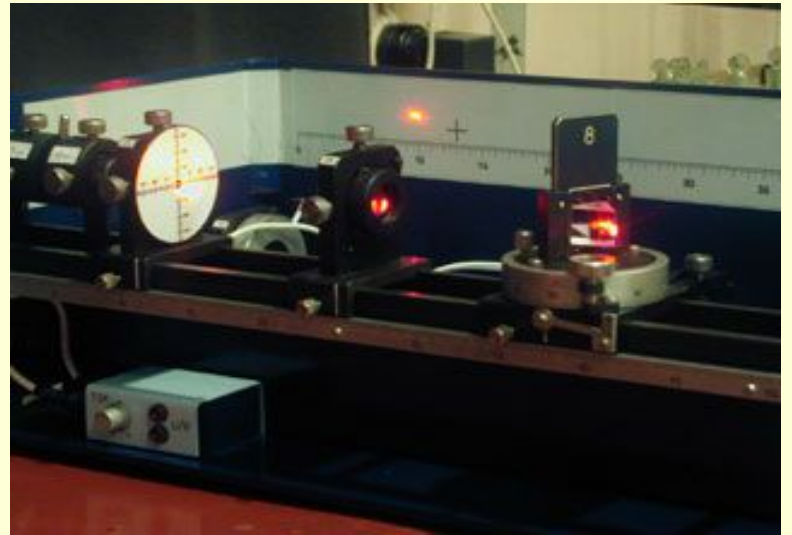


# Оптика и квантовая физика

для студентов  
2 курса ФТФ и ГГФ



Кафедра общей физики



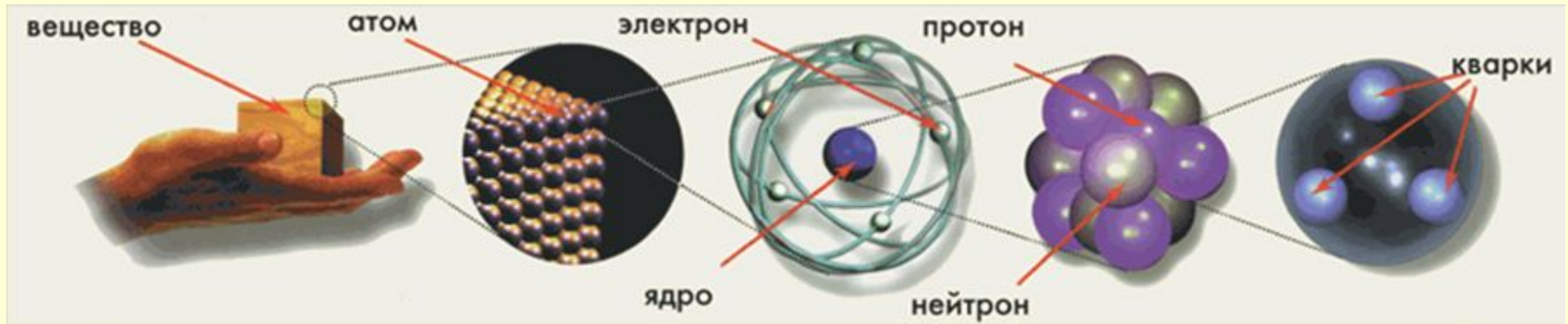
# Лекция 12

## 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;

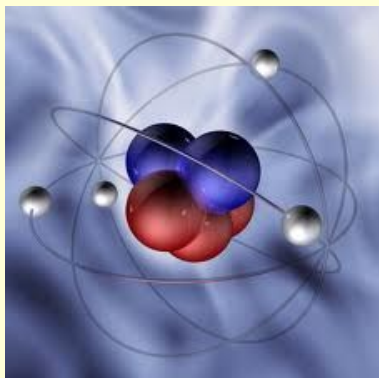
масса покоя  $m_p = 1,673 \cdot 10^{-27}$  кг =  $1836m_e$ .

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](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  $Ze$ ,

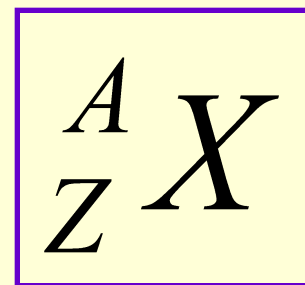
где  $e$  – заряд протона,

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

В настоящее время известны ядра с

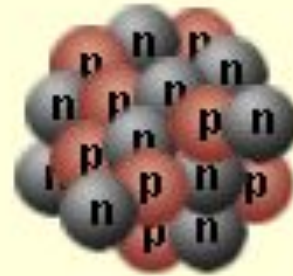
$Z = 1$  до  $Z = 107 - 118$

$A = Z + N$  – **массовое число**.

