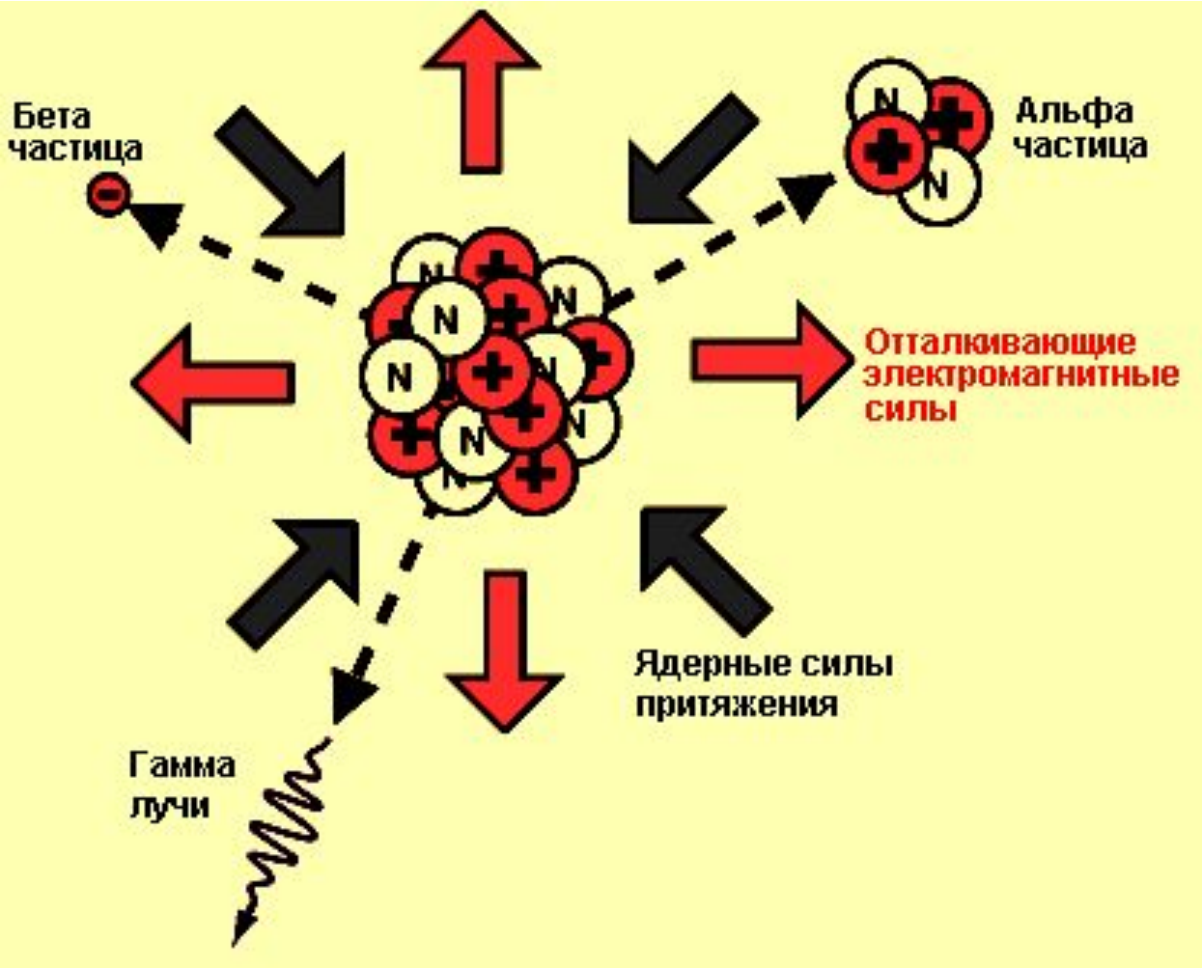
# *РАДИОАКТИВНОСТЬ*

# Радиоактивность

**Радиоактивностью**

**называют самопроизвольное превращение** ***одного***

***химического элемента в изотоп другого элемента, сопровождающееся испус- канием элементарных частиц или излучения.***

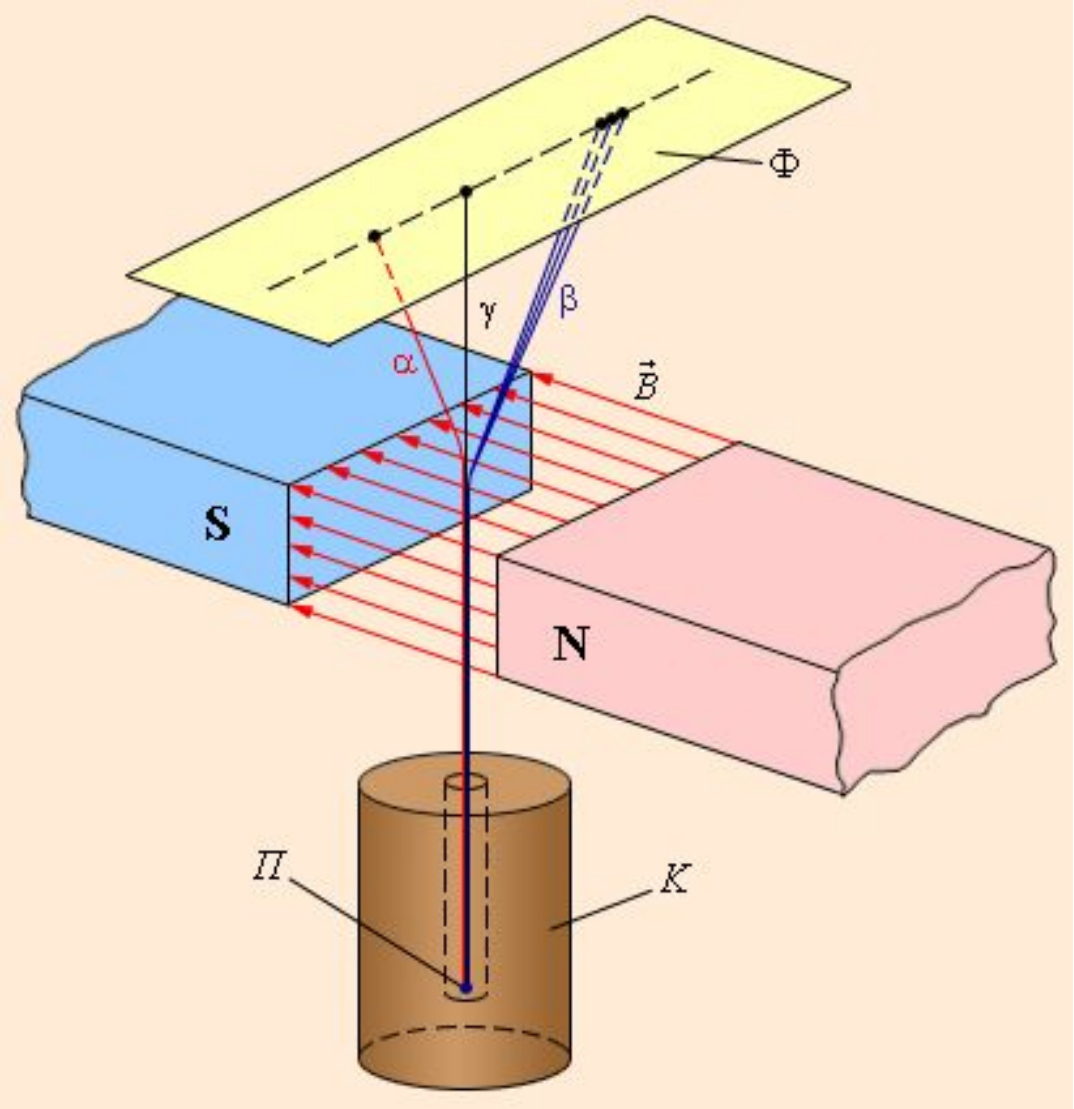



