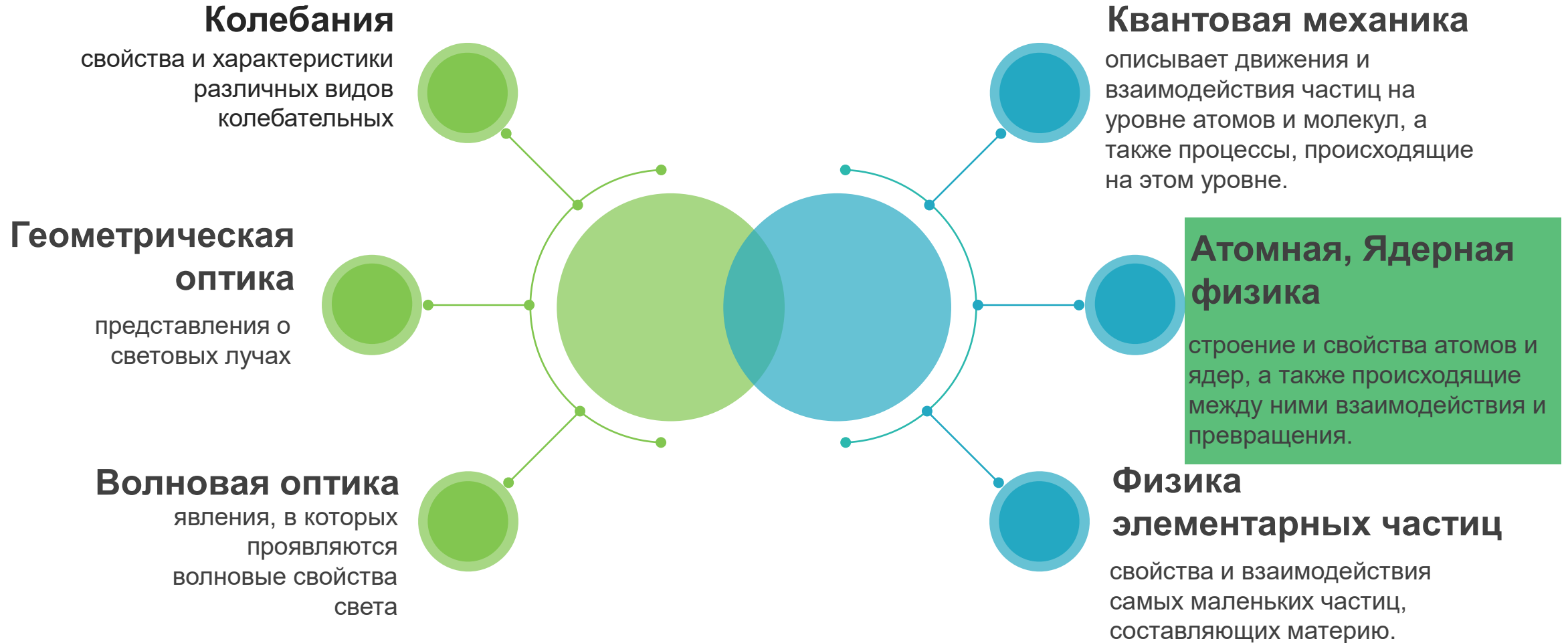


Лекция 14. Физика атомного ядра

Физика 3



Заряд, масса, размер и состав атомного ядра

Ядром называется центральная часть атома, в которой сосредоточена практически вся масса атома и его положительный заряд.

В состав атомного ядра входят элементарные частицы: протоны и нейтроны (нуклоны от латинского слова nucleus – ядро)

1932 г. Д.Д. Иваненко.

Протон (p)

$$e_+ = 1,06 \cdot 10^{-19} \text{ Кл.}$$

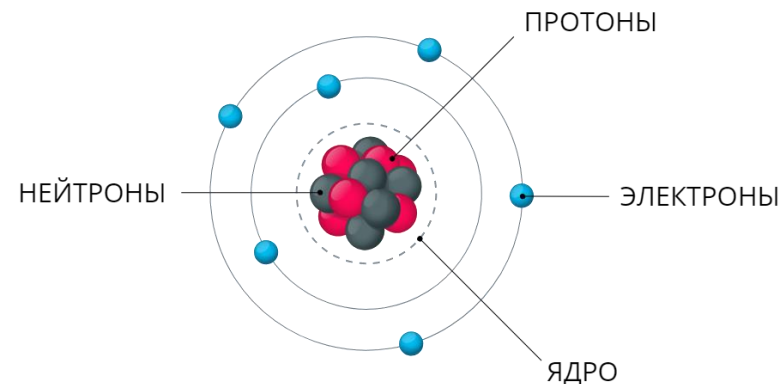
$$m_p = 1,673 \cdot 10^{-27} \text{ кг} = 1836 m_e$$