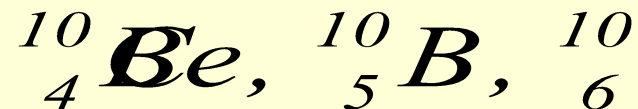


# Состав атомного ядра

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

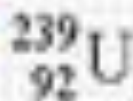
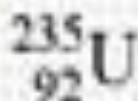
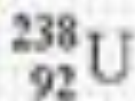


Ядра, которые при одинаковом  $A$  имеют разные  $Z$  называются **изобарами**.



# Состав атомного ядра. Изотопы.

Атомы изотопов урана



протон



нейтрон



Атомы изотопов водорода

водород

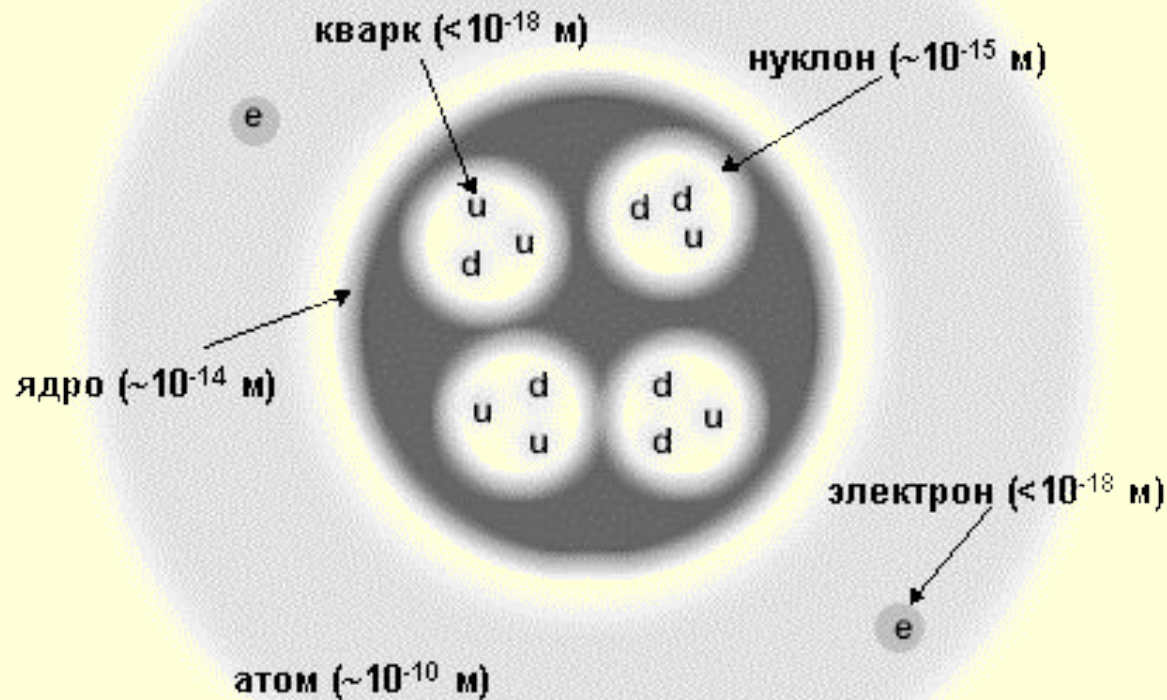


дейтерий



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/м<sup>3</sup>

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.

