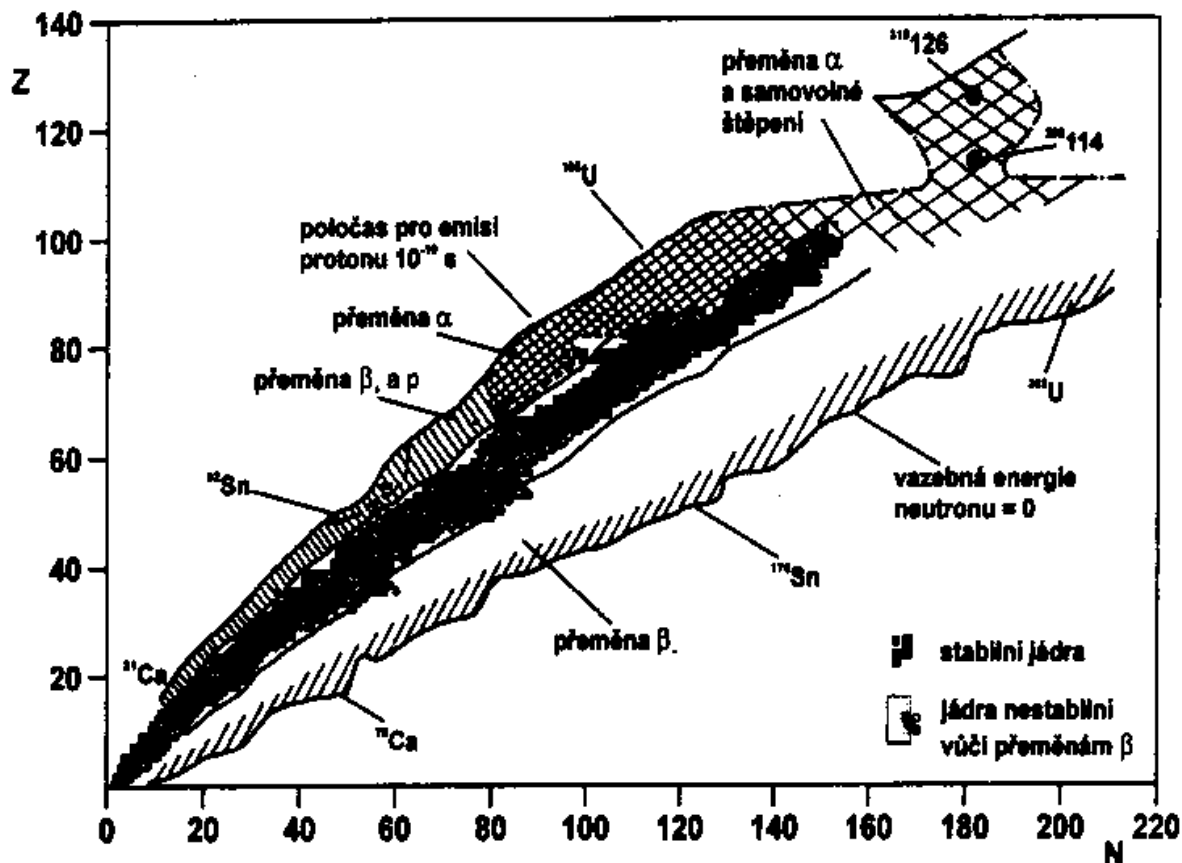


### 3. Radioaktivita

>2000 nuklidů; 266 stabilních

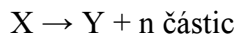
radioaktivita – samovolná přeměna na jiný nuklid (neplatí pro deexcitaci jádra)

pro  $Z \leq 20$   $N/Z \approx 1$ , poté postupně až 1,52 pro  $^{209}\text{Bi}$ , přebytek neutronů zmenšuje odpuzování protonů



**Obrázek 8:** Oblast stabilních nuklidů a různých typů radioaktivních přeměn.

Při radioaktivní přeměně se uvolňuje energie.