**Нарушение ядерного равновесия в ядре, приводящие к радиоактивному распаду.**

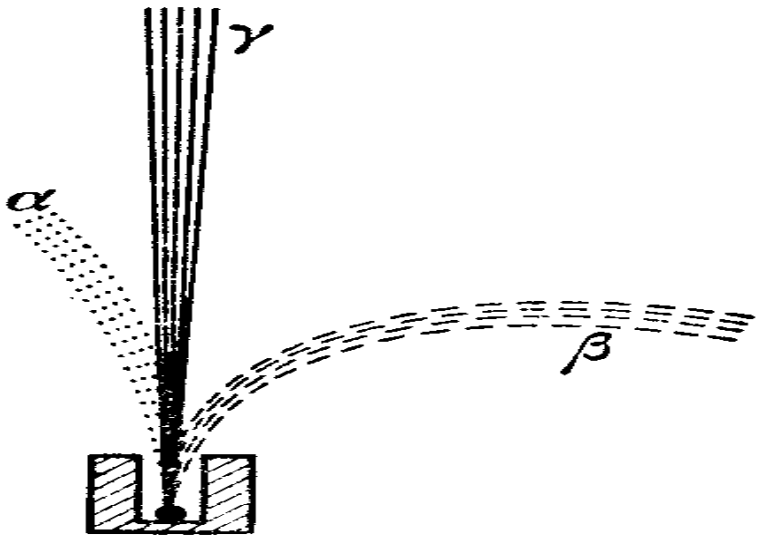
**Анализируя проникающую способность радиоактивного излучения урана, Э. Резерфорд обнаружил две составляющие этого излучения:**