Нейтрон (n)

e – не имеет электрического заряда

$$m_n = 1,675 \cdot 10^{-27} \text{ кг} = 1839 m_e$$

где масса электрона $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг.}$



Заряд, масса, размер и состав атомного ядра

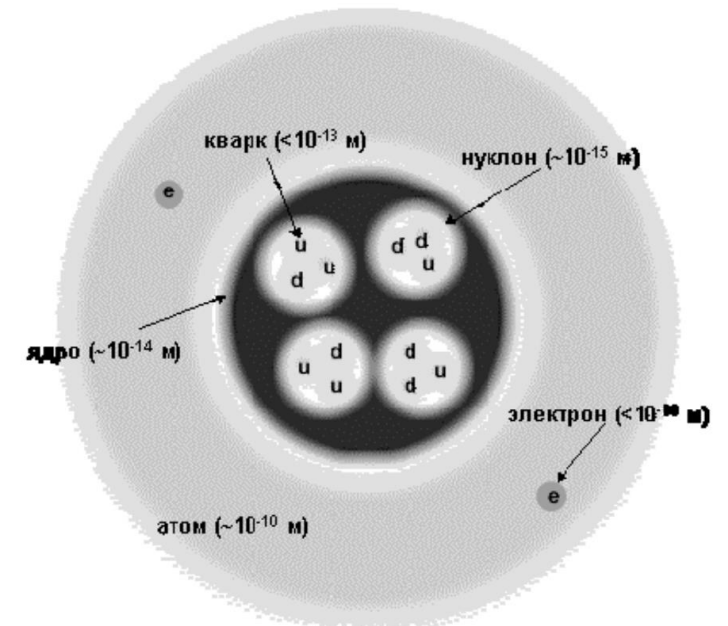
Заряд ядра равен Ze , где e – заряд протона, Z – зарядовое число, равное порядковому номеру химического элемента в периодической системе элементов Менделеева, т.е. числу протонов в ядре. Число нейтронов в ядре обозначается N , $Z > N$.

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

Число нуклонов в ядре $A = N + Z$ называется **массовым числом**.

Изотопы – Ядра с одинаковым Z , но различными A .

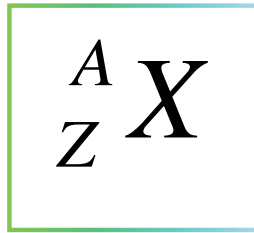
Изобары – Ядра, которые при одинаковом A имеют разные Z .



Заряд, масса, размер и состав атомного ядра

X — символ химического элемента.

Например: водород $Z = 1$ имеет три изотопа:



1_1H — протий ($Z = 1, N = 0$),

2_1H — дейтерий ($Z = 1, N = 1$),

3_1H — тритий ($Z = 1, N = 2$),

Например, олово имеет
10 изотопов.

Э. Резерфорд — размер ядра примерно равен 10^{-15} м (размер атома равен 10^{-10} м).

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

Объём ядра пропорционален числу нуклонов.

Плотность ядерного вещества составляет по порядку величины 10^{17} кг/м^3 и постоянна для всех ядер.

Заряд, масса, размер и состав атомного ядра

Ядро атома имеет собственный момент импульса – спин ядра: $L_{яд} = \hbar\sqrt{I(I+1)}$,

где I – внутреннее (полное) спиновое квантовое число. $I = 0, 1/2, 1, 3/2, 2$ и т.д.

Ядра с четными A имеют целочисленный спин (в единицах \hbar) – (бозоны). Ядра с нечетными A имеют полуцелый спин (в единицах \hbar) – (т.е. ядра – фермионы).

$P_{m\ яд}$ – Магнитный момент ядра, единицей измерения ядерный магнетон $\mu_{яд}$.

$$\mu_{яд} = \frac{e\hbar}{2m_p}$$

Ядерный магнетон в $m_p/m_e = 1836,5$ раз меньше магнетона Бора.

