

# 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 ( $\lambda$ ) 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

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

$$\lambda = \sum \lambda_i$$

- velikost konstanty  $\lambda$  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  $\tau$**

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

## 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) = 3,7.10<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:

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  $\lambda$

**Př. 1kBq  $^{137}\text{Cs}$  = 1,38.10<sup>12</sup> atomů cesia = 3,15.10<sup>-10</sup>g 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  $^{137}\text{Cs}$  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:**

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

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

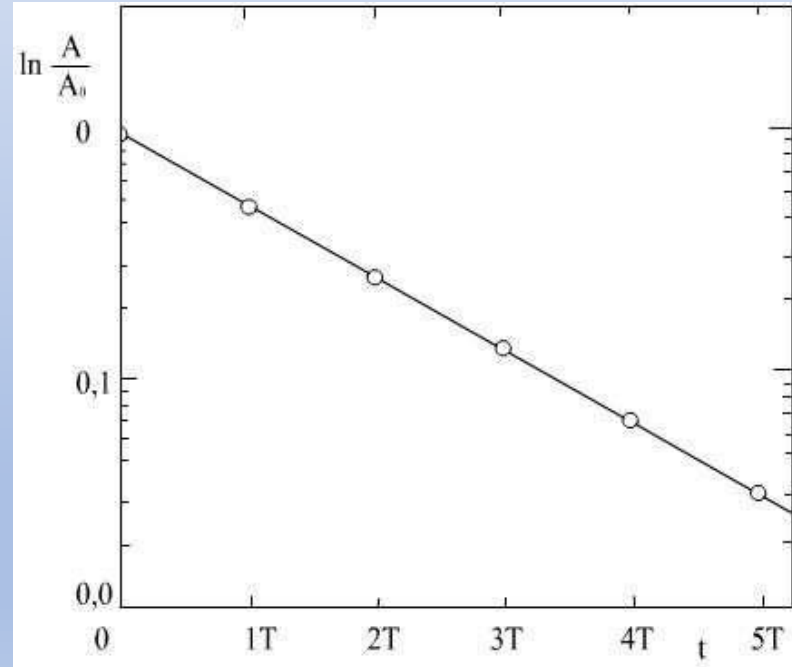
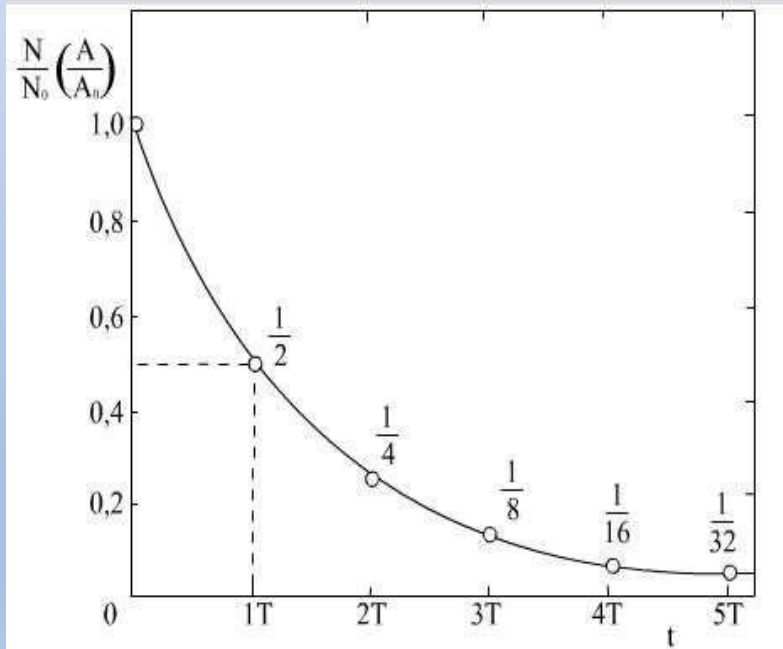
$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda}$$

Přeměnové konstanty a poločasy některých radioaktivních nuklidů.

