

## Радиоактивность

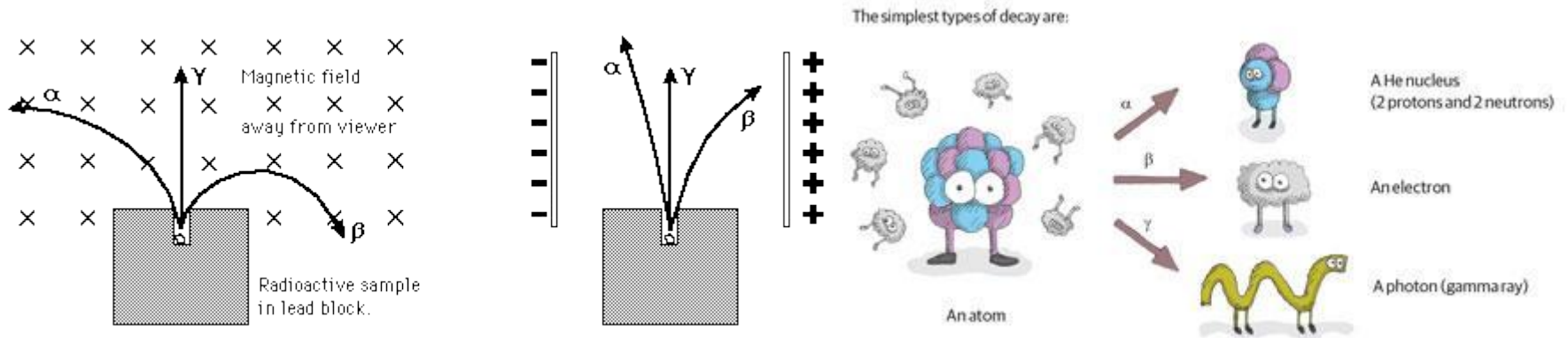
**Радиоактивный распад (радиоактивность)** – спонтанное изменение состава нестабильных атомных ядер (заряда  $Z$ , массового числа  $A$ ) или их внутреннего строения путем испускания элементарных частиц,  $\gamma$ -квантов. Эти химические элементы (вещества) с такими ядрами – радиоактивные элементы. Если порядковый номер (зарядовое число)  $Z > 82$ , начиная с  $\text{Bi}$ , химический элемент радиоактивен.

**Естественная радиоактивность** – самопроизвольный распад ядер, встречающихся в природе. **Искусственная радиоактивность** – распад ядер, полученных искусственным путем через ядерные реакции.

**Материнские и дочерние ядра** – ядро, испытывающее радиоактивный распад, и ядро, возникающее в результате этого распада.

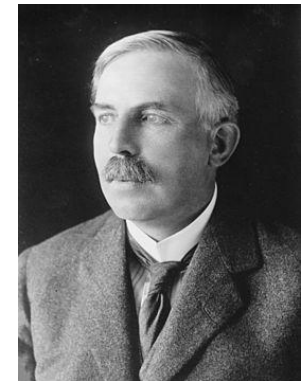
## Частицы, испускаемые при радиоактивном распаде

Резерфорд экспериментально установил (1899), что соли урана испускают лучи, которые по-разному отклоняются в магнитном или электрическом поле.



Три типа лучей, отклоняющихся как:

1. Поток положительно заряженных частиц –  $\alpha$ -лучи.
2. Поток отрицательно заряженных частиц –  $\beta$ -лучи.
3. Не отклоняются –  $\gamma$ -излучение.

