

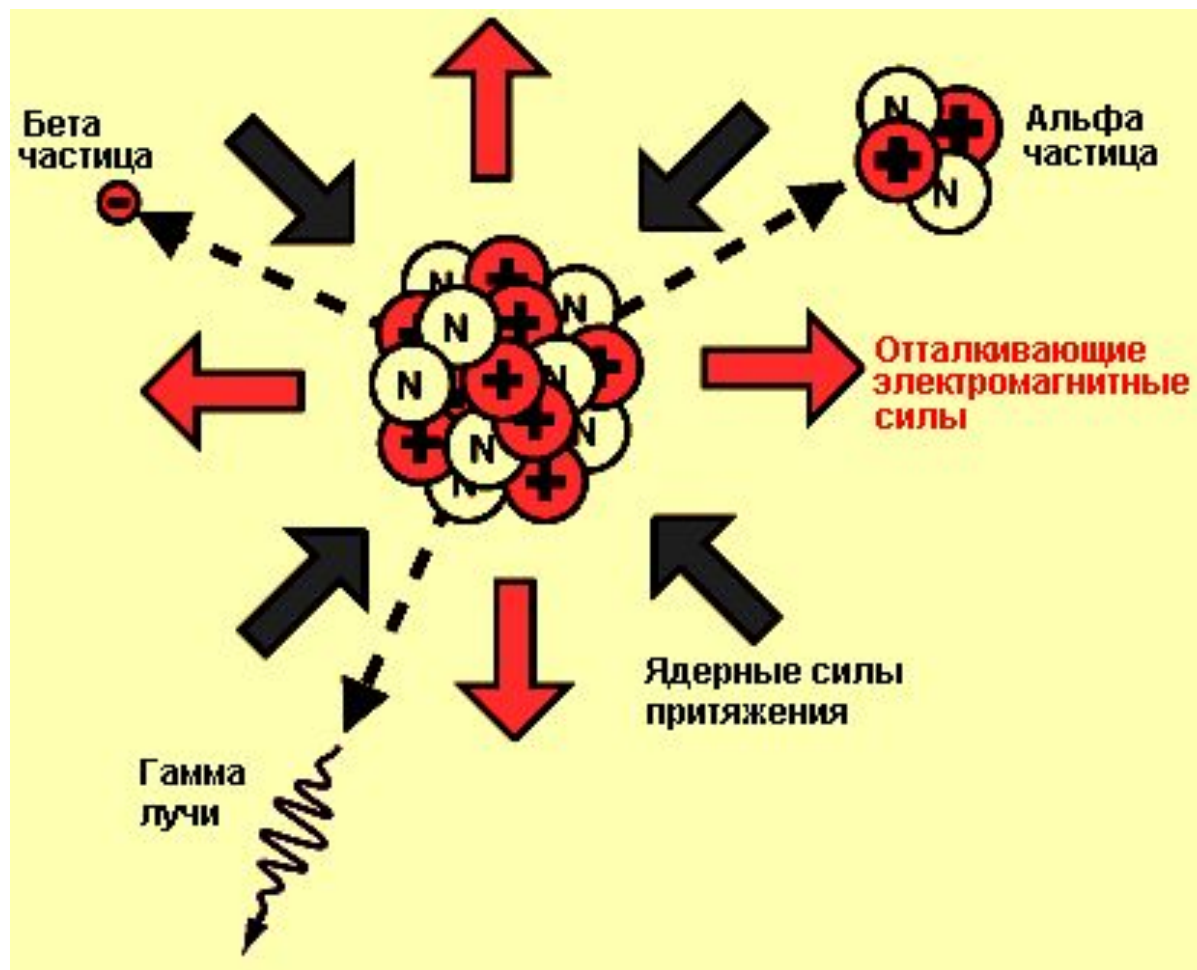
РАДИОАКТИВНОСТЬ

Радиоактивность

Радиоактивностью

называют самопроизвольное превращение *одного*

химического элемента в изотоп другого элемента, сопровождающееся испусканием элементарных частиц или излучения.

