееся **испусканием некоторых частиц.**

Естественной радиоактивностью называется радиоактивность, наблюдающаяся у существующих в природе неустойчивых изотопов.

Искусственной радиоактивностью называется радиоактивность изотопов, полученных в результате ядерных реакций.

Закон радиоактивного превращения

$$dN = -\lambda N dt$$



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

N_0 – количество ядер в данном объеме вещества в начальный момент времени $t = 0$,

N – число ядер в том же объеме к моменту времени t ,

λ – постоянная распада.

Закон самопроизвольного радиоактивного распада основывается на двух предположениях:

- постоянная распада не зависит от внешних условий;
- число ядер, распадающихся за время dt , пропорционально начальному количеству ядер.

Закон радиоактивного превращения

Количество ядер, распавшихся за время t , определяется выражением:

$$N_0 - N = N_0(1 - e^{-\lambda t})$$

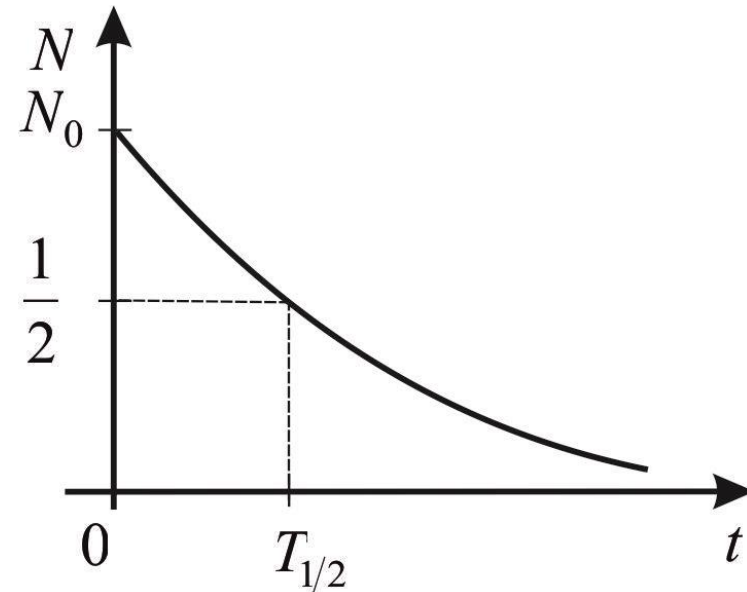
Характеристикой устойчивости ядер относительно распада служит **период полураспада** $T_{1/2}$.

Так называется время, в течение которого первоначальное количество ядер данного радиоактивного вещества уменьшается наполовину.

$$\frac{1}{2}N_0 = N_0e^{-\lambda T}$$

Связь λ и $T_{1/2}$:

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



Закон радиоактивного превращения

Величина $1/\lambda = \tau$ - **средней продолжительности жизни** (среднее время жизни τ) радиоактивного изотопа.

Средняя продолжительность τ жизни всех первоначально существовавших ядер:

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

Суммарная продолжительность жизни dN ядер равна

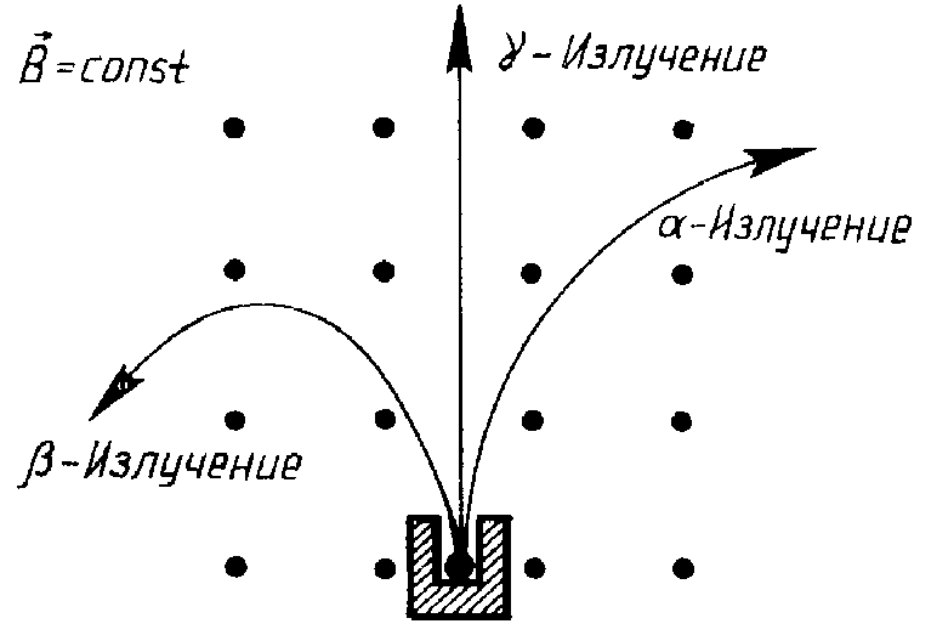
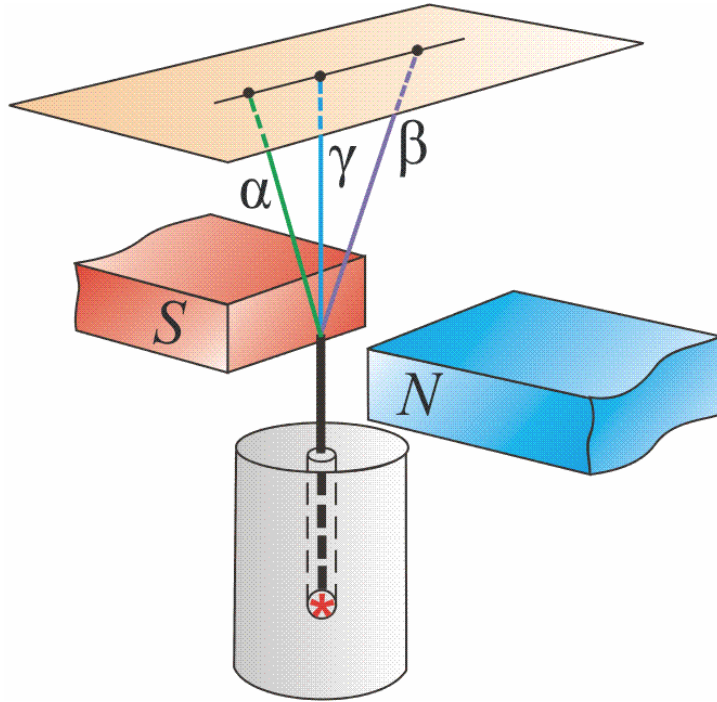
$$t|dN| = t\lambda N dt, \quad dN = -\lambda N dt$$

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

$$T_{1/2} = \ln 2 \cdot \tau = 0,693 \tau$$

Радиоактивность

Поведение разных типов радиоактивного излучения в магнитном поле:



Альфа-лучи отклоняются в ту же сторону, что и поток положительно заряженных частиц

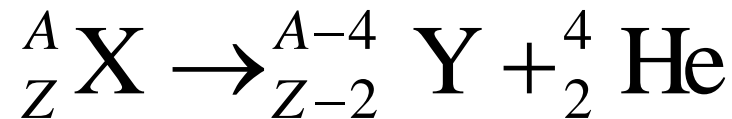
Бета-лучи – в противоположную сторону (как поток отрицательных частиц)

Гамма-лучи никак не реагируют на действие магнитного поля

Тип радиоактивности	Изменение Заряда ядра Z	Изменение массового числа A	Характер процесса
Альфа-распад	$Z - 2$	$A - 4$	Вылет α -частицы – системы двух протонов и двух нейтронов, соединенных воедино
Бета-распад	$Z \pm 1$	A	Взаимные превращения в ядре нейтрона (1_0n) и протона (1_1p)
β_- – распад	$Z + 1$	A	${}^1_0n \rightarrow {}^1_1p + ({}^0_{-1}e + {}^0_0\tilde{\nu}_e)$
β_+ – распад	$Z - 1$	A	${}^1_1p \rightarrow {}^1_0n + ({}^0_1e + {}^0_0\nu_e)$
Электронный захват (e^- или К-захват)	$Z - 1$	A	${}^1_1p \rightarrow {}^1_0n + ({}^0_1e + {}^0_0\nu_e)$ ${}^0_0\nu_e$ и ${}^0_0\tilde{\nu}_e$ – электронное нейтрино и антинейтрино. В скобках указаны частицы, вылетающие из ядра.
Спонтанное деление	$Z - (1/2)A$	$A - (1/2)A$	Деление ядра обычно на два осколка, имеющие приблизительно равные массы и заряды

