

4. KINETIKA JADERNÉ PŘEMĚNY



- Přeměna radionuklidu na dceřiné produkty má svou rychlost, která je pro daný typ přeměny charakteristická.
- Z hlediska kinetického lze na jadernou přeměnu nahlížet jako na (chemickou) **reakci 1. řádu**.
- Pro rychlost procesu platí **základní zákon radioaktivních přeměn**

Za dostatečně krátký časový interval se přemění stejný podíl (stálá část) z přítomného počtu (N) radioaktivních jader".

$$\lambda = \frac{\Delta N}{N \cdot \Delta t} \quad [\lambda] = \text{s}^{-1}$$

$$\lambda = \frac{dN / N}{dt}$$

- tento zákon platí dobře pro velké soubory radioaktivních jader
- nelze dopředu určit, který atom se v daném okamžiku rozpadne (**statistický charakter přeměny**)

Přeměnová konstanta (λ) je charakteristickou konstantou daného nuklidu.

Příklad: $\lambda = 1 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1} \Rightarrow$ za 1 s se rozpadne **1/1000** z přítomného počtu jader

- Konstanta λ vyjadřuje pravděpodobnost přeměny radioaktivního atomu za časovou jednotku
- u větvené přeměny je celková pravděpodobnost dána součtem

$$\lambda = \sum \lambda_i$$



- velikost konstanty λ je dána kvantově - mechanickými výpočty (vlnové funkce jader, typ přeměny, apod.)

- **radioaktivní přeměna není ovlivněna tlakem a teplotou**
- přeměnová konstanta nezávisí na chemickém stavu atomu, vyjma přeměn, které jsou spojeny s interakcí obalového elektronu (EZ, vnitřní konverze – viz dále)
- pravděpodobnost přeměny atomu vyjadřuje tzv. **střední doba života atomu τ**

$$\tau = \frac{1}{\lambda}$$

Aktivita

Aktivitou radionuklidu (A) se rozumí časová změna počtu (úbytku) radioaktivních jader za časovou jednotku.

$$A = \frac{\Delta N}{\Delta t} \Rightarrow A = \lambda \cdot N$$



Jednotkou aktivity je **Becquerel (Bq)** 1 Bq – 1 přeměna za sekundu

Starší jednotka aktivity: 1 Curie (Ci) = 3,7.10¹⁰ Bq

Aktivita se často vztahuje na:

- hmotnostní jednotku (hmotnostní měrná aktivita)...Bq/kg
- objemovou jednotku (objemová měrná aktivita).....Bq/l
- látkové množství (molární měrná aktivita)..... Bq/mol

Rychlost uvolňování radioaktivní látky z určitého zařízení:

rychlost emiseBq/s

rychlost plošné emise.....Bq/s.m²

S aktivitou souvisí hmotnost radioaktivního nuklidu vztahem:

kde A je aktivita radionuklidu o relativní nuklidové hmotnosti A_r .

$$m = \frac{A \cdot A_r}{\lambda \cdot N_A}$$

Praktický poznatek: větší hmotnosti radioaktivních nuklidů se mohou vyskytovat pouze s malou konstantou λ

Př. 1kBq ^{137}Cs = 1,38.10¹² atomů cesia = 3,15.10⁻¹⁰g Cs – nevažitelné množství

⇒ s těmito koncentracemi (či hmotnostmi) není možné provádět běžné chemické operace jako je srážení (nelze překročit součin rozpustnosti) nebo se látka při chemických operacích ztrácí (sorpce na skle, apod.)

⇒ musí se přidávat má podobné chování, nejlepší je látka chemicky identická, avšak neradioaktivní látka – tzv. **nosič**.