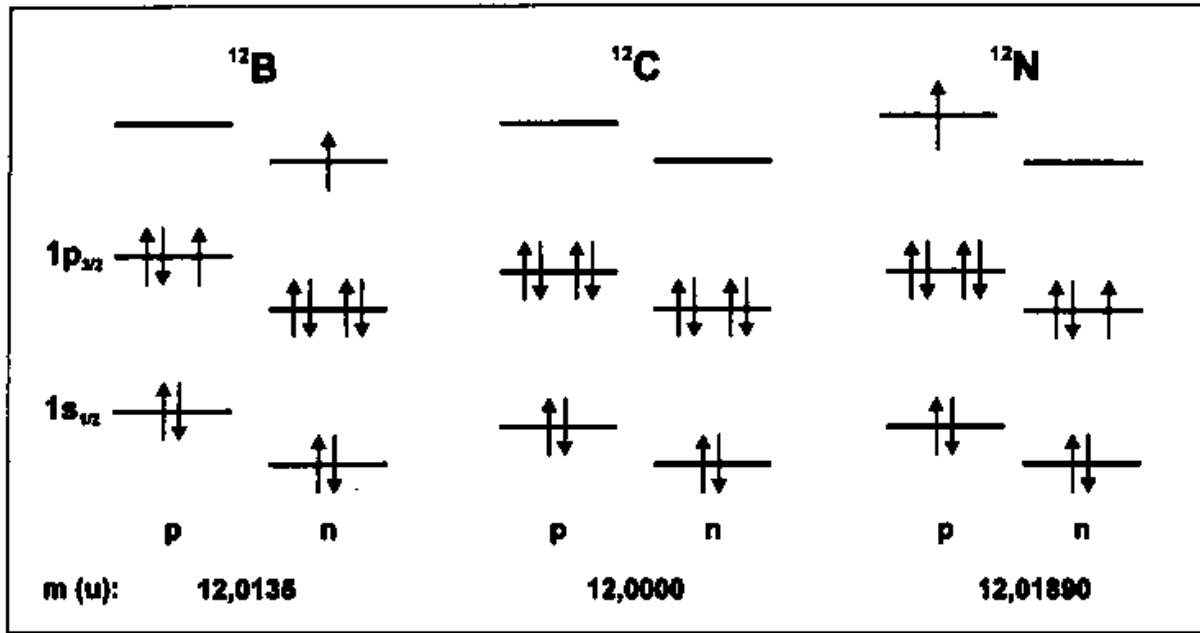
**Základní hmotnostní podmínka radioaktivity:**

$$M(X) > M(Y) + M(\text{ČÁSTIC})$$

**Energie uvolněná při radioaktivní přeměně:**

$$E_{\text{přeměny}} = E_{\text{kin}}(Y) + E_{\text{kin}}(\text{ČÁSTIC}) + E_{\gamma}$$

**Stabilita atomových jader vyplývá z hladinového modelu:**



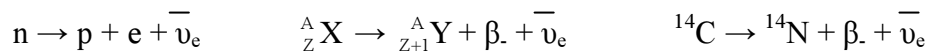
**Obrázek 9:** Souvislost nestability jádra vůči přeměnám  $\beta$  s nukleonovou konfigurací.

**Skupiny radioaktivních přeměn:**

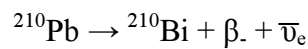
1. mění se Z při konstantním A ( $\beta_-$ ,  $\beta_+$ , EZ)
2. mění se Z i A ( $\alpha$ , emise nukleonů, emise těžších jader  $^{14}\text{C}$ ,  $^{24}\text{Ne}$ , SŠ)
3. deexcitace jádra ( $\gamma$  emise okamžitá či zpožděná, vnitřní konverze)

**Druhy radioaktivních přeměn:**

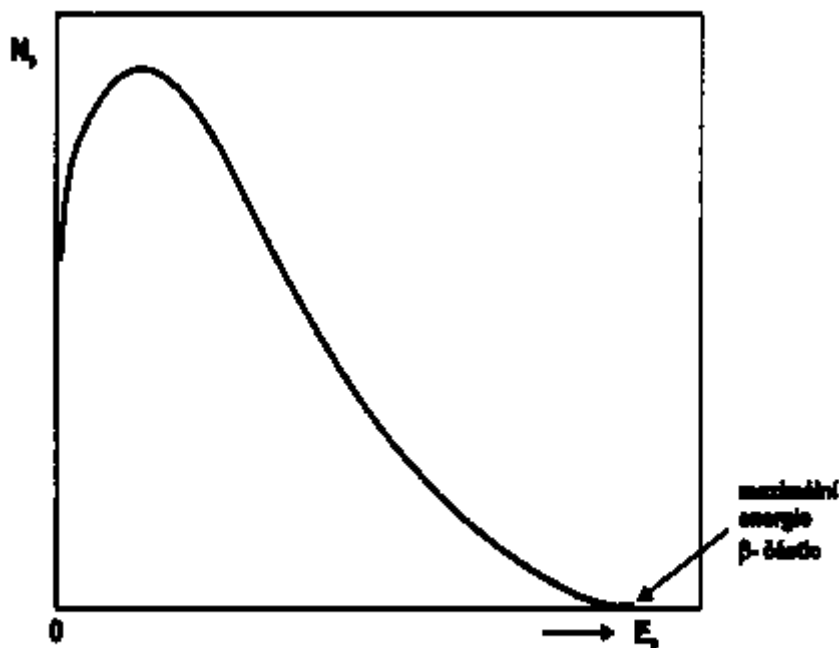
**A) Přeměna  $\beta_-$**



měříme  $\nearrow$



Energie se rozdělí mezi jádro (málo), elektron a  $\bar{\nu}_e$  náhodně, spektrum je proto spojité.

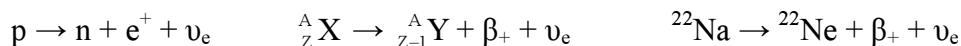


**Obrázek 12: Energetické spektrum  $\beta_-$  částic.**

**Jádro Y vzniká:** a) v základním stavu  ${}^3\text{H}$ ,  ${}^{14}\text{C}$ ,  ${}^{32}\text{P}$ ,  ${}^{35}\text{S}$   
 b) v excitovaném stavu (poté dochází k emisi 1 či více  $\gamma$ )  
 ${}^{60}\text{Co} \rightarrow {}^{60}\text{Ni} + \beta_- + \bar{\nu}_e$ ;  ${}^{60}\text{Ni} \rightarrow {}^{60}\text{Ni} + \gamma$

Může vznikat i směs a) a b)

### B) Přeměna $\beta_+$

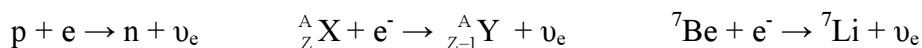


Platí stejné energetické zásady jako u  $\beta_-$  přeměny (spojité spektrum apod.).