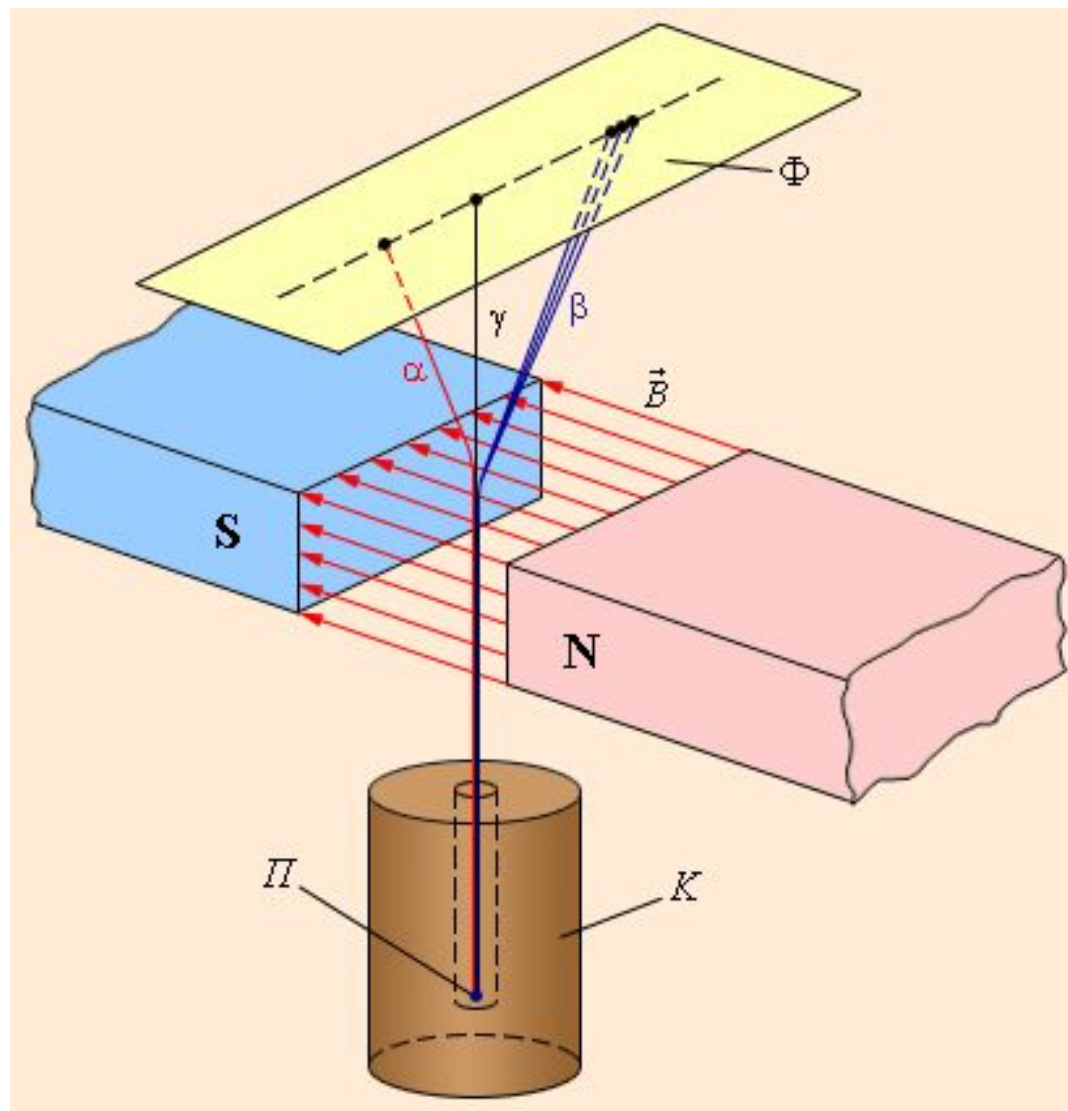


Нарушение ядерного равновесия в ядре, приводящие к радиоактивному распаду.

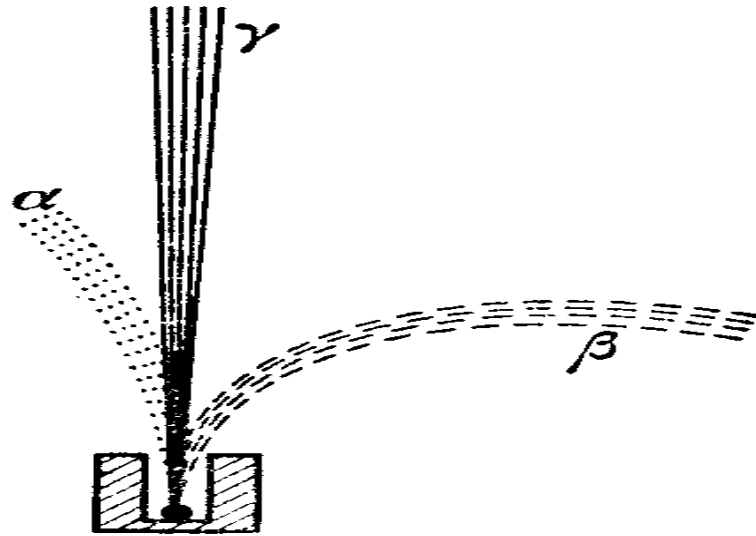
Анализируя проникающую способность радиоактивного излучения урана, Э. Резерфорд обнаружил **две составляющие этого излучения:**

- менее проникающую, названную **α -излучением**, и
- более проникающую, названную **β -излучением**.

Третья составляющая урановой радиации, самая проникающая из всех, была открыта в 1900 году П. Виллардом и названа по аналогии с резерфордовским рядом **γ -излучением**. Резерфорд и его сотрудники показали, что радиоактивность связана с распадом атомов (значительно позже стало ясно, что речь идет о распаде атомных ядер), сопровождающимся выбросом из них определенного типа излучений.



Радиоактивное излучение в магнитном поле



- **α -излучение** — тяжелые положительно заряженные частицы, движущиеся со скоростью около 10^9 см/сек и поглощающиеся слоем алюминия в несколько микрон. Впоследствии методом спектрального анализа было показано, что этими частицами являются ядра гелия ${}^4_2\text{He}$.
- **β -излучение** — легкие, отрицательно заряженные частицы-электроны движущиеся со скоростью, близкой к скорости света, и поглощаемые слоем алюминия толщиной в среднем 1 мм.
- **γ -излучение** — сильно проникающее излучение, не отклоняющееся ни в электрическом, ни в магнитном поле. Природа γ -излучения — жесткое электромагнитное излучение, имеющее еще более короткую длину волны, чем рентгеновское.

Типы превращений

К числу **основных типов превращений** относятся:

- 1) α -распад,
- 2) β^- -распад,
- 3) β^+ -распад, или электронный захват ЭЗ,
- 4) изомерный переход ИП, при котором ядра переходят из возбужденного состояния с большим временем жизни (изомерные состояния) в менее возбужденное или в основное состояние и
- 5) спонтанное деление тяжелых ядер.

Типы превращений

При этих типах превращений материнского нуклида с массовым числом A и атомным номером Z в дочерний нуклид изменяется массовое число и/или атомный номер:

Тип превращения	Атомный номер	Массовое число
α –распад	$Z-2$	$A-4$
β^- -распад	$Z+1$	A
β^+ -распад	$Z-1$	A
Изомерный переход ИП	Z	A

ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ В РАСПАДАХ

При радиоактивном распаде сохраняются следующие параметры:

1. **Заряд.** Электрический заряд не может создаваться или исчезать. Общий заряд до и после реакции должен сохраняться, хотя может по-разному распределяться среди различных ядер и частиц. Единичный положительный и отрицательный заряды нейтрализуют друг друга.

