

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".

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

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

- 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

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

- 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) = 3,7.10¹⁰Bq

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:

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

kde A je aktivita radionuklidu o relativní nuklidové hmotnosti A_r.

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

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:

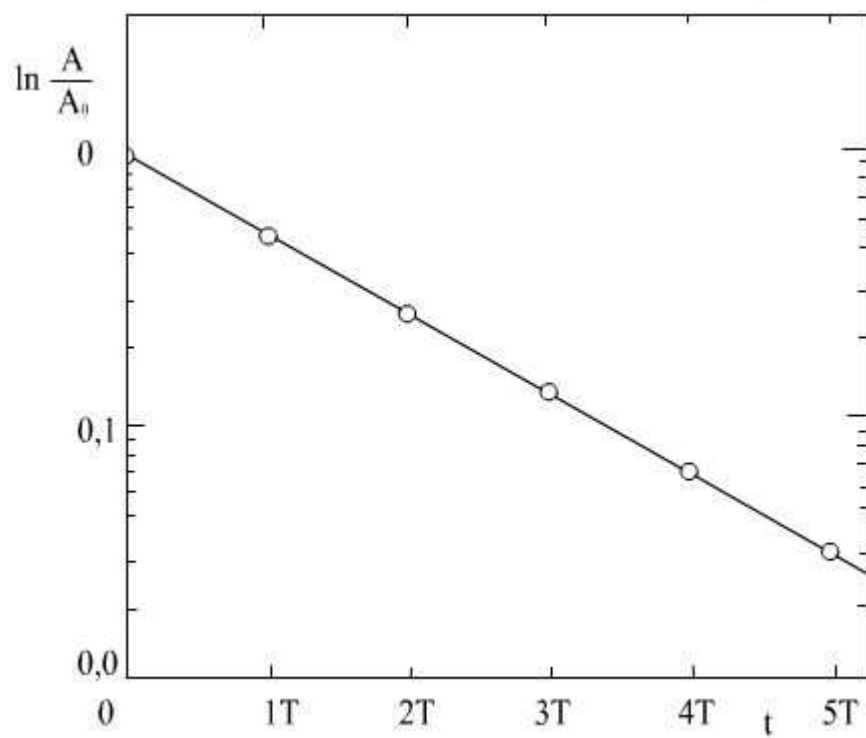
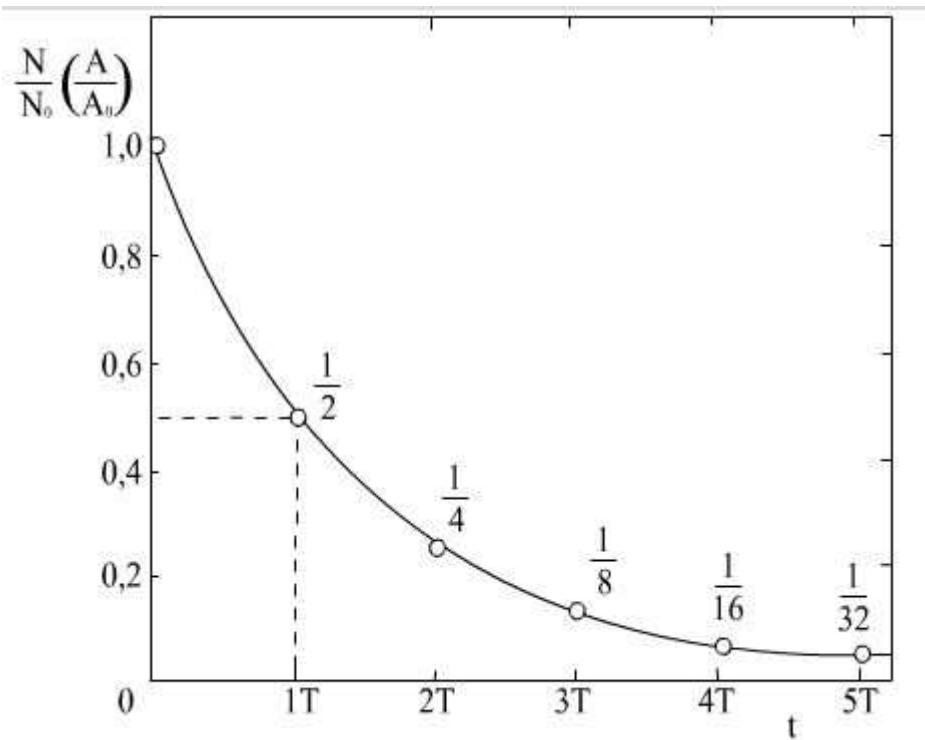
$$N(T_{1/2}) = \frac{1}{2} N_0$$

