Лекция 16

ЭЛЕМЕНТЫ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

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.

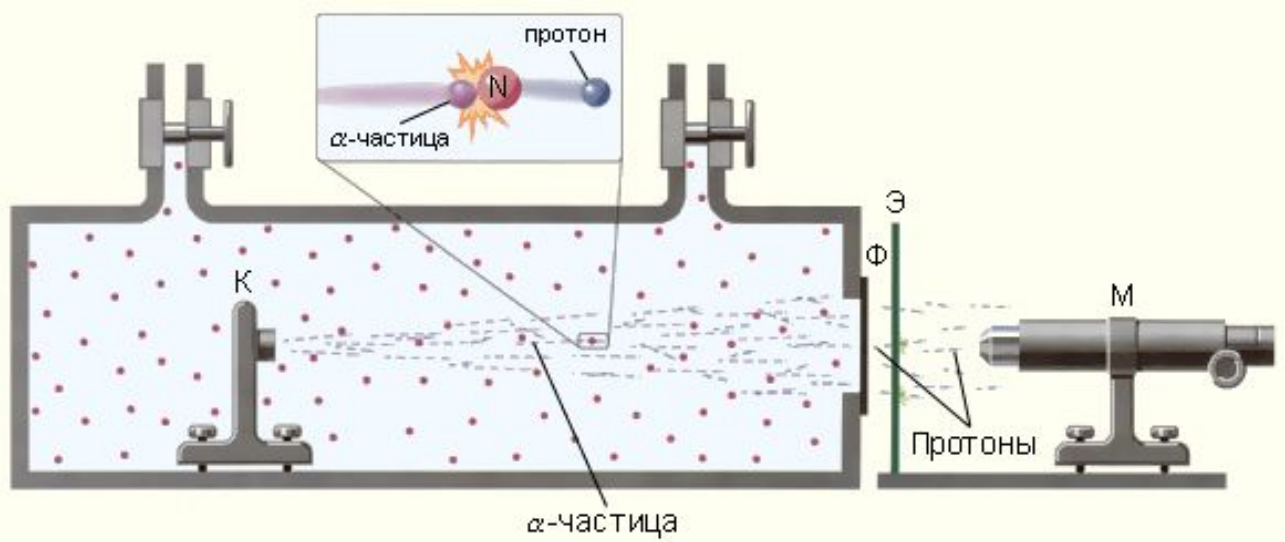
Вернер Гейзенберг (1901 – 1976)

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

Дмитрий Иваненко (1904 – 1994)

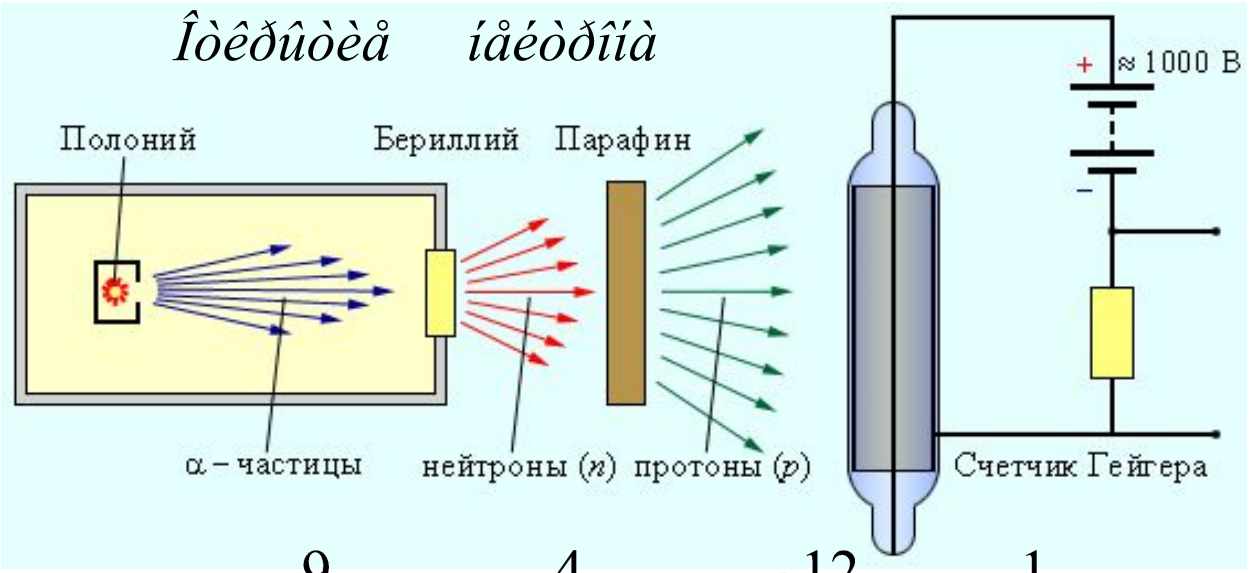
$$1 \text{ а.е.м.} = 1{,}66 \cdot 10^{-27} \text{ кг.}$$

Схема опытов Э.Резерфорда и Дж.Чедвика



Îòêðûòèå ïðîòîíà

$$ {}_7N^{14} + {}_2He^4 \rightarrow {}_8O^{17} + {}_1p^1 $$



$$ {}_4Be^9 + {}_2He^4 \rightarrow {}_6C^{12} + {}_0n^1 $$

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.

<u>Следствия:</u>

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 $R_я$.**
4. **Спин ядра m_s.**

$$R_я = (1{,}3 \ldots 1{,}5) \cdot 10^{-15} \cdot \sqrt[3]{A}, \text{ м}$$

$$V_я = \frac{4}{3}\pi R_я^{\ 3} \sim A \Rightarrow R_я \sim \sqrt[3]{A}$$

Поскольку у протона и нейтрона $m_s = ½$, то спин ядра, состоящего из четного числа нуклонов, является целым числом, а спин ядра, состоящего из нечетного числа нуклонов, – полуцелым.