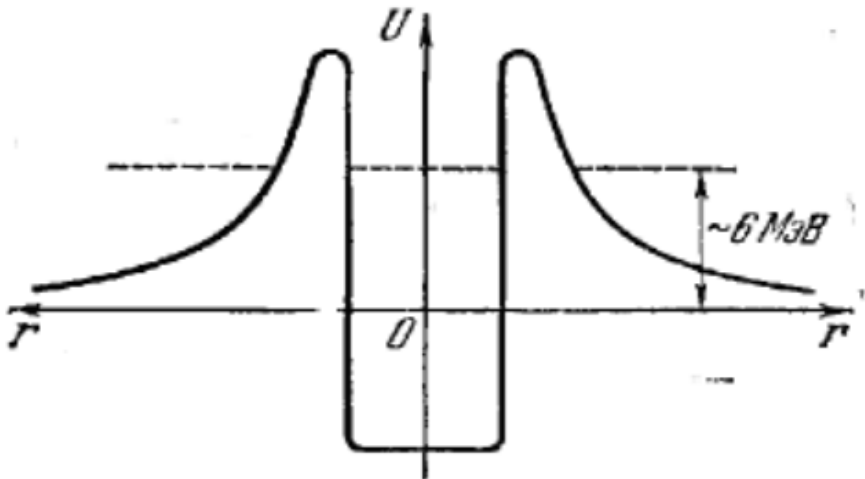
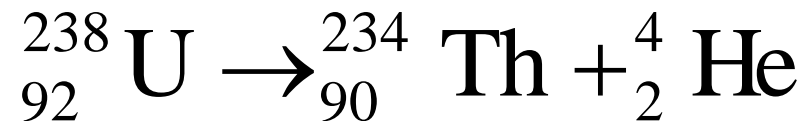
Альфа-распад

Альфа-лучи – поток ядер гелия ${}^4_2\text{He}$.



X – химический символ распадающегося (материнского) ядра,

Y – химический символ образующегося (дочернего) ядра.



Покидая ядро, α -частица преодолевает потенциальный барьер, высота которого превосходит полную энергию α -частицы. Имеет место туннельный эффект.

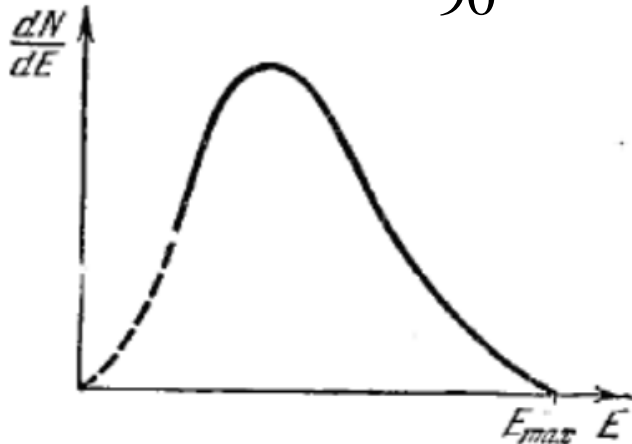
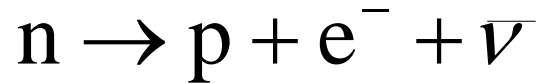
Бета-распад

Бета-распад- испускание электронов (e^-) или позитронов (e^+).

1) β^- - распад или электронный распад:



Простейшим примером бета-распада является превращение свободного нейтрона в протон с периодом полураспада 12 мин:



Энергетический спектр электронов, испускаемых ядрами при β -распаде.

Бета-распад

Бета-распад- испускание электронов (^-e) или позитронов (^+e).

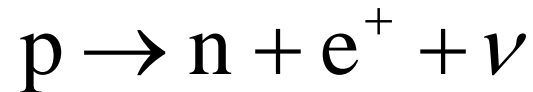
2) β^+ - распад или позитронный распад:



Пример:



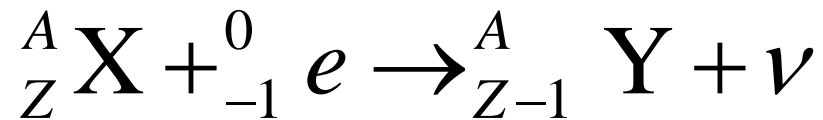
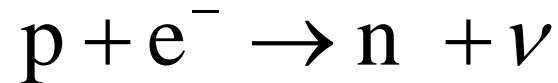
Процесс β^+ - распада протекает так, как если бы один из протонов исходного ядра превратился в нейтрон, испустив при это позитрон и нейтрино:



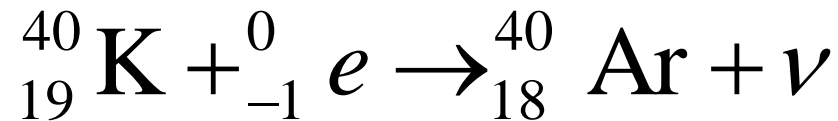
Бета-распад

Бета-распад- испускание электронов (e^-) или позитронов (e^+).