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

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

Radionuklid	^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 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:

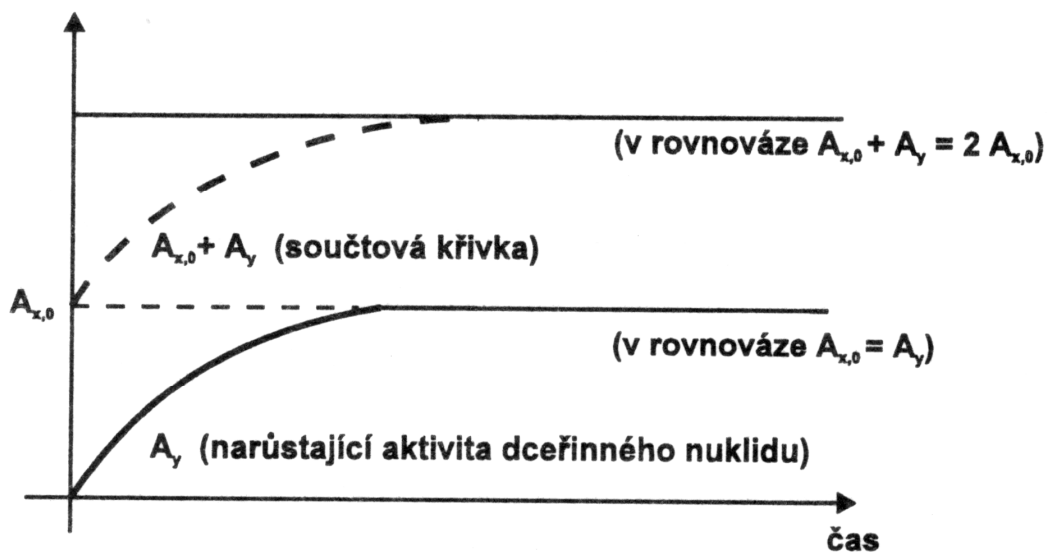
$T_{1/2}(X)$ je velmi dlouhý... $T_{1/2}(X) \gg T_{1/2}(Y)$,
tj. **$\lambda_X \ll \lambda_Y$**

