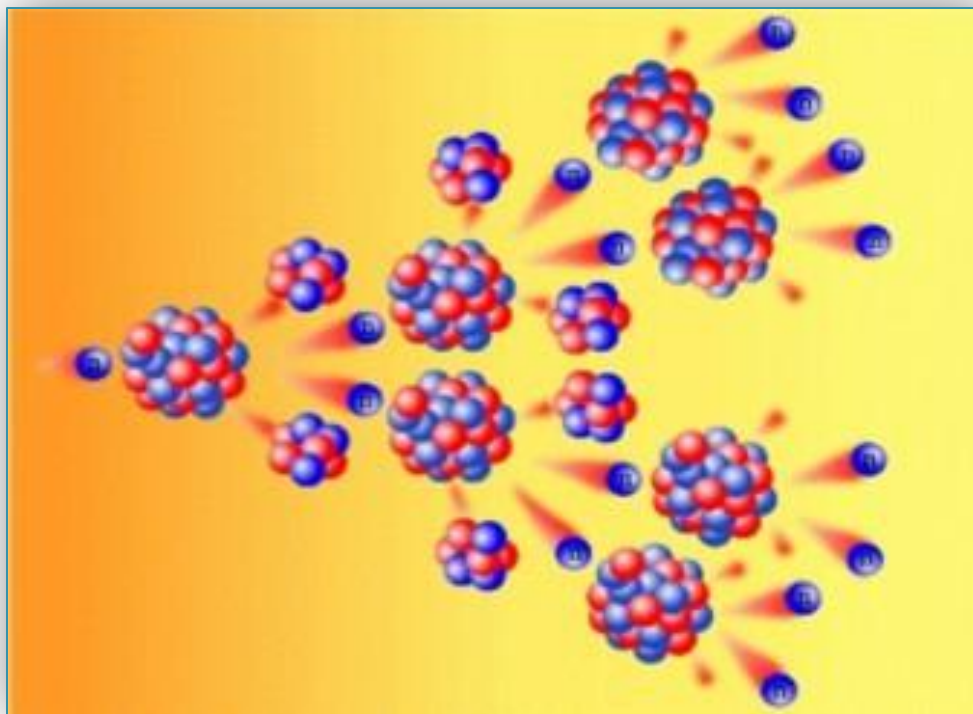


# Радиоактивностъ



# Свойства и строение ядра

**Ядром** называется центральная часть атома, в которой сосредотачивается практически вся масса атома и его положительный электрический заряд.

Все атомные ядра состоят из элементарных частиц: **протонов** и **нейтронов**, которые считаются двумя зарядовыми состояниями одной частицы - **нуклона**.

Протон имеет положительный заряд ( $q_p = 1.6 \cdot 10^{-19}$  Кл), равный абсолютной величине заряду электрона ( $q_e = -1.6 \cdot 10^{-19}$  Кл). Нейтрон не имеет заряда ( $q_n = 0$ ).

# Свойства и строение ядра

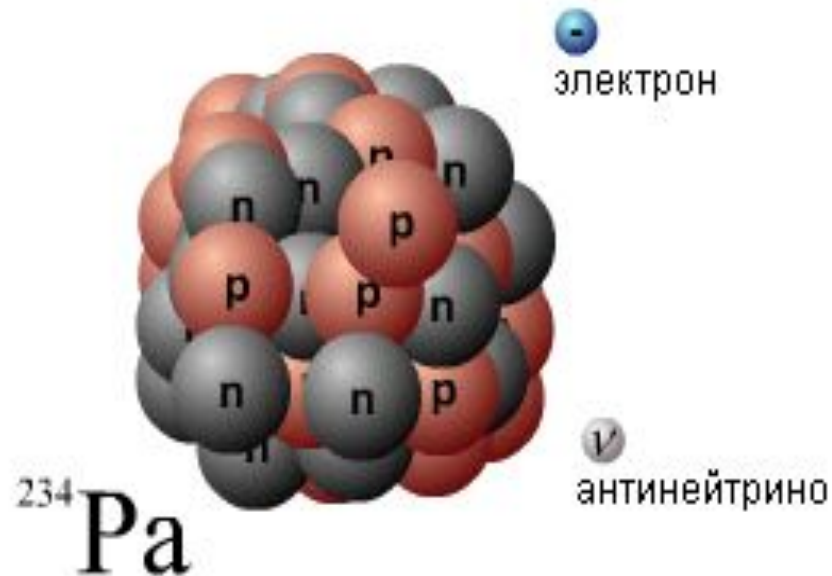
**Зарядом ядра** называется величина  $Ze$ , где  $e$  – величина заряда протона,  $Z$  – порядковый номер химического элемента, равный числу протонов в ядре.

Число нуклонов в ядре  $A=N+Z$  ( $N$ -число нейтронов) называется **массовым числом**.

Ядра с одинаковыми  $Z$ , но различными  $A$  называются **изотопами**.  
Ядра, которые при одинаковом  $A$  имеют различные  $Z$ , называются **изобарами**.

**Радиоактивностью** называют превращение неустойчивых изотопов одного химического элемента в изотопы другого элемента, сопровождающееся испусканием некоторых частиц.

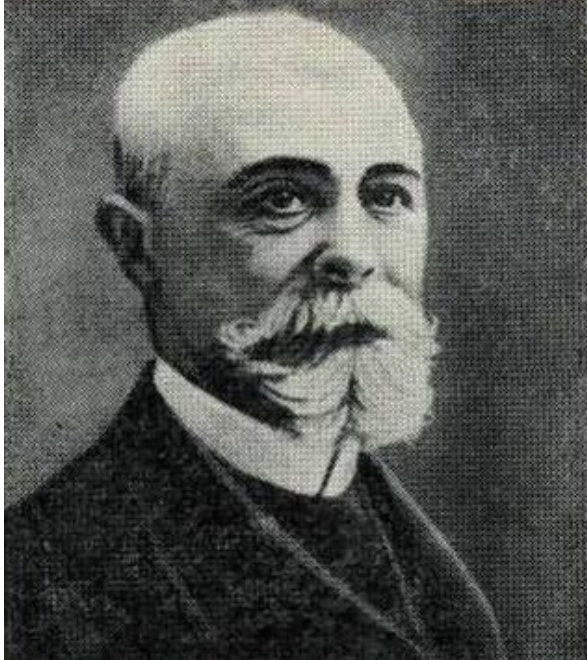
Радиоактивностью считаются так же взаимные превращения одних элементарных частиц в другие (например, нейтрона в протон с образованием электрона и электронного антинейтрино).