2. **Массовое число или число нуклонов.** Число нуклонов после реакции должно быть равно числу нуклонов до реакции.

3. **Общая энергия.** Кулоновская энергия и энергия эквивалентных масс должна сохраняться во всех реакциях и распадах.

4. **Импульс и угловой момент.** Сохранение линейного импульса ответственно за распределение кулоновской энергии среди ядер, частиц и/или электромагнитного

ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ В РАСПАДАХ

При радиоактивном распаде **выполняется закон сохранения электрических зарядов:**

$$Z_{\text{я}}e = \sum_i Z_i e$$

и закон сохранения массовых чисел:

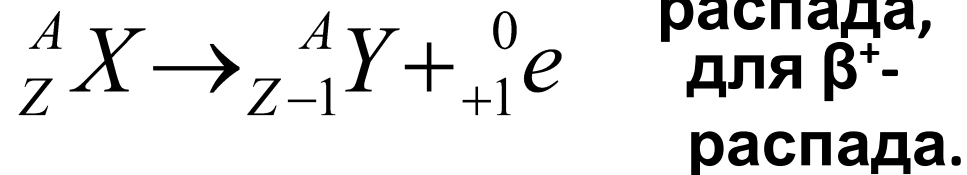
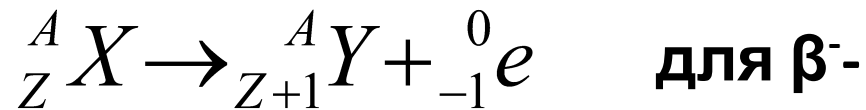
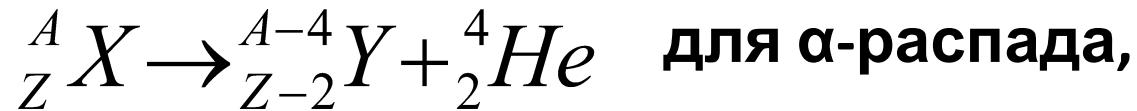
$$A_{\text{я}} = \sum_i A_i$$

$Z_i e$ и $A_{\text{я}}$ — соответственно заряд и массовое число материнского ядра;

$Z_i e$ и A_i — соответственно заряды и массовые числа частиц, получившихся в результате радиоактивного распада.

Правила смещения

Следствием этих законов являются **правила смещения**, позволяющие установить, какое ядро возникает в результате распада данного материнского ядра в различных типах радиоактивного распада:



- Радиоактивность, наблюдающаяся у изотопов, существующих в природных условиях, называется **естественной**.
- Радиоактивность изотопов, полученных посредством ядерных реакций, называется **искусственной**.
- Ядра, подверженные радиоактивным превращениям, называются **радиоактивными**,
- а не подверженные - **стабильными**.

Такое деление условно, так как, в сущности, все ядра могут самопроизвольно распадаться, но этот процесс в разных ядрах идет с различной скоростью.

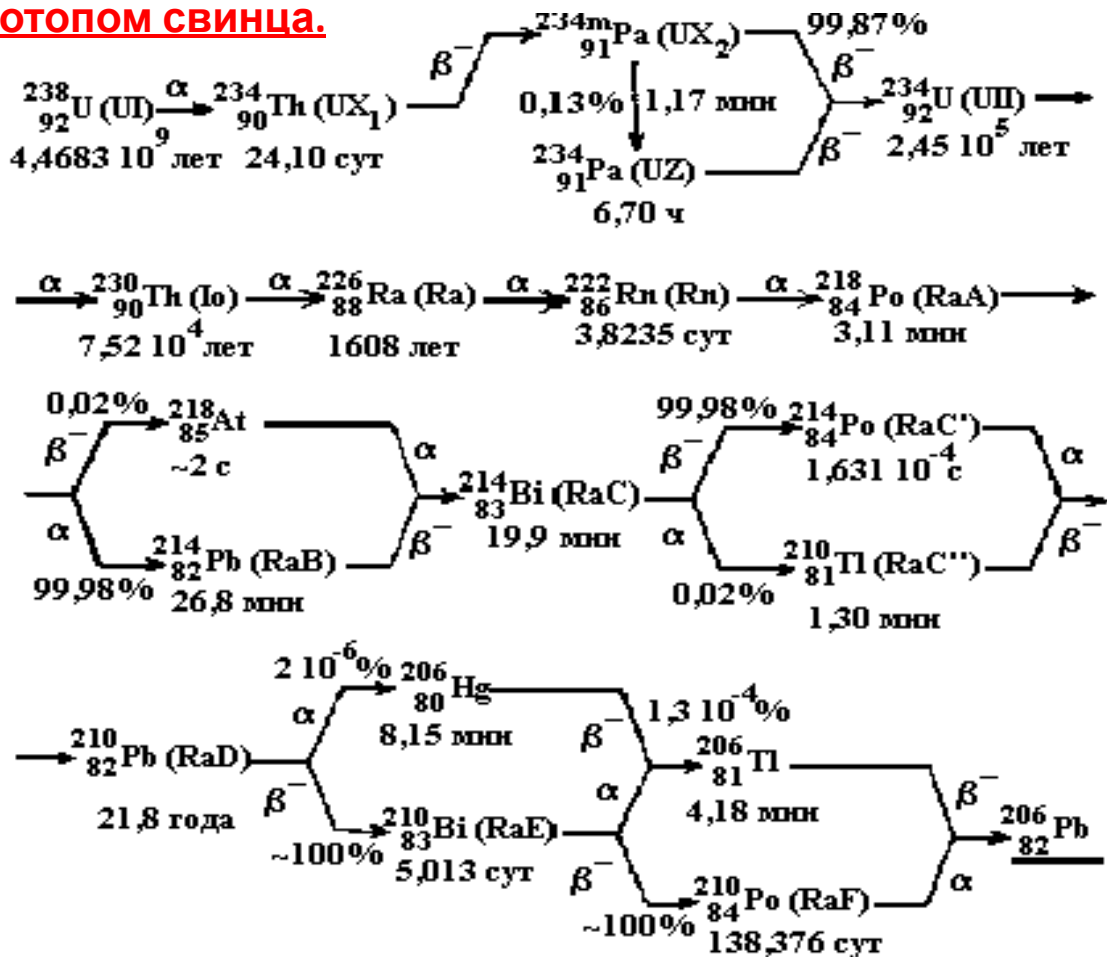
Изобарные цепочки

Все известные радиоактивные нуклиды объединены в **изобарные цепочки**, каждая из которых показывает все радиоактивные превращения ядер с **данным массовым числом A** .
Пример цепочек радиоактивных превращений трех радиоактивных **природных семейств**:

- Урана,
- Актиния,
- Тория.