Магнитные свойства атомов определяются магнитными свойствами его электронов.

$$P_{m\ яд} = \gamma_{яд} L_{яд}$$

$\gamma_{яд}$ – ядерное гиромагнитное отношение.

Заряд, масса, размер и состав атомного ядра



Нейтрон имеет отрицательный магнитный момент $\mu_n \approx -1,913\mu_{яд}$, так как направление спина нейтрона и его магнитного момента противоположны. Магнитный момент протона положителен и равен $\mu_p \approx 2,793\mu_{яд}$. Его направление совпадает с направлением спина протона.

Энергия связи ядер. Дефект массы



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.

Из закона сохранения энергии следует, что при образовании ядра должна выделяться такая энергия, которую нужно затратить при расщеплении ядра на составляющие его нуклоны.

Энергия связи ядер. Дефект массы



При образовании ядра происходит уменьшение его массы: масса ядра меньше, чем сумма масс составляющих его нуклонов.

$W_{\text{св}}$ – величина энергии, выделяющейся при образовании ядра, соответствующая ей масса:

$$\Delta m = \frac{W_{\text{св}}}{c^2} \quad \text{— Дефект массы}$$

Дефект массы характеризует уменьшение суммарной массы при образовании ядра из составляющих его нуклонов.

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

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

Энергия связи ядер. Дефект массы



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

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

Вместо массы ядра $M_{\text{яд}}$ величину Δm можно выразить через атомную массу $M_{\text{ат}}$:

$$\Delta m = Zm_H + (A - Z)m_n = M_{\text{ат}},$$

где m_H – масса водородного атома.

Дефект массы всех частиц и атомов выражаются в атомных единицах массы (а.е.м.).

Одной атомной единице массы соответствует атомная единица энергии (а.е.э.): 1 а.е.э. = 931,5016 МэВ.

Энергия связи ядер. Дефект массы

Дефект массы служит мерой энергии связи ядра:

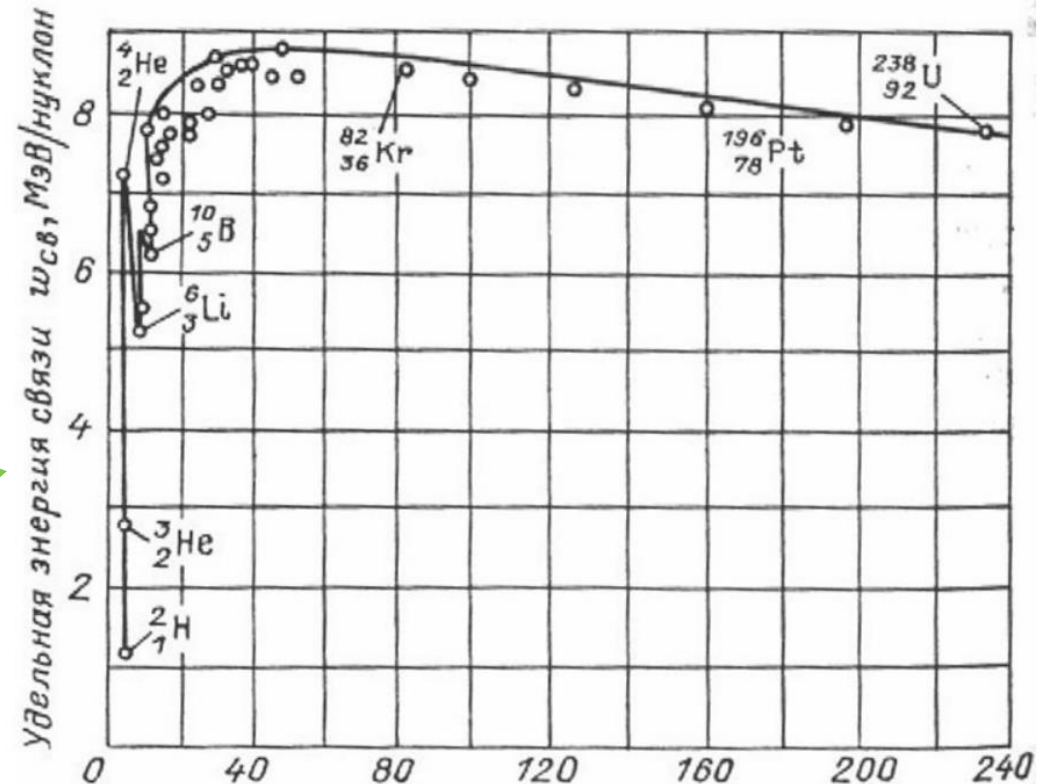
$$W_{св} = \Delta mc^2 = [Zm_p + (A - Z)m_n - M_{яд}] \cdot c^2$$