Čistý  $\beta_+$  rozpad je vzácný, většinou probíhá spolu s elektronovým záchytem (EZ). Měří se pomocí anihilačních fotonů a ionizačních účinků  $e^+$ :

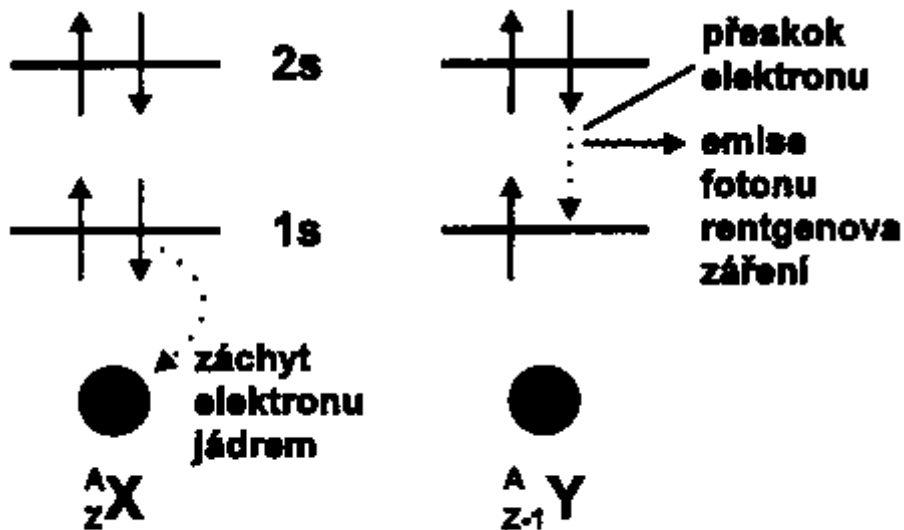


### C) Elektronový záchyt (EZ)



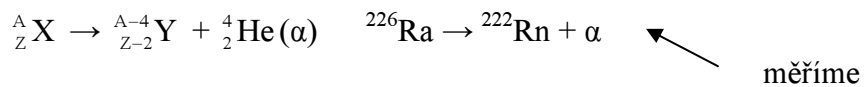
Po EZ dochází k následným dějům pomocí kterých se tato radioaktivita měří: zaplňování vakancí ve slupkách K či L  $\rightarrow$  emise RTG fotonů či Augerových elektronů (elektrony vyražené RTG zářením z vyšších slupek elektronového obalu, mají diskrétní energii,  $E_{\text{aug}} = E_{\text{RTG}} - E_{\text{vaz.}}$ ). Měří se RTG fotony.

Použití v medicíně:  ${}^{13}\text{N}$ ,  ${}^{15}\text{O}$ ,  ${}^{11}\text{C}$

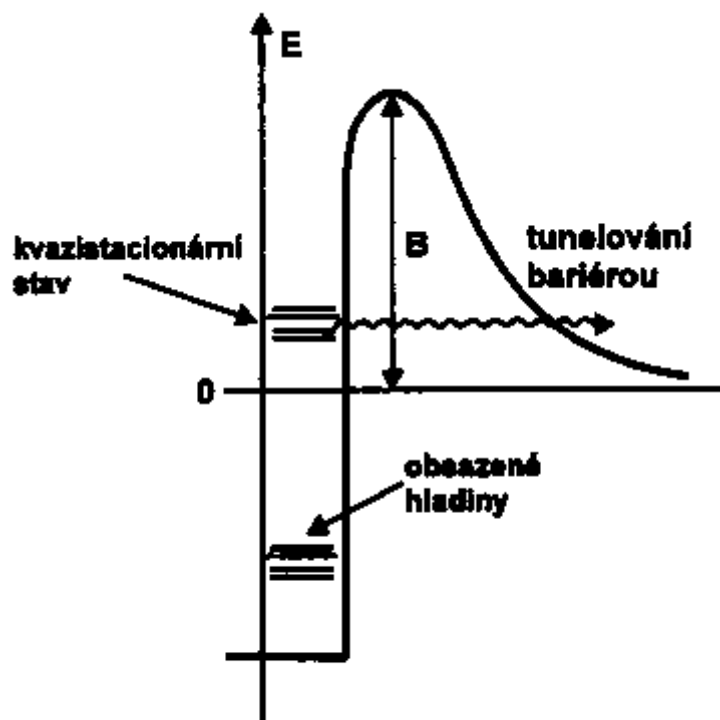


Obrázek 13: K výkladu elektronového záchytu.

D) Přeměna alfa



Alfa částice je velice stabilní a proto je její emise výhodná, zvláště u těžších prvků.

