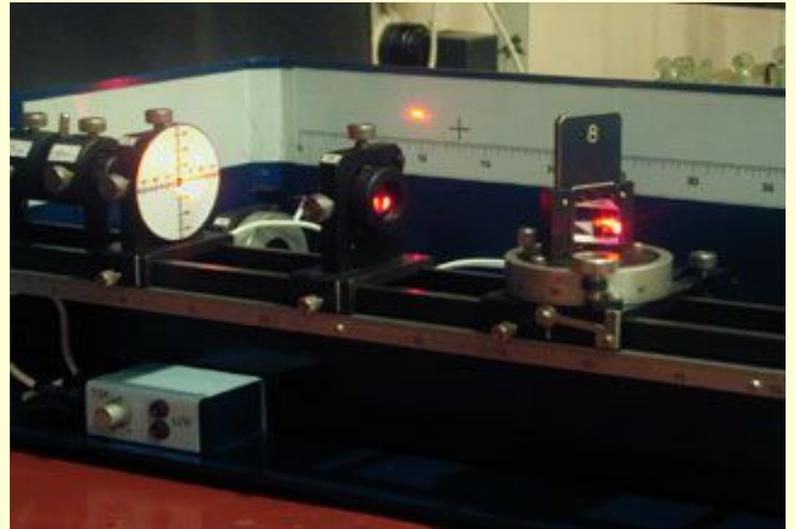


Оптика и квантовая физика

для студентов
2 курса ФТФ и ГГФ



Кафедра общей физики



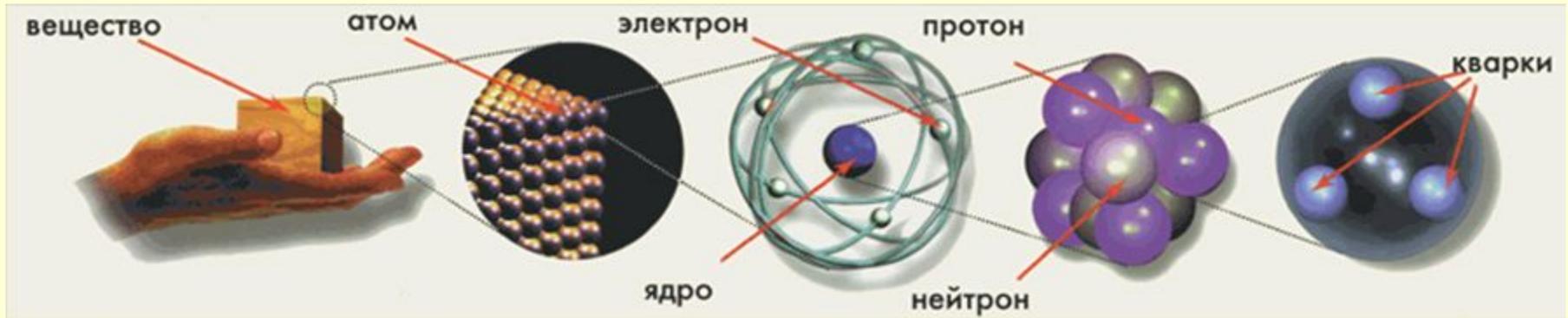
Лекция 12

Элементы физики атомного ядра



- Состав атомного ядра
- Характеристики ядра: заряд, масса, энергия связи нуклонов, ядерные силы
- Радиоактивность. Виды и законы радиоактивного излучения
- Энергия связи атомного ядра. Стабильность ядер

Состав атомного ядра



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

Заряд протона положительный $e^+ = 1,06 \cdot 10^{-19}$ Кл;

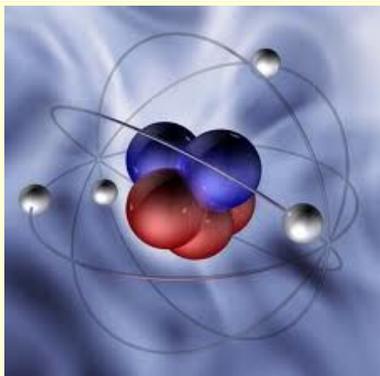
масса покоя $m_p = 1,673 \cdot 10^{-27}$ кг = $1836m_e$.

