

## 4. KINETIKA JADERNÉHO ROZPADU

- 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 **reakci 1. řádu**.

- Pro rychlost procesu platí základní **zákon radioaktivních přeměn**, který říká, že "za dostatečně krátký časový interval se přemění stejný podíl (stálá část) z přítomného počtu ( $N$ ) radioaktivních jader".

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

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

**Přeměnová konstanta ( $\lambda$ ) 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

Přeměnové konstanty a poločasy některých radioaktivních nuklidů.

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

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

$$\lambda = \sum \lambda_i$$

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

- **přeměna není ovlivněna tlakem a teplotou**
- **přeměnová konstanta nezávisí na chemickém stavu atomu**, vyjma rozpadů, které jsou spojeny s interakcí obalového elektronu (EZ, vnitřní konverze)

- **pravděpodobnost přeměny atomu vyjadřuje tzv. střední doba života atomu**

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

## **Rychlost radioaktivní přeměny a aktivita**

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

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

Rozměrem aktivity je **Becquerel (Bq)**, což představuje rozpad jednoho atomu radionuklidu za sekundu.

**1 Bq – 1 rozpad za sekundu**

**Starší jednotka aktivity: 1 Curie (Ci) = 3,7.10<sup>10</sup>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 emise .....Bq/s
- rychlost plošné emise.....Bq/s.m<sup>2</sup>

## S aktivitou souvisí hmotnost radioaktivního nuklidu vztahem:

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

kde A je aktivita radionuklidu o relativní nuklidové hmotnosti A<sub>r</sub>.

**Praktický poznatek:** větší hmotnosti radioaktivních nuklidů se mohou vyskytovat pouze s malou konstantou  $\lambda$

**Př.**

$$1 \text{ kBq } ^{137}\text{Cs} = 1,38 \cdot 10^{12} \text{ atomů cesia} = 3,15 \cdot 10^{-10} \text{ g Cs}$$

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

⇒ musí se přidávat chemicky identická, avšak neradioaktivní látka – tzv. **nosič**.

## Změna aktivity s časem

Jestliže provedeme integraci výše uvedených vztahů, obdržíme vztahy, které jsou použitelné pro praktické výpočty změny počtu atomů radionuklidu či jejich aktivity s časem.

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

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

Jeho souvislost s přeměnovou konstantou vyplývá z následujícího odvození:

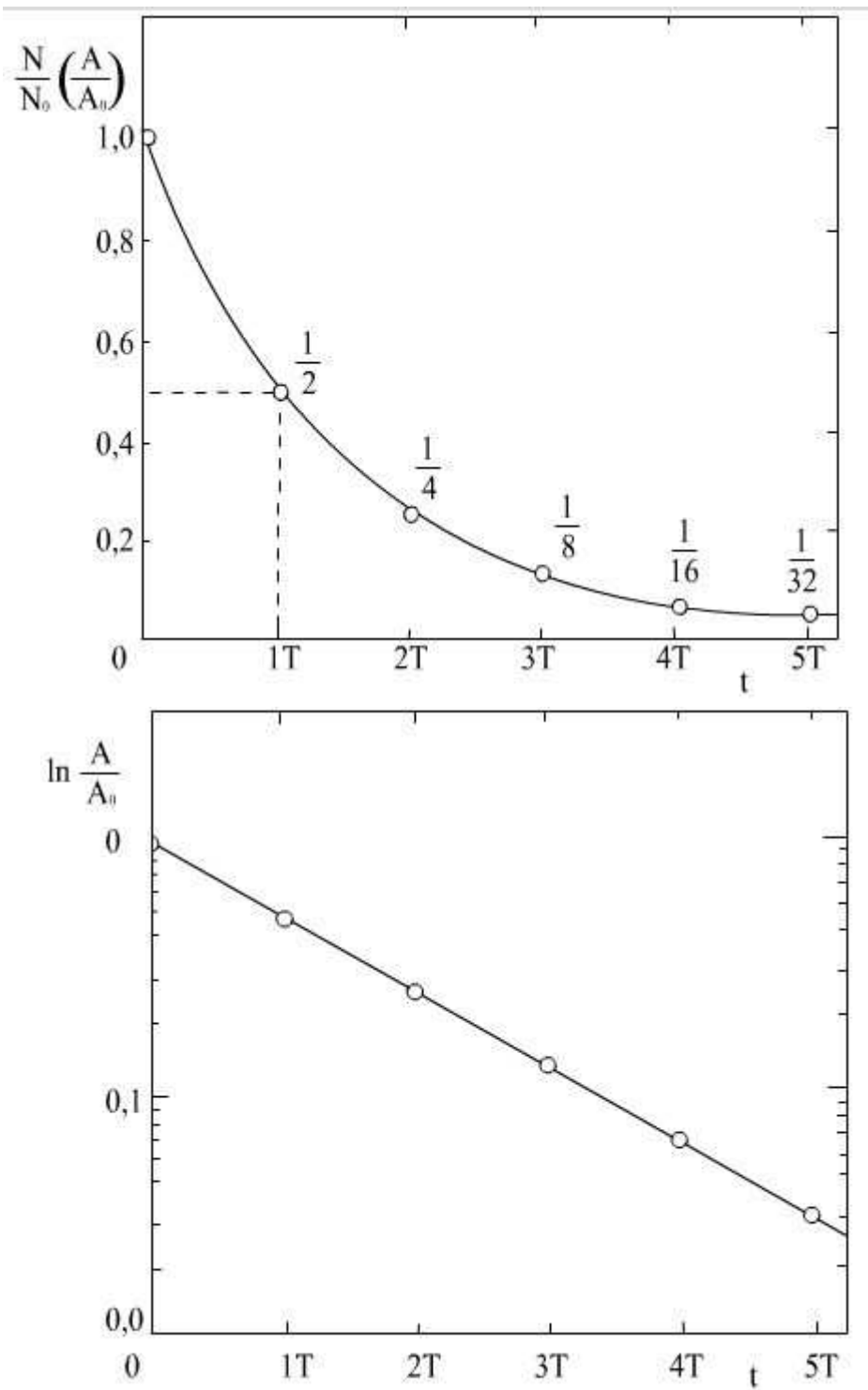
$$N(T_{1/2}) = \frac{1}{2} N_0$$

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

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

Radionuklid	$^3\text{H}$	$^{14}\text{C}$	$^{60}\text{Co}$	$^{137}\text{Cs}$	$^{226}\text{Ra}$	$^{235}\text{U}$	$^{238}\text{U}$
$T_{1/2}$ [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 závislosti  $N/N_0$  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:

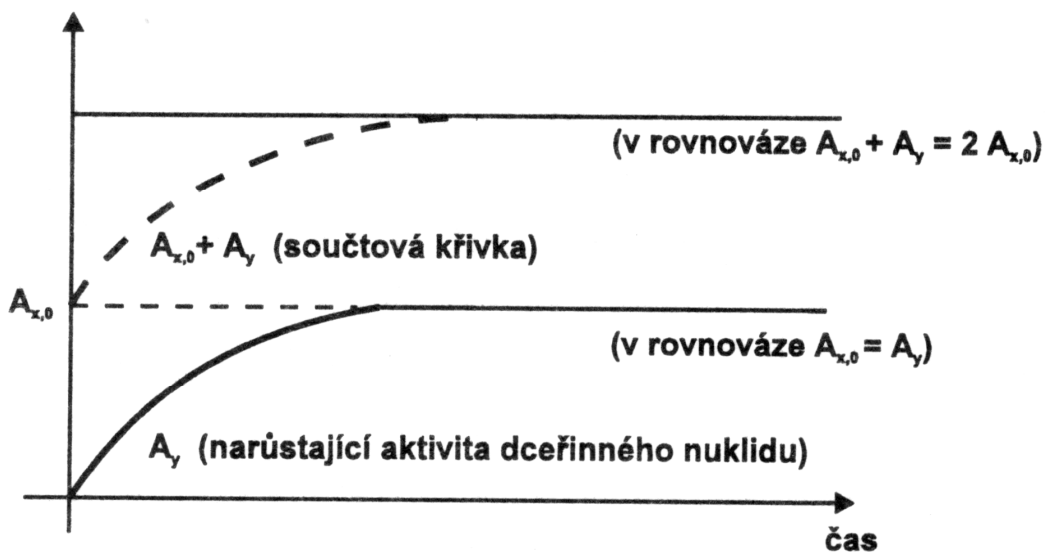
**$T_{1/2}(X)$  je velmi dlouhý...  $T_{1/2}(X) \gg T_{1/2}(Y)$ ,**  
tj.  **$\lambda_X \ll \lambda_Y$**