# Из истории открытия

Открытие рентгеновских лучей дало толчок новым исследованиям. Их изучение привело к новым открытиям, одним из которых явилось открытие **радиоактивности**.

Примерно с середины XIX стали появляться экспериментальные факты, которые ставили под сомнение представления о неделимости атомов. Результаты этих экспериментов наводили на мысль о том, что атомы имеют сложную структуру и что в их состав входят электрически заряженные частицы.



Наиболее ярким свидетельством сложного строения атома явилось открытие явления радиоактивности, сделанное французским физиком **Анри Беккерелем** в 1896 году.

Беккерель установил, что интенсивность излучения определяется только количеством урана в препарате и совершенно не зависит от того, в какие соединения он входит. То есть это свойство присуще не соединениям, а химическому элементу — урану.



Своим открытием Беккерель делился с учеными, с которыми он сотрудничал. в 1898 г. Мария Кюри и Пьер Кюри обнаружили радиоактивность тория, позднее ими были открыты радиоактивные элементы полоний и радий. Они установили, что свойством естественной радиоактивности обладают все соединения урана и в небольшой степени сам уран. В ходе исследований супруги получили большую дозу облучения, в следствие чего, они заболели лучевой болезнью.

# Радиоактивность

```
graph TD; A[Радиоактивность] --> B[Естественная радиоактивность]; A --> C[Искусственная радиоактивность];
```


## Естественная радиоактивность

(Радиоактивность, наблюдаемая у существующих в природе неустойчивых изотопов)

Наблюдается у ядер химических элементов, расположенных в Периодической системе элементов, за свинцом.

## Искусственная радиоактивность

(Радиоактивность изотопов, полученных в результате ядерных реакций)



У больших ядер нестабильность возникает вследствие конкуренции между притяжением нуклонов ядерными силами и кулоновским отталкиванием протонов. Стабильных ядер с зарядовым числом  $Z > 83$  и массовым числом  $A > 209$  не существует. Но радиоактивными могут оказаться и ядра атомов с существенно меньшими значениями чисел  $Z$  и  $A$ .

Если ядро содержит значительно больше протонов, чем нейтронов, то нестабильность обуславливается избытком энергии кулоновского взаимодействия. Ядра, которые содержат избыток нейтронов, оказываются нестабильными вследствие того, что масса нейтрона превышает массу протона. Увеличение массы ядра приводит к увеличению его энергии.



# Закон радиоактивного распада

Самопроизвольный распад атомных ядер подчиняется закону радиоактивного распада:

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

$N_0$  - количество ядер в данном объеме вещества в начальный момент времени  $t = 0$ ;

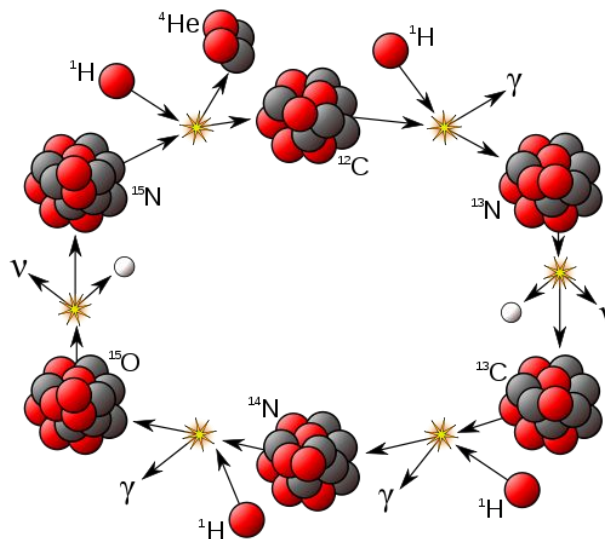
$N$  - число ядер в том же объеме к моменту времени  $t$ ;

$\lambda$  - **постоянная распада**, имеющая смысл вероятности распада ядра за 1 секунду и равная доле ядер, распадающихся за единицу времени.

# Закон самопроизвольного радиоактивного распада основывается на двух предположениях:

1. Постоянная распада  $\lambda$  не зависит от внешних условий;
2. Число ядер, распадающихся за время  $dt$ , пропорционально наличному количеству ядер.

Эти предположения означают, что радиоактивный распад является статистическим процессом и распад данного ядра является случайным событием, имеющим определённую вероятность.



# Средняя продолжительность жизни изотопа

Величина  $\frac{1}{\lambda}$  является **средней продолжительностью жизни радиоактивного изотопа**. Суммарная продолжительность жизни  $dN$  ядер равна:

$$t|dN| = t\lambda N dt$$

**Средняя продолжительность  $\tau$  жизни** всех первоначально существующих ядер:

$$\tau = \frac{1}{N_0} \int_0^{\infty} \lambda N t dt = \lambda \int_0^{\infty} t e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda}$$

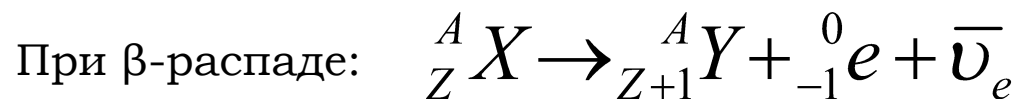
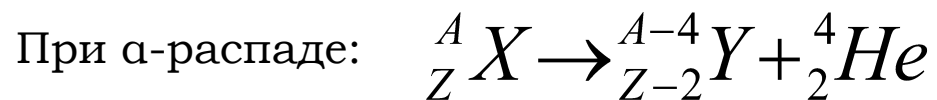
# Период полураспада