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

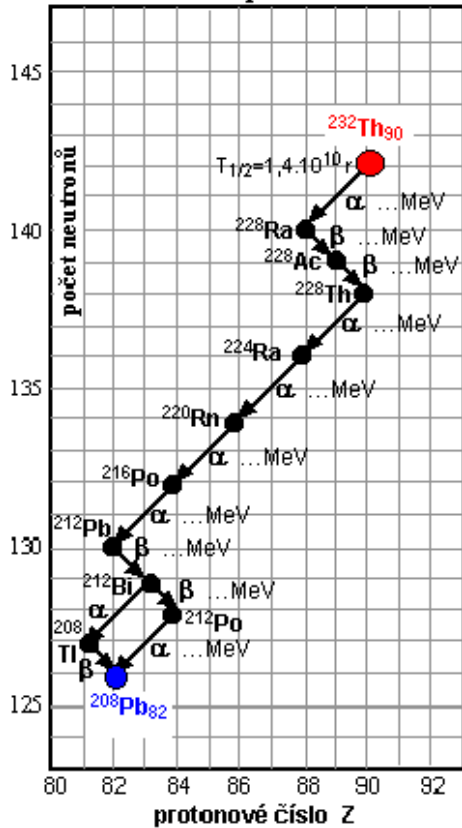
$$e^{-\lambda_X t} \rightarrow 1$$

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

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

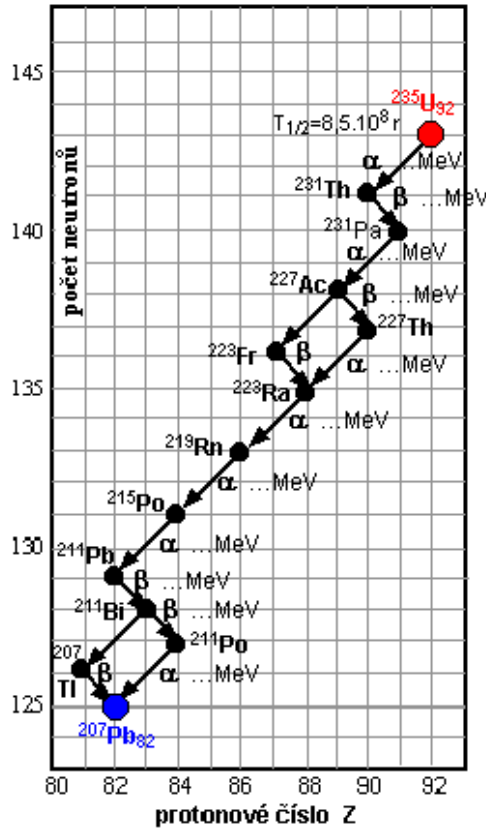


Thoriová rozpadová řada



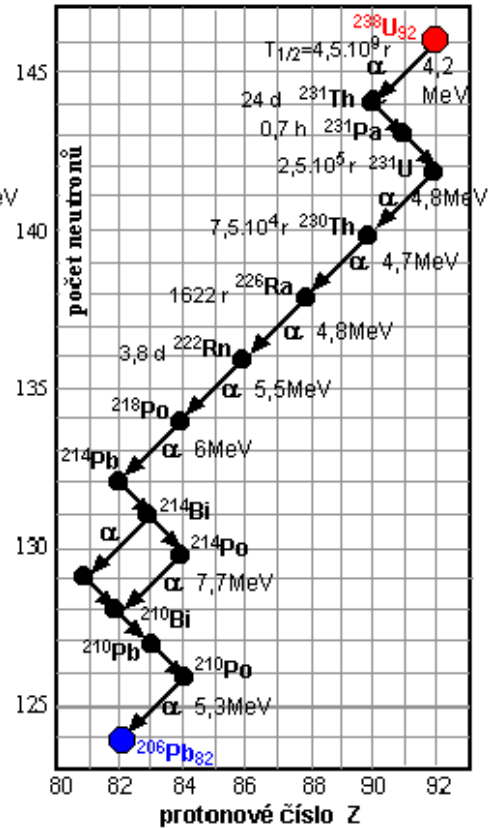
n+0

Uranová řada ²³⁵U



n+3

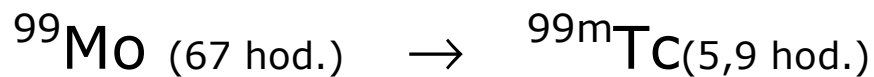
Uranová řada ²³⁸U



n+2

- 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
-
- v každé řadě se vyskytuje určitý izotop radonu, který poskytuje **krátkodobý nebo dlouhodobý aktivní deposit**
- existuje i umělá **řada neptuniová** (začíná ²³⁷Np, končí ²⁰⁹Bi, neobsahuje izotop radonu) - **n+1**