Nosič může být:

izotopický, jde tedy o izotop téhož prvku

neizotopický, jedná se o izotop prvku se stejným chemickým chováním, např. k ^{137}Cs se přidá stejná sůl neradioaktivního sodíku nebo draslíku



Změna aktivity s časem

Jestliže provedeme integraci vztahu pro základní zákon radioaktivních přeměn, obdržíme vztahy, které jsou použitelné pro praktické výpočty změny počtu atomu radionuklidu či jejich aktivity s časem.

$$\lambda = \frac{dN / N}{dt}$$

$$N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda t} \text{ resp. } A(t) = A_0 \cdot e^{-\lambda t}$$



Poločas přeměny $T_{1/2}$ je čas, za který se přemění právě polovina z přítomného počtu atomů radionuklidu.

Odvození:

$$N(T_{1/2}) = \frac{1}{2} N_0$$

$$\frac{1}{2} N_0 = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

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

Přeměnové konstanty a poločasy některých radioaktivních nuklidů.

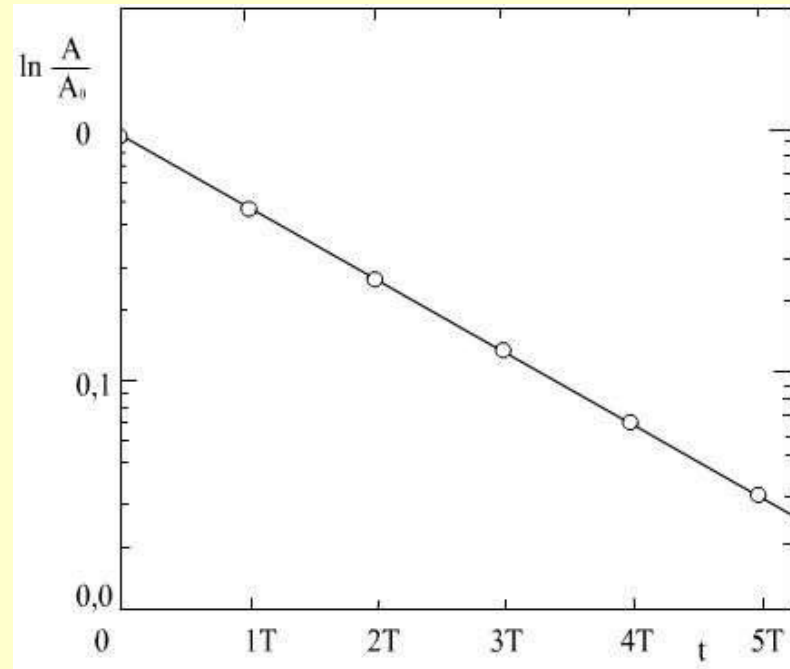
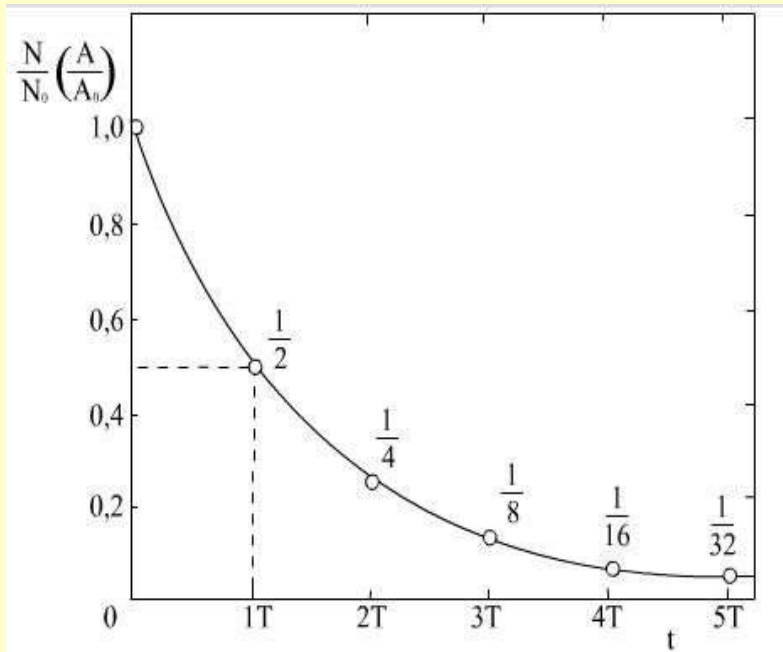
Nuklid	λ (s^{-1})	poločas
^{238}U	$4,87 \cdot 10^{-18}$	$4,51 \cdot 10^9$ roků
^{14}C	$3,84 \cdot 10^{-12}$	5736 roků
^{137}Cs	$7,23 \cdot 10^{-10}$	30 roků
^{131}I	$9,93 \cdot 10^{-7}$	8,1 dní
^{211}At	$2,67 \cdot 10^{-5}$	7,2 hodin
^{223}Fr	$5,25 \cdot 10^{-4}$	22 minut
^{262}Db	0,0204	34 s
^{263}Sg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