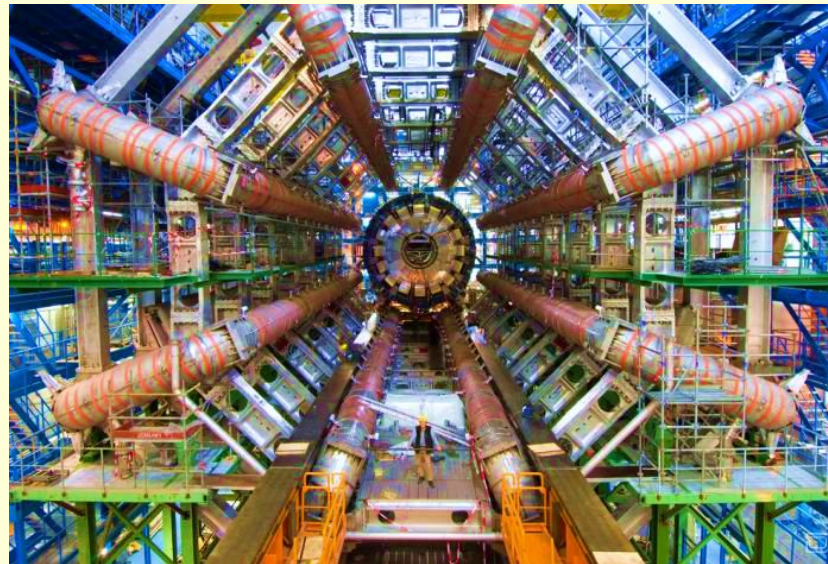
**Искусственной радиоактивностью** называется радиоактивность изотопов, полученных в результате ядерных реакций.



# Радиоактивность

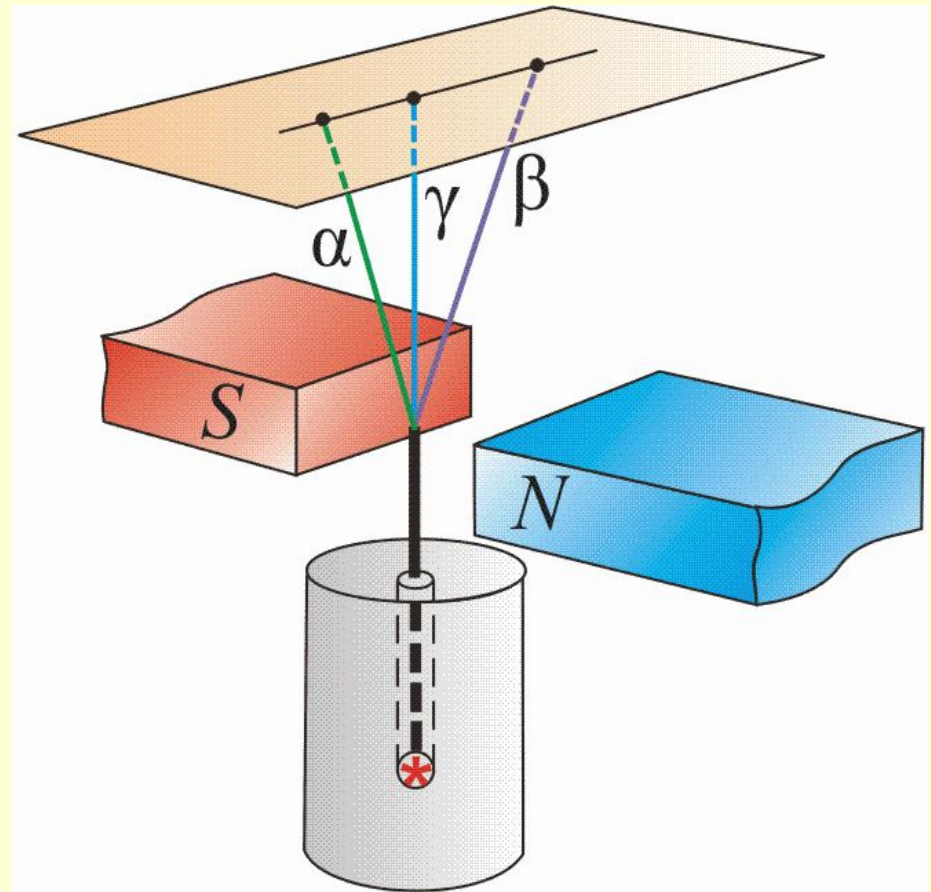
Радиоактивные процессы:

- ✓  $\alpha$  - распад
- ✓  $\beta$  – распад (в том числе электронный захват)
- ✓  $\gamma$  – 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



<b>Тип радиоактивности</b>	Изменение Заряда ядра $Z$	Изменение массового числа $A$	Характер процесса
Альфа-распад	$Z - 2$	$A - 4$	Вылет $\alpha$ -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  **$\gamma$ -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  $t$ ,

$\lambda$  – 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  $\tau$  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