3) Электронный захват:



Пример:



Спонтанное деление тяжелых ядер

В 1940 г. советскими физиками Г.Н. Флеровым и К.А. Петржаком был обнаружен процесс самопроизвольного деления ядер урана на две примерно равные части. Впоследствии это явление было наблюждено и для многих других тяжелых ядер.

Протонная радиоактивность

При протонной радиоактивности ядро претерпевает превращение, испуская один или два протона.

Впервые наблюдался в 1963 г. группой советских физиков, руководимой Г.Н. Флеровым.

Активность радиоактивного вещества

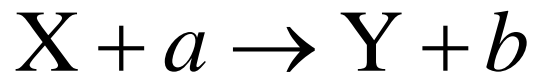
Активность радиоактивного препарата – число распадов, происходящих в препарате за единицу времени.

$$dN_{расп} = |dN| = \lambda N dt$$

Ядерные реакции

Ядерная реакция – процесс сильного взаимодействия атомного ядра с элементарной частицей или с другим ядром, приводящий к образованию ядра (или ядер).

Наиболее распространенный вид ядерной реакции:



Ядерные реакции могут сопровождаться как выделением, так и поглощением энергии. Количество выделяющейся энергии называется **энергией реакции**. Она определяется разностью масс (выраженных в энергетических единицах) исходных и конечных ядер.

Ядерные реакции

В 1936 г. Н. Бор установил, что реакции, вызываемые не очень быстрыми частицами, протекают в два этапа.

Первый этап – захват приблизившейся к ядру X частицы a и образование промежуточного ядра Π , называемого составным ядром.

Второй этап – составное ядро испускает частицу b .



Реакции, вызываемые быстрыми нуклонами, протекают без образования промежуточного ядра. Такие реакции называются **прямыми ядерными взаимодействиями**.

Ядерные реакции

Впервые ядерная реакция была осуществлена Резерфордом в 1919 г. При облучении азота α -частицами, испускаемыми радиоактивным источником, некоторые ядра азота превращались в ядра кислорода, испуская при этом протон.



ядро-мишень налетающая вылетевшая конечный
 частица частица продукт

Во всех ядерных реакциях должен соблюдаться баланс **протонов** и **нейтронов** в начальном и конечном состояниях.

Баланс массы – энергии в ядерной реакции можно рассчитать тем же способом, что и энергию связи, то есть

$$\Delta Mc^2 = \underbrace{\left[m({}^4\text{He}) + m({}^{14}\text{N}) \right]}_{\text{Сумма масс начального состояния}} - \underbrace{\left[m({}^{17}\text{O}) + m({}^1\text{H}) \right]}_{\text{Сумма масс конечного состояния}} c^2$$

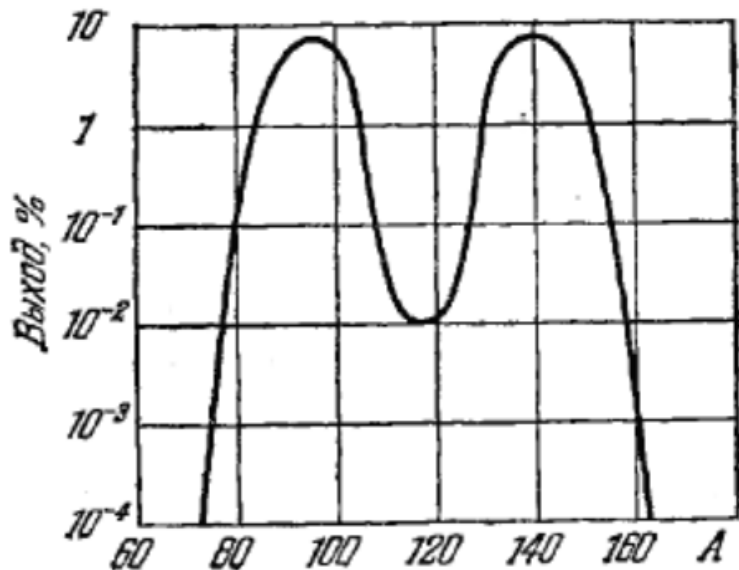
Если $Q > 0$, энергия высвобождается (реакция – **экзотермическая**)

Если $Q < 0$, энергия сообщается (реакция – **эндотермическая**)

Деление ядер

В 1938 г. немецкие ученые О. Ган и Ф. Штрассман обнаружили, что при облучении урана нейтронами образуются элементы из середины периодической системы – барий и лантан.