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

$$\omega_{св} = \frac{W_{св}}{A}$$

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

прочность связей нуклонов
в ядрах разных химических
элементов.



Энергия связи ядер. Дефект массы

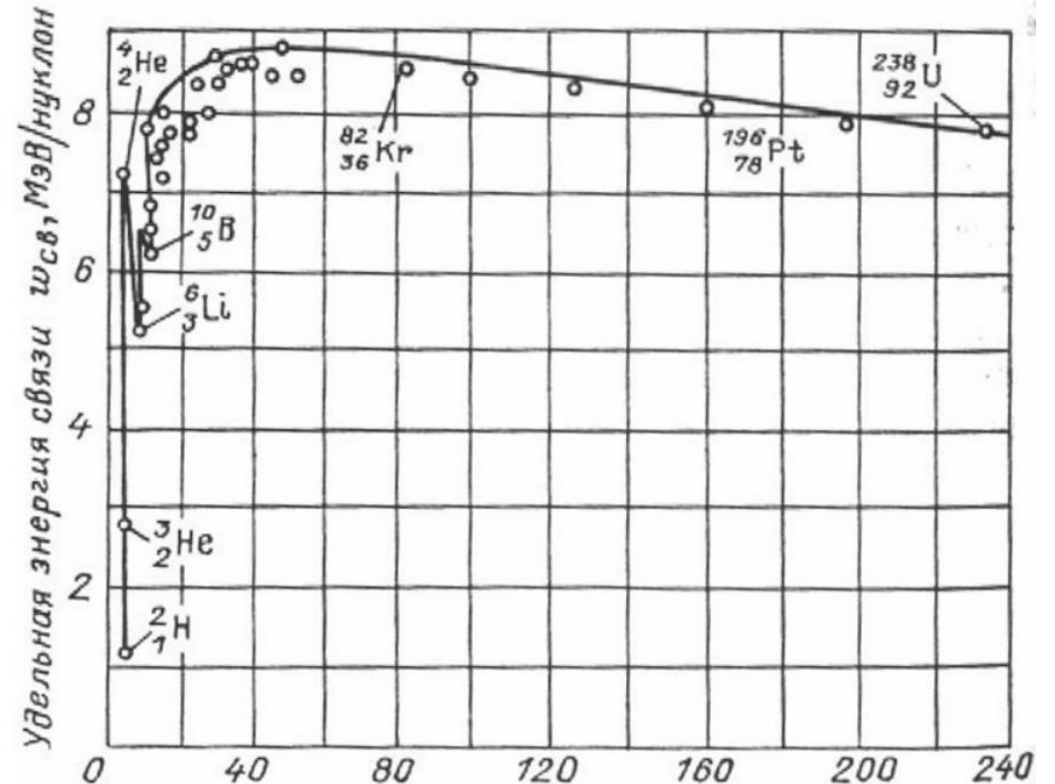
Ядра элементов в средней части периодической системы ($28 < A < 138$), наиболее прочны.

По мере увеличения числа нуклонов в ядре удельная энергия связи убывает. Ядра атомов химических элементов, расположенных в конце периодической системы (например ядро урана), имеют $\omega_{\text{св}} \approx 7,6$ МэВ/нуклон

В области малых массовых чисел:

Максимумы характерны для ядер с четными числами протонов и нейтронов (He 4 2 , C12 6 , O16 8),

минимумы – для ядер с нечетными количествами протонов и нейтронов (Li 6 3 , B10 5 , N14 7).



Энергия связи ядер. Дефект массы



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 ядра - 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.