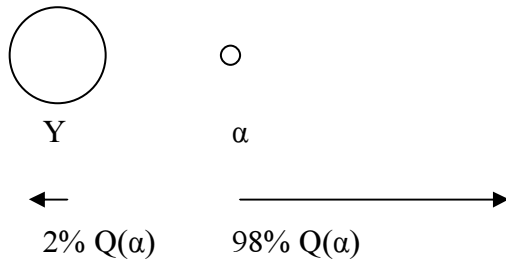


Obrázek 14: Mechanismus přeměny  $\alpha$ .

Na rozdíl od spektra  $\beta$  je spektrum  $\alpha$  spojitě ale stejně jako při  $\beta$  rozpadu vzniká část jader excitovaná.

### Odrazová energie jádra Y:

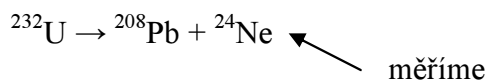
$$E_Y = (m(\alpha) Q(\alpha)) / (m(Y) + m(\alpha)) \text{ kde } Q(\alpha) = 931,5 (m(X) - m(Y) - m(\alpha))$$



$E_\alpha \approx 5 \text{ MeV}$ ,  $E_Y \approx 100 \text{ keV}$ ,  $Q(\alpha)$  – přeměnová energie jádra X [MeV]

U přeměny  $\beta$  a emise  $\gamma$  je odrazová energie mnohem menší (řádově  $10^1 \text{ eV}$ ). Zde odrazová energie způsobuje ztrátu části orbitálních elektronů, vzniká ion z velkým kladným nábojem, což vede ke rozrušení chemických vazeb v dané sloučenině.

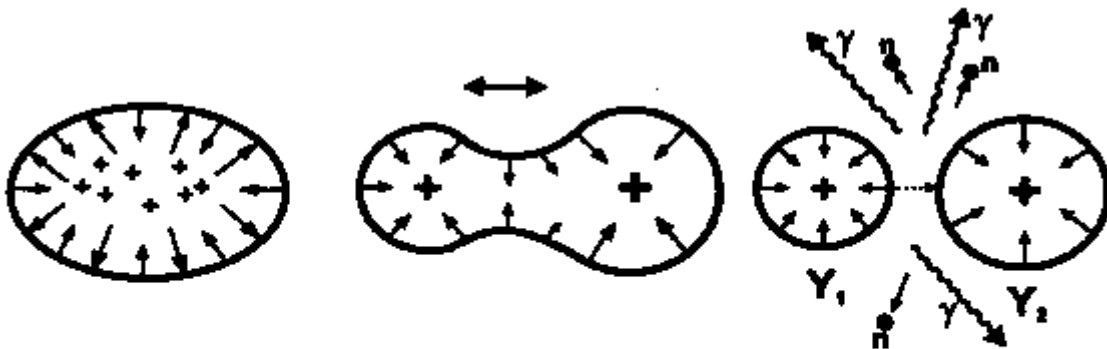
### E) Emise těžších jader



Obdoba  $\alpha$  rozpadu.

### F) Samovolné štěpení (SŠ)

Je-li splněna hmotnostní podmínka, rozštěpí se jádro těžší na dvě lehká plus dva až tři neutrony. Existuje ale i bezneutronové štěpení.



**Obrázek 16: Průběh samovolného štěpení jádra.**

**Vysvětlení:** hladinový model: emise těžké částice, obdoba emise  $\alpha$  částice  
kapkový model: zvětšení povrchu, zúžení, vznik stabilních zárodků, zaškrcení, rozštěpení

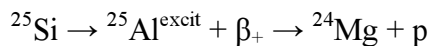
Většinou SŠ konkuruje  $\alpha$  přeměna, která je na rozdíl od SŠ velice rychlá. V excitovaném stavu jde SŠ snadněji, protože jádro je deformovanější.

Příklad:  $T_{1/2}$  SŠ pro excitované jádro  $^{240}\text{Pu} = 8 \mu\text{s}$ , pro jádro v základním stavu  $1,2 \cdot 10^{11}$  roků.

Použití:  $^{252}\text{Cf}$  – jako zdroj neutronů se kterými se ozařují nádory

### G) Emise nukleonů

Normálně nemožná (jen na hranici existence jádra). Možná je spíše zpožděná emise nukleonů z excitovaného jádra.



### H) Větvené přeměny

- 1)  $\alpha / \beta$
- 2)  $\alpha / \text{SŠ}$
- 3)  $\alpha / \text{EZ}$
- 4)  $\beta_+ / \text{EZ}$
- 5)  $\beta_- / \text{EZ}$

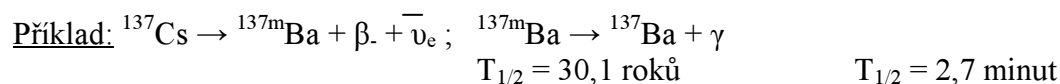
Současně můžou probíhat i více jak 2 přeměny naráz. Každý děj probíhá vlastní rychlostí. Celkový úbytek nuklidu je řízen nejrychlejším dějem.