Pak platí, že aktivita nuklidu X se v reálném čase prakticky nemění:

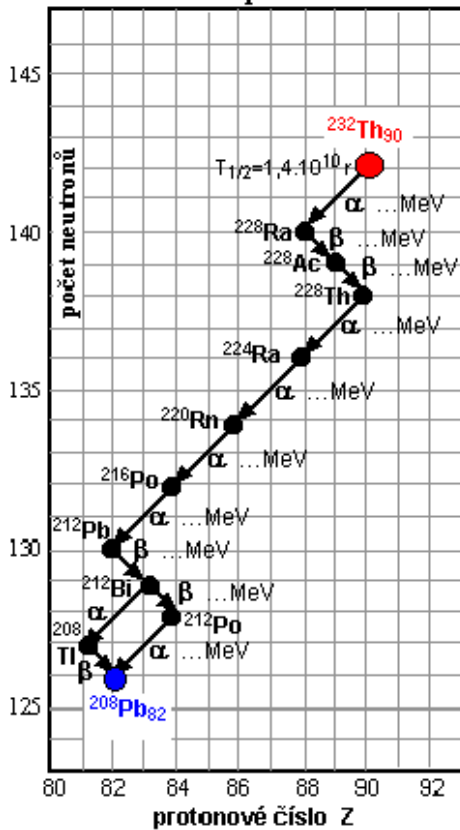
$$e^{-\lambda_X t} \rightarrow 1$$

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

Pro dostatečně dlouhý pozorovací čas ( $t \rightarrow \infty$ )...  $A_Y = A_{X,0}$