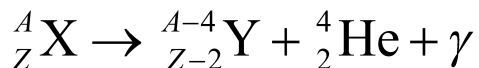


Ernest Rutherford  
1871-1937

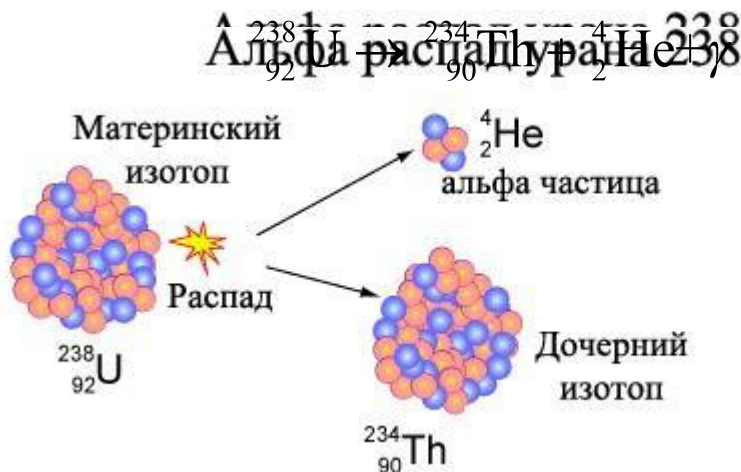
## Альфа-распад

**Альфа-распад** ( $\alpha$ -распад) – самопроизвольный распад ядра на дочернее ядро и  $\alpha$ -частицу.

**$\alpha$ -частица** – ядро изотопа гелия  ${}^4\text{He}$  (гелий-4). Число протонов в ядре (зарядовое число, атомный номер, атомное число, порядковый номер химического элемента в таблице Менделеева)  $Z = 2$ , число нейтронов (изотопическое число)  $N = 2$ , массовое число ядра  $A = Z + N = 4$ . Когда гелий-4 охлажден ниже 2.17 К ( $-271\text{ }^\circ\text{C}$ ), он становится сверхтекучим, с очень необычными для жидкости свойствами: если его поместить в открытый сосуд, то через некоторое время он вытечет из него. Это странное явление объясняется только квантовой механикой.



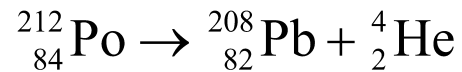
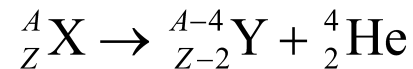
X – материнское ядро, Y – дочернее ядро,  $\gamma$ -квант энергии, испускаемый ядром



U – уран, Th – торий

## Закон радиоактивных смещений (правило Содди, 1913) при $\alpha$ -распаде

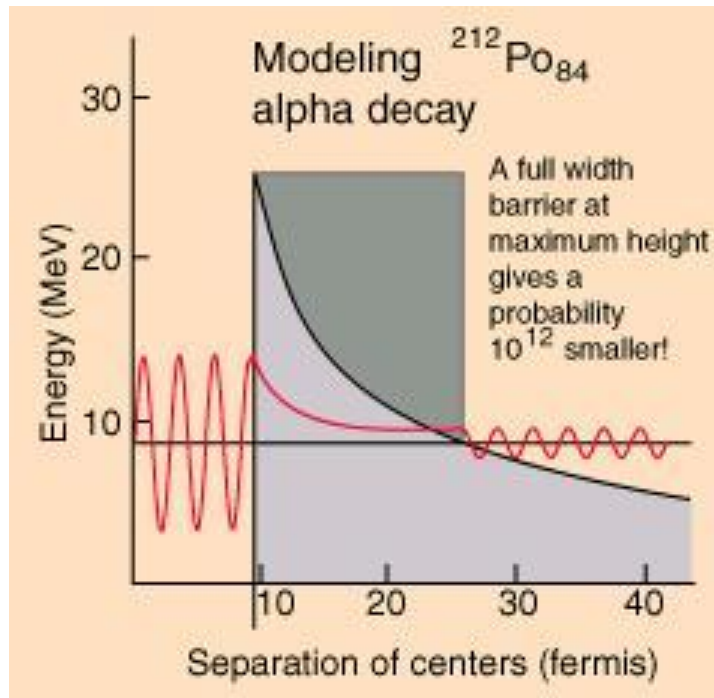
Создается элемент с зарядом ядра  $Z$ , уменьшенным на два, и с атомной массой  $A$ , уменьшенной на четыре по отношению к материнскому ядру.



Po – полоний, Pb – свинец



Frederick Soddy  
1877-1957



1 ферми = 1 фм =  $10^{-15}$  м

Альфа-распад, как правило, происходит в тяжелых ядрах с  $A \geq 140$ . Образовавшаяся  $\alpha$ -частица подвержена большему действию кулоновских сил отталкивания от протонов ядра, чем отдельные протоны. Одновременно  $\alpha$ -частица испытывает меньшее ядерное притяжение к нуклонам ядра, чем остальные нуклоны. На границе ядра она отражается от потенциального барьера внутрь, однако с некоторой вероятностью она может преодолеть его (туннельный эффект) и вылететь наружу. Скорость вылета  $\alpha$ -частицы от 9400 км/с ( $^{144}\text{Nd}$ , неодим) до 23700 км/с ( $^{212\text{m}}\text{Po}$ , полоний)

У всех известных  $\alpha$ -радиоактивных изотопов энергия  $\alpha$ -частиц лежит в пределах от 2 МэВ до 9 МэВ. Времена жизни  $\alpha$ -радиоактивных ядер колеблются в огромном интервале, примерно от  $3 \cdot 10^{-7}$  с. для  $^{212}\text{Po}$  (полоний) до  $5 \cdot 10^{15}$  лет для  $^{142}\text{Ce}$  (церий).