### I) Přeměna $\gamma$ a vnitřní konverze

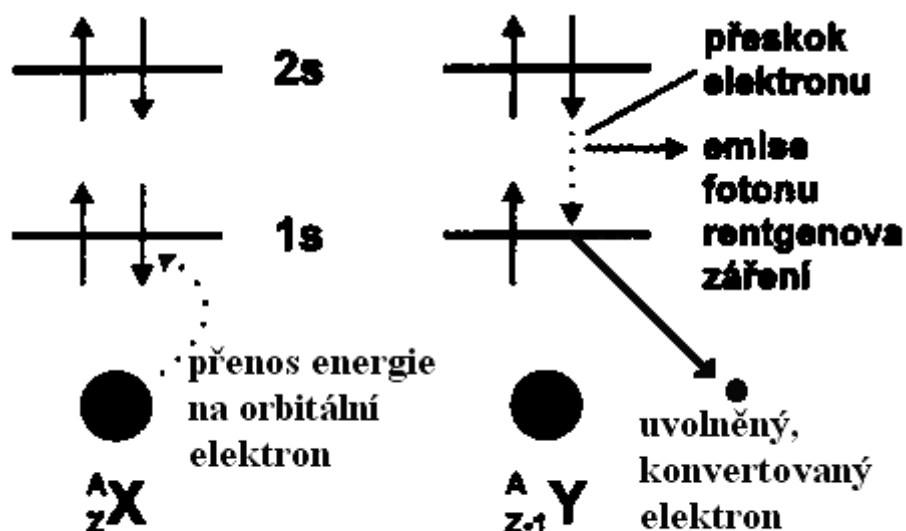
Po radioaktivní přeměně vzniká jádro většinou v excitovaném stavu. Foton má spin  $I = 1$  a proto změna spinu o 1 je nejpravděpodobnější a dochází k „okamžité emisi  $\gamma$  záření.“

Rychlost s  $\Delta I = 1$   $T_{1/2} = 10^{-16} - 10^{-10}$  s, s  $\Delta I = 2$   $T_{1/2} = 10^{-11} - 10^{-4}$  s

Dále existuje „zpožděná emise  $\gamma$  záření“  $\Delta I > 2$  (zakázaný přechod)  $T_{1/2} = 10^{-3}$  s – roky, daný nuklid se pak nazývá jaderný izomer.



**vnitřní konverze:** Je to přímý a nezářivý přenos excitační energie jádra na orbitální elektron.



Konvertované elektrony mají diskrétní spektrum:  $E_{kon} = E_{exc} - E_{vaz. el.}$

Je-li  $\Delta I = 0$  pak VK je jediný možný proces, protože emise není v tomto případě možná.

### Kinetika radioaktivních přeměn:

- za dostatečně krátký časový interval se přemění vždy stálá část z přítomného počtu (N) atomů radioaktivního nuklidu (radionuklidu)

$$(dN / N) / dt = \lambda$$

$\lambda [s^{-1}]$  – přeměnová konstanta

Př.  $\lambda = 1.10^{-3} s^{-1}$  – z přítomného počtu RN se přemění každou sekundu 1 / 1000 atomů

**Tabulka 9: Přeměnové konstanty a poločasy některých radioaktivních nuklidů.**

Nuklid	$\lambda (s^{-1})$	poločas
$^{238}\text{U}$	$4,87 \cdot 10^{-18}$	$4,51 \cdot 10^9$ roků
$^{14}\text{C}$	$3,84 \cdot 10^{-12}$	5736 roků
$^{137}\text{Cs}$	$7,23 \cdot 10^{-10}$	30 roků
$^{131}\text{I}$	$9,93 \cdot 10^{-7}$	8,1 dní
$^{211}\text{At}$	$2,67 \cdot 10^{-5}$	7,2 hodin
$^{223}\text{Fr}$	$5,25 \cdot 10^{-4}$	22 minut
$^{262}\text{Db}$	0,0204	34 s
$^{263}\text{Sg}$	0,77	0,9 s

- Rychlost přeměny závisí na
- výchozím a konečném stavu jádra
  - vlnové funkci obou jader
  - na parametrech slabé, silné a elektromagnetické interakce
- nezávisí na
- tlaku, teplotě, koncentraci, chemické formě

Vyjimka: U EZ a vnitřní konverze.  $\lambda_{\text{slouč.}} < \lambda_{\text{kov}}$  př: u  ${}^7\text{Be}$   $\lambda(\text{BeF}_2) < \lambda_{\text{kov}}$  o 0,1 %

Střední doba života:  $\tau = 1 / \lambda$

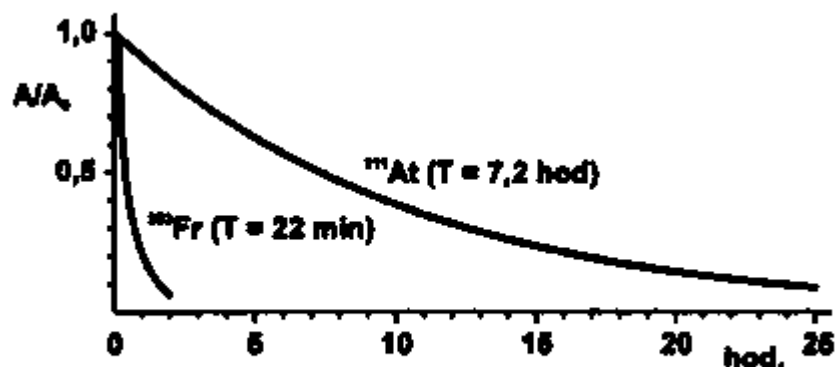
Aktivita: rychlost přeměny radioaktivního nuklidu