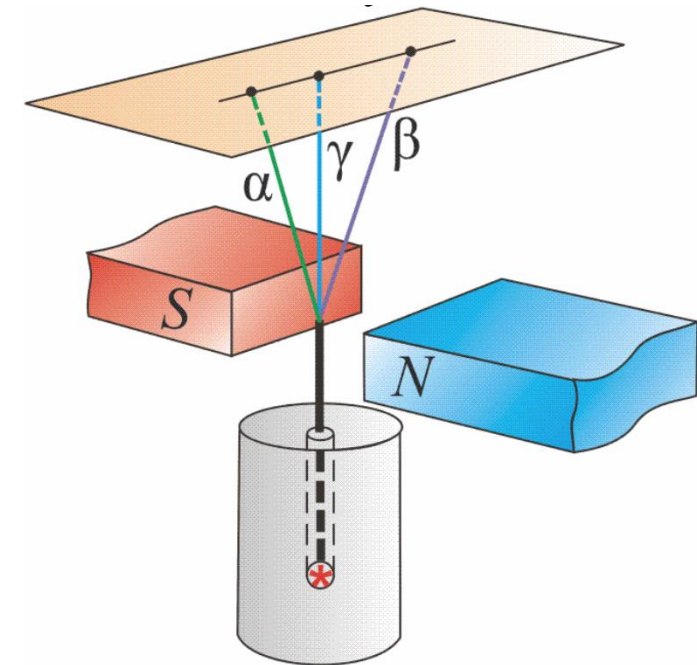
Естественной радиоактивностью называется радиоактивность, наблюдающаяся у существующих в природе неустойчивых изотопов.

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

Радиоактивность

Обычно все типы радиоактивности сопровождаются испусканием гамма-излучения – жесткого, коротковолнового электромагнитного излучения. Гамма-излучение является основной формой уменьшения энергии возбужденных продуктов радиоактивных превращений.

Ядро, испытывающее радиоактивный распад, называется материнским; возникающее дочернее ядро, как правило, оказывается возбужденным, и его переход в основное состояние сопровождается испусканием γ -фотона.



Радиоактивность

Закон радиоактивного распада:

$$N = N_0 e^{-\lambda T},$$

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**, имеющая смысл вероятности распада ядра за 1 секунду и равная доле ядер, распадающихся за единицу времени.

Закон самопроизвольного радиоактивного распада основывается на двух предположениях:

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

Величина $\tau = \frac{1}{\lambda}$ – равна **средней продолжительности жизни** (среднее время жизни) радиоактивного изотопа.

Радиоактивность

Суммарная продолжительность жизни dN ядер равна: $t|dN| = tNdt$. Средняя продолжительность τ жизни всех первоначально существовавших ядер:

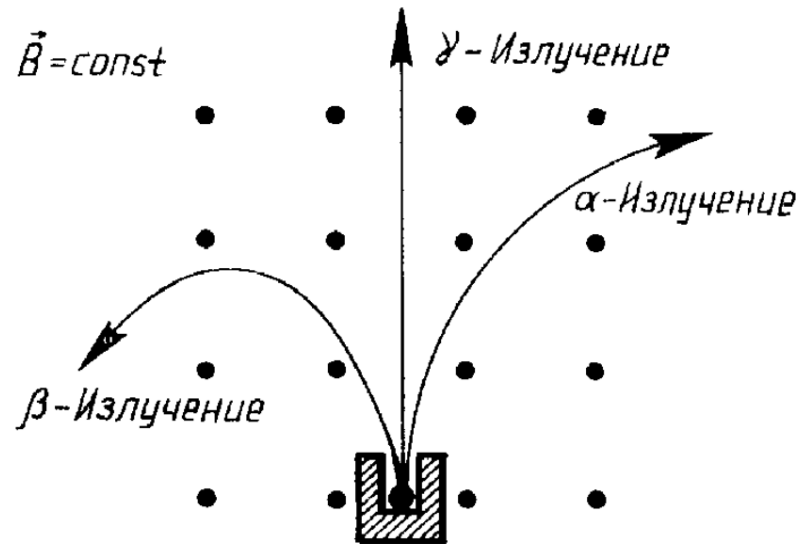
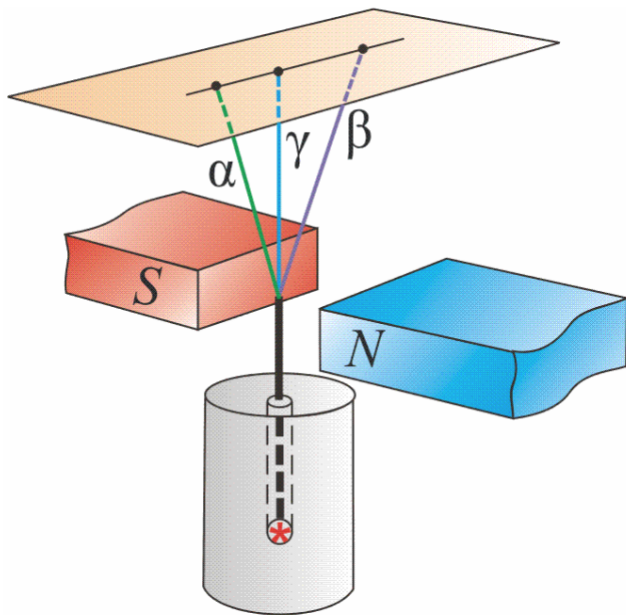
$$\tau = \frac{1}{N_0} \int_0^{\infty} \lambda N t dt = \lambda \int_0^{\infty} t e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda}.$$