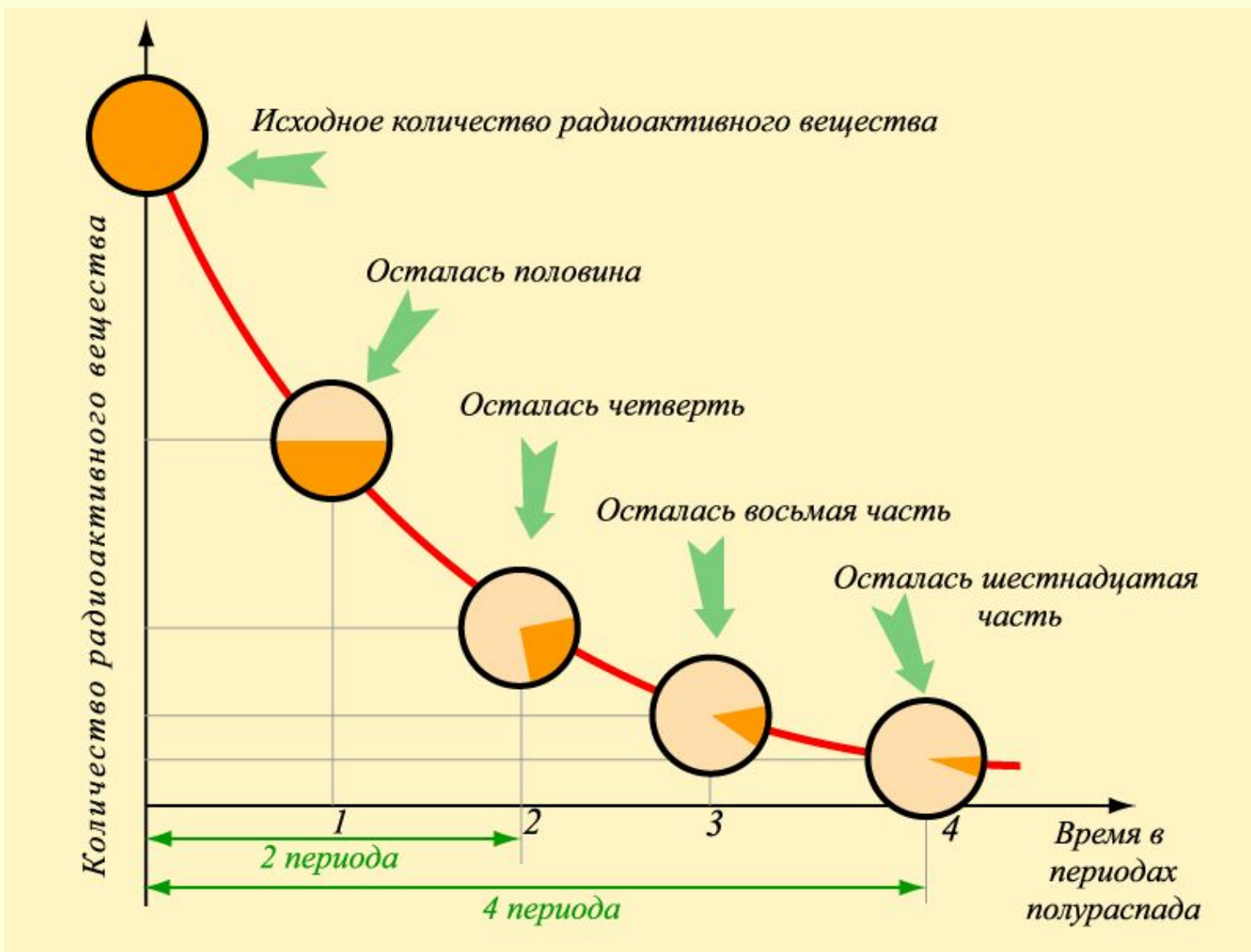
**период полураспада  $T_{1/2}$**

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

Связь  $\lambda$  и  $T_{1/2}$ :

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

# Закон радиоактивного распада

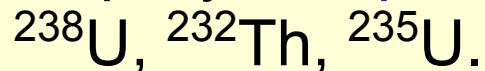


# Закон радиоактивного распада

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

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:

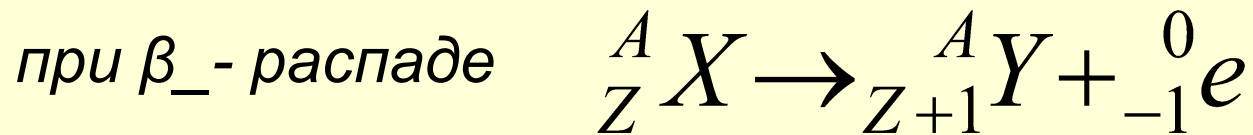
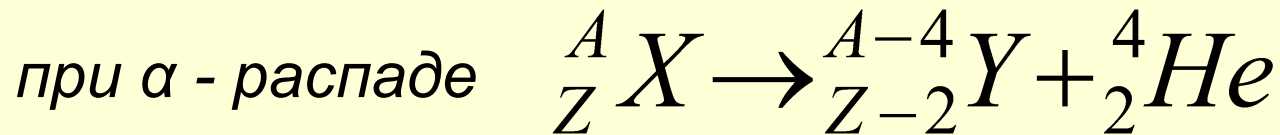
$$Z_{\text{яд}}e = \sum_i Z_i e$$