- **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 $^4_2He$.**
- **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)$\beta^-$ -распад,**

**3)$\beta^+$ -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* |
| $\beta^-$ -распад | Z+1 | A |
| $\beta^+$ -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*:**

$$Z_я e = \sum_i Z_i e$$

**и *закон сохранения массовых чисел*:**

$$A_я = \sum_i A_i$$

$Z_i e$ **и** $A_я$ **— 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:**

$$^{A}_{Z}X \rightarrow ^{A-4}_{Z-2}Y + ^{4}_{2}He$$ **для α-распада,**

$$^{A}_{Z}X \rightarrow ^{A}_{Z+1}Y + ^{0}_{-1}e$$ **для β⁻-распада,**

$$^{A}_{Z}X \rightarrow ^{A}_{Z-1}Y + ^{0}_{+1}e$$ **для β⁺-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.**

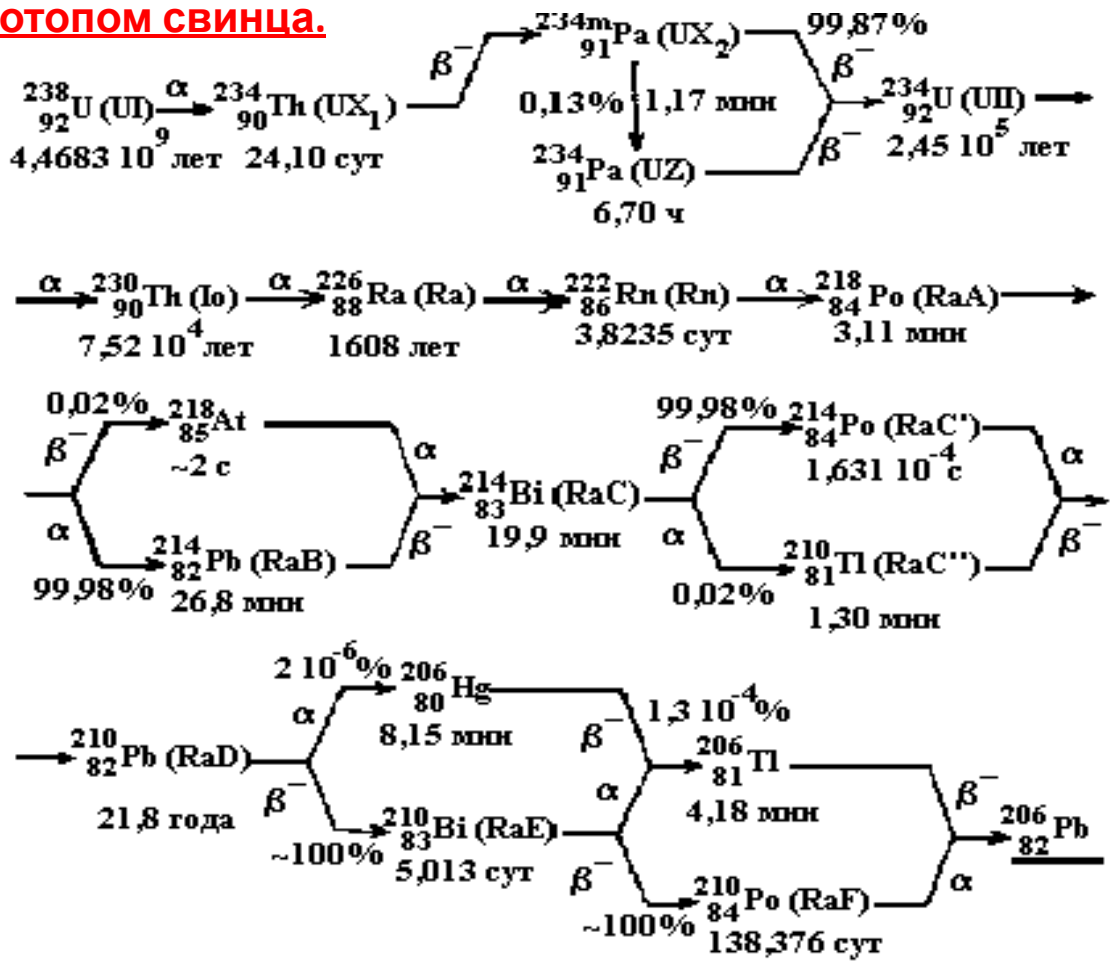
# Изобарные цепочки

**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.**

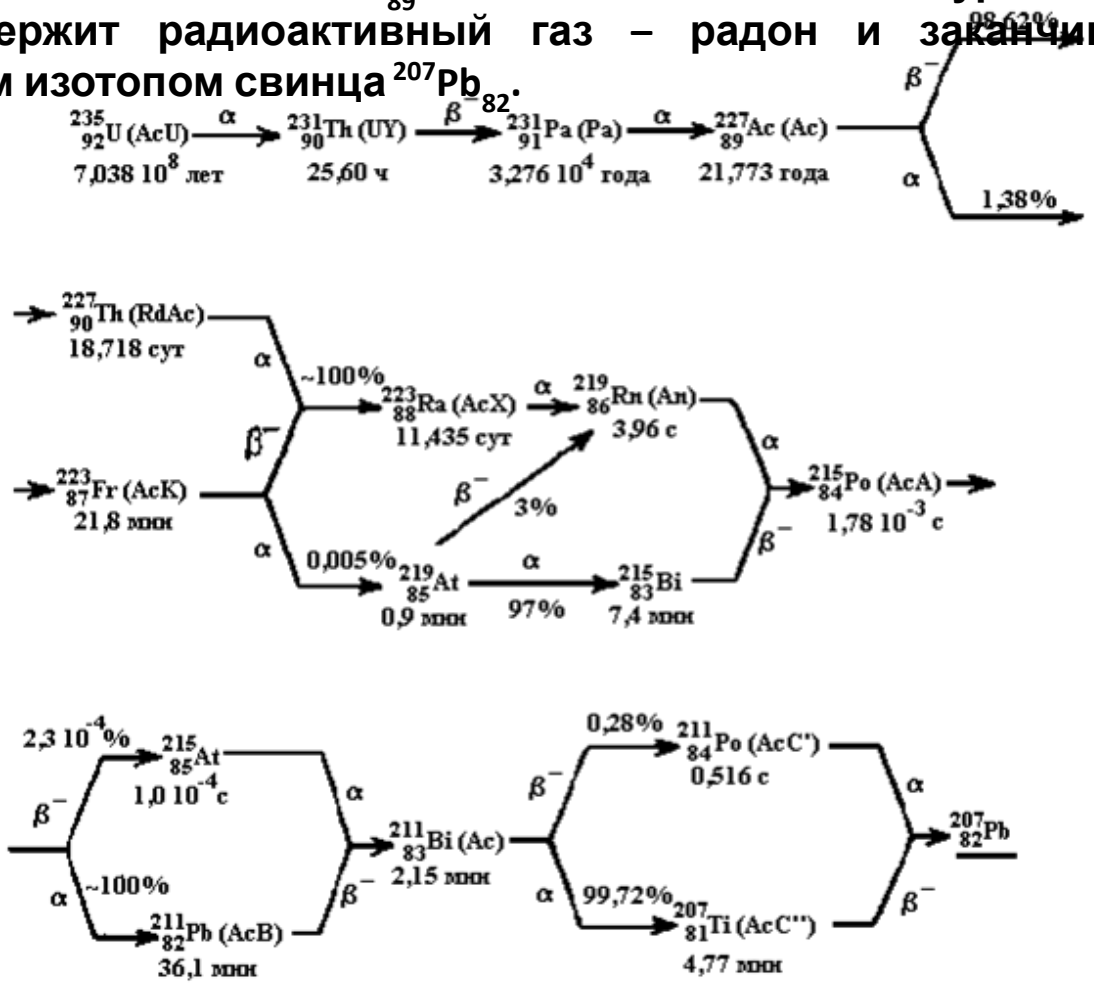
# Семейство урана

**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.**



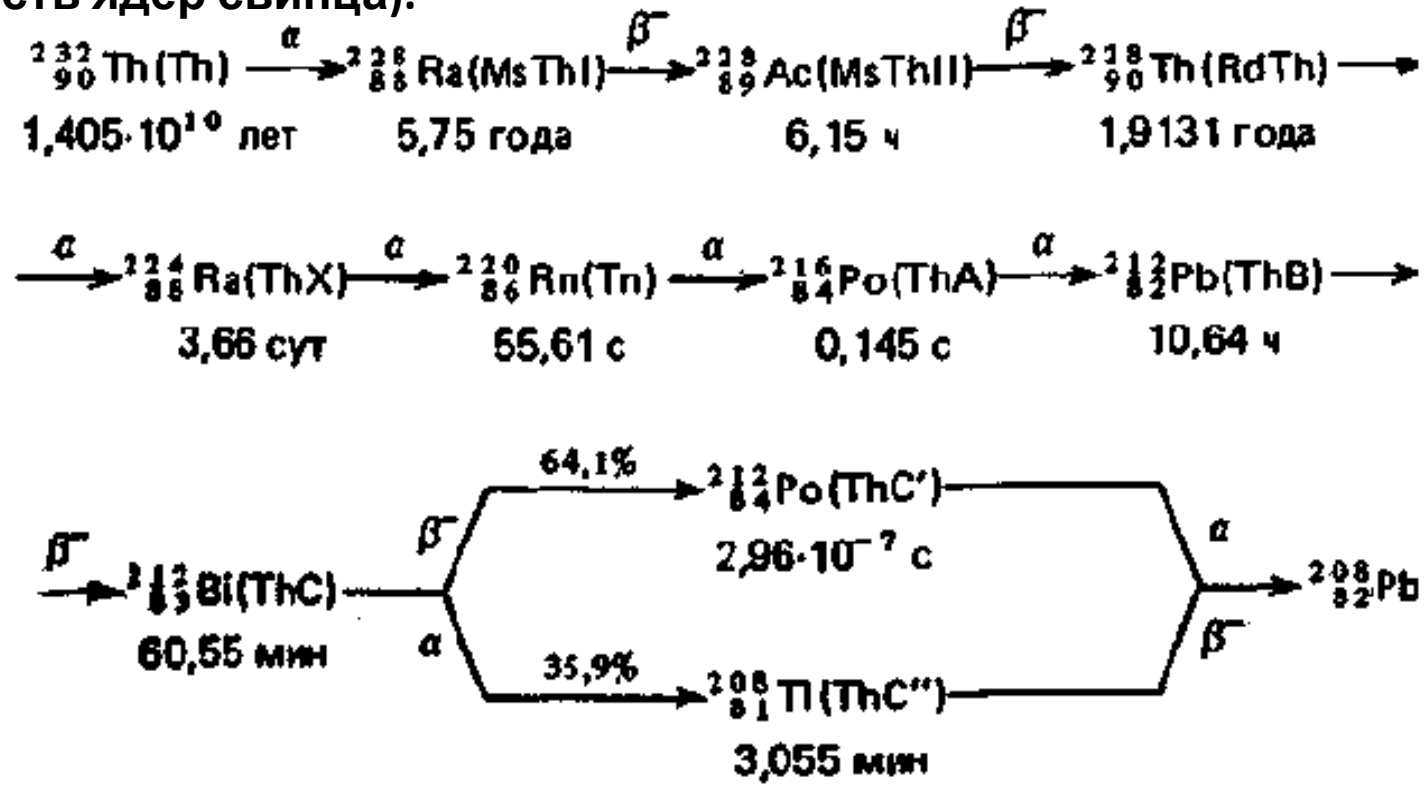
