

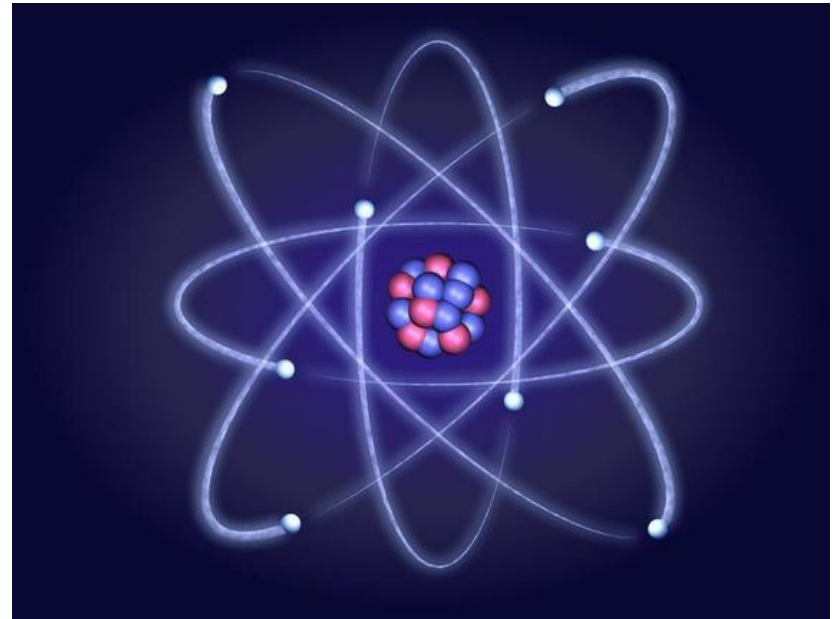
ВОЕННО–МЕДИЦИНСКАЯ АКАДЕМИЯ
имени С.М. Кирова
Кафедра биологической и медицинской
физики
ЛЕКЦИЯ № 9

по дисциплине «Физика, математика»
на тему: «**Радиоактивность. Ядерные**
реакции»

для курсантов и студентов I курса ФПВ,
ФПиУГВ, спецфакультета

1. Строение атомных ядер

- **Атомное ядро** — центральная часть атома, в которой сосредоточена основная его масса (более 99,9 %).



- Ядро заряжено **положительно**, заряд ядра определяет химический элемент, к которому относят атом.
- Размеры ядер различных атомов составляют несколько фемтометров (**1 фм = 10^{-15} м**), что в более чем в 10 тысяч раз меньше размеров самого атома.

- Атомные ядра изучает ядерная физика.

- Атомное ядро состоит из **нуклонов** — положительно заряженных **протонов** и нейтральных **нейтронов**, которые связаны между собой при помощи **сильных взаимодействий (ядерных сил)**.

- **Протон:**

1) Масса протона - $1,67 \cdot 10^{-27}$ кг, т.е. примерно в **1836** раз превышает массу электрона.

2) Заряд: $+1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

- **Нейтрон:**

1) Масса нейтрона чуть больше, чем масса протона, и примерно в **1839** раз превышает массу электрона.

2) Заряд равен 0.

- Химический элемент однозначно характеризуется атомным номером Z , совпадающим с **числом протонов** в ядре (**зарядовым числом**).
- Ядро с данным числом протонов Z может иметь разное **число нейтронов** N .
- Конкретное ядро с данными Z, N называется **нуклидом**.

- **Массовым числом** называется полное число нуклонов в ядре: $A = Z + N$.
- Так как массы протонов и нейтронов очень близки ($m_n/m_p = 1,0014$), то масса ядра с большой точностью пропорциональна A .

- Принятое обозначение для ядра химического элемента **X**: .



- **Изотопы** - нуклиды с одинаковыми **Z** .
- **Изобары** - нуклиды с одинаковыми **A** .
- **Изотоны** - нуклиды с одинаковыми **N** .