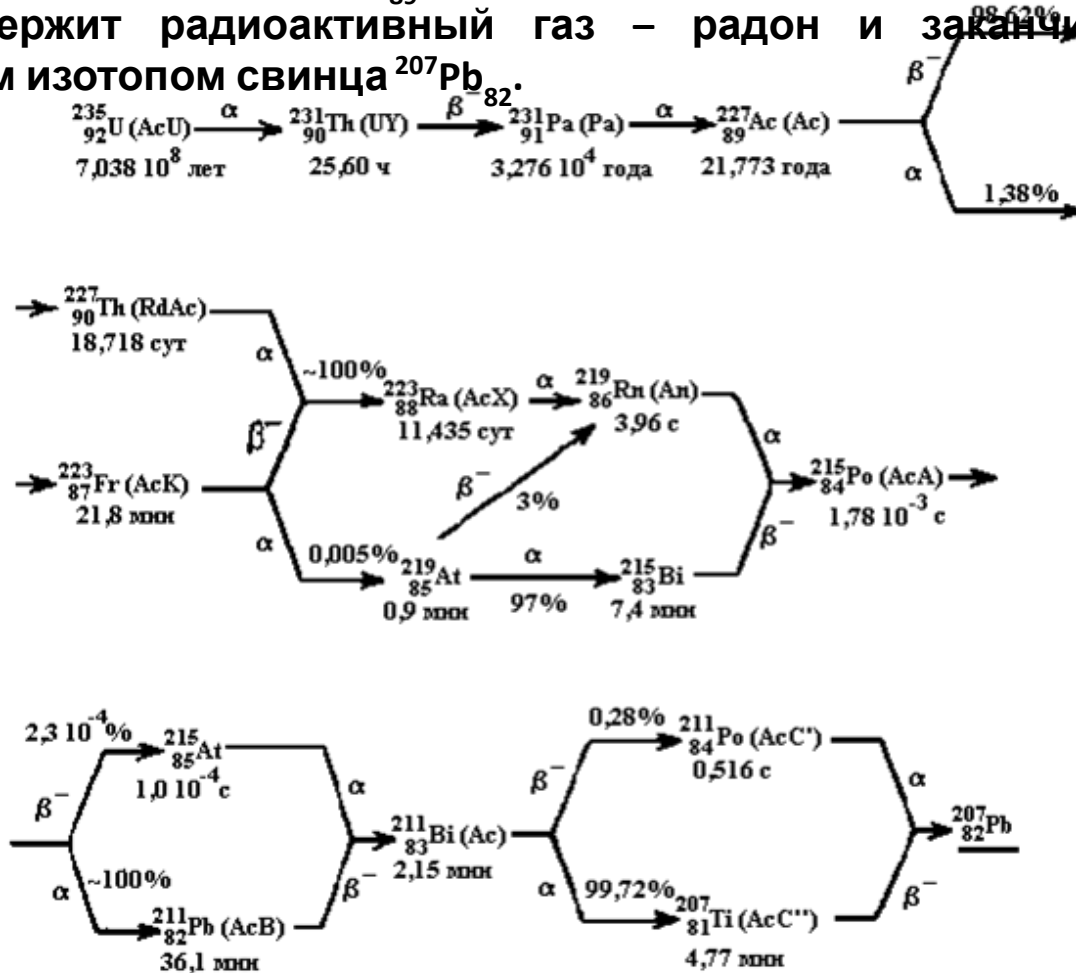
Семейство урана

Первое семейство называется **семейством урана**. Оно начинается с **α -активного изотопа урана**, который с периодом полураспада $4.5 \cdot 10^9$ лет превращается в **торий**. В свою очередь, **торий** является β -радиоактивным изотопом и с периодом 24 дня превращается в β -радиоактивный **протактиний** и т.д. Среди других ядер семейство урана **содержит радий** и радиоактивный газ – **радон** и **заканчивается стабильным изотопом свинца**.