Нейтрон не имеет заряда;

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

http://ens.tpu.ru/POSOBIE_FIS_KUSN/%CA%E2%E0%ED%F2%EE%E2%E0%FF%20%EE%EF%F2%E8%EA%E0.%20%D4%E8%E7%E8%EA%E0%20%FD%EB%E5%EC%E5%ED%F2%E0%F0%ED%FB%F5%20%F7%0%F1%F2%E8%F6/09-1.htm

Состав атомного ядра



Заряд ядра равен Ze ,

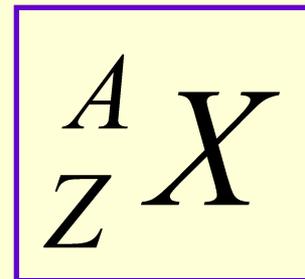
где e – заряд протона,

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

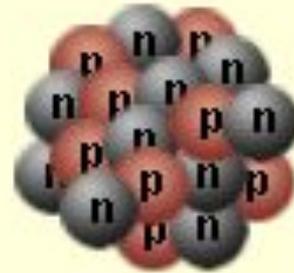
$Z = 1$ до $Z = 107 - 118$

$A = Z + N$ – **массовое число**.

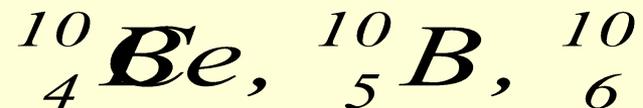


Состав атомного ядра

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

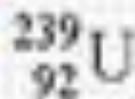
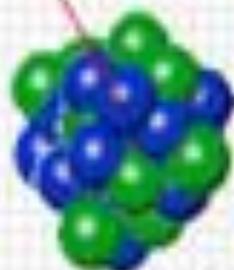
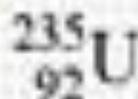
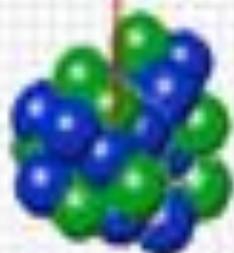
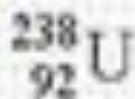
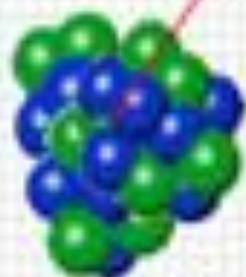


Ядра, которые при одинаковом A имеют разные Z называются *изобарами*.



Состав атомного ядра. Изотопы.

