

**Вопросы:**

- 1. Состав и основные характеристики атомного ядра. Изотопы.**
- 2. Дефект массы и энергия связи. Способы освобождения внутриядерной энергии.**
- 3. Закон радиоактивного распада.**

Атомные ядра, открытые Э.Резерфордом в 1911 г., так же как и сами атомы, имеют внутреннюю структуру, т.е. *не являются неделимыми*.

Основой современной ядерной физики является протонно-нейтронная модель строения атомного ядра (В.Гейзенберг, Д.Иваненко, 1932 г.)

Атомные ядра химических элементов состоят из двух видов частиц – протонов и нейтронов (имеющих обобщающее название *нуклонов*). Ядро атома водорода состоит из одного протона.



Вернер Гейзенберг  
(1901 – 1976)

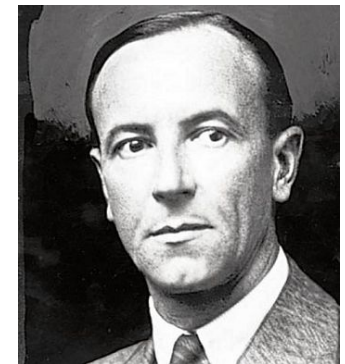
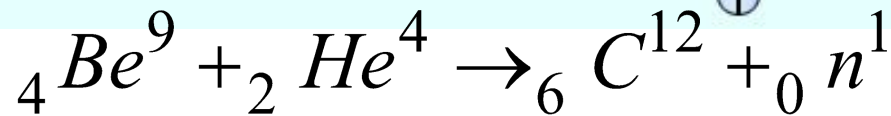
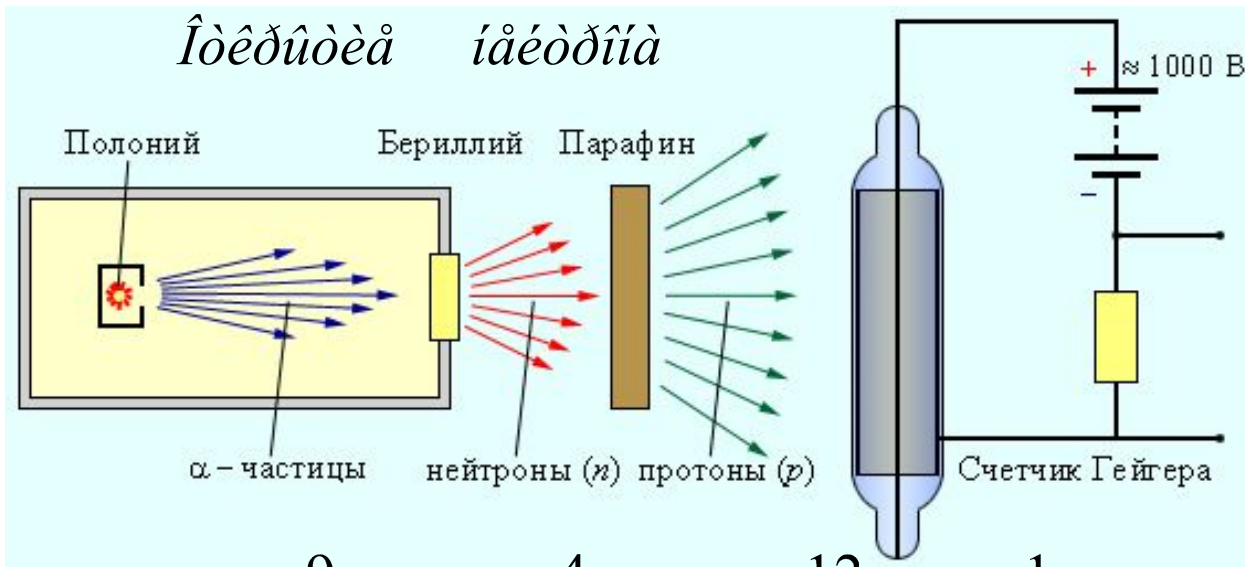
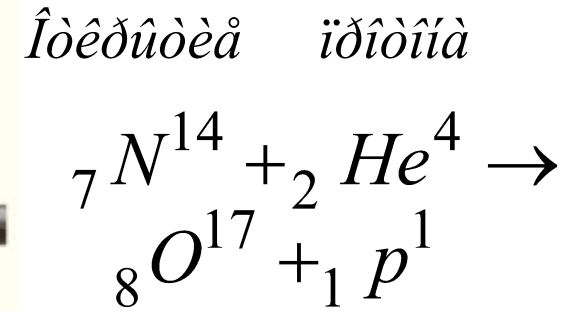
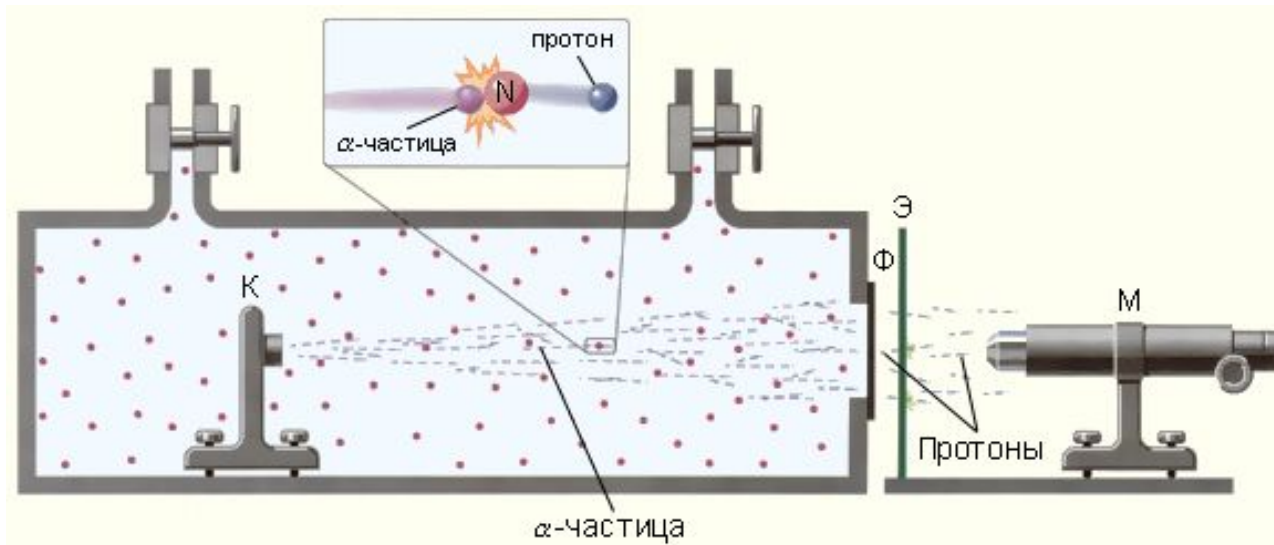
Характеристики нуклонов	Протон (p)	Нейтрон (n)
Электрический заряд, Кл	$1,6 \cdot 10^{-19}$	0
Масса, а.е.м.	1,00728	1,00866