# Семейство актиния

**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 $^{234}Pa_{91}$ является α-радиоактивным и превращается в актиний $^{227}Ac_{89}$ и т. д. Семейство актиноурана, как и семейство урана, содержит радиоактивный газ – радон и заканчивается вторым стабильным изотопом свинца $^{207}Pb_{82}$.**



# Семейство тория

**Наконец, третье семейство — *семейство тория - начинается с α-*радиоактивного изотопа тория, имеющего период полураспада 1,4· $10^{10}$ 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;**

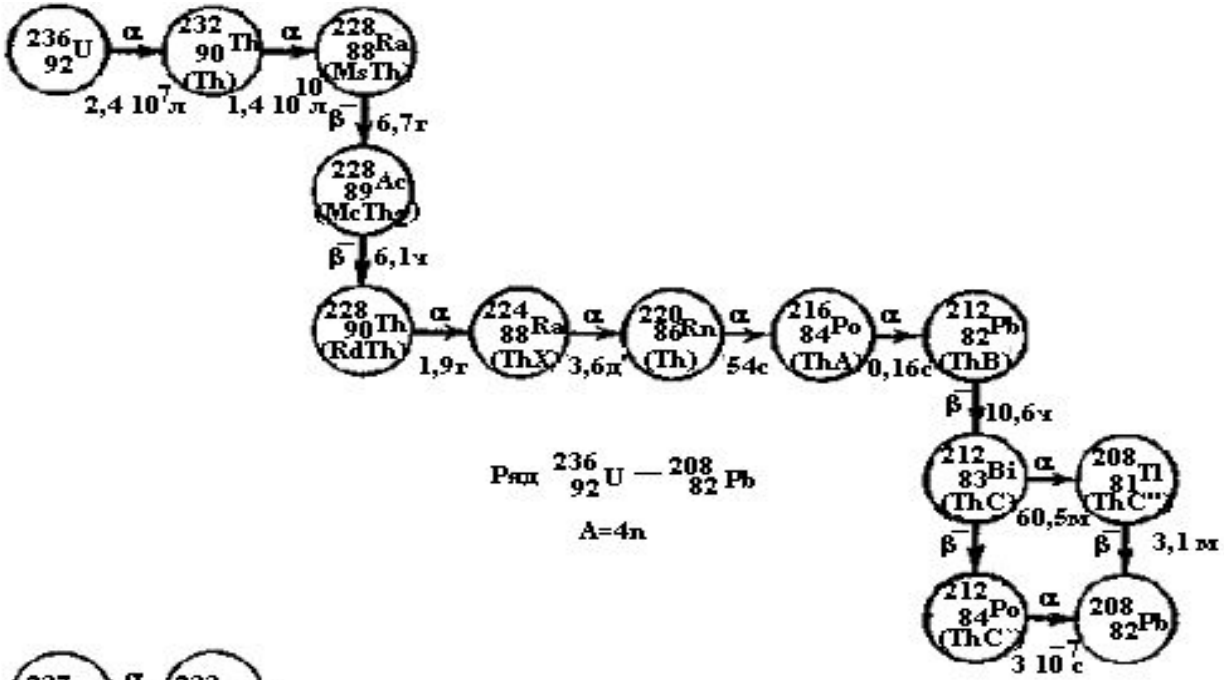
***C = 2 для семейства урана (n > 50),***