$$A = dN / dt \qquad A = \lambda N$$

- závisí na počtu radioaktivních atomů v radioaktivní látce
- rozměr  $\text{s}^{-1}$
- jednotka 1 becquerel (Bq), násobné kBq, MBq, GBq apod.
- měrná aktivita: vztaheno na m, V, c apod.
- maximální možná aktivita  $A = \lambda N = \lambda N_A [\text{Bq} \cdot \text{mol}^{-1}]$

Časová změna aktivity:

$$-dN / dt = \lambda N \rightarrow N = N_0 e^{-\lambda t} \rightarrow A = A_0 e^{-\lambda t}$$



**Obrázek 21: Časový průběh aktivity.**

- aktivita RN klesá s časem exponenciálně, rychlost poklesu je dána konstantou  $\lambda$ .

Poločas přeměny:  $A = A_0 / 2 \rightarrow$

$$A_0 / 2 = A_0 e^{-\lambda t}$$

$$1 / 2 = e^{-\lambda t}$$

$$\ln(1 / 2) = -\lambda t$$

$$-\ln 2 = -\lambda t$$

$$t = \ln 2 / \lambda$$

$$T_{1/2} = \ln 2 / \lambda$$

Měření poločasu rozpadu z úbytku aktivity lze jen u krátkodobě žijících radionuklidů. Jinak se poločas rozpadu počítá z aktivity radionuklidu o známé hmotnosti (měrné aktivivy).



Radionuklid o hmotnosti  $m$  obsahuje:  $N = n N_A$   
 $N = (m N_A) / A_r$   
 $A = (\lambda m N_A) / A_r$

Pak z  $\lambda$  spočítáme  $T_{1/2}$ , popřípadě se znalostí  $\lambda$  spočítáme  $m$ .

Příklad využití vztahu  $A = A_0 e^{-\lambda t}$ :

- uhlíková metoda  $^{14}\text{N}$  (n, p)  $^{14}\text{C}$  – vysvětlit tento druh zápisu
- $^{14}\text{C}$  se během minut až hodin oxidují na  $\text{CO}_2$
- rozdělení mezi rostliny, organismy, oceány
- rovnováha 15,3 přeměny za minutu v 1g C živé hmoty
- po smrti konec rovnováhy, citlivost asi do 50 000 roků ( $T_{1/2} = 5,7$  tisíc roků)
- měří se dřevo, uhlíky, textil, kůže
- moderní metoda: urychlovačová hmotnostní spektrometrie, použitelná až do 100 000 roků
- stačí i 0,05 mg vzorku, ve vakuu se vzorek bombarduje ionty  $\text{Cs}^+$  za vzniku  $^{14}\text{C}^-$  (izobarický  $^{14}\text{N}$  záporné ionty netvoří) poté se ionty  $^{14}\text{C}^-$  dostávají do prostoru s Ar, vzniká  $^{14}\text{C}^{3+}$  a vstupují do hmotnostního spektrometru.
- stejná metoda se používá ke stanovení obsahu př.:  $^{10}\text{Be}$  (mořské sedimenty, polární led),  $^{36}\text{Cl}$  a  $^{129}\text{I}$  (podzemní vody),  $^{27}\text{Al}$  (mořské sedimenty).

Příklad: Maximální měrná aktivita pro glycin  $\text{NH}_2 - \text{CH}_2 - ^{14}\text{COOH}$

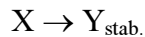
$T_{1/2} = 5760 \text{ r} = 1,818 \cdot 10^{11} \text{ s}$ ;  $N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$

$\lambda = \ln(2) / T_{1/2} = 3,813 \cdot 10^{-12} \text{ s}^{-1}$  A (molární, maximální) =  $\lambda N_A = 3,813 \cdot 10^{-12} \cdot 6,022 \cdot 10^{23} =$

$2,3 \cdot 10^{12} \text{ Bq} \cdot \text{mol}^{-1} = 2,3 \text{ TBq} \cdot \text{mol}^{-1} = 2,3 \text{ GBq} \cdot \text{mmol}^{-1}$

Z katalogu SIGMA: glycin  $^{14}\text{C}$  0,3 – 2,0 GBq · mmol<sup>-1</sup>

Kinetika hromadění stabilního produktu radioaktivní přeměny:



$$-dN_X / dt = dN_Y / dt$$

Na počátku ( $t = 0$ )  $N_{X,0}$  atomů X a 0 atomů Y pak v čase  $t$  platí:

$$N_{X,0} = N_X + N_Y$$

$$N_X = N_{X,0} e^{-\lambda t} = (N_X + N_Y) e^{-\lambda t}$$

Pro počet atomů  $N_Y$  vzniklých za čas  $t$  platí:

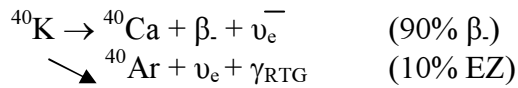
$$N_X / e^{-\lambda t} = N_X + N_Y$$

$$N_Y = N_X / e^{-\lambda t} - N_X$$

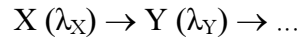
$$N_Y = N_X e^{\lambda t} - N_X$$

$$N_Y / N_X = e^{\lambda t} - 1$$

Použití: Při určování stáří nerostů. Nuklid musí mít velký  $T_{1/2}$  ( $^{40}\text{K}$ ,  $^{87}\text{Rb}$ ,  $^{238}\text{U}$  atd.), okamžik krystalizace  $t = 0$ . Nejznámější je metoda **draslík-argonová**: roztavení materiálu a stanovení  $^{40}\text{Ar}$  pomocí hmotnostní spektrometrie.



Kinetika hromadění radioaktivního produktu radioaktivní přeměny:



X mateřský radionuklid, Y dceřinný radionuklid

Celková změna počtu atomů Y v čase je:  $dN_Y / dt = \lambda_X N_X - \lambda_Y N_Y$

Pro počet atomů Y v čase t platí:

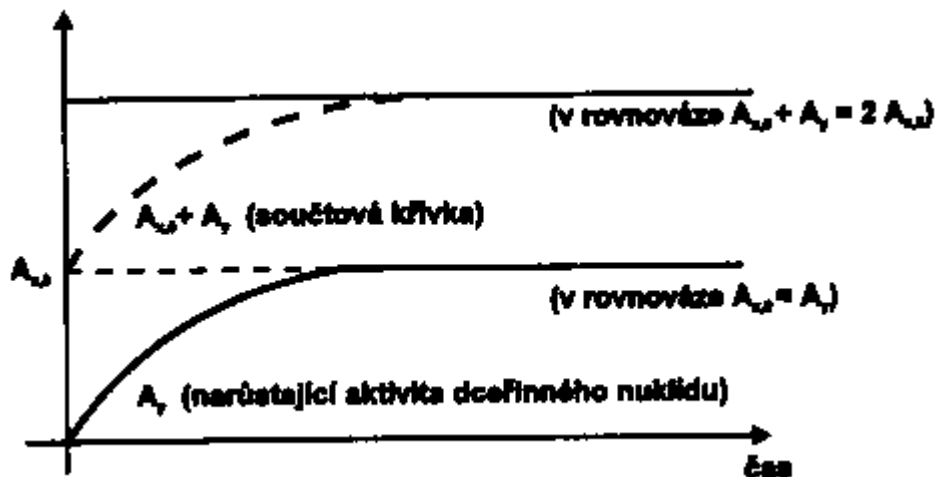
$$N_Y = N_{X,0} \lambda_X / (\lambda_Y - \lambda_X) (e^{-\lambda_X t} - e^{-\lambda_Y t})$$

Jestli  $T_{1/2}X \gg T_{1/2}Y$  ( $\lambda_X \ll \lambda_Y$ ) pak se vztah zjednodušuje na:

$$A_Y = A_{X,0}(1 - e^{-\lambda_Y t})$$

Za dostatečně dlouhou dobu (vůči  $T_{1/2}Y$ ) pak platí:

$$A_Y = A_{X,0}$$

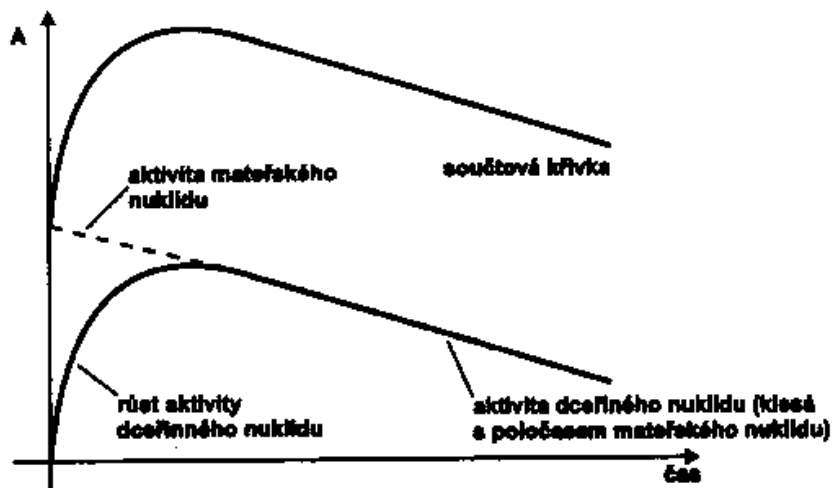


To znamená že po uplynutí určité doby (10ti násobek  $T_{1/2} Y$ ) se vytvoří v původně čistém nuklidu X dceřinný nuklid Y o stejné aktivitě – tzv. **trvalá radioaktivní rovnováha**.

Významné jsou některé produkty štěpení uranu:  ${}^{137}\text{Cs} \rightarrow {}^{137\text{m}}\text{Ba} + \beta^-$ .