Атомы изотопов урана



протон



нейтрон



Атомы изотопов водорода

водород

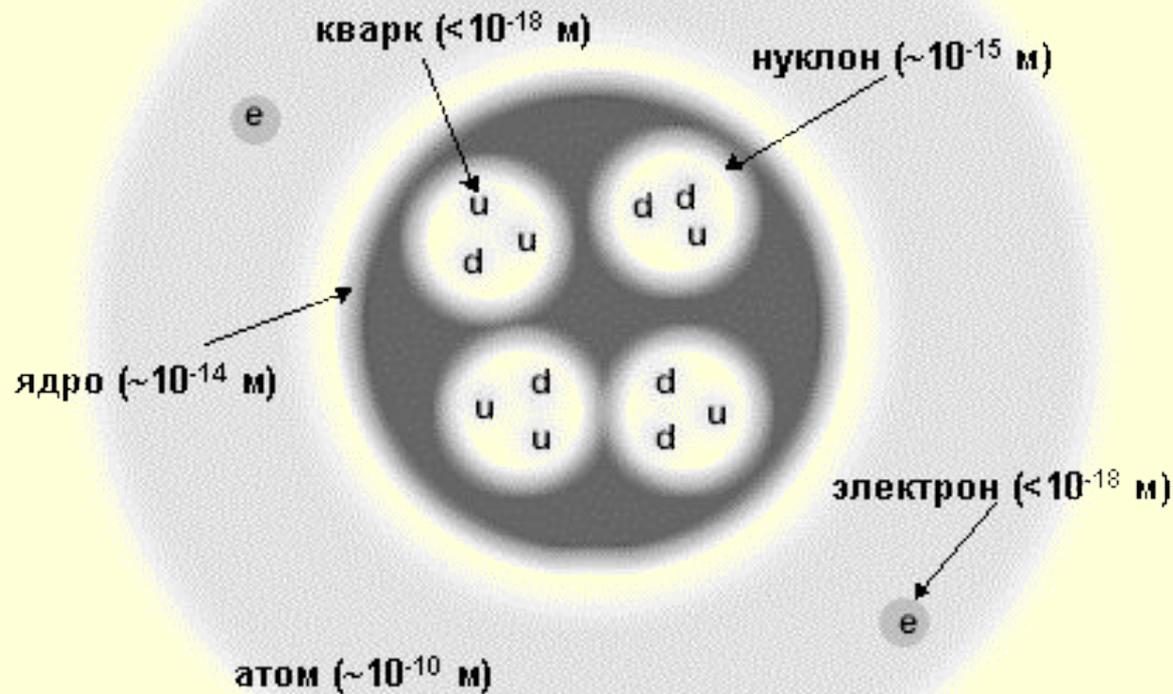


дейтерий



тритий





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

Плотность ядерного вещества – 10^{17} кг/м³

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** $\mu_{\text{яд}}$:

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

Ядерный магнетон в $m_p/m_e = 1836,5$ раз меньше магнетона Бора, откуда следует, что магнитные свойства атомов определяются магнитными свойствами его электронов.

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.

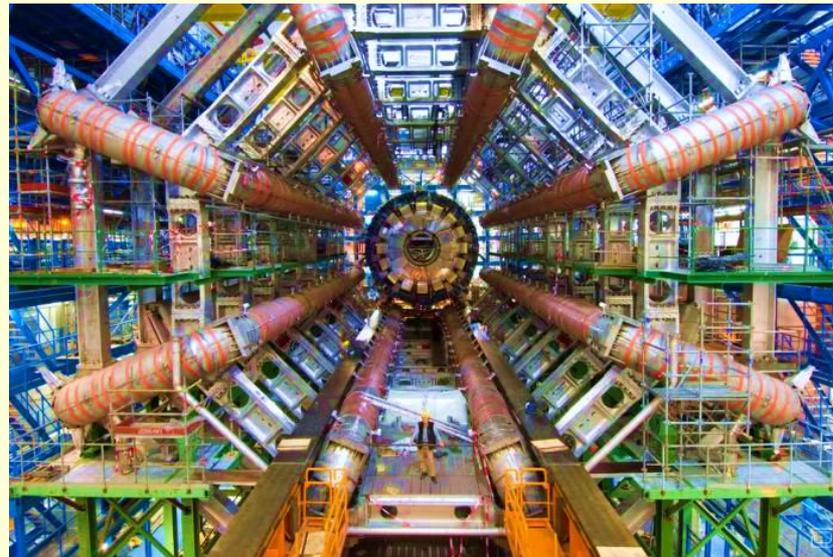
Искусственной радиоактивностью называется радиоактивность изотопов, полученных в результате ядерных реакций.



Радиоактивность

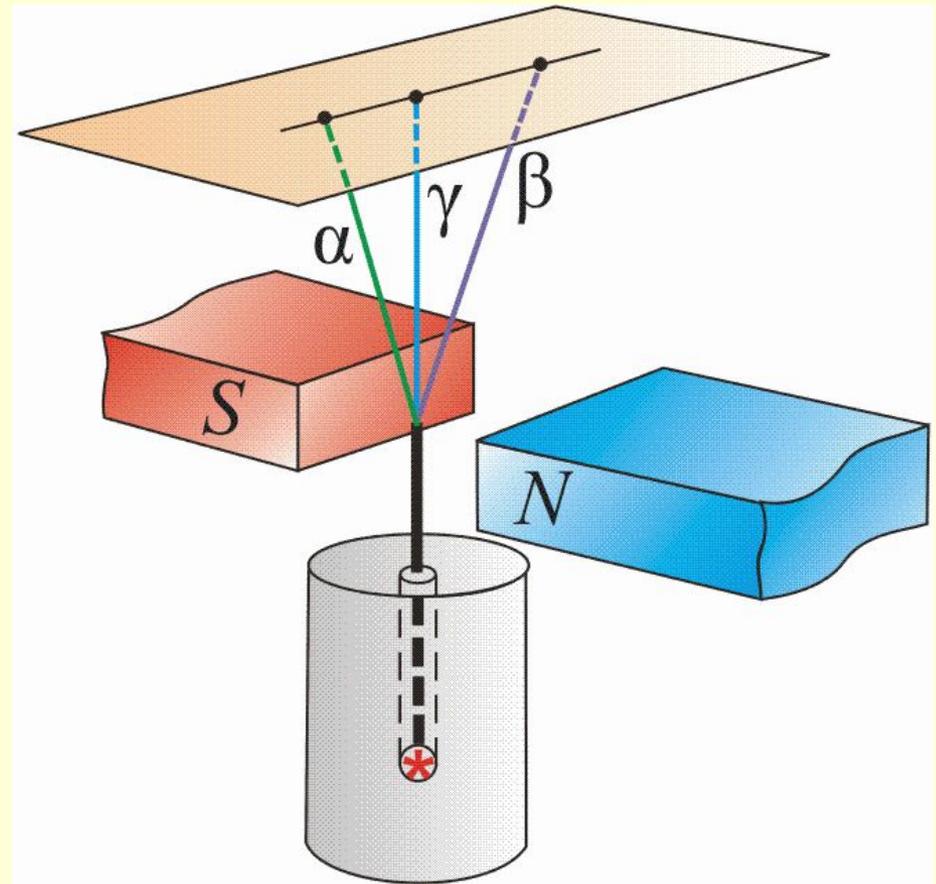
Радиоактивные процессы:

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



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_0p)
B_- – распад	$Z + 1$	A	${}^1_0n \rightarrow {}^1_1p + ({}^0_{-1}e + {}^0_0\tilde{\nu}_e)$
B_+ – 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



Радиоактивность

Все типы радиоактивности сопровождаются испусканием **гамма-излучения** – жесткого коротковолнового электромагнитного излучения.

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

Закон радиоактивного распада

$$dN \sim N, dt$$

dN – число ядер, распавшихся в среднем за интервал времени от t до $t+dt$

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

$$dN = -\lambda N dt$$

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

$$\int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = -\lambda \int_0^t dt$$

$$\ln \frac{N}{N_0} = -\lambda t$$

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



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.

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 распада

Величина $1/\lambda = \tau$ - средняя продолжительность жизни (среднее время жизни) радиоактивного изотопа.

Средняя продолжительность τ жизни всех первоначально существовавших ядер

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

Суммарная продолжительность жизни dN ядер равна $\tau dN = \lambda N t dt$.

Закон радиоактивного распада

Характеристикой устойчивости ядер относительно распада служит

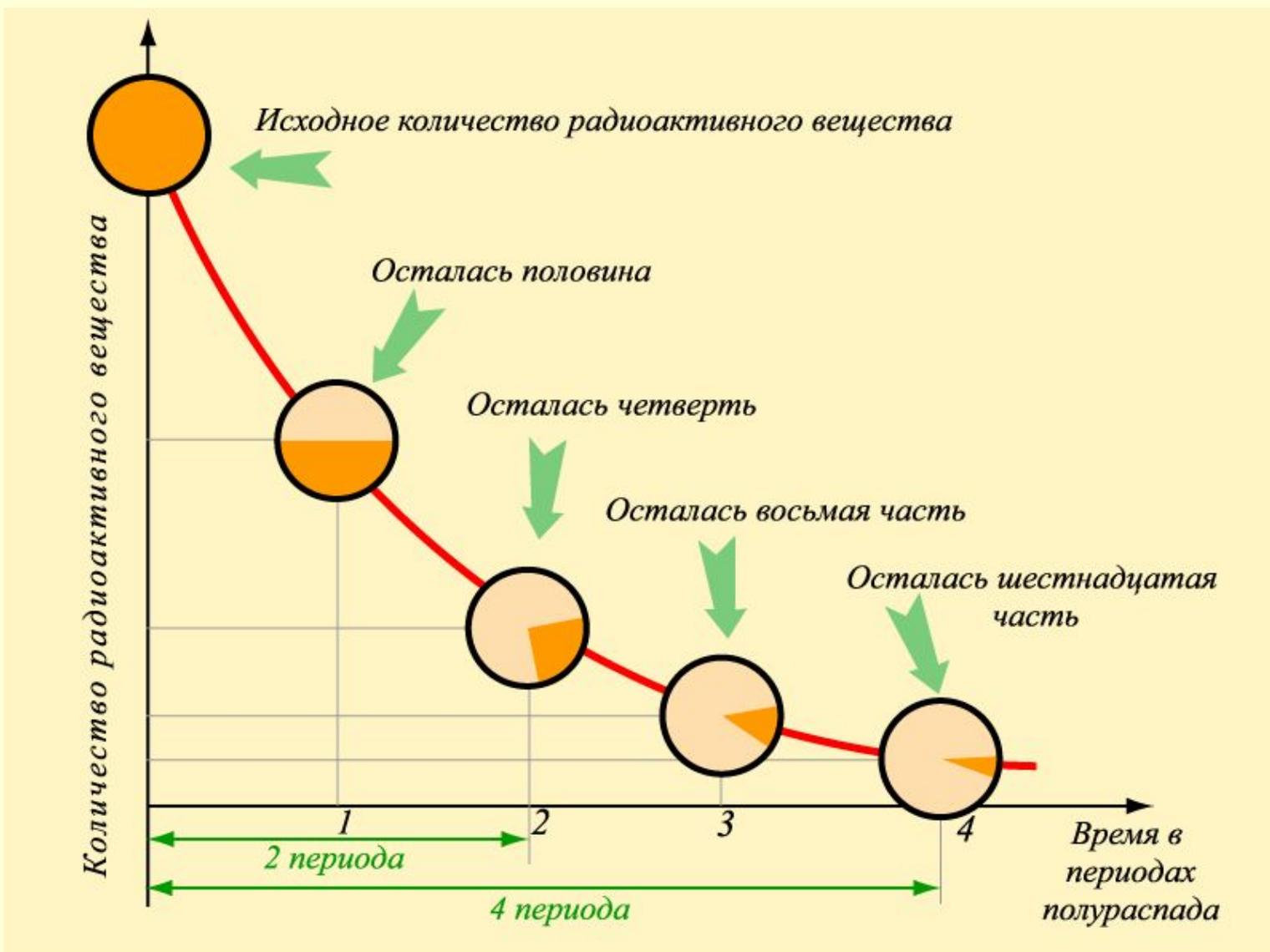
период полураспада $T_{1/2}$

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

Связь λ и $T_{1/2}$:

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

Закон радиоактивного распада

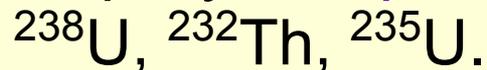


Закон радиоактивного распада