Nuklid	$\lambda$ ( $s^{-1}$ )	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

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



## Trvalá radioaktivní rovnováha



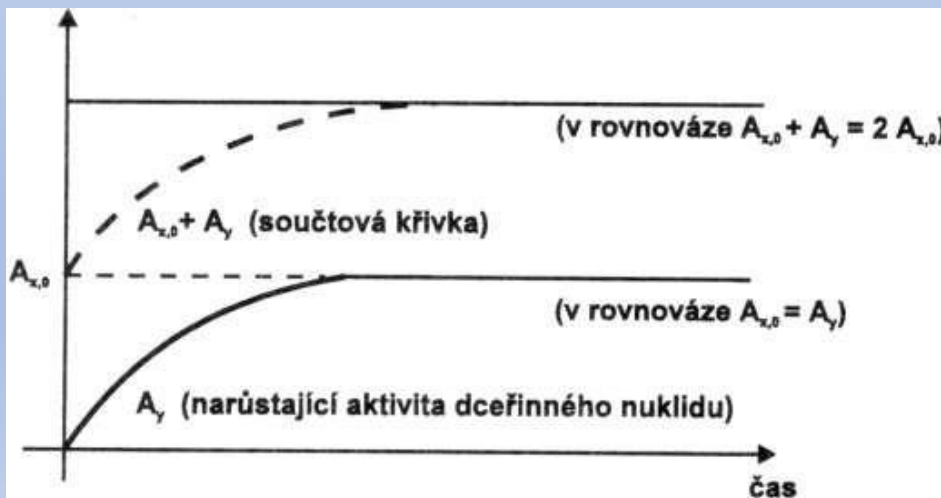
Pro počet radioaktivních atomů s ohledem na mateřský nuklid platí vztah:

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

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

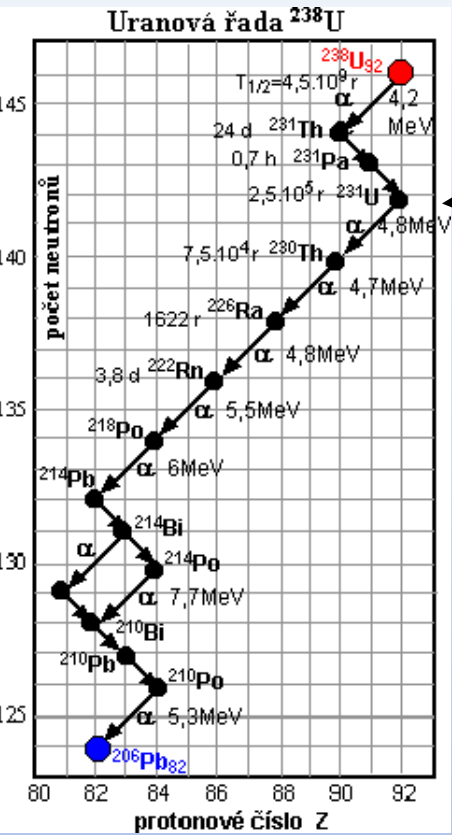
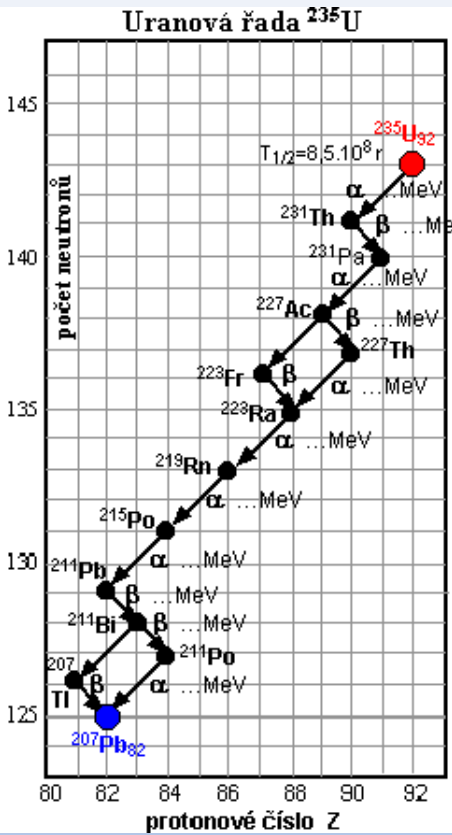
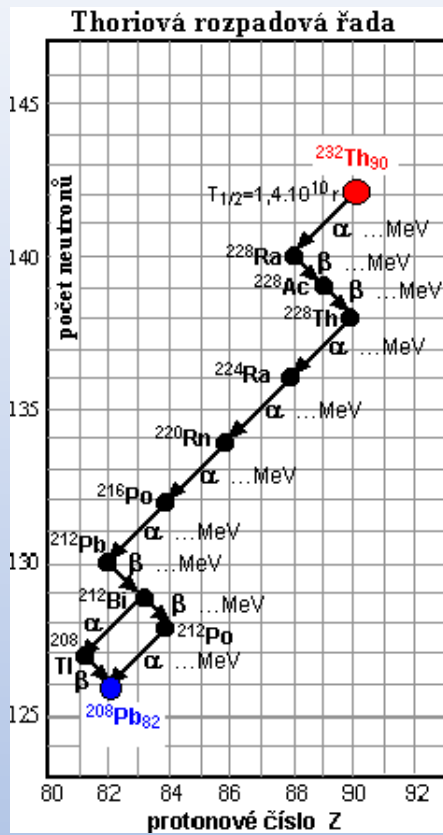
$$T_{1/2}(X) \gg T_{1/2}(Y), \quad \text{tj. } \lambda_X \ll \lambda_Y$$

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 <sup>238</sup>U  $238 : 4 = 59$ , zbytek je 2, tedy jde o řadu **n+2**.