V přírodě najdeme trvalé radioaktivní rovnováhy v radioaktivních řadách. Existují 3 a to uran-radiová ( ${}^{238}\text{U} - {}^{206}\text{Pb}$ ), thoriová ( ${}^{232}\text{Th} - {}^{208}\text{Pb}$ ) a uran – aktiniová ( ${}^{235}\text{U} - {}^{207}\text{Pb}$ ).

**Přechodná radioaktivní rovnováha:** Mateřský nuklid má sice větší poločas rozpadu ale srovnatelný s dceřinným nuklidem ( $\lambda_X < \lambda_Y$ ;  $T_{1/2}X > T_{1/2}Y$ ).



**Obrázek 24:** Průběh aktivity mateřského a dceřinného nuklidu v případě ustavení přechodné radioaktivní rovnováhy.

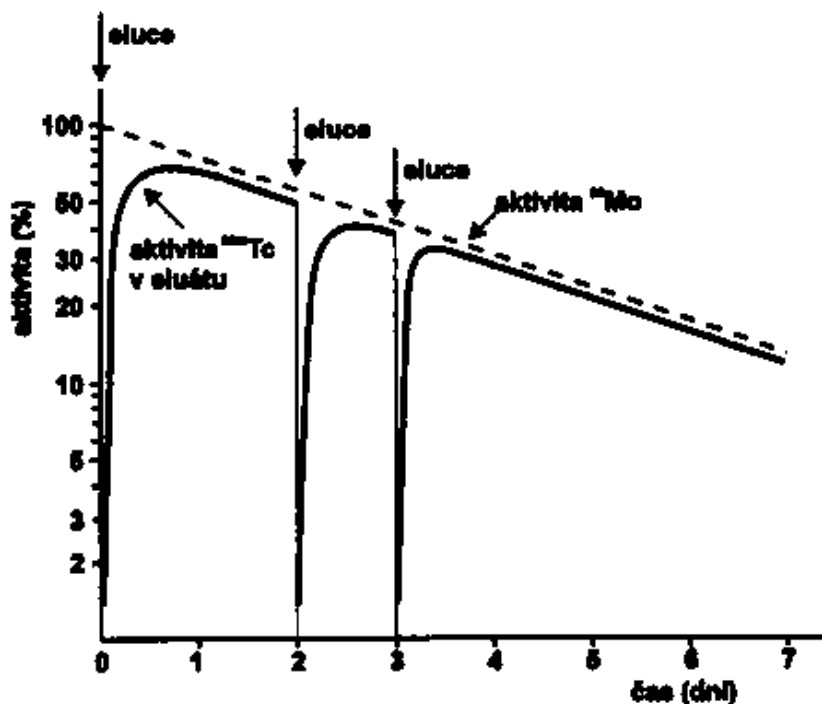
$$A_Y = A_X \lambda_Y / (\lambda_Y - \lambda_X)$$

$$A_Y / A_X = \lambda_Y / (\lambda_Y - \lambda_X)$$

Poměr  $A_Y / A_X$  je konstantní, maximální aktivity je dosaženo v čase:

$$t = 1 / (\lambda_Y - \lambda_X) \ln (\lambda_Y / \lambda_X)$$

**Generátory radioaktivních nuklidů:** Kolonka sorbentu s pevně zachycenou vhodnou formou mateřského nuklidu, ve vhodné době se dceřinný nuklid s kolonky vymyje.



**Obrázek 25:** Opakované získávání nuklidu  $^{99m}\text{Tc}$  z generátoru  $^{99}\text{Mo}-^{99m}\text{Tc}$ .

**Přírodně se vyskytující radioaktivní prvky:** přírodní X umělé (není mezi nimi rozdílu)

1.  $T_{1/2} > 10^8$  roků, vznikly při syntéze prvků ve vesmíru

**Tabulka 10:** Některé přírodní radioaktivní nuklidy s velkými poločasy přeměny

Nuklid	Poločas (roků)	Zastoupení v příslušném prvku (%)
$^{40}\text{K}$	$1,27 \cdot 10^{10}$	0,012
$^{87}\text{Rb}$	$4,7 \cdot 10^{10}$	27,85
$^{88}\text{Sr}$	$> 3 \cdot 10^{16}$	82,56
$^{115}\text{In}$	$6 \cdot 10^{14}$	95,77
$^{138}\text{Ba}$	$> 1 \cdot 10^{15}$	71,66
$^{147}\text{Sm}$	$6,7 \cdot 10^{11}$	14,97
$^{159}\text{Tb}$	$> 5 \cdot 10^{16}$	100
$^{186}\text{W}$	$> 6 \cdot 10^{15}$	28,41
$^{187}\text{Re}$	$5 \cdot 10^{10}$	0,93
$^{209}\text{Bi}$	$2,7 \cdot 10^{17}$	100
$^{232}\text{Th}$	$1,39 \cdot 10^{10}$	100
$^{235}\text{U}$	$7,13 \cdot 10^8$	0,715
$^{238}\text{U}$	$4,51 \cdot 10^9$	99,274

2.  $T_{1/2} < 10^8$  roků, vznikají jako produkty přeměny mateřských nuklidů z radioaktivních řad a jadernými reakcemi v zemské atmosféře působením kosmického záření ( $^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{10}\text{Be}$  aj.)