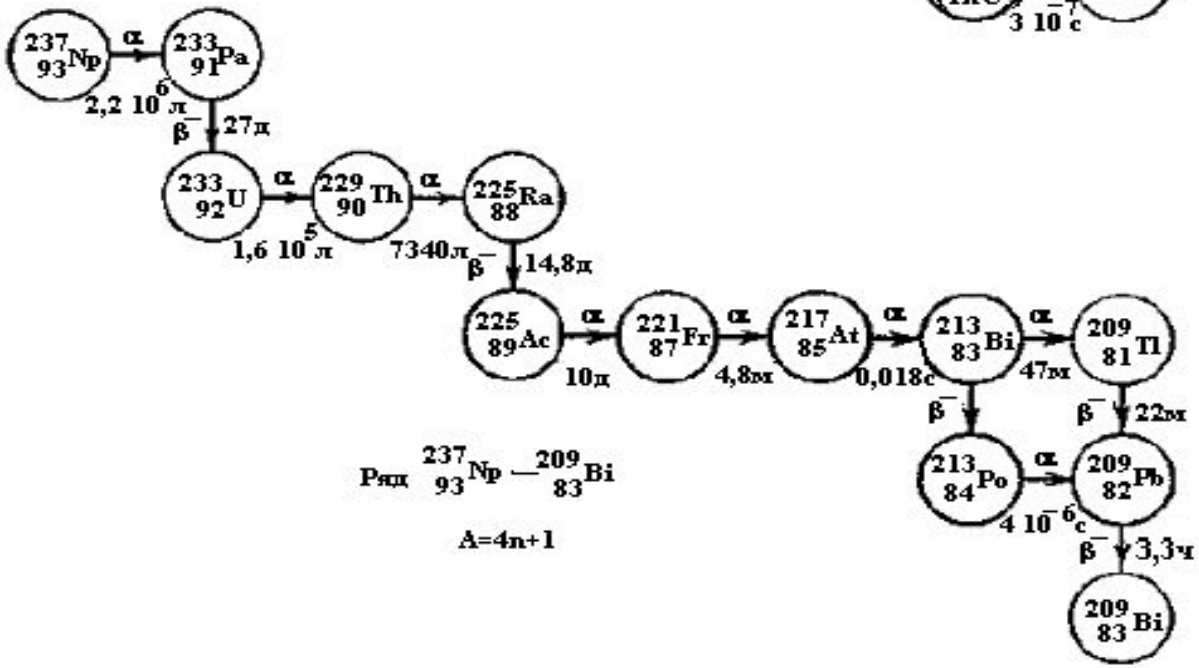
***C = 3 для семейства актиноурана (n*> 50),**