Размеры ядер

- Если представить себе ядро как шарик определенного радиуса R , внутри которого упакованы A нуклонов, то ясно, что **объем** такого шарика растёт пропорционально A .

$$R = R_0 A^{1/3}, \text{ где } R_0 = 1,23 \cdot 10^{-15} \text{ м}$$

2. Ядерные силы

- Существование ядер возможно только в том случае, если между нуклонами действуют **силы особой природы**, противодействующие электростатическому отталкиванию протонов и сжимающие все нуклоны в малой области пространства.

- Такие силы не могут иметь ни электростатическую природу (наоборот, эти силы должны сильно притягивать протоны), ни гравитационную природу (численно сила гравитационного притяжения слишком мала, чтобы воспрепятствовать значительному электростатическому отталкиванию).

- Эти силы получили название **ядерных сил**, а порождающее эти силы взаимодействие называется **сильным**.

Экспериментально установлены следующие свойства ядерных сил:

- 1) Эти силы одинаковы по величине, независимо от того, действуют ли они между двумя протонами, протоном и нейтроном или двумя нейтронами (*зарядовая независимость ядерных сил*).

- 2) Эти силы являются **короткодействующими**, т.е. обращаются в нуль, если расстояние между нуклонами превышает размер ядра.

- 3) Ядерные силы обладают свойством **насыщения** (т.е. каждый нуклон взаимодействует только с ближайшими соседними нуклонами).

- 4) Эти силы носят **обменный характер**, т.е. возникают в результате непрерывного обмена частицами, называемыми **пи-мезонами**, между нуклонами в ядре.

(«*Мезос*» (греч.) – «**промежуточный**»: масса π -мезона больше массы электрона и меньше массы протона).

- Есть три сорта π -мезонов - положительный, отрицательный и нейтральный.
- Их массы несколько отличаются, но все они примерно в 300 раз больше массы электрона.

3. Масса ядер и энергия связи.

- Принятой единицей измерения масс ядер является **атомная единица массы (а.е.м.)**, определяемая как **1/12 массы атома углерода ^{12}C** .
- Измерения дают:
$$1 \text{ а.е.м.} = 1,6605402 \cdot 10^{-27} \text{ кг.}$$

- Масса ядра **меньше** суммы масс покоя составляющих его нуклонов.
- **Дефект массы** – разность между суммой масс покоя всех нуклонов в свободном состоянии и массой ядра.

$$\Delta m = Zm_p + Nm_n - M_{\text{я}}$$

- Энергия связи ядра численно равна энергии, которую нужно затратить для расщепления ядра на отдельные нуклоны, или энергии, выделяющейся при синтезе ядер из нуклонов.
- Мерой энергии связи ядра является дефект массы.