Период полураспада $T_{1/2}$ – время, в течение которого первоначальное количество ядер данного радиоактивного вещества уменьшается наполовину.

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

Радиоактивность

Правило сохранения массовых чисел при явлениях естественной радиоактивности: $A_{\text{яд}} = \sum A_i$,
где $A_{\text{яд}}$ – массовое число материнского ядра, A_i – массовые числа ядер или частиц, получившихся
в результате радиоактивного распада.



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

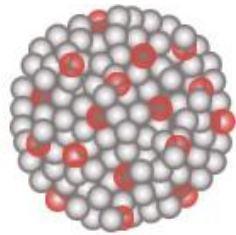
Радиоактивность

Основные типы радиоактивности

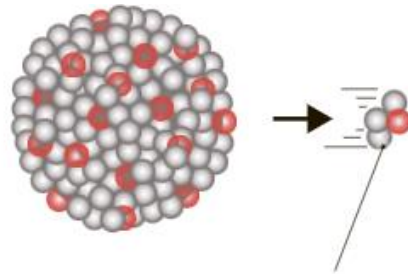
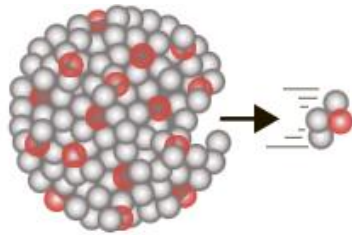
Тип радиоактивности	Изменение заряда ядра Z	Изменение массового числа A	Характер процесса
α -распад	$Z - 2$	$A - 4$	Вылет α -частицы – системы двух протонов и двух нейтронов, соединенных воедино
β -распад	$Z \pm 1$	A	Взаимные превращения в ядре нейтрона (1_0n) и протона (1_0p)
β_- -распад	$Z + 1$	A	${}^1_0n \rightarrow {}^1_1p + ({}^0_{-1}e + {}^0_0\tilde{\nu}_e)$
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
Спонтанное деление	$Z - (1/2)A$	$A - (1/2)A$	Деление ядра обычно на два осколка, имеющих приблизительно равные массы и заряды

Радиоактивность

Альфа-распад — самопроизвольное излучение α -частиц (${}^2_4\text{He}$ — полностью ионизированное ядро гелия). При α -распаде радиоактивное ядро X превращается в новое Y испуская при этом α -частицу.