$$1 \text{ а.е.м.} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг.}$$



Дмитрий Иваненко  
(1904 – 1994)

# Схема опытов Э. Резерфорда и Дж. Чедвика



**Джеймс Чедвик**  
(1891 – 1974)

${}_z X^A$  – условное обозначение атомного ядра  
(химического элемента).

**Массовое число  $A$  ядра равно общему числу нуклонов (протонов и нейтронов) в данном ядре.**

**Заряд ядра (зарядовое число)  $z$  ядра равен числу протонов в данном ядре, определяет порядковый номер химического элемента в Периодической таблице и его химические свойства.**

### Следствия:

- 1. Разность  $A - z$  определяет число нейтронов в данном атомном ядре.**
- 2. В нейтральном (неионизированном) атоме химического элемента в электронных оболочках содержится  $z$  электронов, т.к. суммарный электрический заряд атома должен быть равен нулю.**

## Основные характеристики атомного ядра

1. Зарядовое число  $z$ .
  2. Массовое число  $A$ .
  3. Радиус ядра  $R_{\text{я}}$ .
  4. Спин ядра  $m_s$ .
- $$R_{\text{я}} = (1,3 \dots 1,5) \cdot 10^{-15} \cdot \sqrt[3]{A}, \text{ м}$$
- $$V_{\text{я}} = \frac{4}{3} \pi R_{\text{я}}^3 \sim A \Rightarrow R_{\text{я}} \sim \sqrt[3]{A}$$

Поскольку у протона и нейтрона  $m_s = 1/2$ , то спин ядра, состоящего из четного числа нуклонов, является целым числом, а спин ядра, состоящего из нечетного числа нуклонов, – полуцелым.