Přechodná radioaktivní rovnováha

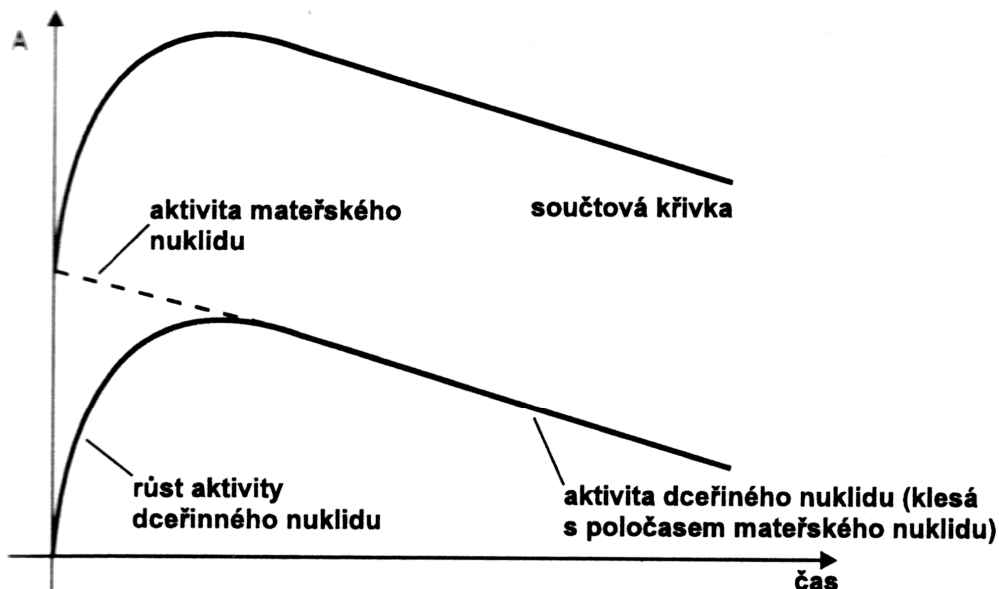


$T_{1/2}(X)$ je sice dlouhý, ale oba poločasy jsou srovnatelné

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

Pro aktivitu platí vztah:

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

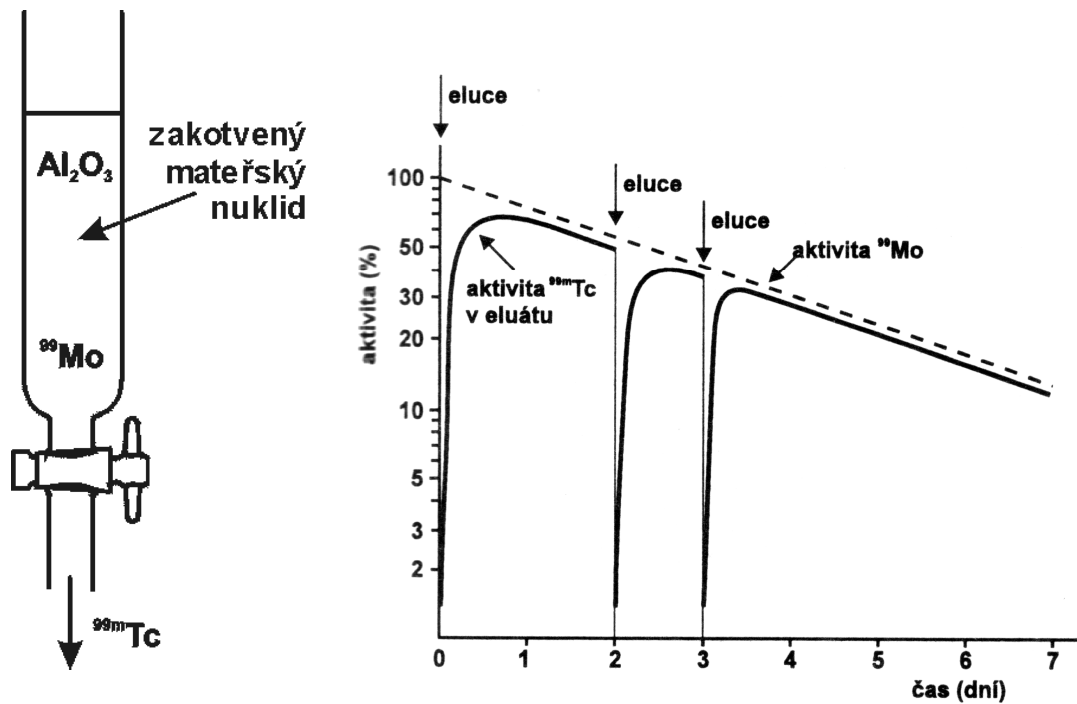


- aktivita mateřského nuklidu je největší na počátku a časem se zmenšuje
- poměr aktivit obou nuklidů je konstantní
- celá přeměna se řídí rozpadem nuklidu s větším poločasem (nuklid X)
- aktivita obou nuklidů po dosažení maxima klesá se stejnou rychlostí

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}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 (diagnostické metody)**