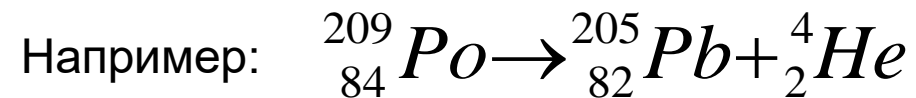
Ядро атома



Альфа - частица



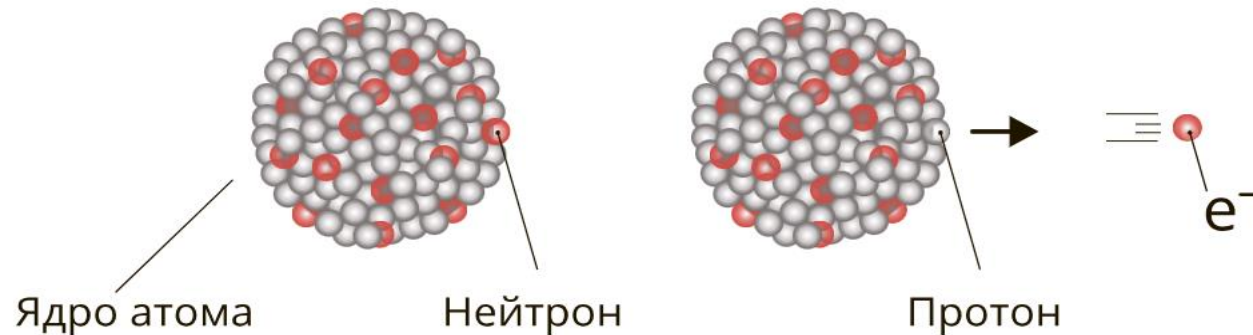
Здесь ${}^A_Z X$ — материнское ядро, Y — символ дочернего ядра, ${}^4_2 \text{He}$ — ядро гелия.



Массовое число 209 и заряд 84 распадающегося ядра атома полония равны, соответственно, сумме массовых чисел $205+4=209$, и сумме зарядов $82+2=84$ ядер атомов свинца и гелия.

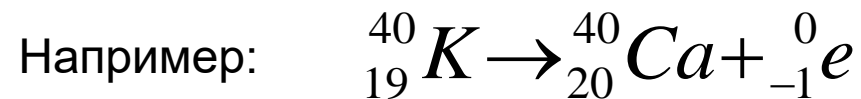
Радиоактивность

Бета – распад — радиоактивный распад атомного ядра, сопровождающийся вылетом из ядра электрона или позитрона.



Здесь ${}^A_Z X$ – материнское ядро, Y – символ дочернего ядра,

e – символическое обозначение электрона, для которого A = 0 и Z = -1.



Массовое число 40 и заряд 19 распадающегося ядра атома калия равны, соответственно, сумме массовых чисел 40+0=40, и сумме зарядов 20+(-1)=19 ядер атомов кальция и электрона.

Ядерные реакции и их основные типы



Ядерная реакция – это превращение атомных ядер при взаимодействии с элементарными частицами (в том числе и с γ -квантами) или друг с другом.

Наиболее распространенным видом ядерной реакции является реакция, записываемая символически следующим образом:



где X и Y – исходные и конечные ядра, a и b – бомбардирующая и испускаемая (или испускаемые) в ядерной реакции частица

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 и их основные типы



Н. Бора (1936 г.) о том, что ядерные реакции протекают в две стадии:



Первый этап – захват приблизившейся к ядру X частицы a и образование промежуточного ядра C , 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**

Деление ядер



В 1938 г. немецкие ученые О. Хан 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**.

В результате деления высвобождается энергия ~ 200 МэВ. Около 80 % ее приходится на энергию осколков. За один акт деления образуется более двух нейтронов деления со средней энергией ~ 2 МэВ.

Деление ядер

В 1 г любого вещества содержится $mc^2 = 9 \cdot 10^{13}$ Дж.

Деление 1 г урана сопровождается выделением $\sim 9 \cdot 10^{10}$ Дж.

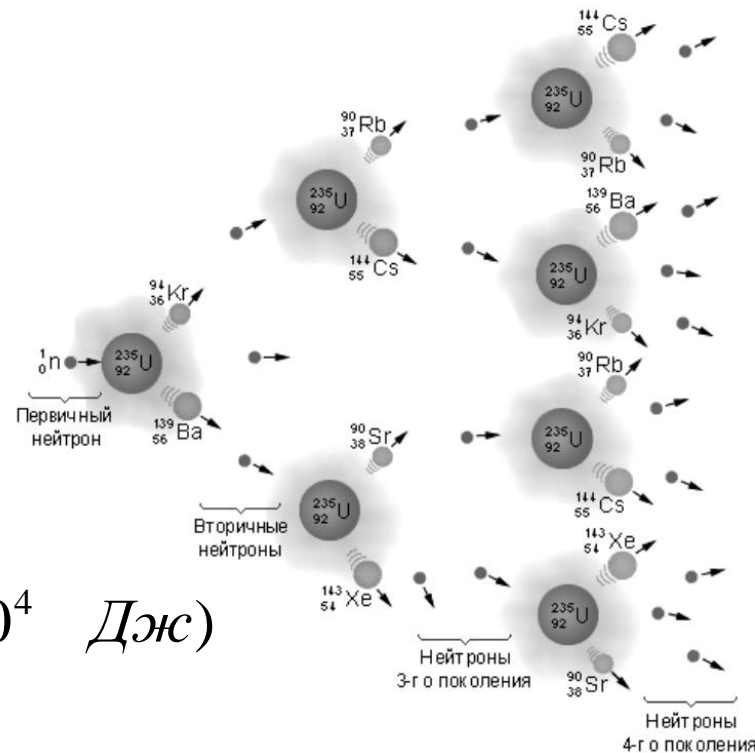
Это почти в 3 млн раз превосходит энергию сжигания 1 г угля ($2,9 \cdot 10^4$ Дж)