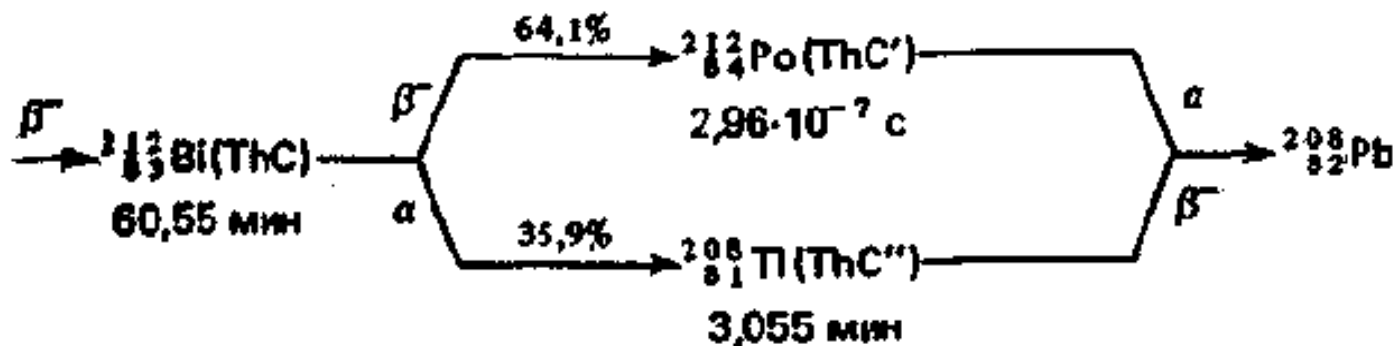
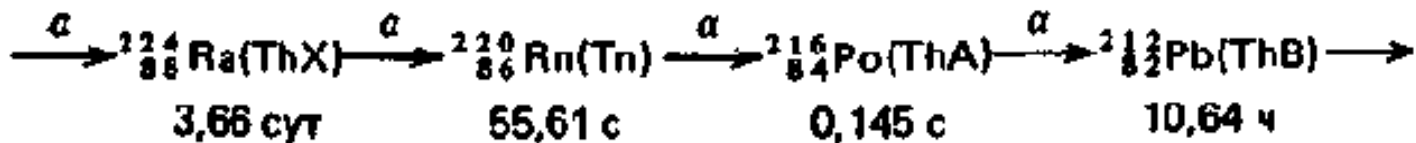
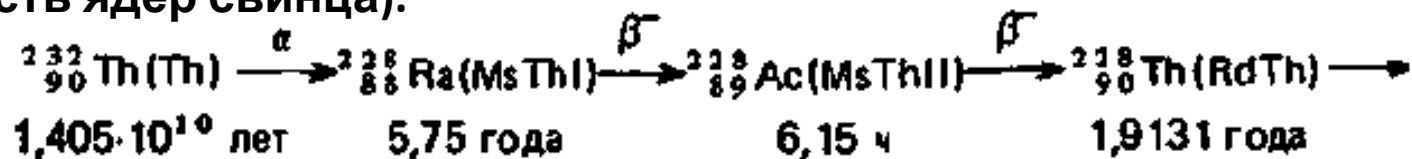
Семейство актиния

Второе **семейство—семейство актиноурана** — начинается с другого α -активного изотопа урана, который с периодом полураспада примерно $7 \cdot 10^8$ лет превращается в торий, испускающий β -частицы и превращающийся в **протактиний**. Этот изотоп в отличие от $^{234}\text{Pa}_{91}$ является α -радиоактивным и превращается в актиний $^{227}\text{Ac}_{89}$ и т. д. Семейство актиноурана, как и семейство урана, содержит радиоактивный газ – радон и заканчивается вторым стабильным изотопом свинца $^{207}\text{Pb}_{82}$.



Семейство тория

Наконец, третье семейство — **семейство тория** - **начинается** с α -радиоактивного изотопа **тория**, имеющего период полураспада $1,4 \cdot 10^{10}$ лет и превращающегося в β -радиоактивный изотоп **радия** и т. д. Это семейство также содержит в своем составе радиоактивный газ **радон** и заканчивается **третьим стабильным изотопом свинца** (что указывает на особую устойчивость ядер свинца).



Из приведенных участков цепочек видно, что **массовые числа** элементов в пределах каждого радиоактивного семейства

- или **не** меняются совсем, а заряд следующего элемента повышается на единицу,
- или **изменяются** на четыре единицы, а заряд следующего элемента понижается на две единицы.

Эта закономерность, названная правилами смещения, очевидно, объясняется тем, что радиоактивное превращение сопровождается

- либо испусканием **β -частицы (электрона)**, в результате чего **заряд ядра повышается на единицу, а массовое число остается неизменным,**
- либо испусканием **α - частицы, уносящей четыре массовые единицы и двойной заряд.**

Из правил смещения вытекает, что массовые числа членов всех трех семейств описываются следующей формулой:

$$**A = 4n + C,**$$

где n — целое число;