Характеристикой, устойчивости ядер относительно распада является **период полураспада**  $T_{1/2}$ . Так называется время, в течении которого первоначальное количество ядер данного радиоактивного вещества распадается наполовину. Связь  $\lambda$  и  $T_{1/2}$  :

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = 0,693\tau$$

Пример: U-238	$T_{1/2} = 4,5 \cdot 10^9$ лет
Vi-210	$T_{1/2} = 5$ дней
Pb-210	$T_{1/2} = 10^{-9} \text{ c}^{-1}$

# Правила смещения (правила Фаянса и Содди)



${}^A_Z X$  - материнское ядро;

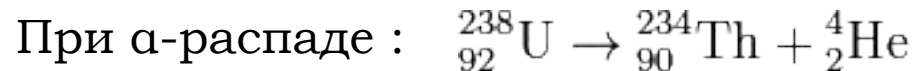
$Y$  - символ дочернего ядра;

${}^4_2 He$  - ядро гелия;

${}^0_{-1} e$  - символическое обозначение электрона, для которого  $A=0, Z=-1$ .

$\bar{\nu}_e$  - антинейтрино.

# Примеры правил смещения (правила Фаянса и Содди)



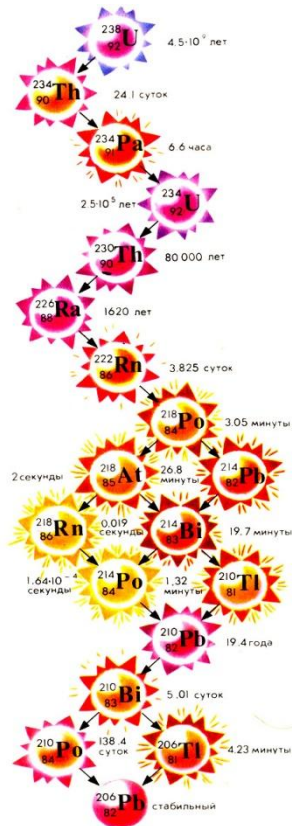
В результате  $\alpha$ -распада элемент смещается на 2 клетки к началу таблицы Менделеева, массовое число дочернего ядра уменьшается на 4.



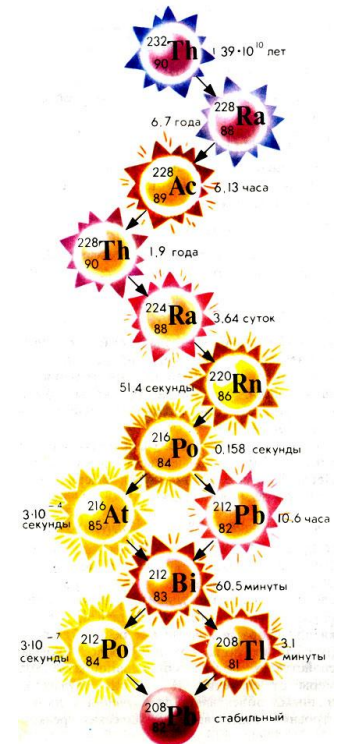
В результате  $\beta$ -распада элемент смещается на 1 клетку к концу таблицы Менделеева (заряд ядра увеличивается на единицу), массовое число дочернего ядра не меняется.