<u>Изотопами</u> 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);** ${}_1H^3$ **(тритий).**

Дефект массы атомного ядра

Масса любого ядра $m_я$ всегда меньше суммы масс входящих в его состав отдельных нуклонов:

$$m_я < z \cdot m_p + (A - z) \cdot m_n$$

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 $\Delta m = [\ z \cdot m_p + (A - z) \cdot m_n] - m_я$
называется *дефектом массы*.

Пример. Для ядра гелия ${}_2He^4$: $2m_p + 2m_n = 4{,}03298$ **а.е.м.,**

$m_я = 4{,}00260$ **а.е.м.,** $\Delta m = 0{,}03038$ **а.е.м.**

Энергия связи атомного ядра

Величина $E_{св} = \Delta m \cdot c^2 = [z \cdot m_p + (A - z) \cdot m_n - m_я] \cdot c^2$ **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:

$$E_{св} = [z \cdot m_p + (A - z) \cdot m_n - m_я] \cdot c^2 =$$

$$= \left[z \cdot m_p + z \cdot m_e + (A - z) \cdot m_n - m_я - z \cdot m_e\right] \cdot c^2 =$$

$$= \left[z \cdot m_H + (A - z) \cdot m_n - m_{ат}\right] \cdot c^2$$

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

Свойства энергии связи

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

$$E_{\text{уд}} = \frac{E_{\text{св}}}{A}$$ – ***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 $E_{уд} = E_{уд}(A)$ 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)

$$_{92}U^{235} +_{0} n^{1} \rightarrow$$

$$_{56}\hat{A}\grave{a}^{139} +_{36} Kr^{94} + 3_{0}n^{1} + Q$$

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

Термоядерная энергия синтеза легких ядер

$$ {}_1H^2 + {}_1H^3 \rightarrow {}_2He^4 + {}_0n^1 + Q $$

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

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).

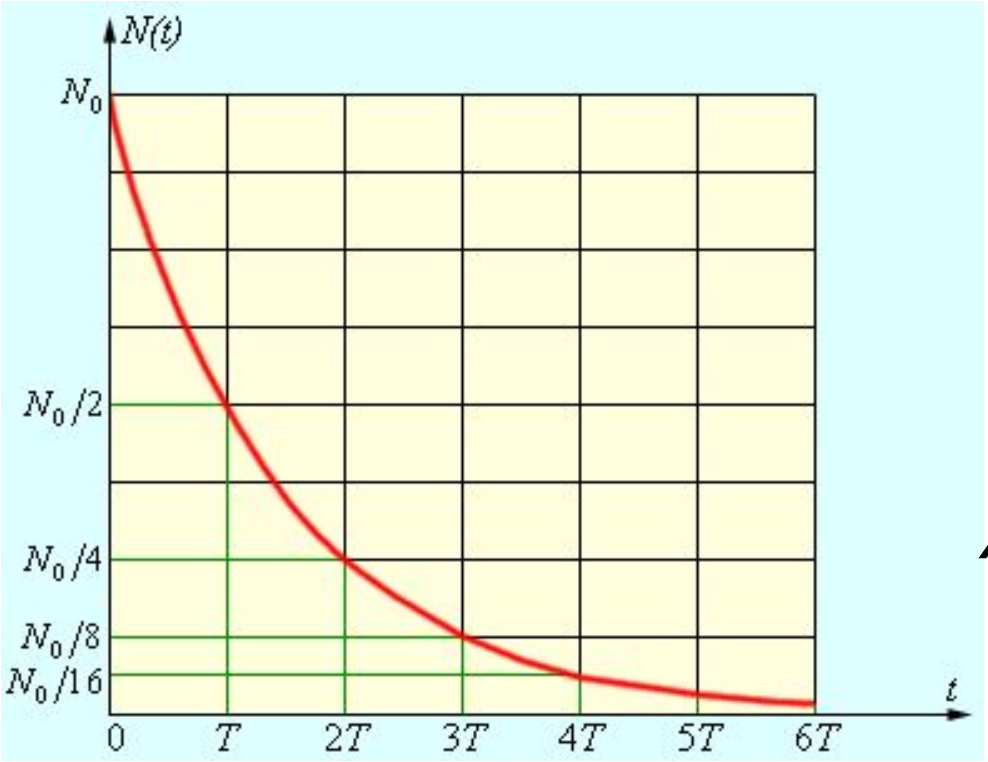
Если в реакции деления тяжелых ядер кулоновские силы помогают ядру делиться на несколько осколков, то в реакции синтеза они препятствуют сближению ядер. Поэтому реакции синтеза изотопов водорода могут протекать только при очень высоких температурах (~ 10 млн. К) и получили название *термоядерных реакций*.

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.***

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

$T\left[c\right]$ – ***период полураспада.***

<u>Физический смысл</u> характеристик радиоактивного распада:

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

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

Связь между *T* и *λ*:

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

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

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

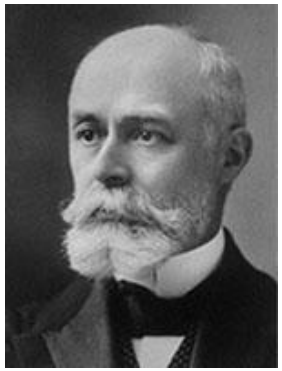
$$A = \left|\frac{\mathrm{d}N}{\mathrm{d}t}\right| = \lambda N; \quad [A] = \text{Бк (Беккерель)}$$

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)