

Радиоактивность

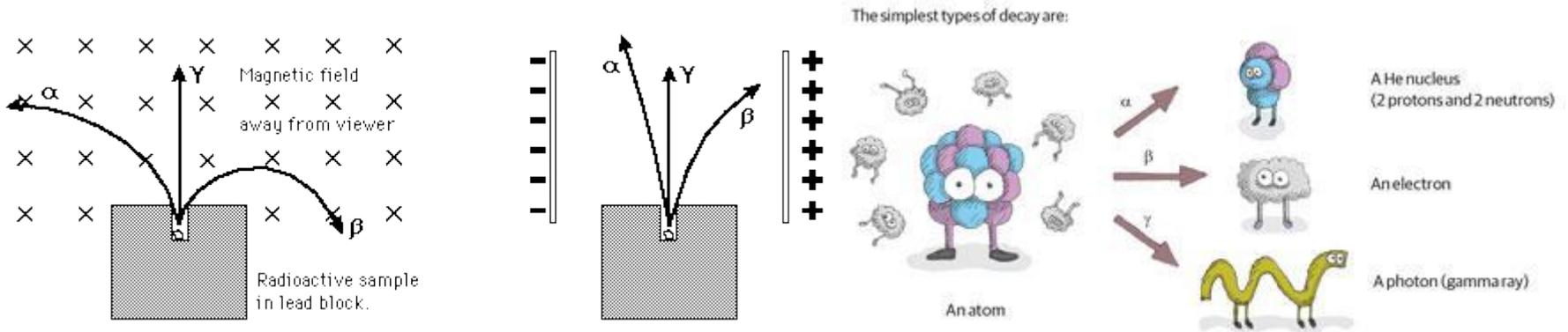
Радиоактивный распад (радиоактивность) – спонтанное изменение состава нестабильных атомных ядер (заряда Z , массового числа A) или их внутреннего строения путем испускания элементарных частиц, γ -квантов. Эти химические элементы (вещества) с такими ядрами – радиоактивные элементы. Если порядковый номер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

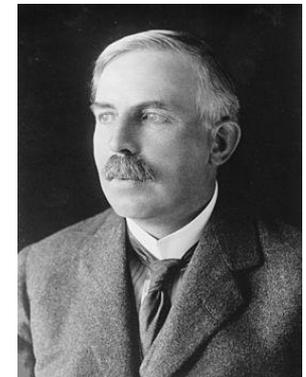
Частицы, испускаемые при радиоактивном распаде

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 – α -лучи.
2. Поток отрицательно заряженных частиц – β -лучи.
3. Не отклоняются – γ -излучение.

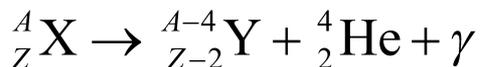


Ernest Rutherford
1871-1937

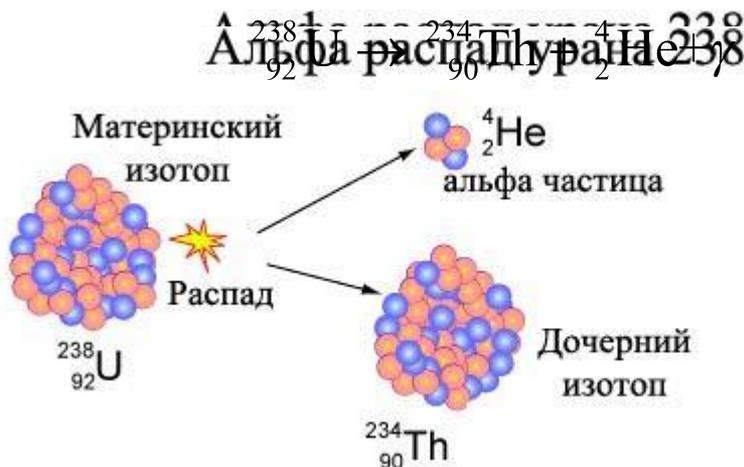
Альфа-распад

Альфа-распад (α -распад) – самопроизвольный распад ядра на дочернее ядро и α -частицу.

α -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.



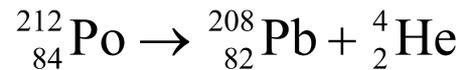
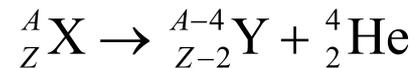
X – материнское ядро, Y – дочернее ядро, γ -квант энергии, испускаемый ядром



U – уран, Th – торий

Закон радиоактивных смещений (правило Содди, 1913) при α -распаде

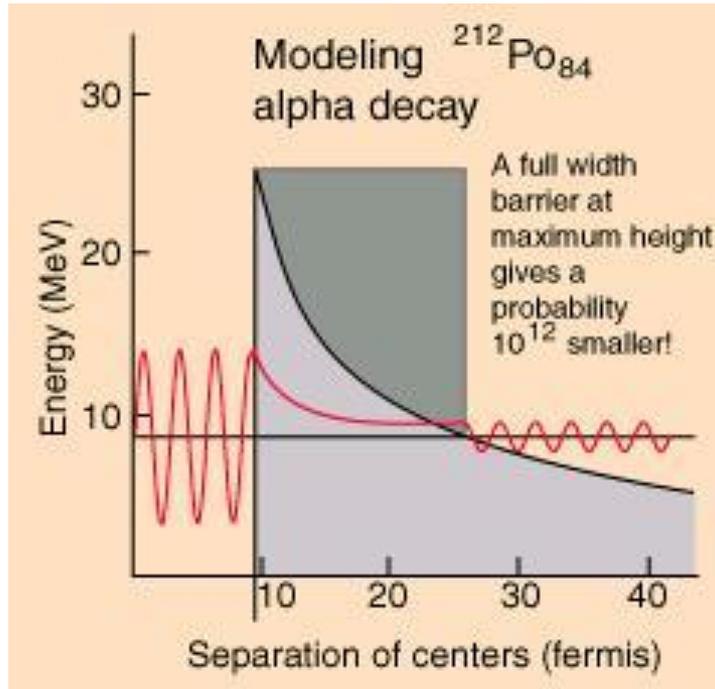
Создается элемент с зарядом ядра Z , уменьшенным на два, и с атомной массой A , уменьшенной на четыре по отношению к материнскому ядру.