# Радиоактивные семейства

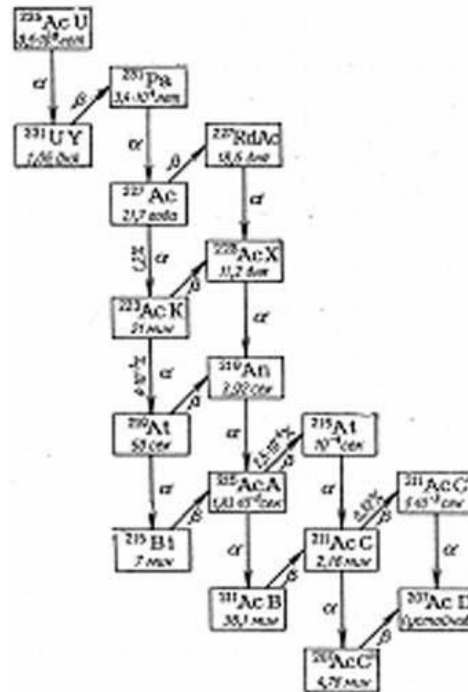
Семейство урана  $^{238}_{92}\text{U}$



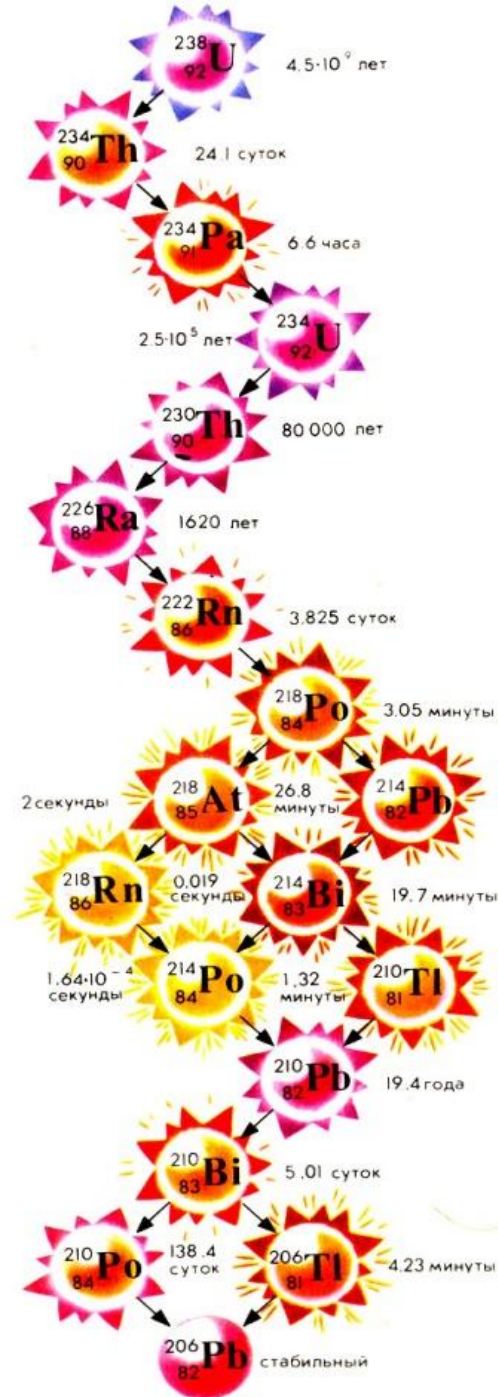
Семейство тория  $^{232}_{90}\text{Th}$



Семейство актиния  $^{235}_{89}\text{Ac}$

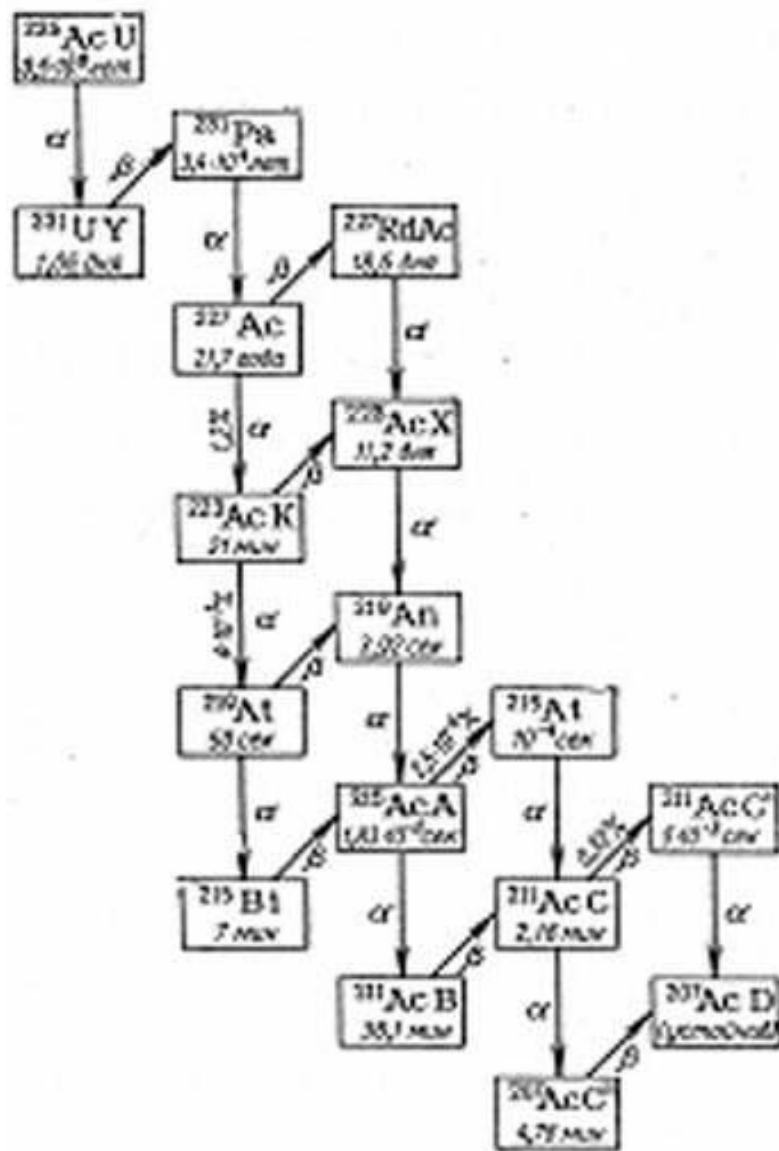


# Семейство урана

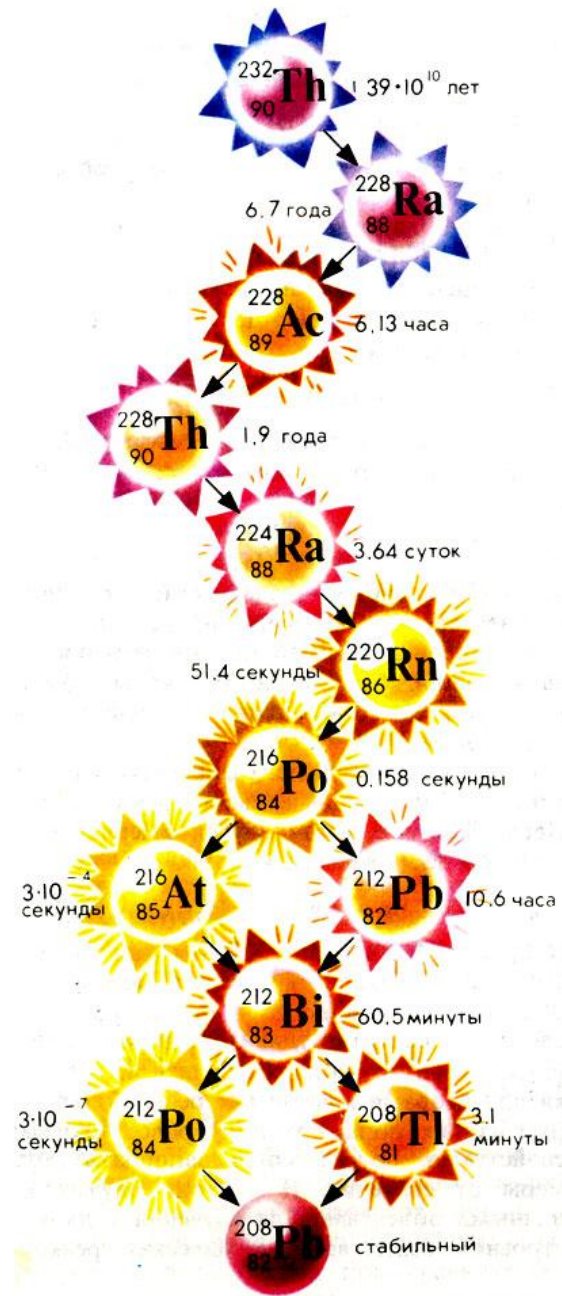




# Семейство актиния

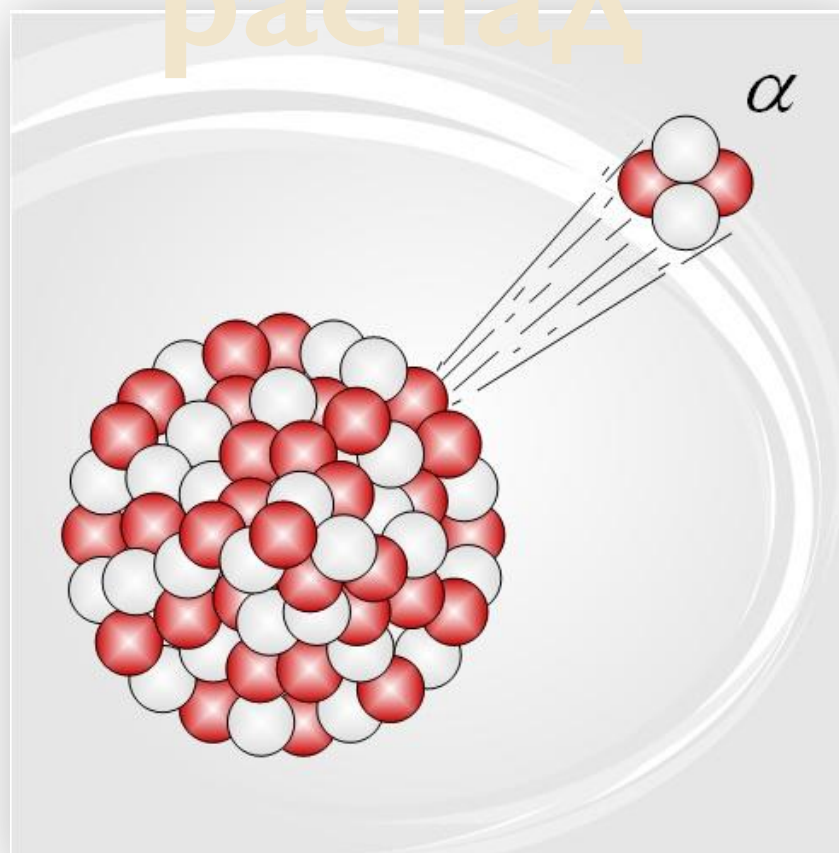


# Семейство тория



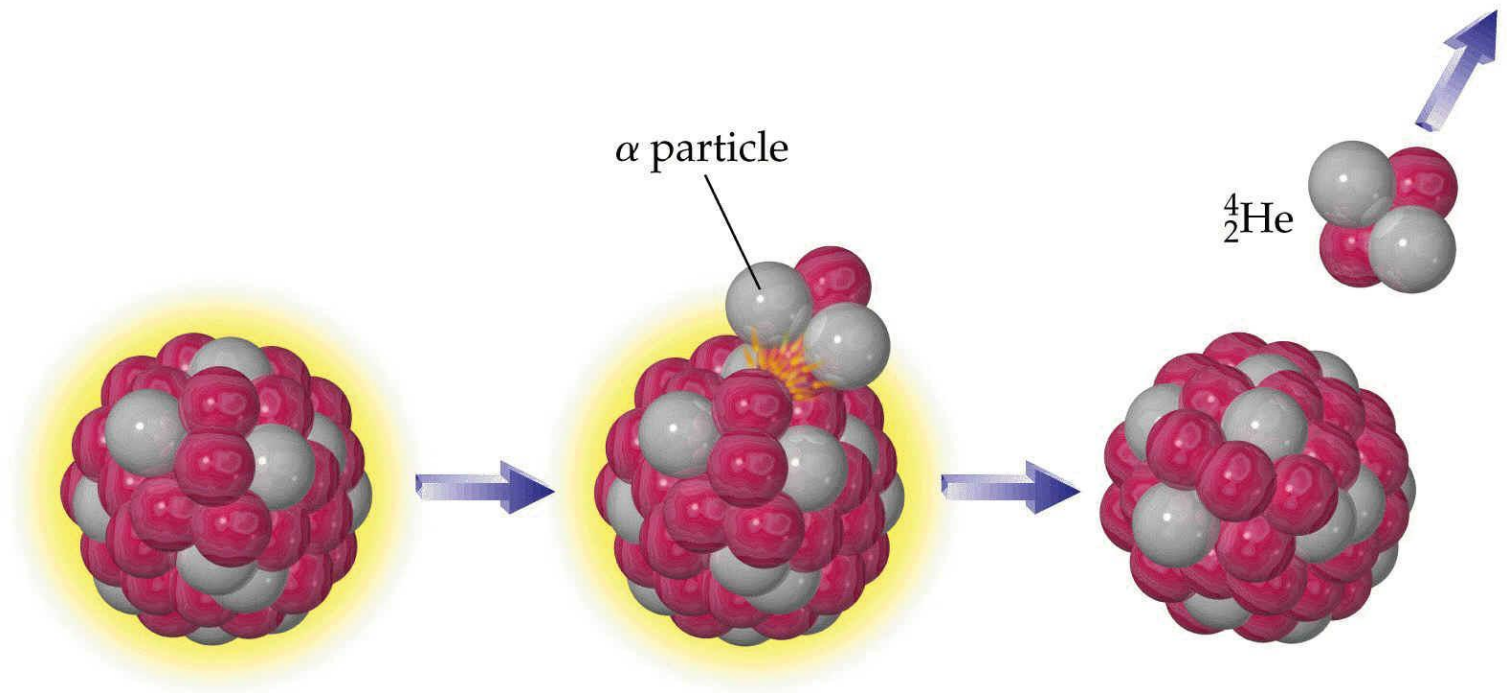
# $\alpha$ -радиоактивный

распад



**Альфа-распадом** называется испускание ядрами некоторых химических элементов  $\alpha$ -частиц.

**Альфа-распад** является свойством тяжелых ядер с массовыми числами  $A > 200$  и зарядами ядер  $Z > 82$ . Внутри таких ядер происходит образование обособленных  $\alpha$ -частиц, состоящих каждая из двух протонов и двух нейтронов.