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  $\alpha$ - и  $\beta_-$  – 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  $\Delta m$  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:

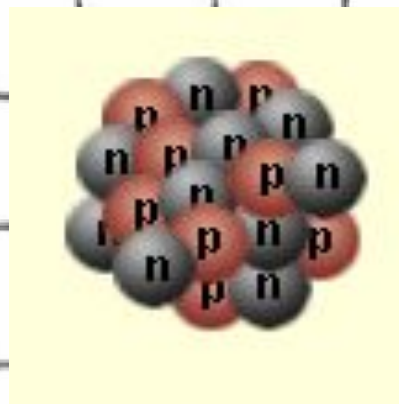
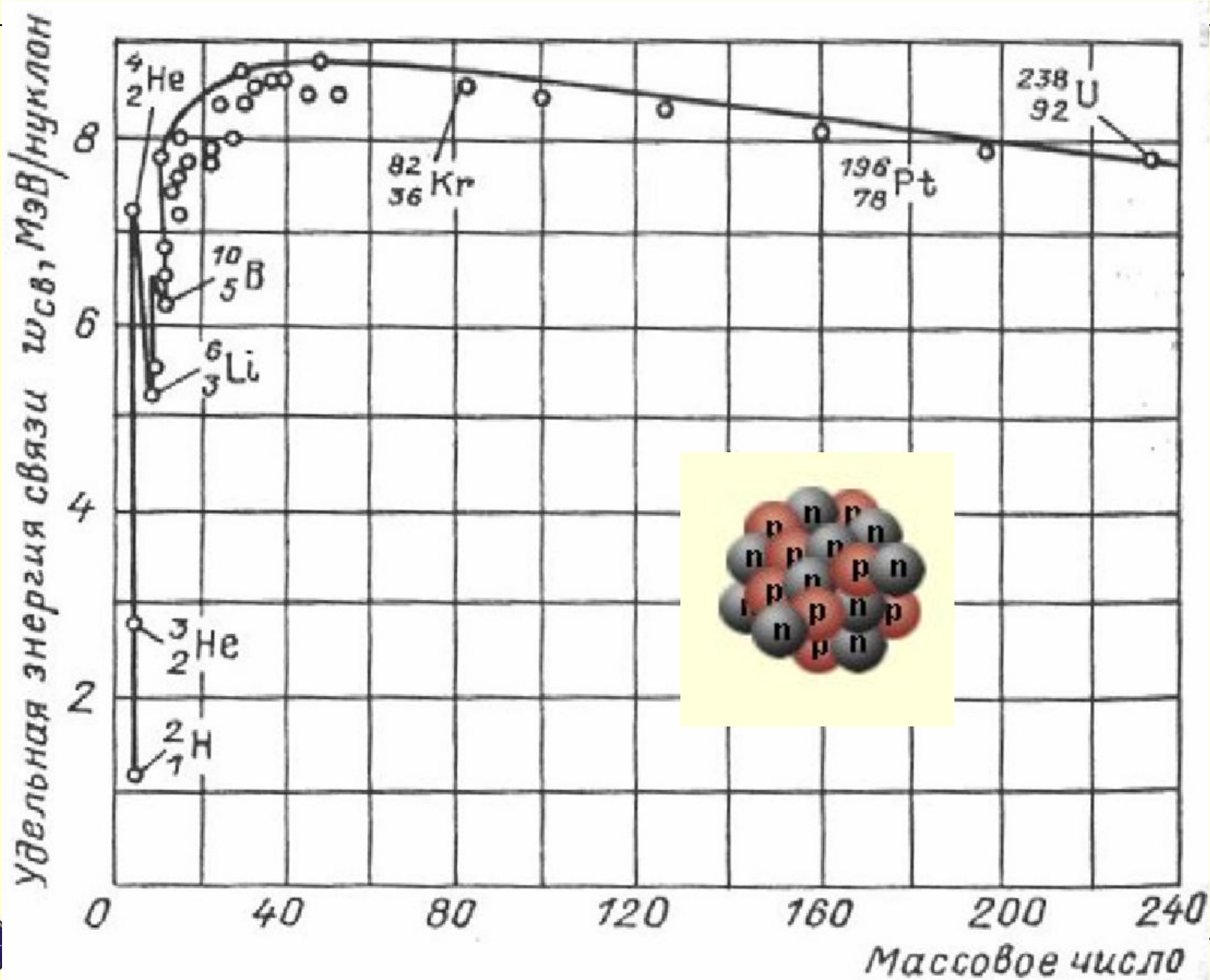
$$\omega_{св} = \frac{W_{св}}{A}$$