**Изотопами называются ядра с одинаковым зарядовым числом  $Z$  (т.е. одинаковыми химическими свойствами), но с разными массовыми числами  $A$  (т.е. различными физическими свойствами).**

Например:  ${}_1H^1$  (протий);  ${}_1H^2$  (дейтерий);  ${}_1H^3$  (третий).

## Дефект массы атомного ядра

Масса любого ядра  $m_{\text{я}}$  всегда меньше суммы масс входящих в его состав отдельных нуклонов:

$$m_{\text{я}} < z \cdot m_p + (A - z) \cdot m_n$$

Это объясняется тем, что при объединении нуклонов в ядро между ними начинают действовать короткодействующие ядерные силы притяжения. Это означает уменьшение энергии и массы системы нуклонов.

Величина  $\Delta m = [ z \cdot m_p + (A - z) \cdot m_n ] - m_{\text{я}}$  называется *дефектом массы*.

Пример. Для ядра гелия  ${}_2\text{He}^4$ :  $2m_p + 2m_n = 4,03298$  а.е.м.,  
 $m_{\text{я}} = 4,00260$  а.е.м.,  $\Delta m = 0,03038$  а.е.м.

## Энергия связи атомного ядра

Величина  $E_{\text{св}} = \Delta m \cdot c^2 = [Z \cdot m_p + (A - Z) \cdot m_n - m_{\text{я}}] \cdot c^2$  называется *энергией связи ядра*.

**Физический смысл энергии связи ядра: это энергия, необходимая для расщепления ядра на отдельные нуклоны без сообщения им кинетической энергии. Энергия связи является характеристикой прочности атомных ядер.**

**Преобразуем формулу для энергии связи:**

$$\begin{aligned} E_{\text{св}} &= [Z \cdot m_p + (A - Z) \cdot m_n - m_{\text{я}}] \cdot c^2 = \\ &= [Z \cdot m_p + Z \cdot m_e + (A - Z) \cdot m_n - m_{\text{я}} - Z \cdot m_e] \cdot c^2 = \\ &= [Z \cdot m_H + (A - Z) \cdot m_n - m_{\text{ат}}] \cdot c^2 \end{aligned}$$

$$E_{\text{св}}, \text{ МэВ} = 931,5 \cdot \Delta m, \text{ а.е.м.}$$

## Свойства энергии связи

1. Согласно закону сохранения энергии, при образовании ядра из составляющих его нуклонов выделяется энергия, равная энергии связи ядра.

$$E_{\text{уд}} = \frac{E_{\text{св}}}{A} \text{ — удельная энергия связи ядра.}$$