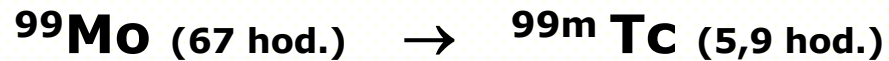


## Co lze ze schémat přeměnových řad vyčíst:

- postupnými přeměnami  $\alpha$  a  $\beta^-$  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, 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  $^{237}\text{Np}$ , končí  $^{209}\text{Bi}$ , neobsahuje izotop radonu)  
- 

<b>Typ n+1</b>
----------------

## Přechodná radioaktivní rovnováha



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

Symbol „m“ znamená metastabilní

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

Pro aktivitu platí vztah:

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

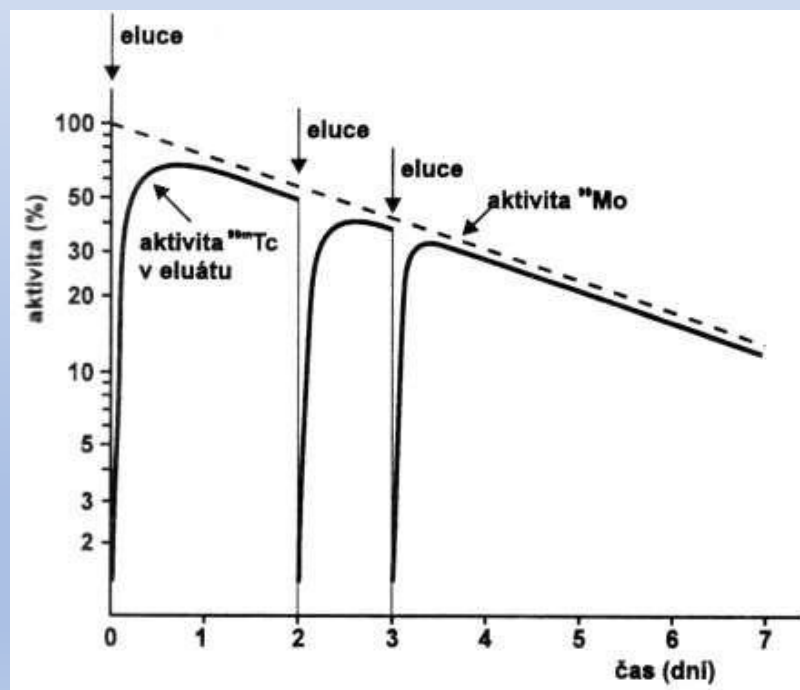
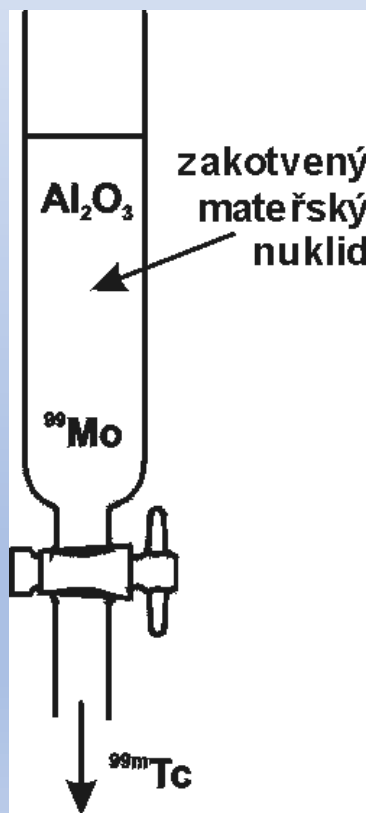
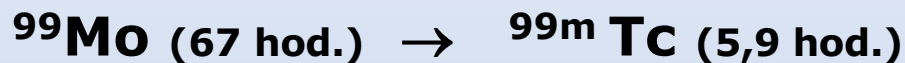


- aktivita mateřského nuklidu je největší na počátku a časem se zmenšuje
- poměr aktivit obou nuklidů je konstantní
- celá přeměna se řídí přeměnou nuklidu s větším poločasem (nuklid X)
- aktivita obou nuklidů po dosažení maxima klesá se stejnou rychlostí

# 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:**



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

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