Radionuklid	^3H	^{14}C	^{60}Co	^{137}Cs	^{226}Ra	^{235}U	^{238}U
$T_{1/2}$ [roky]	12,3	5730	5,27	30	1602	$7,1 \cdot 10^8$	$4,5 \cdot 10^9$
A_{1g} [Bq]	$3,6 \cdot 10^{14}$	165GBq	$4,2 \cdot 10^{13}$	$3,2 \cdot 10^{12}$	36,6GBq	79kBq	12kBq

Ze směrnice semilogaritmické závislosti N/N_0 nebo A/A_0 na čase lze určit poločas přeměny radioaktivního nuklidu



Trvalá radioaktivní rovnováha



Pro počet radioaktivních atomů s ohledem na mateřský nuklid platí vztah:

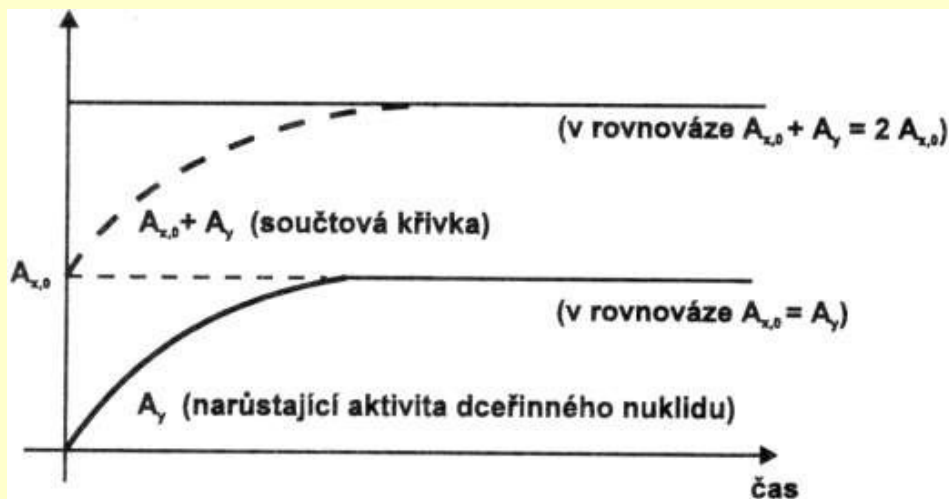
$$N_Y = N_{X,0} \frac{\lambda_X}{\lambda_Y - \lambda_X} (e^{-\lambda_X t} - e^{-\lambda_Y t})$$

Trvalá radioaktivní rovnováha mezi nuklidy X a Y se ustavuje, když $T_{1/2}(X)$ je velmi dlouhý