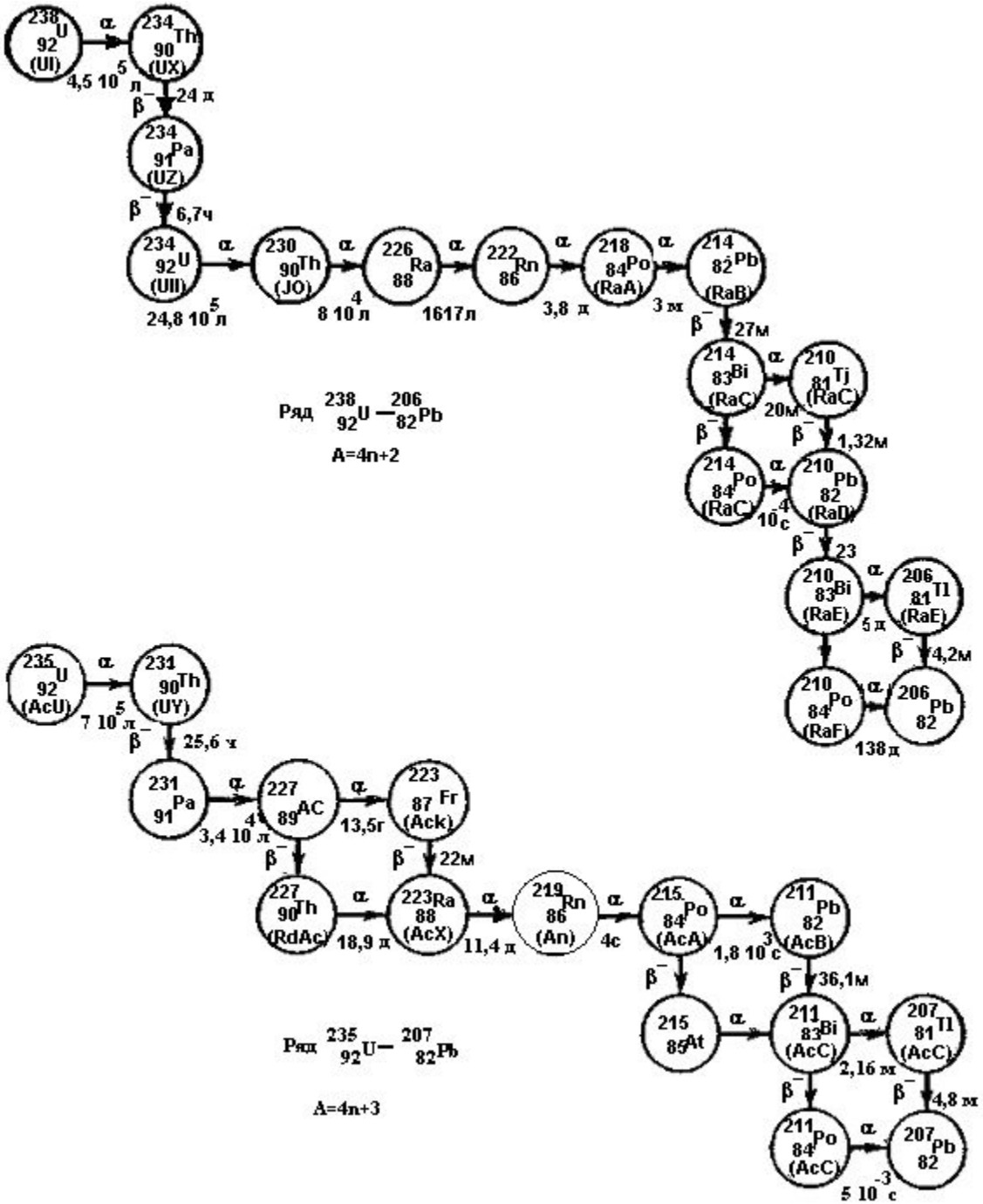
***C = 0 для семейства тория (n > 51).***

***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.**


236 92 U
α
232 90 Th (Th)
α
228 88 Ra (MsTh1)
2,4 10^7 л
1,4 10^10 л
β⁻
6,7г
228 89 Ac (MsTh2)
β⁻
6,1ч
228 90 Th (RdTh)
α
224 88 Ra (ThX)
α
220 86 Rn (Th)
α
216 84 Po (ThA)
α
212 82 Pb (ThB)
1,9г
3,6д
54с
0,16с
β⁻
10,6ч
212 83 Bi (ThC)
α
208 81 Tl (ThC'')
60,5мх
β⁻
β⁻
3,1 м
212 84 Po (ThC')
α
208 82 Pb
3 10^-7 с
Ряд 236 92 U — 208 82 Pb
A=4n


237 93 Np
α
233 91 Pa
2,2 10^6 л
β⁻
27д
233 92 U
α
229 90 Th
α
225 88 Ra
1,6 10^5 л
7340л
β⁻
14,8д
225 89 Ac
α
221 87 Fr
α
217 85 At
α
213 83 Bi
α
209 81 Tl
10д
4,8мх
0,018с
47мх
β⁻
β⁻
22мх
213 84 Po
α
209 82 Pb
4 10^-6 с
β⁻
3,3ч
209 83 Bi
Ряд 237 93 Np — 209 83 Bi
A=4n+1