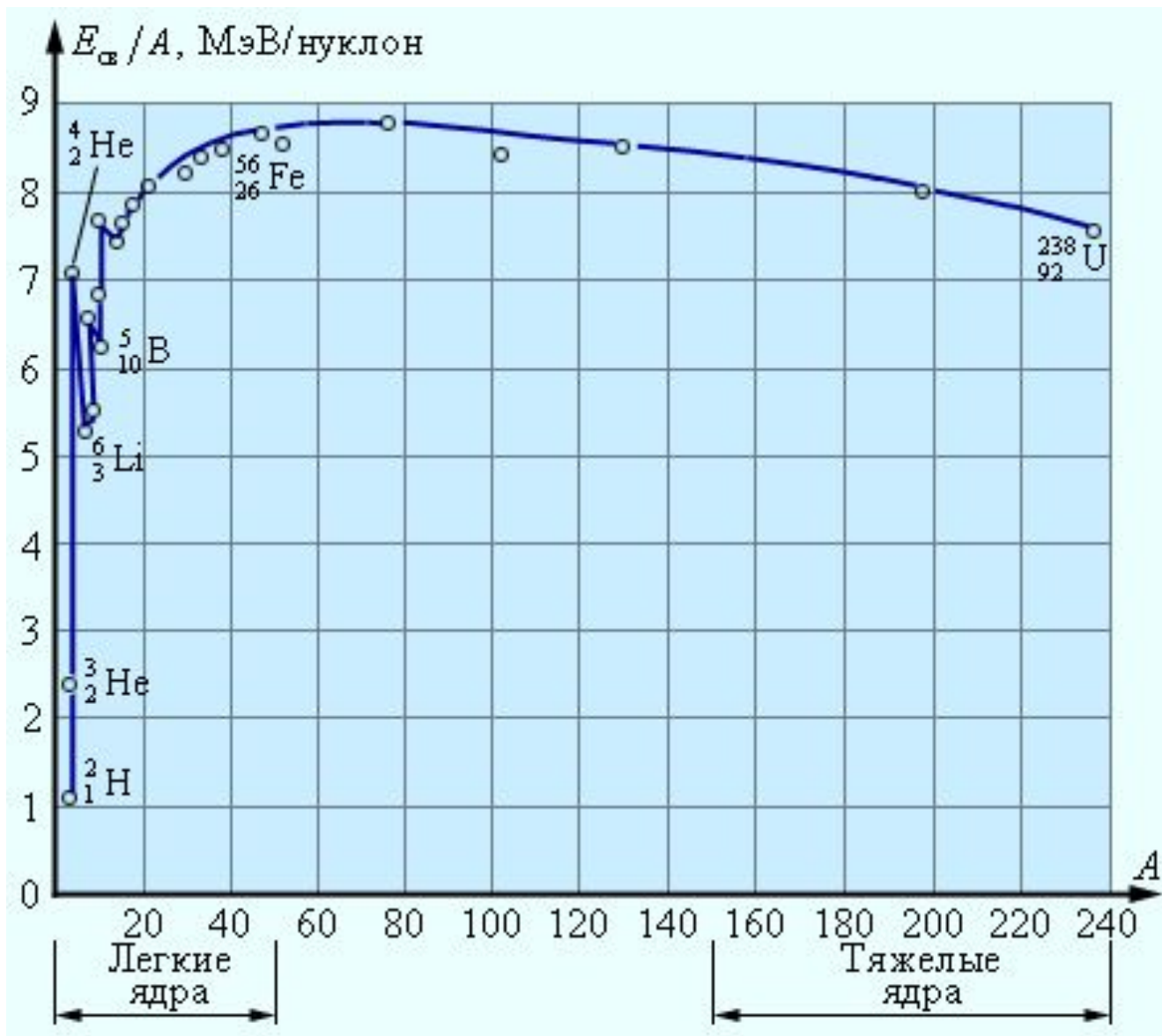
2. Если из одного ядра с меньшей удельной энергией связи образуется другое ядро с большей удельной энергией связи, то такой процесс пойдет с выделением энергии.



Энрико Ферми  
(1901 – 1953)



# Зависимость удельной энергии связи от массового числа

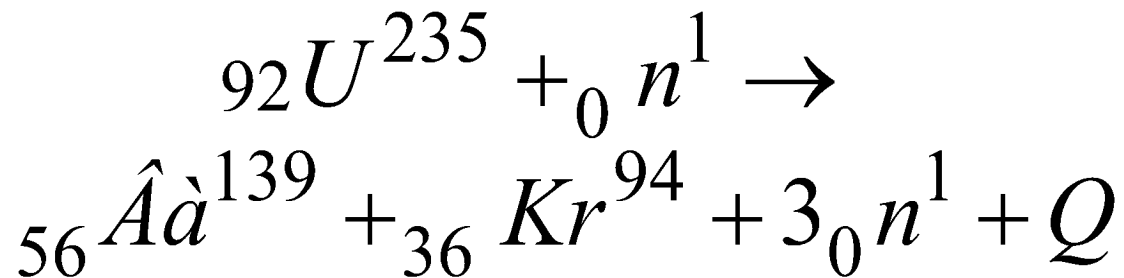


Из зависимости  $E_{\text{уд}} = E_{\text{уд}}(A)$  следует, что наиболее прочными являются ядра химических элементов в средней части Периодической таблицы Д.Менделеева, а легкие и тяжелые ядра являются менее прочными.

Такая зависимость делает энергетически возможными два процесса:

- деление тяжелых ядер;
- синтез легких ядер.