$$T_{1/2}(X) \gg T_{1/2}(Y), \quad \text{tj. } \lambda_X \ll \lambda_Y$$

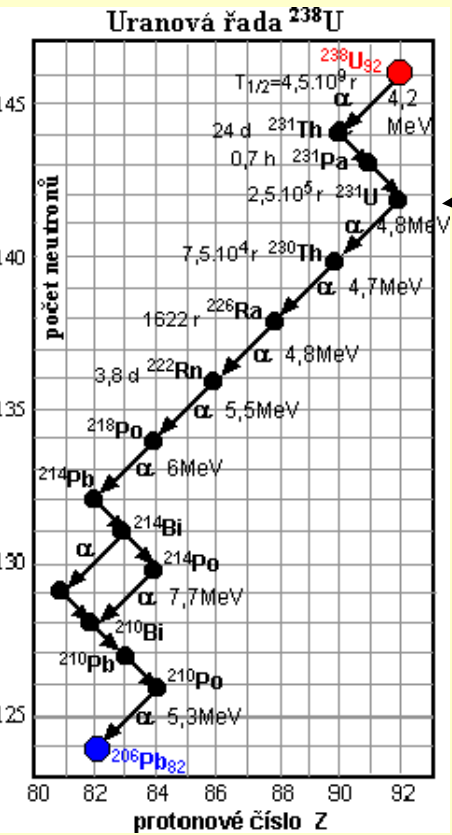
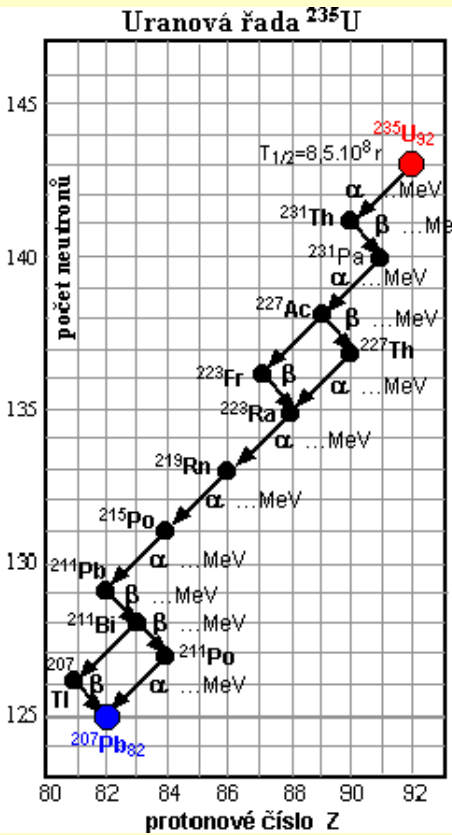
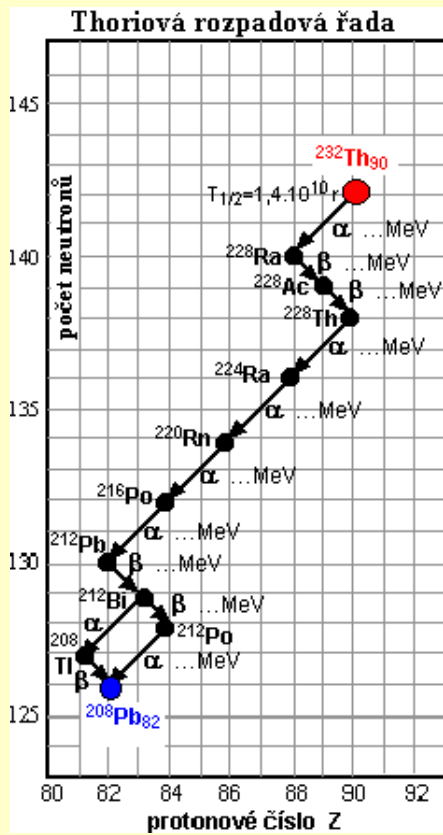


Pak platí, že aktivita nuklidu X se v reálném čase prakticky nemění, tedy platí $e^{-\lambda_X t} \rightarrow 1$, pak $A_Y = A_{X,0}(1 - e^{-\lambda_Y t})$. Pro dostatečně dlouhý pozorovací čas ($t \rightarrow \infty$) platí



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

⇒ v přírodních přeměnových řadách jsou aktivity jednotlivých členů stejné



V této řadě je chyba – najděte ji

Typ řady: **n+0**

n+3

n+2

Typ řady se pro jednotlivé členy určí takto:

- nukleonové číslo člena řady se vydělí čtyřmi.
- dostaneme nějaké celé číslo.
- zbytek po dělení pak určuje typ řady.

např. u ^{238}U $238 : 4 = 59$, zbytek je 2, tedy jde o řadu **n+2**.