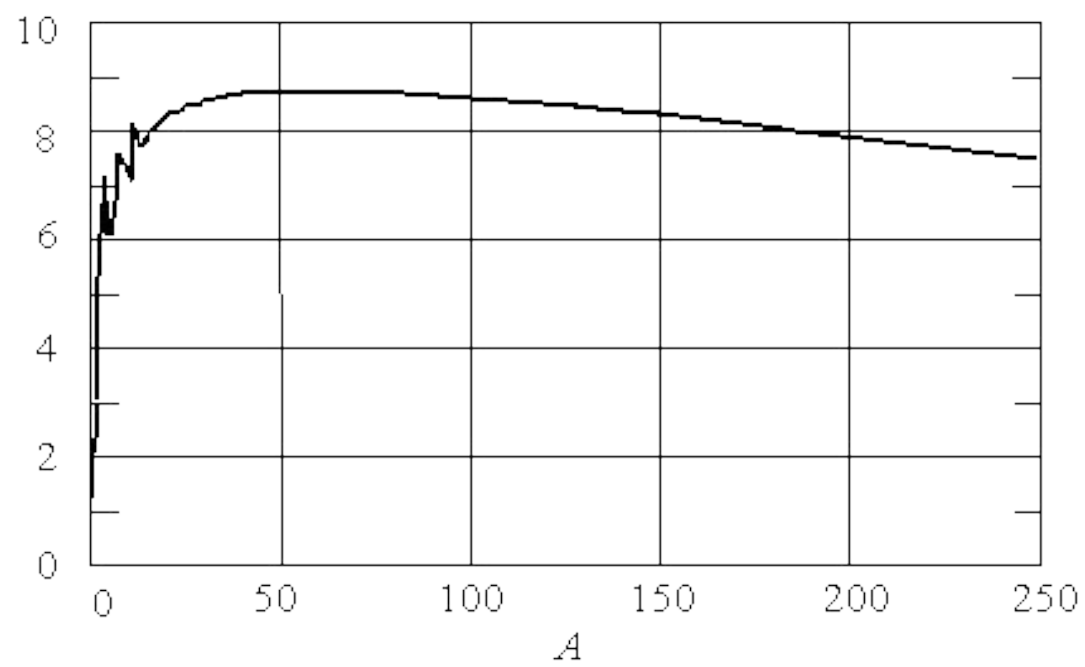
$$E_{\text{св}} = \Delta m \cdot c^2$$

- **Удельная энергия связи** - это энергия связи, приходящаяся на 1 нуклон.

$$\varepsilon = \frac{E_{\text{св}}}{A}$$

- Удельная энергия связи – **мера устойчивости** ядер.

ε, MeV



- Удельная энергия связи нуклона в ядре меняется в среднем в пределах от 1 МэВ у лёгких ядер (дейтерий) до 8,6 МэВ у ядер средней массы (с массовым числом $A \approx 100$).

- У тяжёлых ядер ($A \approx 200$) удельная энергия связи нуклона **меньше**, чем у ядер средней массы, приблизительно на **1 МэВ**, так что их превращение в ядра среднего веса (деление на 2 части) сопровождается выделением энергии в количестве около **1 МэВ на нуклон**, или около **200 МэВ на ядро**.

- Превращение лёгких ядер в более тяжёлые ядра даёт ещё больший энергетический выигрыш в расчёте на нуклон. Так, например, реакция соединения ядер дейтерия и трития сопровождается выделением энергии, равной 17,6 МэВ, то есть 3,5 МэВ на нуклон.

Два пути получения ядерной энергии:

- 1) Деление тяжелых ядер;
- 2) Синтез легких ядер (термоядерный синтез).

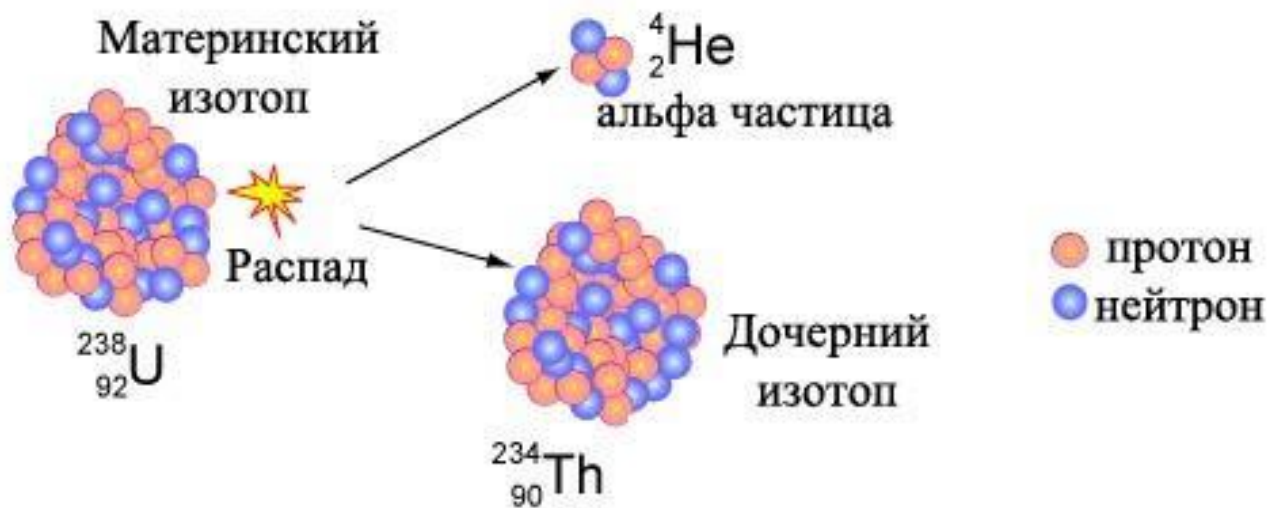
4. Радиоактивность. Виды радиоактивного распада. Закон радиоактивного распада