238 92 U (UI)
4,5 10^5 л
234 90 Th (UX)
24 д
234 91 Pa (UZ)
6,7ч
234 92 U (UII)
24,8 10^5 л
230 90 Th (JO)
8 10^4 л
226 88 Ra
1617л
222 86 Rn
3,8 д
218 84 Po (RaA)
3 м
214 82 Pb (RaB)
27м
214 83 Bi (RaC)
20м
210 81 Tj (RaC)
1,32м
214 84 Po (RaC)
10^-4 с
210 82 Pb (RaD)
23
210 83 Bi (RaE)
5 д
206 81 Tl (RaE)
4,2м
210 84 Po (RaF)
138 д
206 82 Pb
Ряд 238 92 U — 206 82 Pb
A=4n+2
235 92 U (AcU)
7 10^5 л
231 90 Th (UY)
25,6 ч
231 91 Pa
3,4 10^4 л
227 89 AC
13,5г
223 87 Fr (Ack)
22м
227 90 Th (RdAc)
18,9 д
223 88 Ra (AcX)
11,4 д
219 86 Rn (An)
4с
215 84 Po (AcA)
1,8 10^3 с
211 82 Pb (AcB)
36,1м
215 85 At
211 83 Bi (AcC)
2,16 м
207 81 Tl (AcC)
4,8 м
211 84 Po (AcC)
5 10^-3 с
207 82 Pb
Ряд 235 92 U — 207 82 Pb
A=4n+3

## 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*мКи=$10^{-3}$) и *микрокюри (1мкКи=$10^{-6}$Ки). По первоначальному определению кюри есть активность одного грамма изотопа радия $^{226}Ra_{88}$. Однако, для удобства измерений это определение в дальнейшем было заменено следующим:**

$$1Ки = 3,700 \cdot 10^{10}\ Бк;$$

$$1Бк = 0,27 \cdot 10^{-10}\ Ки.$$

**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* $\lambda_i$.**

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

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

$$dN_2(t)/dt = -\lambda_2 dN_2(t) + \lambda_1 dN_1(t);$$

……

…..

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

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

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

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

$$N_3(t) = N_1(0)\lambda_1 \cdot \lambda_2 \begin{bmatrix} \exp(-\lambda_1 t)/(\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_1) + \exp(\lambda_2 t)/(\lambda_1 - \lambda_2)(\lambda_3 - \lambda_2) + \\ + \exp(\lambda_3 t)/(\lambda_1 - \lambda_3)(\lambda_2 - \lambda_3) \end{bmatrix}$$

.....

.....

$$N_i(t) = N_1(0)\lambda_1 \cdot \lambda_2 \ldots \lambda_{i-1} \begin{bmatrix} \exp(-\lambda_1 t)/(\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_1)\ldots(\lambda_i - \lambda_1) + \ldots \\ + \exp(\lambda_i t)/(\lambda_1 - \lambda_i)(\lambda_2 - \lambda_i)\ldots(\lambda_{i-1} - \lambda_i) \end{bmatrix} \quad (*)$$

**Активность источника А** 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*:**

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

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

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

**При** $\lambda_1 << \lambda_2$ ***(или*** $(T½)_1 >> (T½)_2$ ***)***

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

**То есть, количество (активного) дочернего радионуклида возрастает со временем по экспоненциальному закону с** ***$\lambda_2$ дочернего радионуклида и при $t \gg (T½)_2$ приближается к своему предельному значению***

$$A_2\Big|_{t\to\infty} = A_2(0)\frac{\lambda_1}{\lambda_2}$$

**При** ***$\lambda_1 \gg \lambda_2$ (или $(T½)_1 \ll (T½)_2$)***

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

**то есть активность дочернего радионуклида падает со временем по**

**экспоненциальному закону с** ***$\lambda_1$ материнского радионуклида.***

**Соотношение активности $A_1$ материнского и $A_2$ дочернего радионуклидов** $(T_{½})_1 >> (T_{½})_2$ ***и при*** $t > 10(T_{½})_2$ ***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:**

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

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

**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 |
|---|---|---|---|---|---|
| $a_1$ | $2{,}40\cdot10^{-24}$ | $1{,}44\cdot10^{-22}$ | $8{,}62\cdot10^{-21}$ | $2{,}07\cdot10^{-19}$ | $7{,}56\cdot10^{-17}$ |
| $a_2$ | $8{,}86\cdot10^{-14}$ | $5{,}32\cdot10^{-21}$ | $3{,}19\cdot10^{-10}$ | $7{,}66\cdot10^{-9}$ | $2{,}80\cdot10^{-6}$ |
| $b_1$ | $4{,}17\cdot10^{23}$ | $6{,}94\cdot10^{22}$ | $1{,}16\cdot10^{20}$ | $4{,}83\cdot10^{18}$ | $7{,}32\cdot10^{16}$ |
| $b_2$ | $1{,}13\cdot10^{13}$ | $1{,}88\cdot10^{11}$ | $3{,}13\cdot10^{9}$ | $3{,}57\cdot10^{5}$ | $1{,}30\cdot10^{8}$ |

**<u>Задача.</u> При радиоактивном распаде ядер нуклида $A_1$ образуется радионуклид $A_2$. Их постоянные распада равны $\lambda_1$ и $\lambda_2$, 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?**