# Формула прозрачности $D$ потенциального барьера

Ядро является для  $\alpha$ -частицы потенциальным барьером, высота  $U$  которого больше, чем  $W$  – энергия  $\alpha$ -частицы в ядре. Формула прозрачности  $D$  потенциального барьера показывает, что незначительные изменения энергии  $\alpha$ -частицы в ядре приводит к сильному изменению величины

$$\ln D \left\{ -\frac{2}{\hbar} \int_{x_1}^{x_2} \sqrt{2m_a [U(x) - W]} dx \right\}$$

# СВЯЗЬ $\lambda$ И $D$

Постоянная распада  $\lambda$  связана с прозрачностью  $D$  потенциального барьера для  $\alpha$ -частицы. Для упрощенной модели прямоугольного потенциального барьера длины  $L$ , которая обычно принимается равной радиусу ядра  $R$  ( $2R$ - ширина потенциального барьера):

$$\lambda = Dn$$

где  $n$  – число ударов  $\alpha$ -частицы о стенку барьера за единицу времени

$$n = v / 2L$$

$v$  - скорость  $\alpha$ -частицы в ядре

$$v = \sqrt{\frac{2W}{m_a}}$$

Упрощенная формула для  
постоянной  $\alpha$ -распада

$$\lambda = \frac{1}{2R} \sqrt{\frac{2W}{m_\alpha}} e^{-\frac{2}{\hbar} \sqrt{2m_\alpha (U_0 - W)} R}$$

# Закон Гейгера - Нэттола

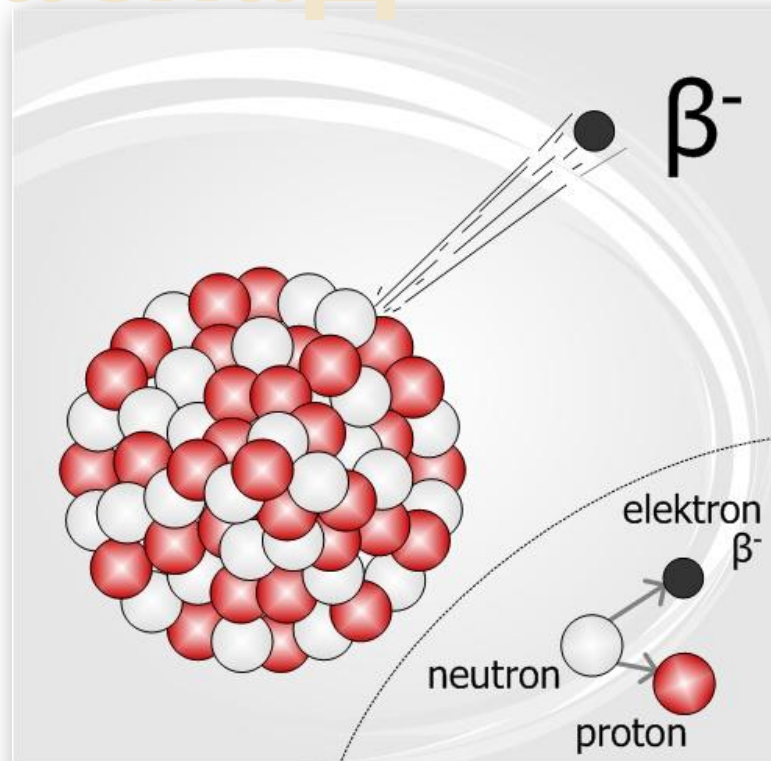
Чем больше постоянная распада  $\lambda$  радиоактивного элемента, тем больше пробег  $R_\alpha$  испускаемых им  $\alpha$ -частиц в воздухе:

$$\ln \lambda = A + B \ln R_\alpha$$

где  $A$  и  $B$  – эмпирические постоянные, имеющие различные значения для каждого из радиоактивных семейств.