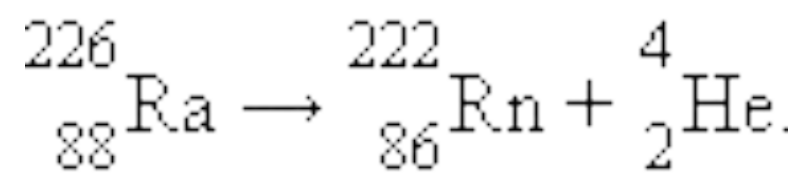
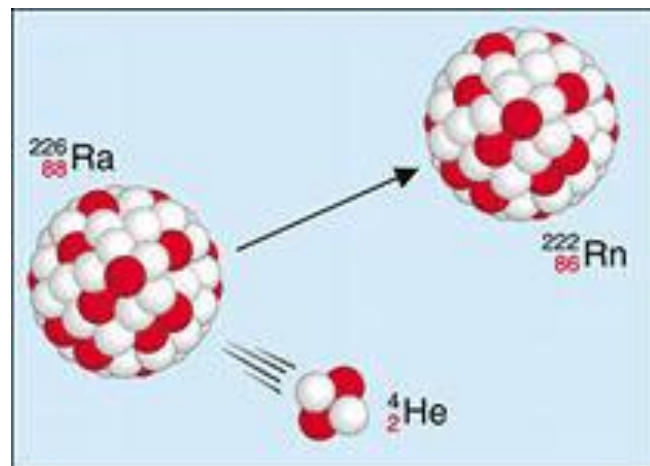
- **Радиоактивностью** называют самопроизвольный распад неустойчивых ядер с испусканием других ядер и элементарных частиц.
- Характерным признаком, отличающим ее от других видов ядерных превращений, является **самопроизвольность (спонтанность)** этого процесса.

Виды радиоактивного распада:

- 1) **Альфа-распад** – самопроизвольное превращение атомного ядра в другое ядро с испусканием **альфа-частицы** (ядра атома гелия).

Альфа распад урана 238





- В результате α -распада атом смещается на 2 клетки к началу таблицы Менделеева (то есть зарядовое число ядра Z уменьшается на 2, массовое число дочернего ядра A уменьшается на 4).

- Альфа-распад часто сопровождается гамма-излучением (γ -излучением).
- γ -излучение – это электромагнитное излучение с очень короткой длиной волны (менее 10^{-10} м).
- Его источником являются дочерние ядра, если они образуются не в основном, а в возбужденном состоянии.

- 2) **Бета-распад:**
- а) электронный, или β^- -распад;
- б) позитронный, или β^+ -распад;
- в) электронный захват (е-захват).
- Изучить самостоятельно по учебнику А. Н. Ремизова!

Закон радиоактивного распада

- Это статистический закон, выражающий зависимость числа **нераспавшихся ядер** радиоактивного изотопа **от времени**.

- а) Дифференциальная форма:

$$-dN = \lambda N dt$$

Число ядер, распавшихся за малый интервал времени, прямо пропорционально величине этого интервала dt и общему числу N радиоактивных ядер.

- λ - постоянная распада, пропорциональная вероятности распада радиоактивного ядра в единицу времени и различная для разных радиоактивных изотопов.
- Численно равна относительной убыли числа радиоактивных ядер в единицу времени.