$C = 2$ для семейства урана ($n > 50$),

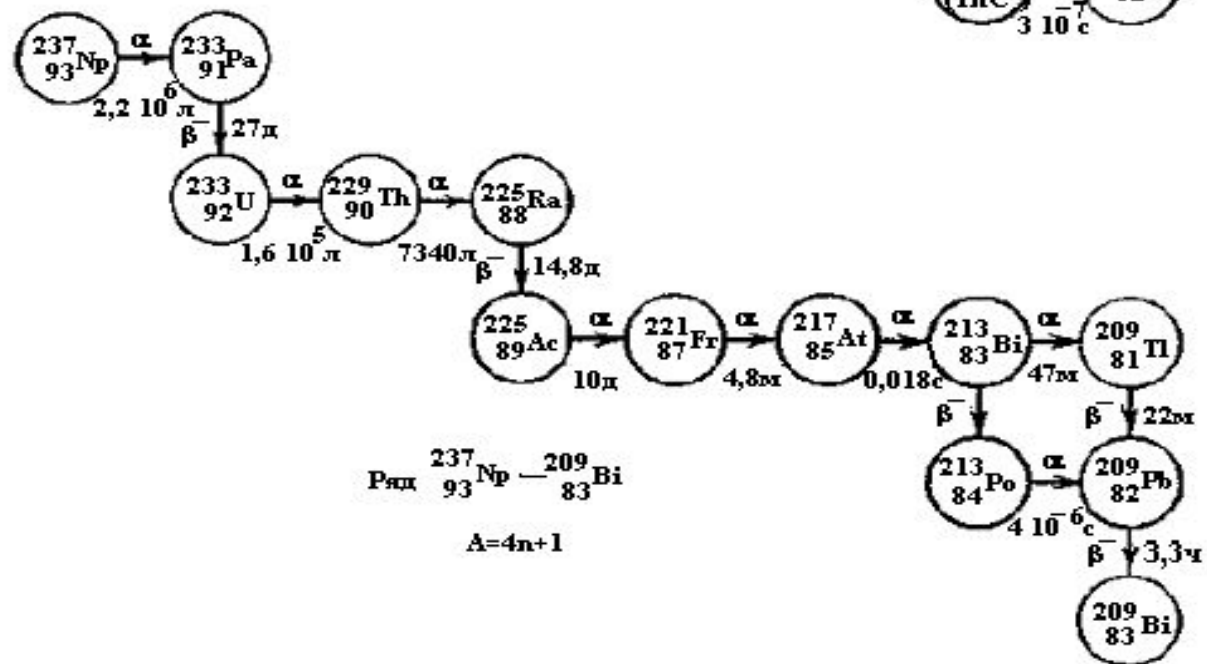
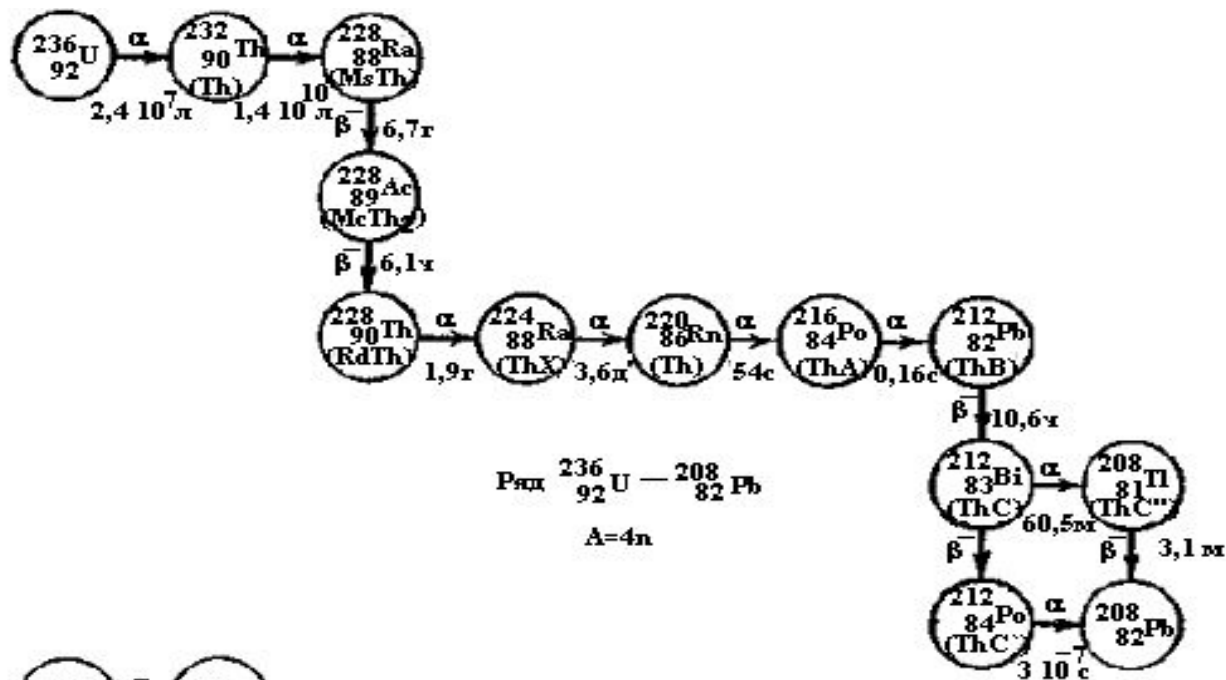
$C = 3$ для семейства актиноурана ($n > 50$),