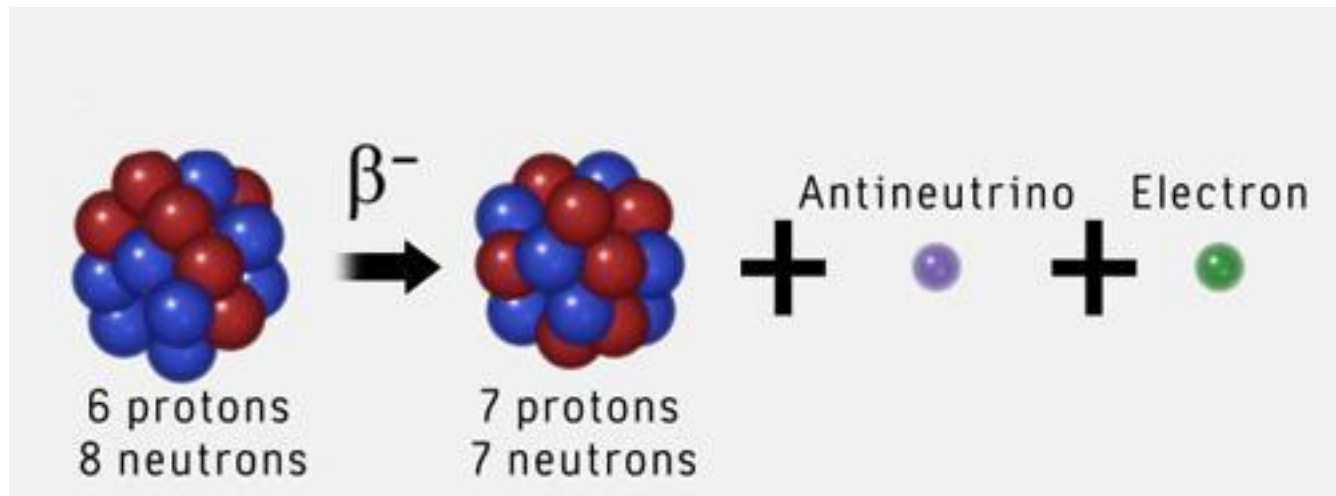
# Бета- распад



Термином бета-распад обозначает три типа ядерных превращений:

1. Электронный распад ( $\beta_-$ )
2. Позитронный распад ( $\beta_+$ )
3. Электронный захват ( $e^-$  или K-захват)

Первые два типа состоят в том, что ядро испускает электрон и электронное антинейтрино.



# Превращения при $\beta$ -распаде

при  $\beta_-$ :  ${}_0^1n \rightarrow {}_1^1p + {}_{-1}^0e + {}_0^0\tilde{\nu}_e$

при  $\beta_+$ :  ${}_1^1p \rightarrow {}_0^1n + {}_{+1}^0e + {}_0^0\nu_e$

при e-захвате:  ${}_1^1p + {}_{-1}^0e \rightarrow {}_0^1n + {}_0^0\nu_e$

Здесь  ${}_0^1n$  и  ${}_1^1p$  - символические обозначения нейтрона и протона;

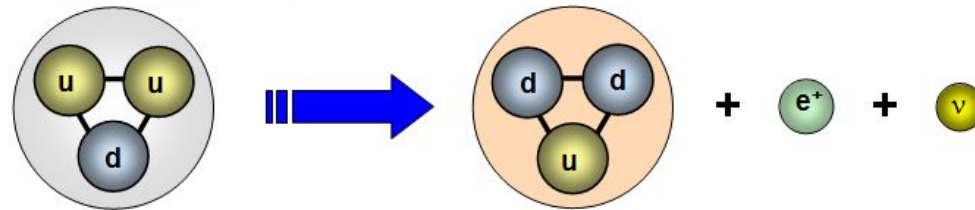
${}_{-1}^0e$  и  ${}_{+1}^0e$  - обозначение электрона и позитрона;

${}_0^0\nu_e$  и  ${}_0^0\tilde{\nu}_e$  - электронное нейтрино и антинейтрино

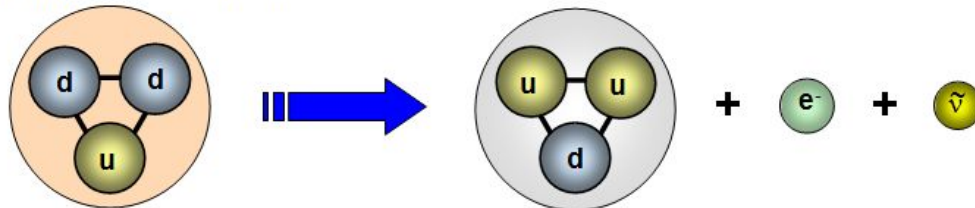
$\beta_-$ -распад происходит у естественно-радиоактивных, а также искусственно-радиоактивных ядер;  $\beta_+$ -распад характерен только для явления искусственной радиоактивности- возникновения собственных радиоактивных излучений ядер под действием  $\alpha$ -частиц, нейтронов и других частиц.

Нарушение условия устойчивости введением в ядро избыточных протонов приводит к искусственному  $\beta_+$  распаду.