Бывает, что дочерние ядра также радиоактивные и распадаются со скоростью, характеризуемой постоянной распада λ' .

Новый продукт распада также радиоактивный и т.д...

- образуется радиоактивный ряд (семейство):



Активность радиоактивного препарата

$$A = dN/dt = \lambda N$$

- число распадов в единицу времени.

Единица измерения активности

$[A] = 1$ беккерель (Бк) = распад в секунду.

Внесистемная единица $1\text{Ки} = 3,7 \cdot 10^{10}$ Бк



Закон радиоактивного распада

Закон сохранения электрического заряда
при радиоактивном распаде ядер:

$$Z_{\text{яд}}e = \sum_i Z_i e$$

где $Z_{\text{яд}}e$ – заряд материнского ядра,
 $Z_i e$ – заряды ядер и частиц, возникших в
результате радиоактивного распада.

Закон радиоактивного распада

Правила смещения (правила Фаянса и Содди)

при радиоактивных α - и β_- – распадах:



Здесь ${}^A_Z X$ – материнское ядро,

Y – символ дочернего ядра,

${}^4_2 \text{He}$ – ядро гелия,

${}^0_{-1} e$ – символическое обозначение электрона,
для которого $A = 0$ и $Z = -1$.

Энергия связи нуклонов. Дефект масс

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 ($W_{\text{св}}$) определяется величиной той работы, которую нужно совершить, чтобы расщепить ядро на составляющие его нуклоны без придания им кинетической энергии.



Энергия связи нуклонов. Дефект масс

$W_{\text{св}}$ – энергия связи ядра.

Соответствующая ей масса Δm называется **дефектом масс**:

$$\Delta m = \frac{W_{\text{св}}}{c^2}$$

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

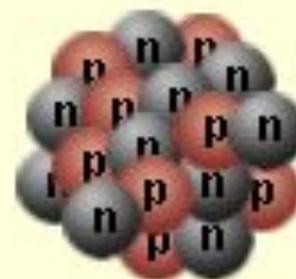
$$\Delta m = Zm_p + (A - Z)m_n - M$$



Энергия связи нуклонов. Дефект масс

Удельная энергия связи ядра $\omega_{св}$ – энергия связи, приходящаяся на один нуклон:

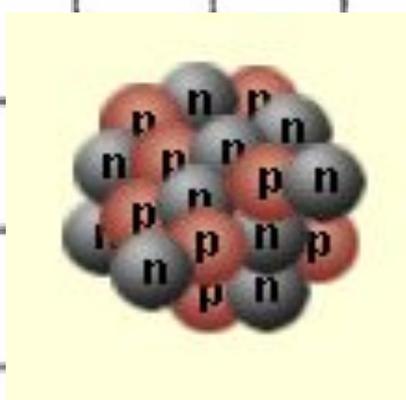
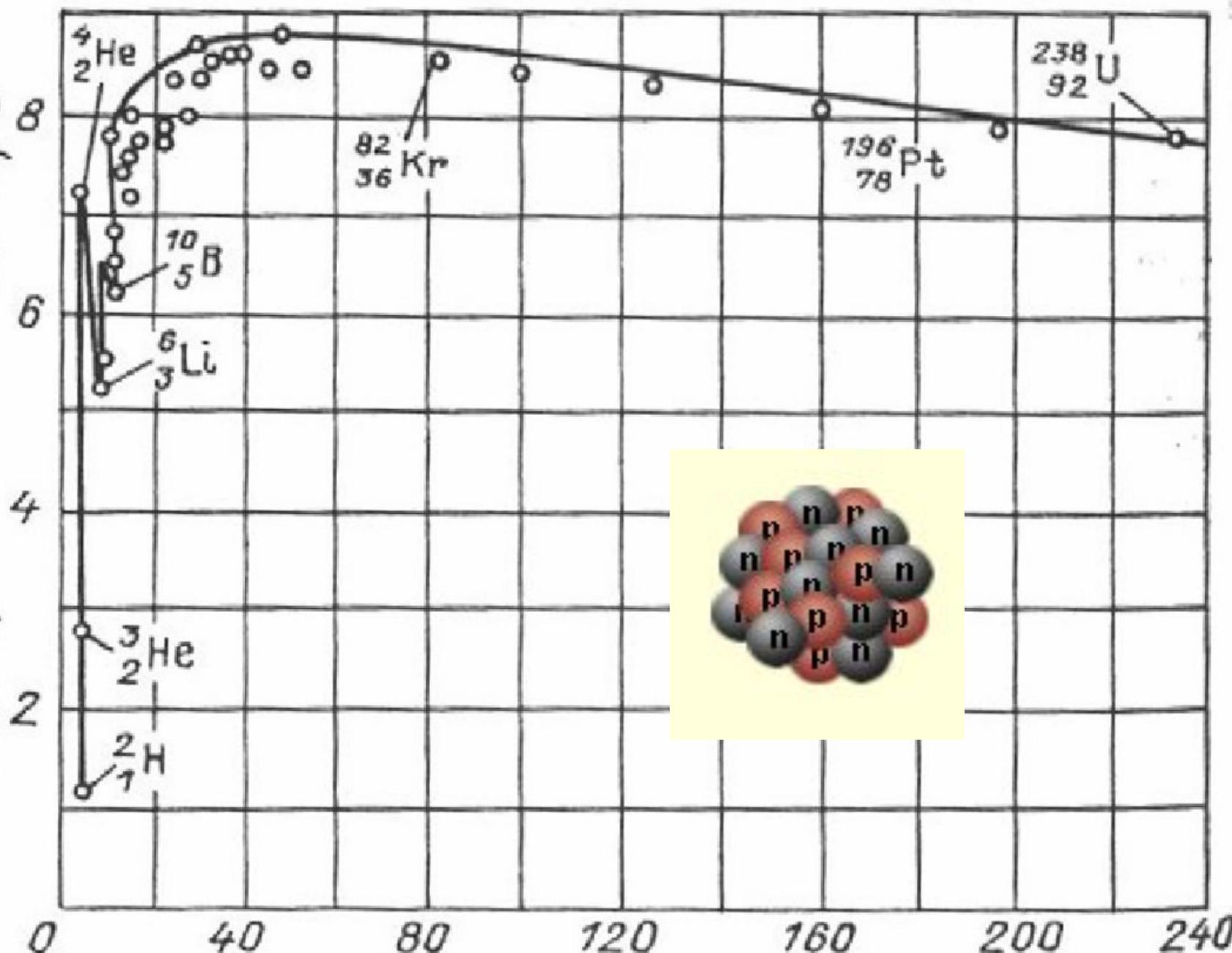
$$\omega_{св} = \frac{W_{св}}{A}$$