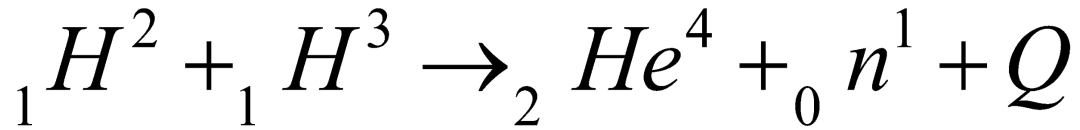
*Оба процесса сопровождаются выделением большого количества энергии.*



**Отто Ган**  
(1879 – 1968)

$$Q = (8,7 - 7,6)\text{МэВ} / \text{нуклон} \cdot 235 \cdot 0,8 \approx 200 \text{ МэВ}$$

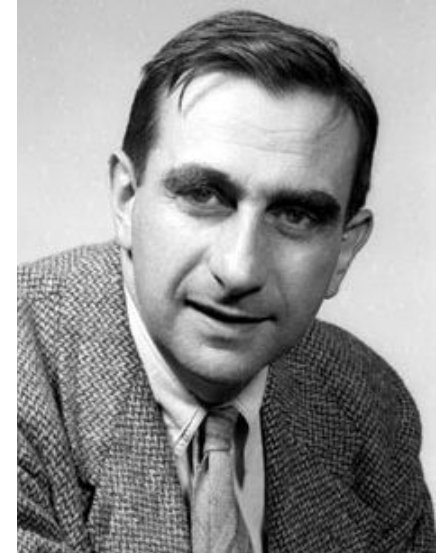
## Термоядерная энергия синтеза легких ядер



$$Q = 28,3 \text{ МэВ} - (2,2 + 8,5) \text{ МэВ} = 17,6 \text{ МэВ}$$

**В пересчете на один нуклон энергетический эффект реакции синтеза более чем в 4 раза превосходит эффект реакции деления (3,52 МэВ/нуклон против 0,85 МэВ/нуклон).**

Если в реакции деления тяжелых ядер кулоновские силы помогают ядру делиться на несколько осколков, то в реакции синтеза они препятствуют сближению ядер. Поэтому реакции синтеза изотопов водорода могут протекать только при очень высоких температурах (~ 10 млн. К) и получили название *термоядерных реакций*.



Эдвард Теллер  
(1908 – 2003)

## Закон радиоактивного распада

**Радиоактивный распад** – это превращение неустойчивых ядер одного химического элемента в ядра другого, происходящее самопроизвольно и сопровождающееся испусканием частиц и выделением энергии.

$$N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda t} = N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T}}$$



$N_0$  – начальное число нераспавшихся ядер.

$N(t)$  – число нераспавшихся ядер к моменту времени  $t$ .

$\lambda [c^{-1}]$  – постоянная распада.

$T [c]$  – период полураспада.

## Физический смысл характеристик радиоактивного распада:

- *период полураспада*  $T$  – это время, за которое исходное число радиоактивных ядер в среднем уменьшается вдвое;
- *постоянная распада*  $\lambda$  – это величина, обратная к которой есть среднее время жизни радиоактивного ядра:

$$\lambda = \frac{1}{\tau_{\text{ср}}}$$

Связь между  $T$  и  $\lambda$ :

$$\frac{N_0}{2} = N_0 \cdot e^{-\lambda T} \Rightarrow e^{\lambda T} = 2 \Rightarrow T = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda}$$

<b>Периоды полураспада, <math>T</math></b>				
${}_{86}\text{Rn}^{222}$	${}_{84}\text{Po}^{210}$	${}_{38}\text{Sr}^{90}$	${}_{88}\text{Ra}^{226}$	${}_{92}\text{U}^{238}$
<b>3,82 сут.</b>	<b>138 сут.</b>	<b>28 лет</b>	<b>1590 лет</b>	<b><math>4,5 \cdot 10^9</math> лет</b>

**Активностью  $A$  радиоактивного изотопа (нуклида) называется число распадов, происходящих с ядрами вещества за 1 с:**

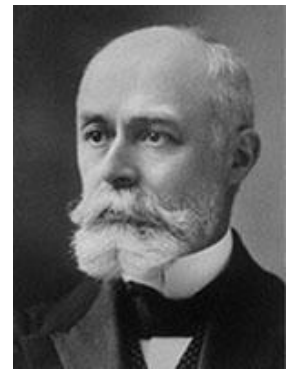
$$A = \left| \frac{dN}{dt} \right| = \lambda N; \quad [A] = \text{Бк (Беккерель)}$$

**1 Бк – активность нуклида, при которой за 1 с распадается одно ядро.**

**Широко применяются кратные единицы: кБк, МБк, ГБк.**

$$A(t) = \lambda N = \lambda N_0 \cdot e^{-\lambda t} = A_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

**Закон изменения активности радиоактивного вещества имеет такой же вид, как и закон радиоактивного распада.**



**Антуан  
Беккерель  
(1852 – 1908)**