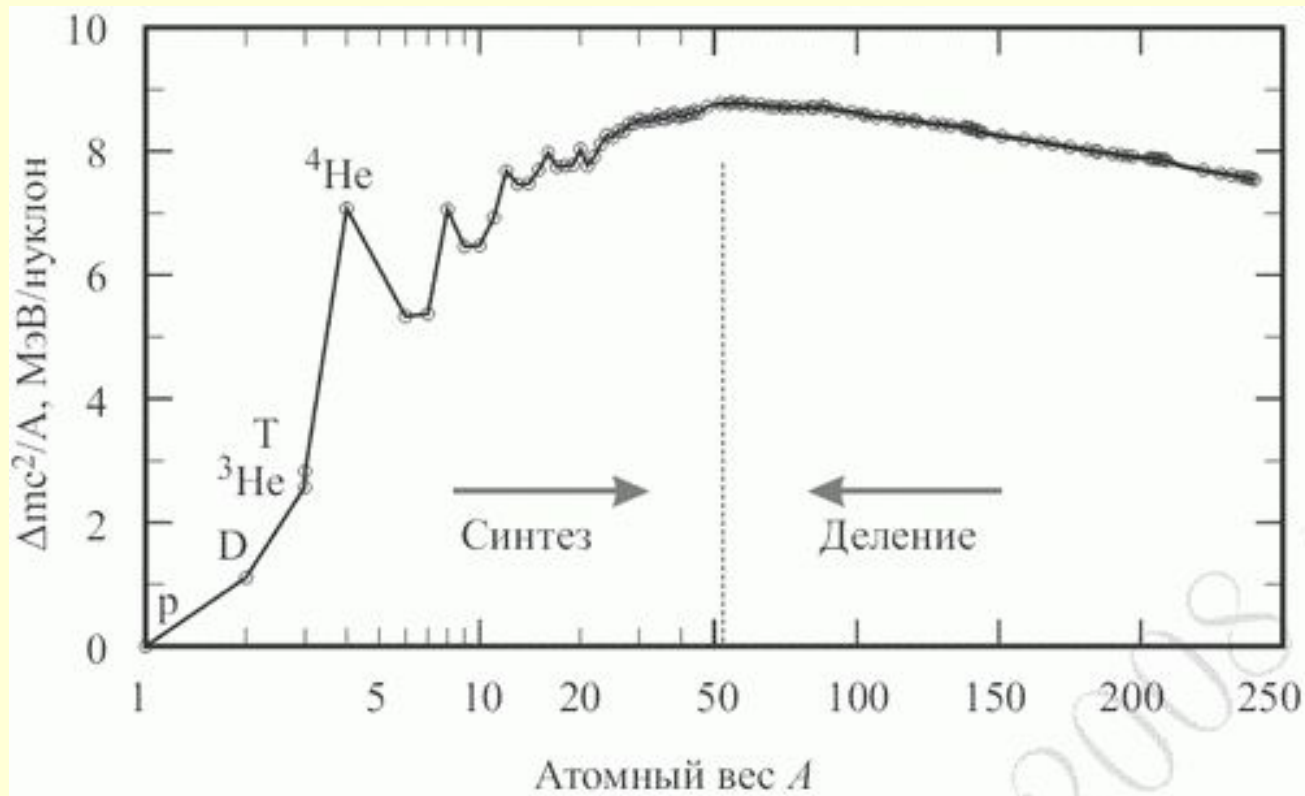
Величина  $\omega_{св}$  составляет в среднем  
8 МэВ/нуклон







# 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.



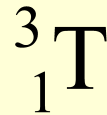
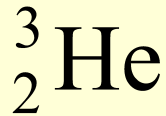
# Ядерные силы

✓ 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.