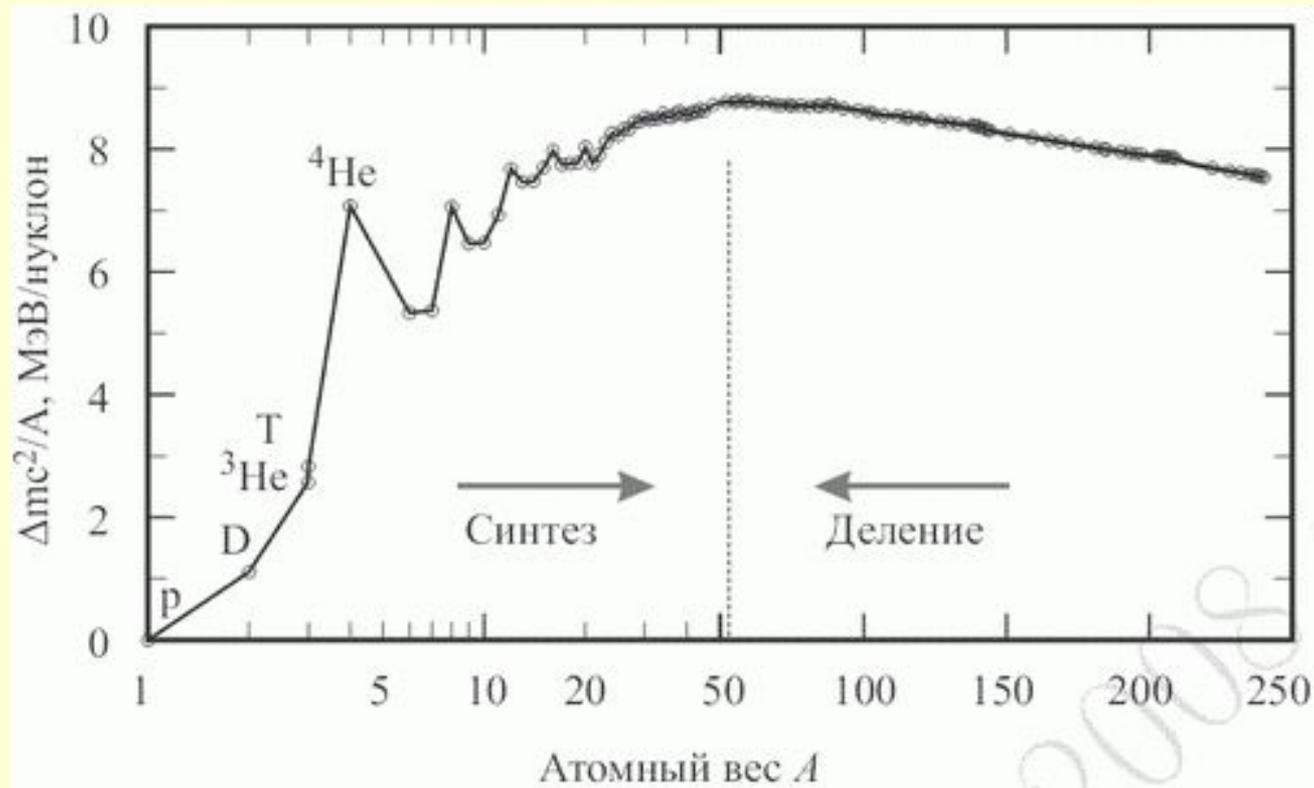
Величина $\omega_{св}$ составляет в среднем
8 МэВ/нуклон



Удельная энергия связи $w_{св}$, МэВ/нуклон



Энергия связи нуклонов. Дефект масс



- Реакция деления тяжелых ядер
- Реакция синтеза легких ядер

Ядерные реакции.
Реакции на нейтронах.



Энергия связи нуклонов. Дефект масс

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.



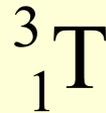
Ядерные силы

✓ Являются **короткодействующими**. Они проявляются лишь на весьма малых расстояниях между нуклонами – 10^{-15} м.

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

✓ Обнаруживают **зарядовую независимость**: притяжение между двумя нуклонами одинаково, независимо от зарядового состояния нуклонов – протонов или нейтронов (**n-n** , **p-p**, **n-p**).

Зарядовая независимость ядерных сил видна из сравнения энергий связи зеркальных ядер:



Энергии связи этих ядер – 7,72 МэВ и 8,49 МэВ.



Ядерные силы

- ✓ Обладают свойством насыщения.
Полное насыщение ядерных сил достигается у альфа-частицы.
- ✓ Не являются центральными.
- ✓ Обменный характер ядерного взаимодействия.