Po – полоний, Pb – свинец



Frederick Soddy
1877-1957



$$1 \text{ ферми} = 1 \text{ фм} = 10^{-15} \text{ м}$$

Альфа-распад, как правило, происходит в тяжелых ядрах с $A \geq 140$. Образовавшаяся α -частица подвержена большему действию кулоновских сил отталкивания от протонов ядра, чем отдельные протоны. Одновременно α -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 α -частицы от 9400 км/с (^{144}Nd , неодим) до 23700 км/с ($^{212\text{m}}\text{Po}$, полоний)

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

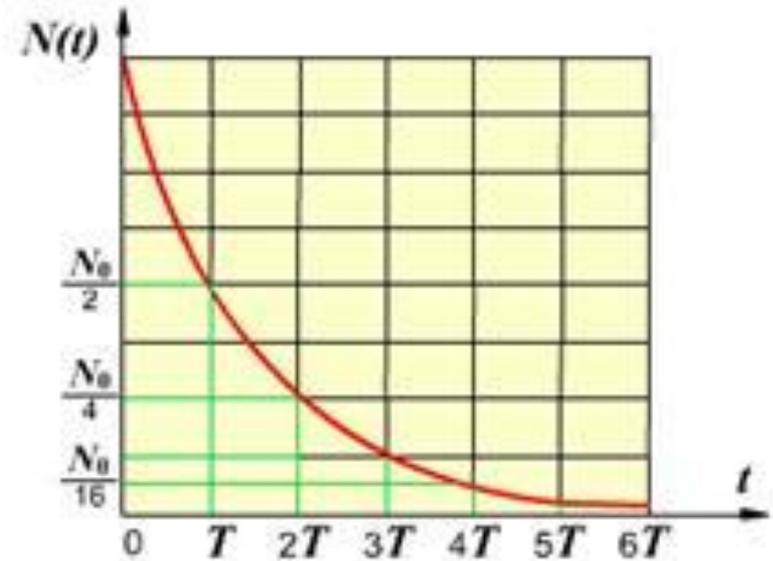
Постоянная распада λ радиоактивного ядра в большинстве случаев практически не зависит от окружающих условий (температуры, давления, химического состава вещества).

Среднее время жизни квантовомеханической системы (частицы, ядра атомов) – время τ , 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 τ 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}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 (β -распад) – радиоактивный распад, обусловленный слабым взаимодействием. Изменяется заряд ядра Z на единицу, но не изменяется массовое число. Ядро излучает β -частицу (электрон или позитрон), а также **нейтральную** частицу с полуцелым спином.

К бета-распадам относятся распады двух видов:

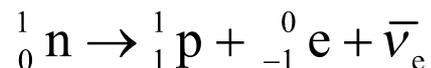
- ядро (нейтрон) испускает электрон и электронное антинейтрино – **бета-минус-распад** (β^- -распад, электронная эмиссия),
- ядро испускает позитрон и электронное нейтрино – **бета-плюс-распад**, (β^+ -распад, позитронная эмиссия).

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 ~ 1 фм = 10^{-15} м).

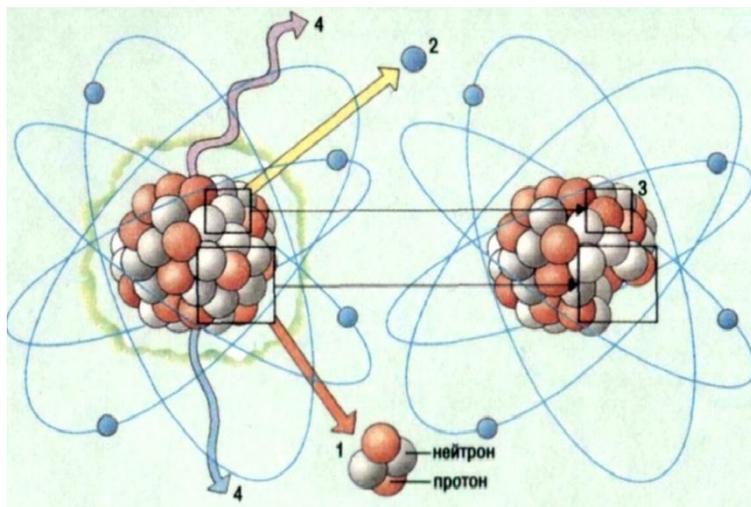
Спиральность – характеристика состояния элементарной частицы. Представляет собой проекцию спина частицы на направление движения со скоростью света или близкой к ней.

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

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



Правило смещения Содди для β^- -распада:



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



Cs – цезий, Ba – барий

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