Co lze ze schémat přeměnových řad vyčíst:



- postupnými přeměnami α a β^- se snižuje Z i A až vzniká stabilní nuklid olova

- malá hodnota λ_x způsobuje, že všechny další členy řady jsou v trvalé radioaktivní rovnováze s mateřským nuklidem a jsou tudíž v rovnováze i samy mezi sebou, jejich aktivity navzájem jsou stejné

- v každé řadě se vyskytuje určitý izotop radonu, který poskytuje **krátkodobý nebo dlouhodobý aktivní deposit**

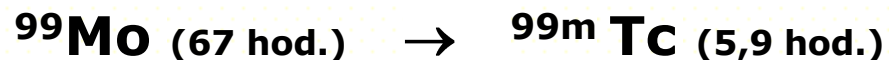


- existuje i umělá **řada neptuniová** (začíná ^{237}Np , končí ^{209}Bi , neobsahuje izotop radonu)

Typ n+1

-

Přechodná radioaktivní rovnováha



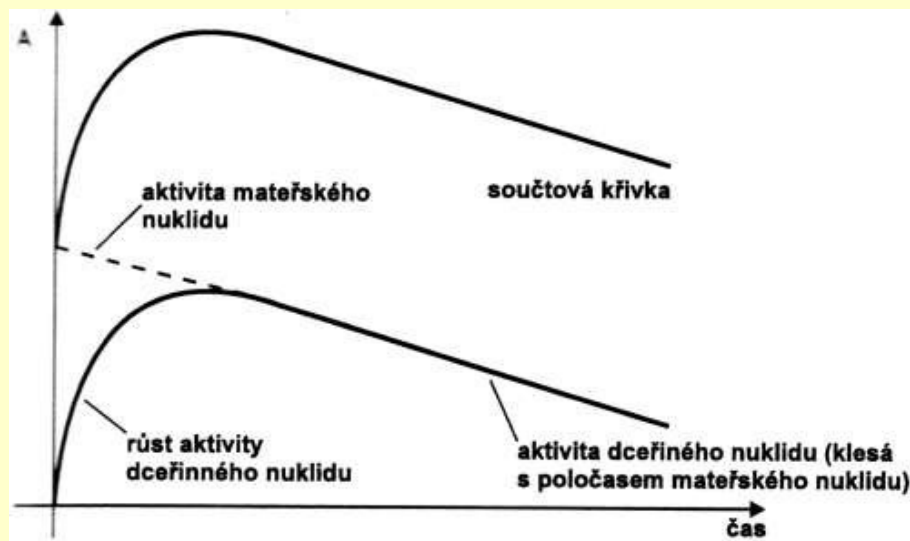
$T_{1/2}(X)$ je sice dlouhý, ale oba poločasy jsou srovnatelné

Symbol „m“ znamená metastabilní

$$T_{1/2}(X) > T_{1/2}(Y), \text{ tj. } \lambda_X < \lambda_Y$$

Pro aktivitu platí vztah:

$$A_Y = A_X \frac{\lambda_Y}{\lambda - \lambda_Y}$$

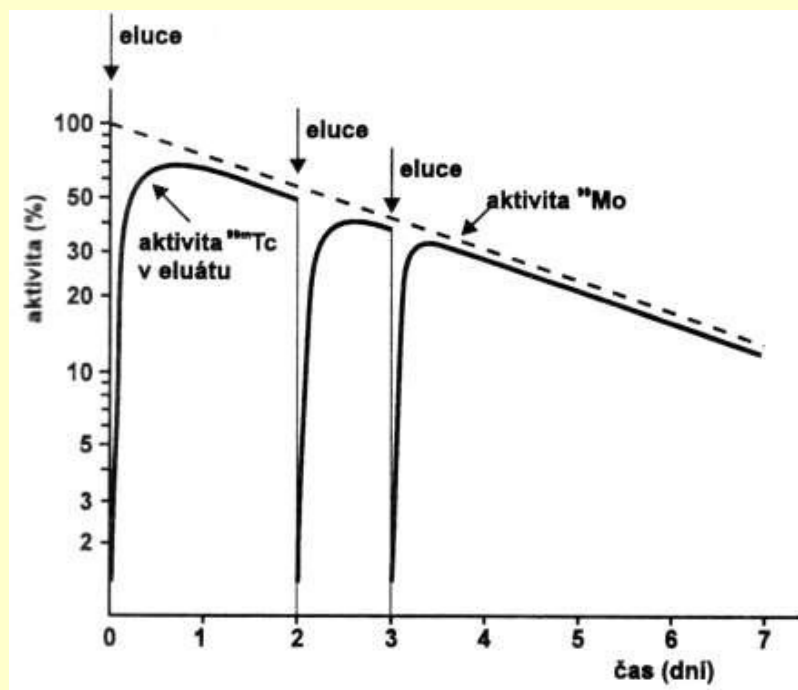
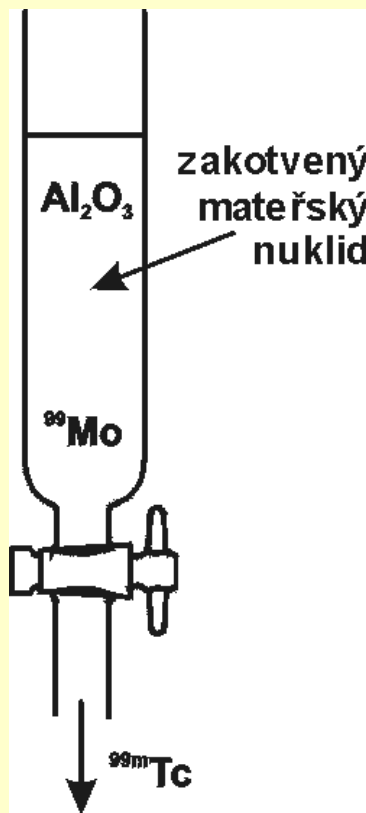
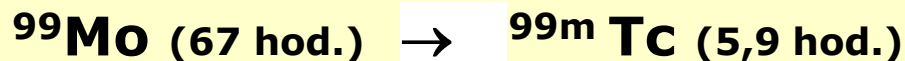


- aktivita mateřského nuklidu je největší na počátku a časem se zmenšuje
- poměr aktivit obou nuklidů je konstantní
- celá přeměna se řídí přeměnou nuklidu s větším poločasem (nuklid X)
- aktivita obou nuklidů po dosažení maxima klesá se stejnou rychlostí

Generátory radioaktivních nuklidů

- metoda pro opakované získávání některých nuklidů, především v nukleární medicíně
- využívá se existence trvalé nebo přechodné radioaktivní rovnováhy

Experimentální provedení **radionuklidového generátoru:**



mateřský nuklid	dceřiný nuklid	náplň kolony	eluční činidlo
^{99}Mo (67 hod)	$^{99\text{m}}\text{Tc}$ (5,9 hod)	Al_2O_3	roztok NaCl
^{68}Ge (288 dní)	^{68}Ga (689 min)	SnO_2	1M HCl
^{81}Rb (4,58 hod)	$^{81\text{m}}\text{Kr}$ (13 s)	katex	voda nebo vzduch
^{82}Sr (25 dní)	^{82}Rb (78 s)	katex	roztok NaCl
^{113}Sn (115 dní)	$^{113\text{m}}\text{In}$ (1,7 hod)	ZrO_2	zř. kyselina



Použití radionuklidových generátorů: v nukleární medicíně (viz dále diagnostické metody)