- Для характеристики радиоактивных изотопов вводят величину, называемую **активностью**, которая характеризует скорость распада:

$$A = -dN/dt$$

- Она измеряется в **беккерелях** ($1\text{Бк} = 1\text{распад/с}$).
- внесистемной единицей измерения активности является **кюри** ($1\text{Ки} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{Бк}$).

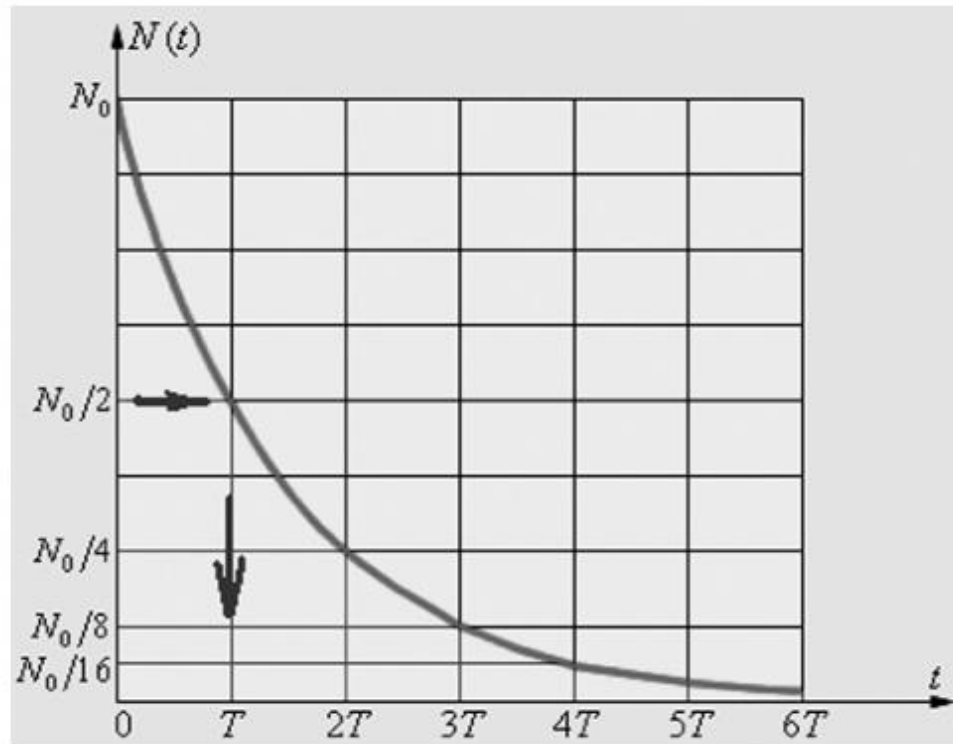
- Из закона радиоактивного распада в дифференциальной форме следует:

$$A = \lambda N = \lambda \frac{m}{\mu} N_A$$

- б) Интегральная форма:

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

- Число нераспавшихся ядер радиоактивного изотопа убывает с течением времени по экспоненциальному закону.



- Период полураспада T – время, за которое распадается ровно половина радиоактивных атомов ($N(T)=N_0/2$).
- Постоянная распада и период полураспада связаны между собой:

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,69}{\lambda}$$

- Закон радиоактивного распада можно записать через активность:

$$A_t = A_0 e^{-\lambda t}$$

- или через удельную активность:

$$a_t = a_0 e^{-\lambda t}$$

- **Удельная активность** – это активность единицы массы (в случае сухого вещества) или единицы объема (в случае жидкости).

$$a = \frac{A}{V}$$

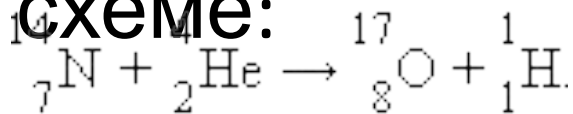
$$a = \frac{A}{m}$$

ИЛИ

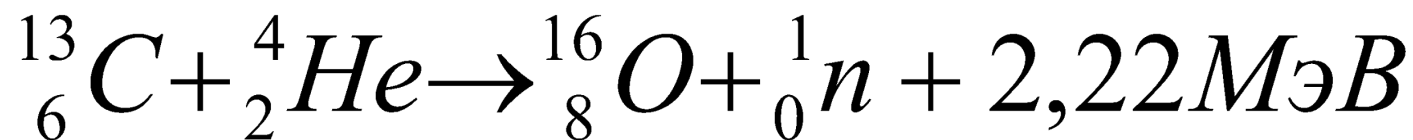
5. Ядерные реакции. Эффективное сечение ядерных реакций. Наведенная активность