## Закон радиоактивного распада (Содди и Резерфорд, 1903):

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N \Rightarrow N(t) = N_0 \exp(-\lambda t)$$

Скорость радиоактивных распадов пропорциональна числу  $N$  радиоактивных атомов в образце.  $\lambda$  – постоянная распада, которая характеризует вероятность  $p$  распада ядра за единицу времени;  $N_0$  – количества частиц в начальный момент времени. Знак минус указывает на убыль числа радиоактивных ядер со временем. Закон выражает независимость распада этих ядер друг от друга и от времени: вероятность распада данного ядра в каждую следующую единицу времени не зависит от времени, прошедшего с начала эксперимента, и от количества ядер, оставшихся в образце.

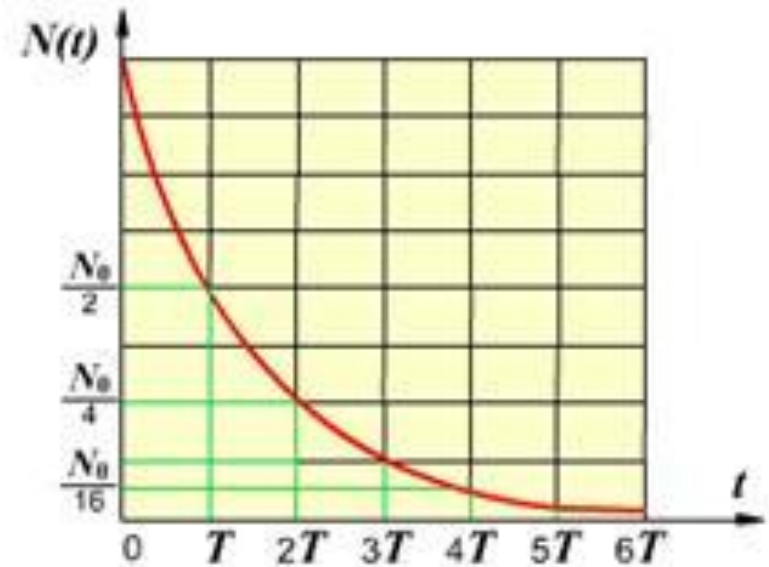
Постоянная распада  $\lambda$  радиоактивного ядра в большинстве случаев практически не зависит от окружающих условий (температуры, давления, химического состава вещества).

**Среднее время жизни** квантовомеханической системы (частицы, ядра атомов) – время  $\tau$ , в течение которого система распадается с вероятностью  $1-1/e$  ( $e = 2,71828\dots$  – число Эйлера). Если рассматривается ансамбль независимых частиц, то в течение времени  $\tau$  число оставшихся частиц уменьшается в  $e$  раз от количества частиц  $N_0$  в начальный момент.

**Период полураспада** – время  $T_{1/2}$ , в течение которого система распадается в примерном отношении 1/2. Число выживших частиц (вероятность  $p$  для данной частицы) зависит от  $t$  следующим образом:

$$p(t) = 2^{-t/T_{1/2}} \approx \frac{N(t)}{N_0}, \quad N(t) = 2^{-t/T_{1/2}} N_0$$

$$\Rightarrow T_{1/2} = \tau \ln 2 = \frac{\ln 2}{\lambda}$$



Образец содержит  $m = 10$  г изотопа плутония  $^{239}\text{Pu}$  с периодом полураспада  $T_{1/2} = 24\,400$  лет. Сколько изотопов распадается ежесекундно (скорость распада)?