Стоимость 1 Дж энергии, полученной сжиганием угля, оказывается в 400 раз выше, чем в случае уранового топлива.

Благодаря цепной реакции процесс деления ядер можно сделать самоподдерживающимся.

Первый уран-графитовый реактор был пущен в декабре 1942 г. в Чикагском университете под руководством итальянского физика Э. Ферми.

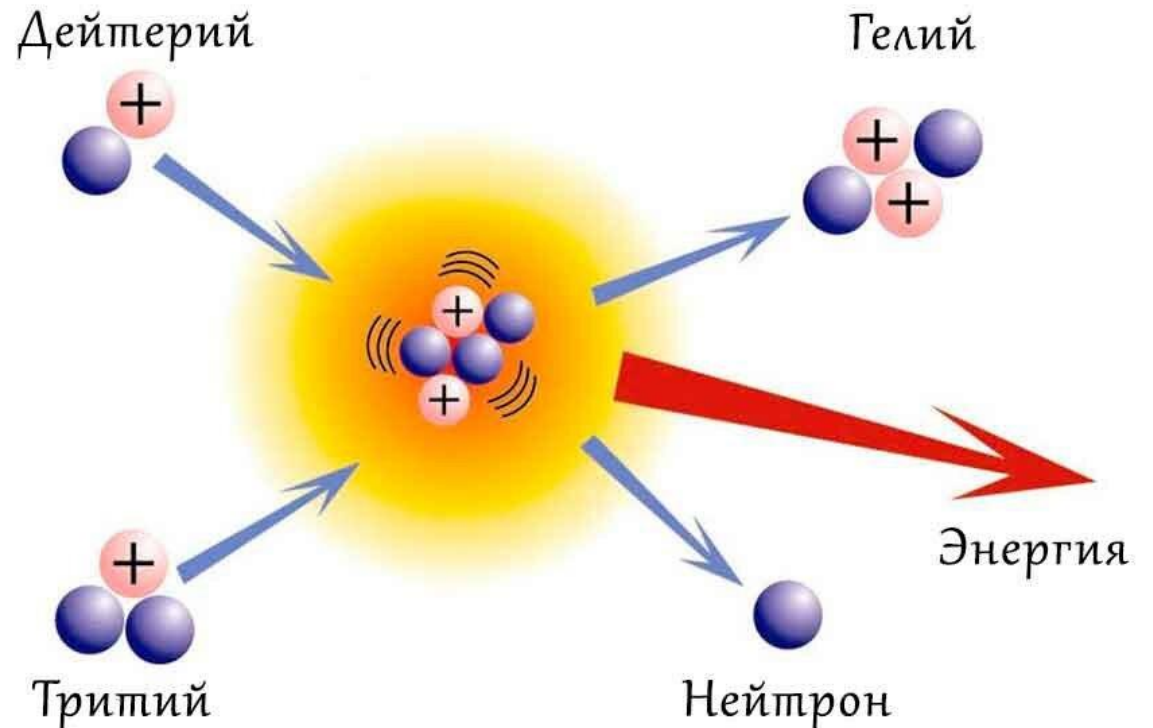
В Советском Союзе реактор такого же типа был пущен под руководством И.В. Курчатова в декабре 1946 г. в Москве.



Синтез ядер

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**.

Самая распространенная во Вселенной реакция — это реакция термоядерного синтеза ядер гелия из ядер водорода: в естественных условиях она непрерывно протекает в недрах практически всех видимых звезд, искусственная — в водородной бомбе.



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.