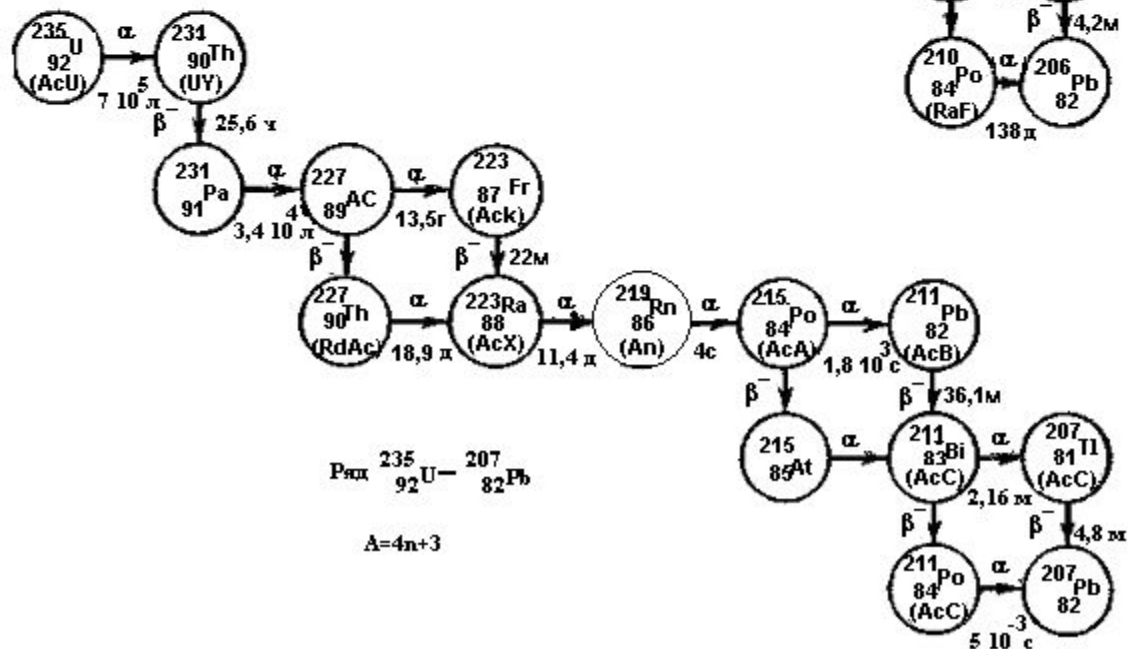
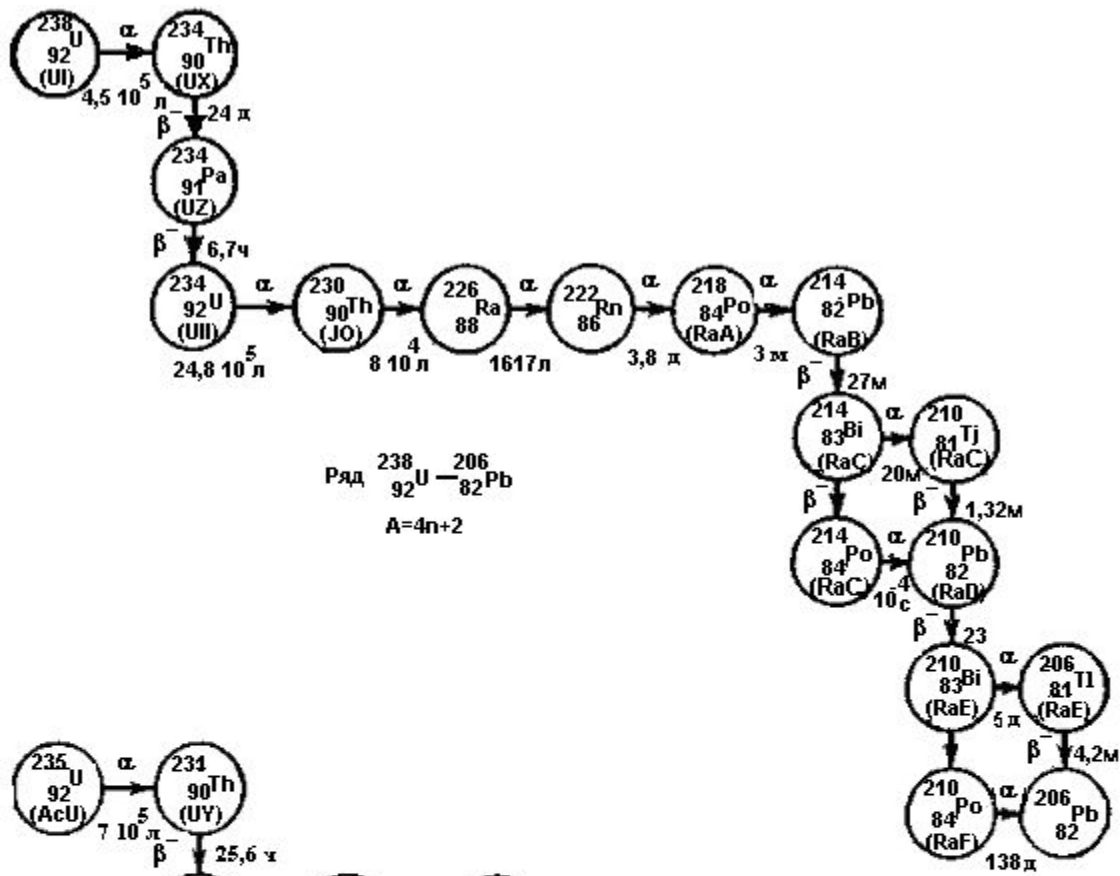
$C = 0$ для семейства тория ($n > 51$).

Обращает на себя внимание отсутствие четвертого семейства при $C = 1$, существование которого в принципе можно ожидать.

Такое семейство действительно существует, но оно состоит из изотопов, не встречающихся в природе.

Четвертое семейство было открыто только после того, как научились искусственно получать изотопы различных элементов.





Закон радиоактивного превращения

Закон радиоактивного превращения весьма прост. Для каждого радиоактивного ядра имеется определенная вероятность λ того, что оно испытывает превращение в единицу времени. Следовательно, если радиоактивное вещество содержит N атомов, то количество атомов dN , которое претерпит превращение за время dt , будет равно

$$dN = -\lambda N dt$$

Вероятность распада λ входит в это уравнение в качестве коэффициента, который называется **постоянной распада**. **Знак минус** соответствует убыванию вещества в процессе распада.

Закон радиоактивного превращения

Решив уравнение найдем следующий закон изменения числа радиоактивных ядер со временем:

$$N = N_0 \exp(-\lambda t),$$

где N_0 – число атомов вещества до начала распада.

Если в полученное уравнение подставить вместо времени t период полураспада $T_{1/2}$, то можно найти связь постоянной распада λ с периодом полураспада $T_{1/2}$.

Действительно, так как $N(T_{1/2}) = N_0/2$, то $N_0 \exp(-\lambda T_{1/2}) = N_0/2$ и $\exp(-\lambda T_{1/2}) = 1/2$,

Откуда

$$\lambda = \ln 2 / T_{1/2} \approx 0,69 / T_{1/2}$$

Старейшей, до сих пор наиболее употребительной единицей радиоактивности является **кюри (Ки)** и ее дольные единицы: **милликюри ($1\text{мКи}=10^{-3}$)** и **микрокюри ($1\text{мкКи}=10^{-6}\text{Ки}$)**. По первоначальному определению кюри есть активность одного грамма изотопа радия $^{226}\text{Ra}_{88}$. Однако, для удобства измерений это определение в дальнейшем было заменено следующим:

$$1\text{Ки} = 3,700 \cdot 10^{10} \text{ Бк};$$

$$1\text{Бк} = 0,27 \cdot 10^{-10} \text{ Ки}.$$

Рассмотрим в общем виде уравнение баланса нуклидов в радиоактивной цепочке из материнского ядра и $i-1$ дочерних радионуклидов (число ядер i -го типа N_i) с постоянными распада соответственно λ_i .