- **Ядерная реакция** – это процесс взаимодействия атомного ядра с другим ядром или элементарной частицей, сопровождающийся изменением состава и структуры ядра и выделением вторичных частиц или γ -квантов.
- Ядерные реакции – **несамопроизвольные** процессы!

- Первая ядерная реакция была осуществлена Э. Резерфордом в 1919 году.
- Он бомбардировал **атомы азота α -частицами**.
- При соударении частиц происходила ядерная реакция, протекавшая по следующей схеме:



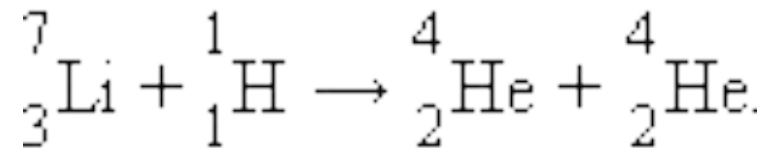
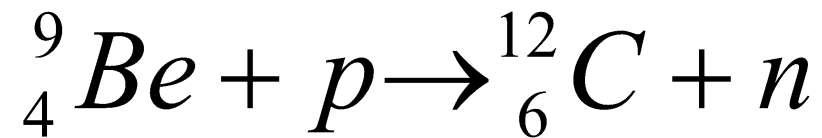
- Употребляется **два способа записи ядерных реакций**.
- Один из них аналогичен обычным хим. уравнениям, например:



- В правой части может быть указан энергетический выход реакции Q (в МэВ).
- Положительное значение Q соответствует выделению, а отрицательное - поглощению энергии в ядерной реакции.

- Во втором (сокращенном) способе записи выделяются **тяжелые ядра** (мишень и продукты реакции), а бомбардирующая и выбрасываемая (или выбрасываемые) более легкие частицы пишут в скобках и разделяют запятой.
- Указанная выше реакция записывается при этом как $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$, а все реакции такого типа называют реакциями **(α, n)**-типа.

- Другие примеры ядерных реакций:



Эффективное сечение ядерных реакций

- При облучении некоторого количества ядер нерадиоактивного изотопа частицами количество произошедших ядерных реакций рассчитывается по формуле:

$$N = \sigma \frac{\Phi}{S} \frac{m}{\mu} N_A t$$

- Число ядерных реакций N пропорционально плотности потока частиц (Φ/S), числу облучаемых $\frac{m}{\mu} N_A$ ядер () и времени t .
- Коэффициентом пропорциональности здесь является *эффективное сечение ядерной реакции* (σ).

- Эффективное сечение имеет **размерность площади** и по порядку величины сопоставимо с площадью поперечного сечения атомных ядер (**ок. 10^{-28} м^2**).
- Ранее использовалась внесистемная единица эффективного сечения - **барн** (**1 барн = 10^{-28} м^2**).

- Реальные значения для различных ядерных реакций изменяются в широких пределах (от 10^{-49} до 10^{-22} м²).
- Значение σ зависит от природы бомбардирующей частицы, ее энергии, и, в особенно большой степени, от свойств облучаемого ядра.

- **Наведенная радиоактивность** – это радиоактивность, возникающая в материалах в результате их облучения элементарными частицами.

- Рассчитать наведенную активность можно по формуле:

$$A = \lambda N = \lambda \sigma \frac{\Phi}{S} \frac{m}{\mu} N_A t = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} \sigma \frac{\Phi}{S} \frac{m}{\mu} N_A t$$