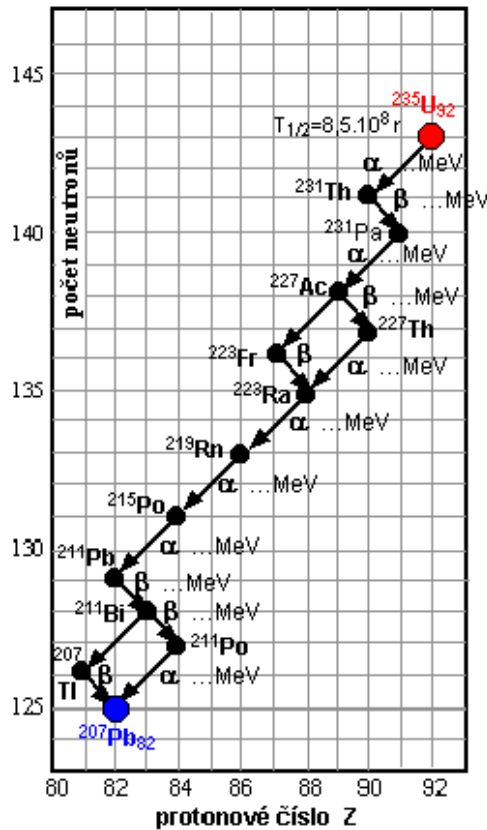


Thoriová rozpadová řada



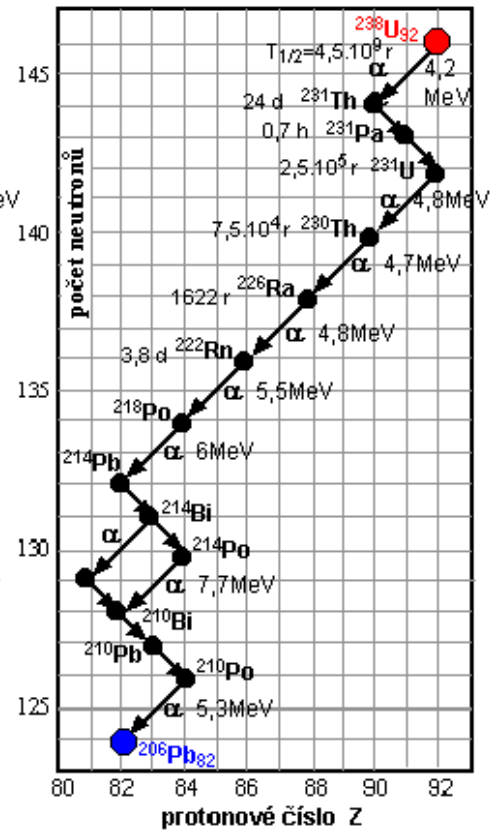
**n+0**

Uranová řada  $^{235}\text{U}$



**n+3**

Uranová řada  $^{238}\text{U}$

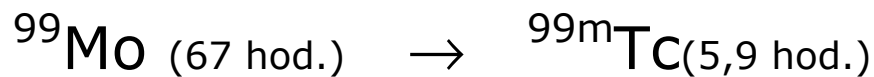


**n+2**

- postupnými přeměnami  $\alpha$   $\beta^-$  se snižuje Z i A až vzniká stabilní nuklid olova
- malá hodnota  $\lambda_x$  způsobuje, že všechny další členy řady jsou v trvalé radioaktivní rovnováze s mateřským nuklidem a jsou tudíž v rovnováze i samy mezi sebou
- 
- v každé řadě se vyskytuje určitý izotop radonu, který poskytuje **krátkodobý nebo dlouhodobý aktivní depozit**
- existuje i umělá **řada neptuniová** (začíná  $^{237}\text{Np}$ , končí  $^{209}\text{Bi}$ , neobsahuje izotop radonu) - **n+1**



## Přechodná radioaktivní rovnováha

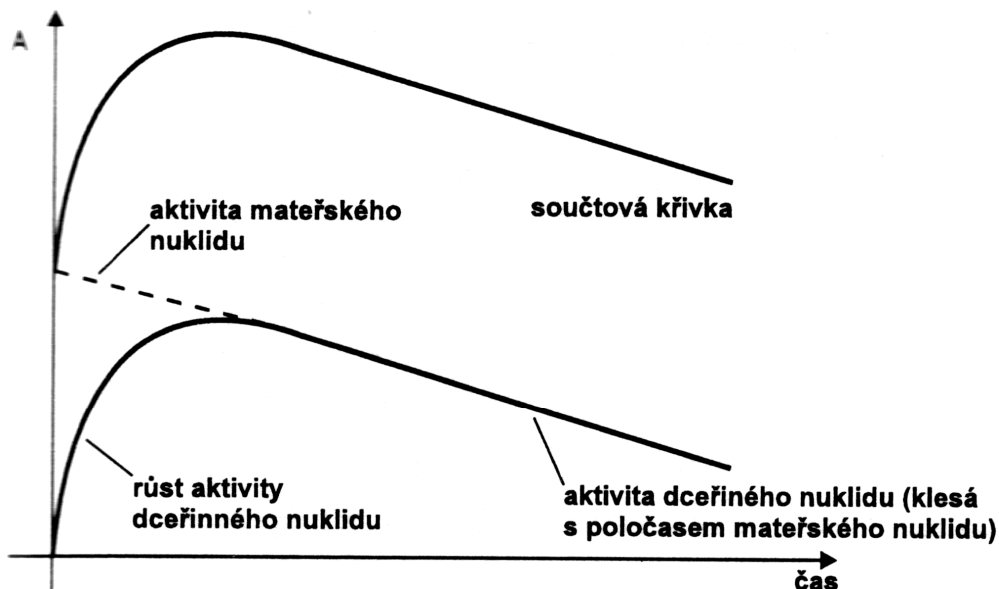


$T_{1/2}(X)$  je sice dlouhý, ale oba poločasy jsou srovnatelné

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

Pro aktivitu platí vztah:

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

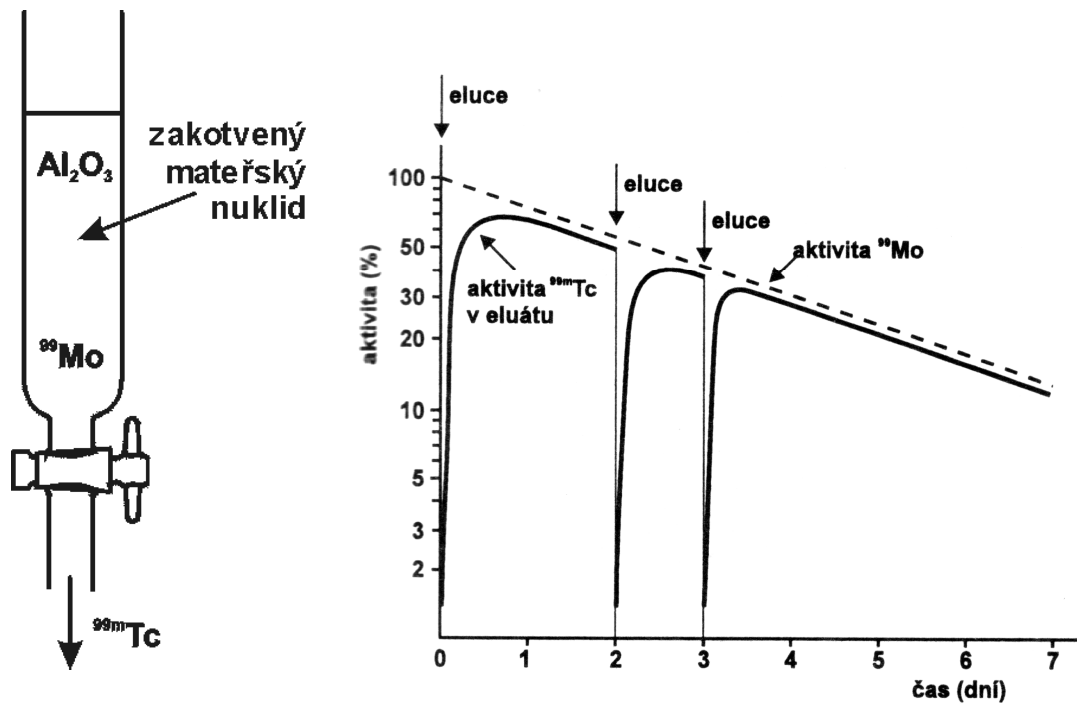


- aktivita mateřského nuklidu je největší na počátku a časem se zmenšuje
- poměr aktivit obou nuklidů je konstantní
- celá přeměna se řídí rozpadem nuklidu s větším poločasem (nuklid X)
- aktivita obou nuklidů po dosažení maxima klesá se stejnou rychlostí

## Generátory radioaktivních nuklidů

- metoda pro opakované získávání některých nuklidů
- využívá se existence trvalé nebo přechodné radioaktivní rovnováhy

Experimentální provedení **radionuklidového generátoru:**



mateřský nuklid	dceřiný nuklid	náplň kolony	eluční činidlo
$^{99}\text{Mo}$ (67 hod)	$^{99\text{m}}\text{Tc}$ (5,9 hod)	$\text{Al}_2\text{O}_3$	roztok NaCl
$^{68}\text{Ge}$ (288 dní)	$^{68}\text{Ga}$ (689 min)	$\text{SnO}_2$	1M HCl
$^{81}\text{Rb}$ (4,58 hod)	$^{81\text{m}}\text{Kr}$ (13 s)	katex	voda nebo vzduch
$^{82}\text{Sr}$ (25 dní)	$^{82}\text{Rb}$ (78 s)	katex	roztok NaCl
$^{113}\text{Sn}$ (115 dní)	$^{113\text{m}}\text{In}$ (1,7 hod)	$\text{ZrO}_2$	zř. kyselina

Použití radionuklidových generátorů: **v nukleární medicíně (diagnostické metody)**