Система дифференциальных уравнений для линейной цепочки, характеризующая распад и накопление числа радиоактивных атомов имеет вид:

$$dN_1(t)/dt = -\lambda_1 N_1(t);$$

$$dN_2(t)/dt = -\lambda_2 N_2(t) + \lambda_1 N_1(t);$$

.....

$$dN_i(t)/dt = -\lambda_i N_i(t) + \lambda_{i-1} N_{i-1}(t)$$

Пусть $N_i(0)$ - число ядер материнского радионуклида в начальный момент времени $t = 0$. Тогда для **любого времени t** решение уравнений имеет вид:

$$N_1(t) = N_1(0) \exp(-\lambda_1 t);$$

$$N_2(t) = N_1(0) \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} [\exp(-\lambda_1 t) - \exp(-\lambda_2 t)]$$

$$N_3(t) = N_1(0) \lambda_1 \cdot \lambda_2 \left[\frac{\exp(-\lambda_1 t)}{(\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_1)} + \frac{\exp(-\lambda_2 t)}{(\lambda_1 - \lambda_2)(\lambda_3 - \lambda_2)} + \frac{\exp(-\lambda_3 t)}{(\lambda_1 - \lambda_3)(\lambda_2 - \lambda_3)} \right]$$

$$N_i(t) = N_1(0) \lambda_1 \cdot \lambda_2 \dots \lambda_{i-1} \left[\frac{\exp(-\lambda_1 t)}{(\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_1) \dots (\lambda_i - \lambda_1)} + \dots + \frac{\exp(-\lambda_i t)}{(\lambda_1 - \lambda_i)(\lambda_2 - \lambda_i) \dots (\lambda_{i-1} - \lambda_i)} \right]$$

(*)

Активность источника A определяется как произведение постоянной распада λ на число радиоактивных ядер в источнике N

$$A = \lambda N \quad (**)$$

- Если N — число ядер в 1 г вещества, т.е. $N = N_0/A$ (ядер/г) (где $N_0 \approx 6 \cdot 10^{23}$ - число Авогадро, A - массовое число), то говорят об **удельной активности A_m , Бк/г**;
- если N - число ядер в единице объема, т.е. $N = \rho N_0/A$ (где ρ — плотность в г/см³), то по формуле (**)
определяется **объемная активность A_v , Бк/см³**.

Формулы расчета активности материнского и дочерних продуктов в линейной цепочке в момент времени t :

$$A_1(t) = A_1(0)\exp(-\lambda_1 t);$$

$$A_2(t) = A_1(0)\frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} [\exp(-\lambda_1 t) - \exp(-\lambda_2 t)] \quad (***)$$

и так далее в соответствии с формулами (*), ().**

При $\lambda_1 \ll \lambda_2$ (или $(T_{1/2})_1 \gg (T_{1/2})_2$)

$$A_2(t) = A_1(0)\frac{\lambda_1}{\lambda_2} [1 - \exp(-\lambda_2 t)]$$

То есть, количество (активного) дочернего радионуклида возрастает со временем по экспоненциальному закону с λ_2 дочернего радионуклида и при $t \gg (T_{1/2})_2$ приближается к своему предельному значению

$$A_2 = A_2(0) \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$$

При $\lambda_1 \gg \lambda_2$ (или $(T_{1/2})_1 \ll (T_{1/2})_2$)

$$A_2(t) = A_1(0) \exp(-\lambda_1 t),$$

то есть активность дочернего радионуклида падает со временем по

экспоненциальному закону с λ_1 материнского радионуклида.

Соотношение активности A_1 материнского и A_2 дочернего радионуклидов $(T_{1/2})_1 \gg (T_{1/2})_2$ и при $t > 10(T_{1/2})_2$ записывается обычно в форме

$$\lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2,$$

где N_1 и N_2 - число ядер материнского и дочернего радионуклидов.

Это так называемое **вековое** (или секулярное) равновесие. Оно означает, что **число распадов дочерних радионуклидов $\lambda_2 N_2$ равно числу распадов $\lambda_1 N_1$ материнского радионуклида** (то есть, числу образующихся при этом ядер дочернего радионуклида $\lambda_1 N_1$).

Активность N (Бк, Ки) радионуклидов связана с массой m (г) радиоактивного изотопа следующими соотношениями:

$$m = a_1 A T_{1/2} N; \quad m = a_2 A T_{1/2} N;$$

$$N = b_1 m / A T_{1/2}; \quad N = b_2 m / A T_{1/2};$$

где A - атомная масса; $T_{1/2}$ - период полураспада, a_1, b_1, a_2, b_2 - константы, зависящие от единиц, в которых выражаются $T_{1/2}$ и N . a_1, b_1 используются, если N выражается в Бк, а a_2, b_2 - в Ки.

Константы	Сек	Мин	Час	Сутки	Год
a_1	$2,40 \cdot 10^{-24}$	$1,44 \cdot 10^{-22}$	$8,62 \cdot 10^{-21}$	$2,07 \cdot 10^{-19}$	$7,56 \cdot 10^{-17}$
a_2	$8,86 \cdot 10^{-14}$	$5,32 \cdot 10^{-21}$	$3,19 \cdot 10^{-10}$	$7,66 \cdot 10^{-9}$	$2,80 \cdot 10^{-6}$
b_1	$4,17 \cdot 10^{23}$	$6,94 \cdot 10^{22}$	$1,16 \cdot 10^{20}$	$4,83 \cdot 10^{18}$	$7,32 \cdot 10^{16}$
b_2	$1,13 \cdot 10^{13}$	$1,88 \cdot 10^{11}$	$3,13 \cdot 10^9$	$3,57 \cdot 10^5$	$1,30 \cdot 10^8$

Задача. При радиоактивном распаде ядер нуклида A_1 образуется радионуклид A_2 . Их постоянные распада равны λ_1 и λ_2 , соответственно.

Полагая, что в начальный момент времени препарат содержит только ядра нуклида A_1 в количестве $N_1(0)$, определить:

- а) количество ядер A_2 через промежуток времени t ;
- б) промежуток времени, через который количество ядер A_2 достигнет максимума;
- в) в каком случае может возникнуть состояние переходного равновесия, при котором отношение количества обоих нуклидов будет оставаться постоянным. Чему равно это отношение?