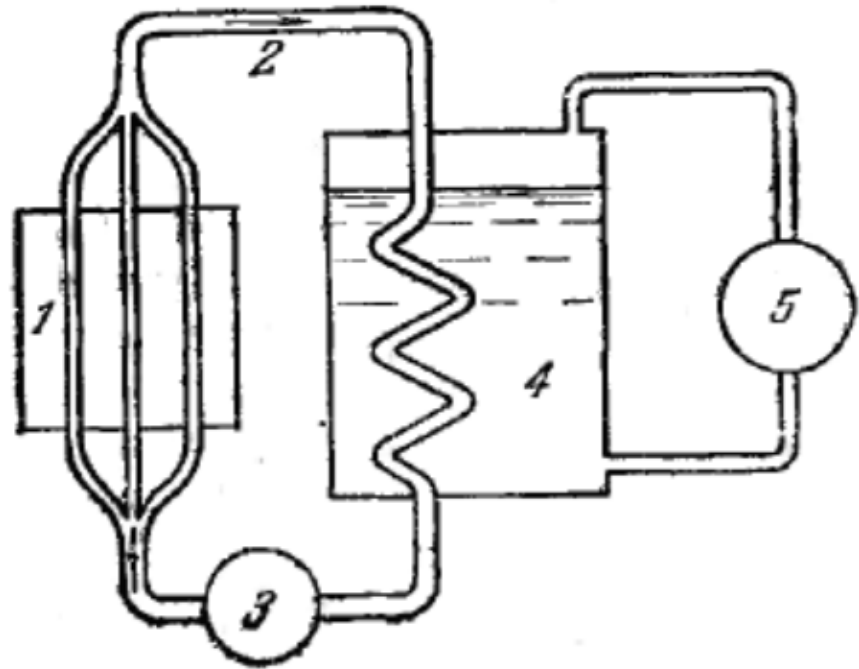
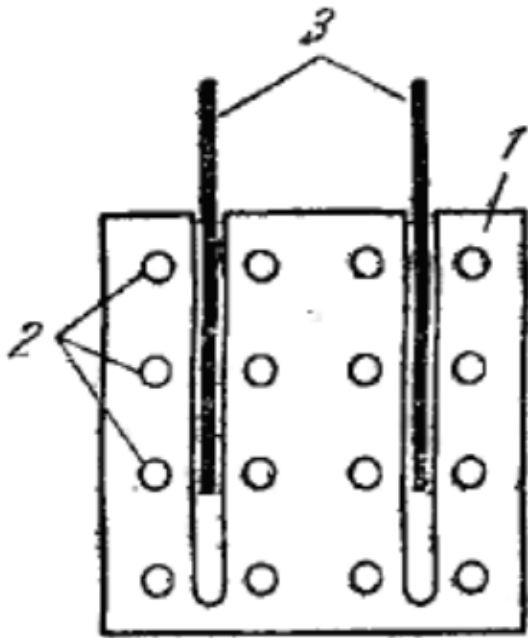
Объяснение этого явления было дано немецкими учеными О. Фришем и Лизой Мейтнер. Они высказали предположение, что захватившее нейтрон ядро урана делится на две примерно равные части, получившие название **осколков деления**.



Относительный выход осколков разной массы, возникающей при делении ^{235}U медленными нейтронами.

Деление ядер

Первый уран-графитовый реактор был пущен в декабре 1942 г. в Чикагском университете под руководством итальянского физика Э. Ферми. В Советском Союзе реактор такого же типа был пущен под руководством И.В. Курчатова в декабре 1946 г. в Москве.



Термоядерные реакции

Ядерный синтез, т.е. слияние легких ядер в одно ядро, сопровождается выделением огромных количеств энергии.

Поскольку для синтеза ядер необходимы очень высокие температуры, этот процесс называется **термоядерной реакцией**.

$$E = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{r_{\text{я}}}$$

$r_{\text{я}}$ – радиус действия ядерных сил ($\sim 2 \cdot 10^{-13}$ см).

Термоядерные реакции

Управляемый синтез.

Чтобы с помощью ядерного синтеза получить полезную энергию, термоядерные реакции должны быть управляемыми.

Необходимо найти способы создания и поддержания температур в миллионы градусов. Одна из технических проблем связана с тем, что высокотемпературный газ, или плазму, нужно удерживать таким образом, чтобы не расплавились стенки соответствующего объема.

Плазму изолируют от стенок с помощью сильных магнитных полей. Задача заключается в том, чтобы удержать плазму в изолированном состоянии в течение достаточно продолжительного времени и при этом выработать мощность, превышающую ту, которая была затрачена на запуск термоядерного реактора.