$$N(t) = N_0 2^{-t/T_{1/2}}, \quad \frac{dN}{dt} = -\frac{\ln 2}{T_{1/2}} N = -N_0 \frac{2^{-t/T_{1/2}} \ln 2}{T_{1/2}}, \quad t \ll T_{1/2} \Rightarrow 2^{-t/T_{1/2}} \approx 1, \quad \frac{dN}{dt} \approx -\frac{N_0 \ln 2}{T_{1/2}}$$

$$N_0 = \frac{m}{\mu} N_A \quad \mu = 239 \text{ г/моль} - \text{молярная масса изотопа,}$$

$$N_0 = \frac{10}{239} 6.022 \cdot 10^{23} = 2.5 \cdot 10^{22} \quad N_A = 6.022 \cdot 10^{23} \text{ 1/моль} - \text{число Авогадро}$$

$$T_{1/2} = 24400 \cdot 365 \cdot 24 \cdot 3600 = 7.7 \cdot 10^{11} \text{ с} \quad \left| \frac{dN}{dt} \right| = \frac{2.5 \cdot 10^{22} \cdot 0.693}{7.7 \cdot 10^{11}} = 2.25 \cdot 10^{10} \text{ с}^{-1}$$

## Бета-распад

**Бета-распад** ( $\beta$ -распад) – радиоактивный распад, обусловленный слабым взаимодействием. Изменяется заряд ядра  $Z$  на единицу, но не изменяется массовое число. Ядро излучает  $\beta$ -частицу (электрон или позитрон), а также **нейтральную** частицу с полуцелым спином.

К бета-распадам относятся распады двух видов:

- ядро (нейтрон) испускает электрон и электронное антинейтрино – **бета-минус-распад** ( $\beta^-$ -распад, электронная эмиссия),
- ядро испускает позитрон и электронное нейтрино – **бета-плюс-распад**, ( $\beta^+$ -распад, позитронная эмиссия).

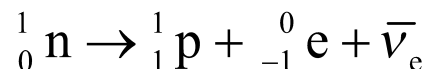
**Слабое ядерное взаимодействие** – одно из четырех фундаментальных взаимодействий в природе. Оно короткодействующее, значительно слабее двух других взаимодействий в ядерной физике (электромагнитное и сильное), но значительно сильнее гравитационного взаимодействия. Проявляется на расстояниях с характерным радиусом  $2 \cdot 10^{-18}$  м (радиуса ядра  $\sim 1$  фм =  $10^{-15}$  м).

**Спиральность** – характеристика состояния элементарной частицы. Представляет собой проекцию спина частицы на направление движения со скоростью света или близкой к ней.

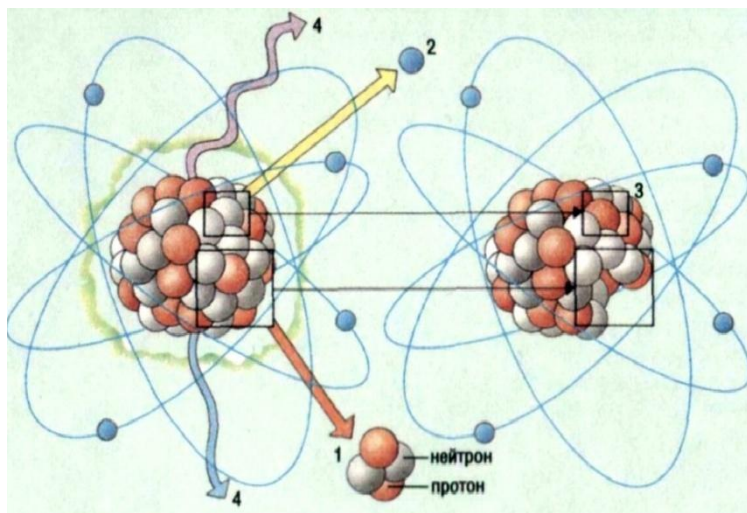


**Электронное нейтрино**  $\nu_e$  – элементарная частица, одна из трех видов нейтрино, с **отрицательной** спиральностью. **Электронное антинейтрино**  $\bar{\nu}_e$  – с **положительной** спиральностью.

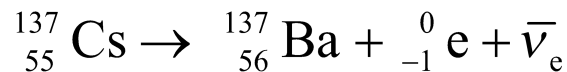
При  $\beta^-$ -распаде слабое взаимодействие превращает нейтрон в протон, при этом испускаются электрон и электронное антинейтрино:



**Правило смещения Содди для  $\beta^-$ -распада:**



**$\beta^-$ -распад:** заряд ядра атома  $Z$  созданного элемента **возрастает на единицу** при неизменной атомной массе  $A$ :



Cs – цезий, Ba – барий

**$\beta^+$ -распад:** заряд ядра атома  $Z$  созданного элемента **уменьшается на единицу** при неизменной атомной массе  $A$ :