Beta<sup>+</sup> decay:  $p \rightarrow n + \beta^+ + \nu$

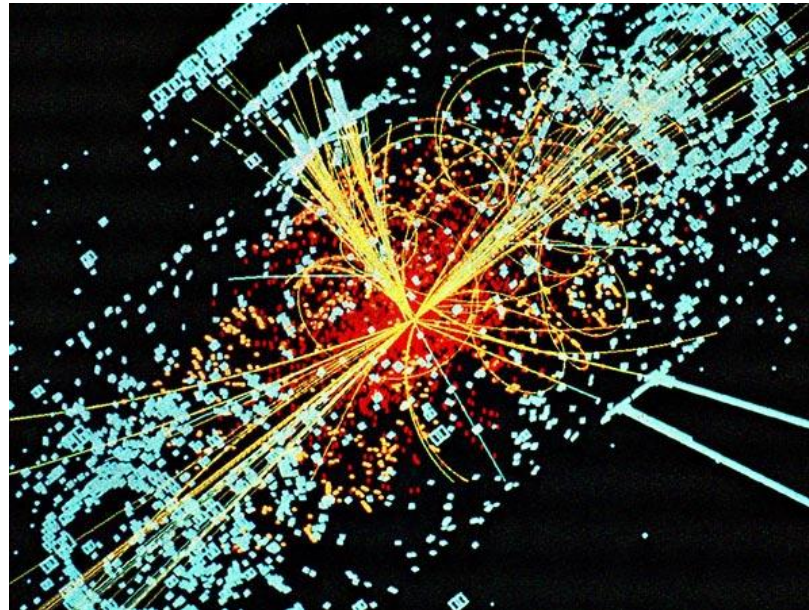


Beta<sup>-</sup> decay:  $n \rightarrow p + \beta^- + \bar{\nu}$

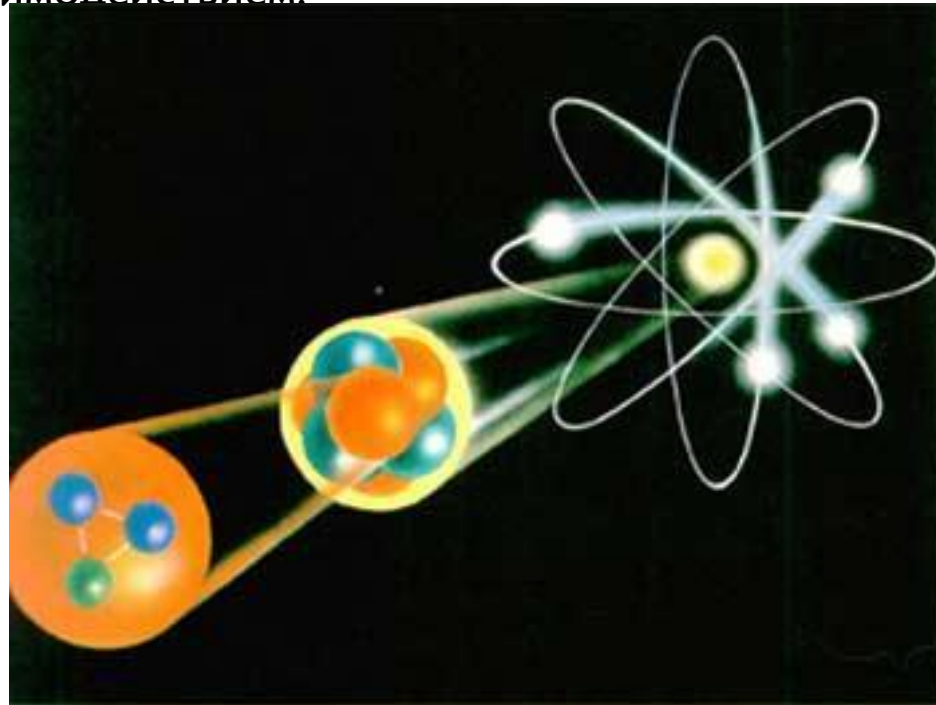


# Радиоактивный распад свободных нейтронов

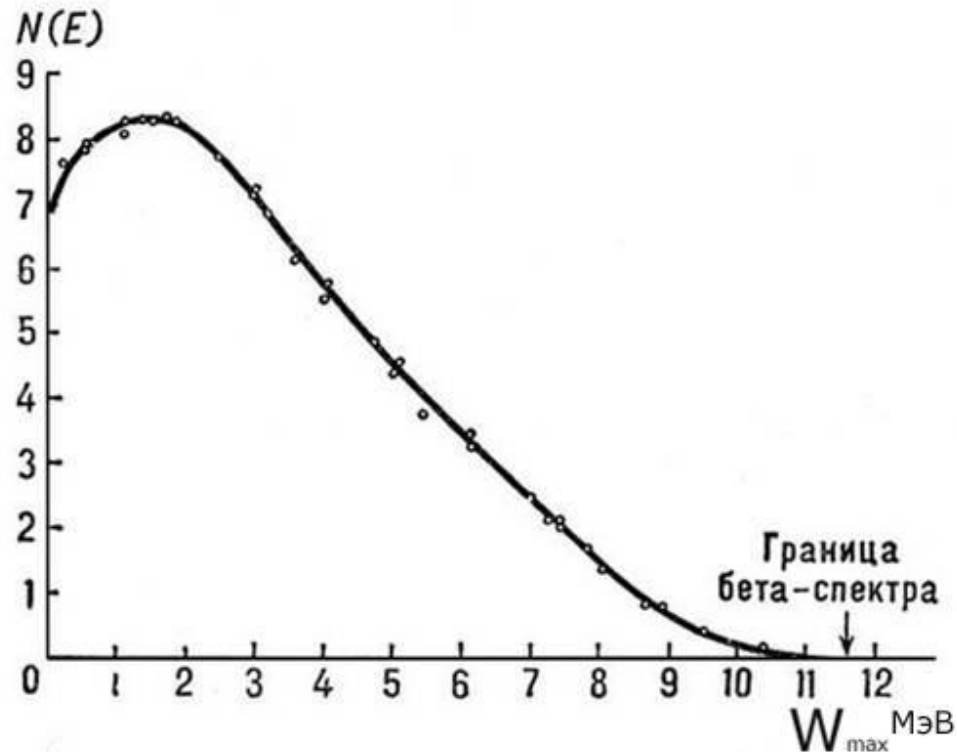
В потоках нейтронов большой интенсивности, возникающих в ядерных реакторах, обнаружен радиационный распад свободных нейтронов, происходящий с периодом полураспада  $(1,01 \pm 0,03) \cdot 10^3$  с. В тяжелых ядрах, перегруженных нейтронами, такое превращение приводит к  $\beta_-$  - естественной радиоактивности.



Полупериоды бета-распадов изменяются для различных источников  $\beta_+$ -радиоактивного излучения в широком интервале времен от  $10^{-2}$  с до  $10^{12}$  лет, несоизмеримо больших по сравнению с ядерным временем ( $10^{-22} - 10^{-23}$ ) с. Это указывает на то, что бета-распад обуславливается слабым взаимодействием.



# Энергетический спектр испускаемых электронов



Энергия  $W_{\max}$  называется **верхней границей  $\beta_-$ -спектра** и является характеристикой источника  $\beta_-$ -радиоактивного излучения. Для данного источника невозможны энергии электронов, превышающие  $W_{\max}$ .

При бета-распаде не изменяется массовое число  $A$  и спин ядра. Сохранение спина ядра объясняется тем, что электронное антинейтрино имеет спин  $\hbar/2$  и суммарный спин этой частицы и спина электрон, так же равного  $\hbar/2$ , равен нулю при противоположной ориентации спинов двух частиц.

