

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"**.
- tento zákon platí dobře pro velké soubory radioaktivních jader
- nelze dopředu určit, který atom se v daném okamžiku rozpadne

Přeměnová konstanta (λ):

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

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

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

- Přeměnová konstanta je charakteristickou konstantou daného nuklidu.

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.)

- rozpad není ovlivněn 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: $1 \text{ Curie (Ci)} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$

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:

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

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 atomu radionuklidu či jejich aktivity s časem.

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

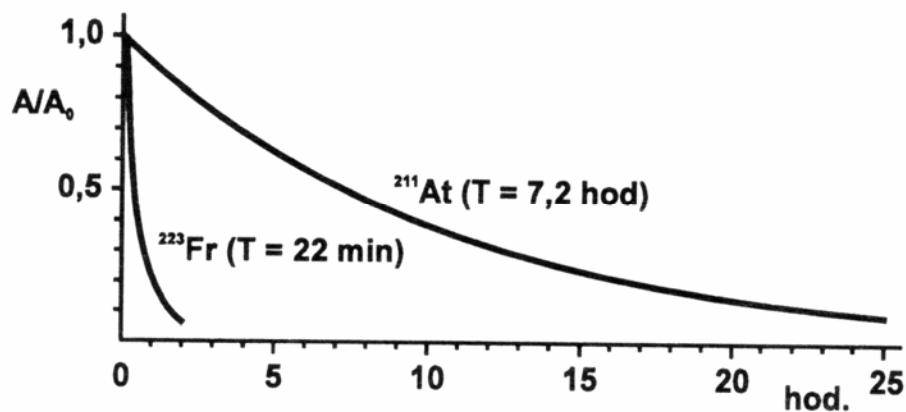
Poločas přeměny $T_{1/2}$ je čas, za který se přemění právě polovina z přítomného počtu atomů radionuklidu.

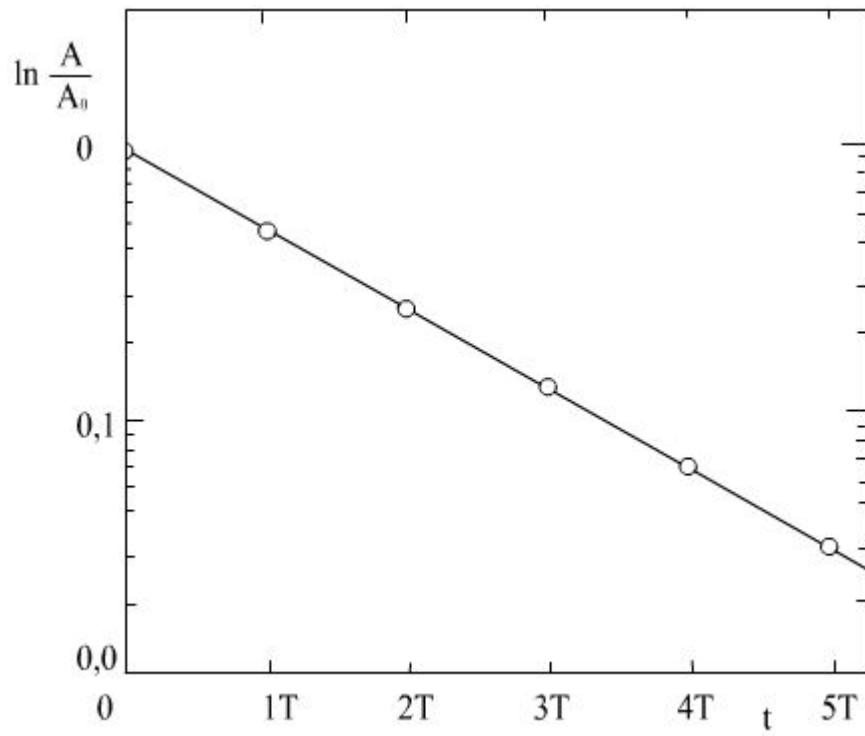
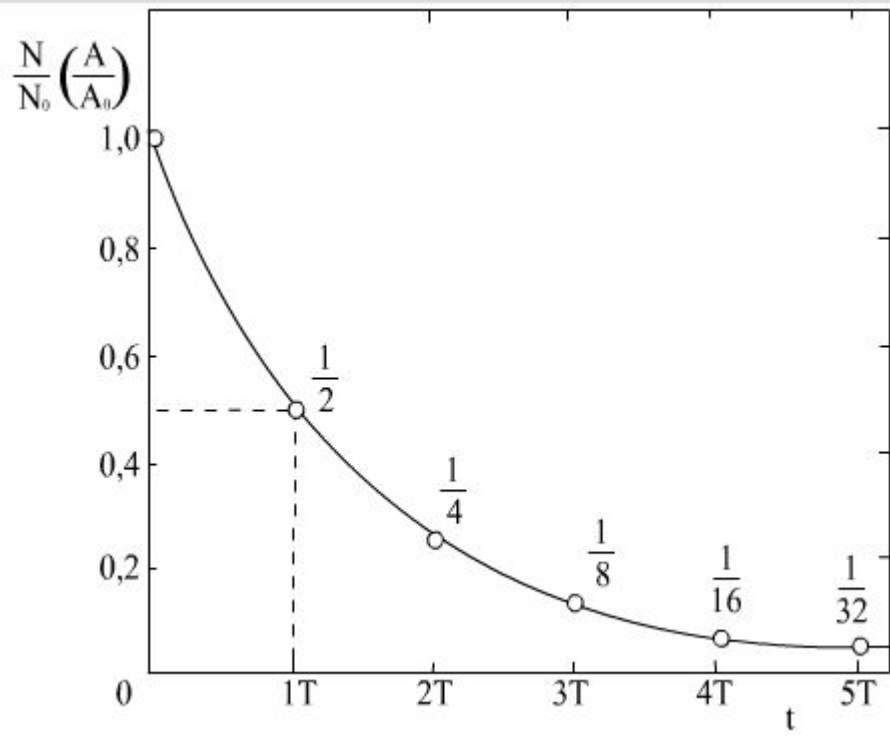
Jeho souvislost s přeměnovou konstantou vyplývá z následujícího odvození:

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

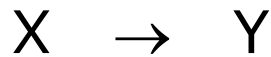
$$\frac{1}{2} N_0 = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

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





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:

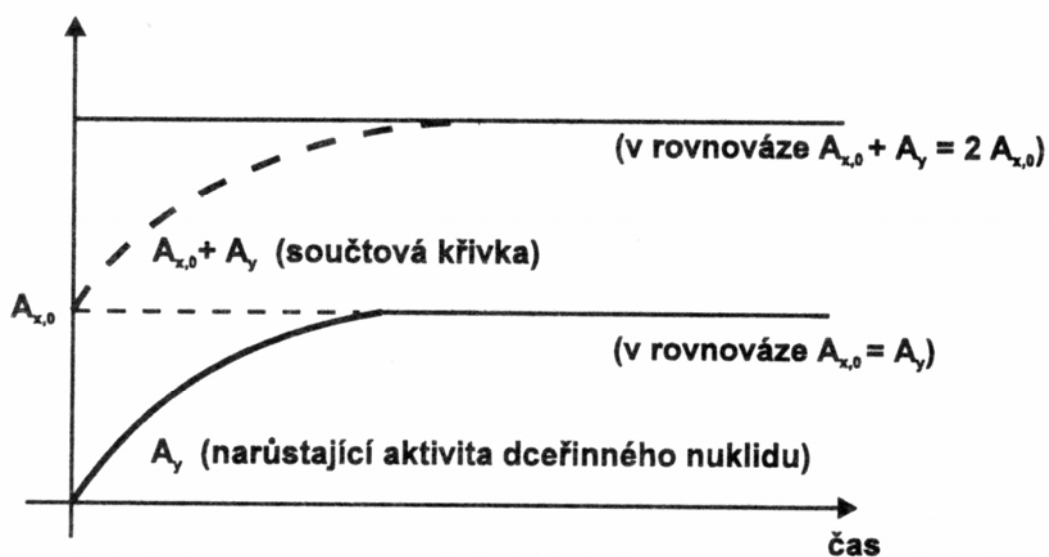
$T_{1/2}(X)$ je velmi dlouhý

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

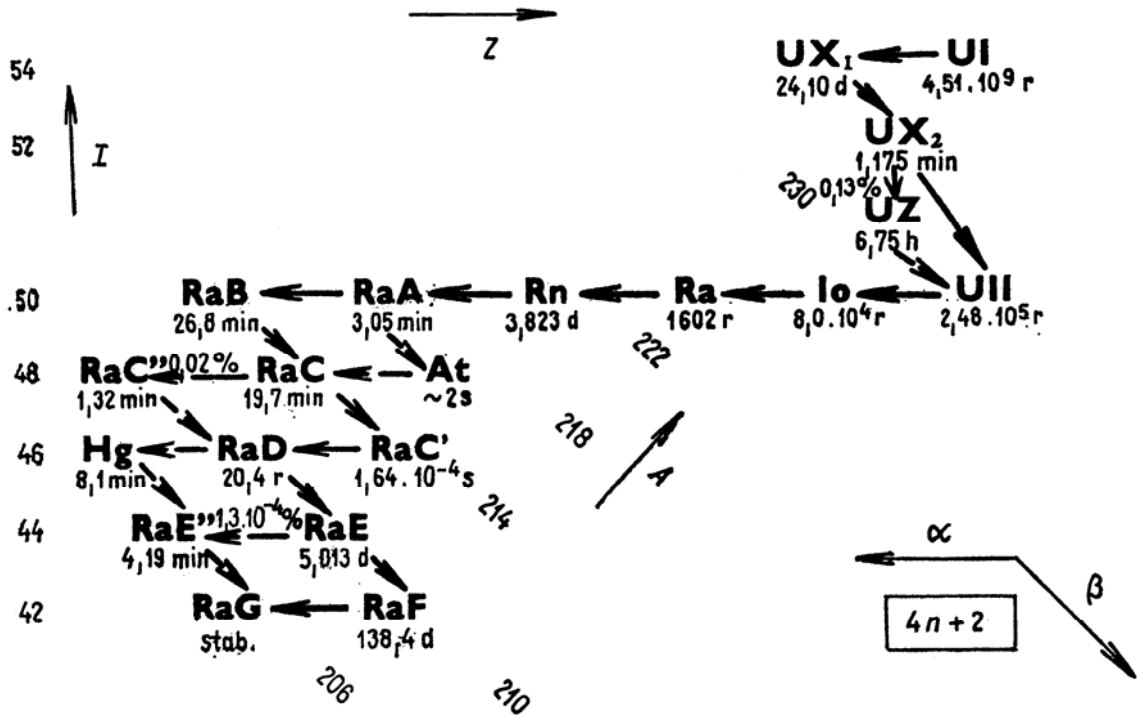
Pak platí, že aktivita nuklidu X se v reálném čase prakticky nemění: $e^{-\lambda_X t} \rightarrow 1$

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

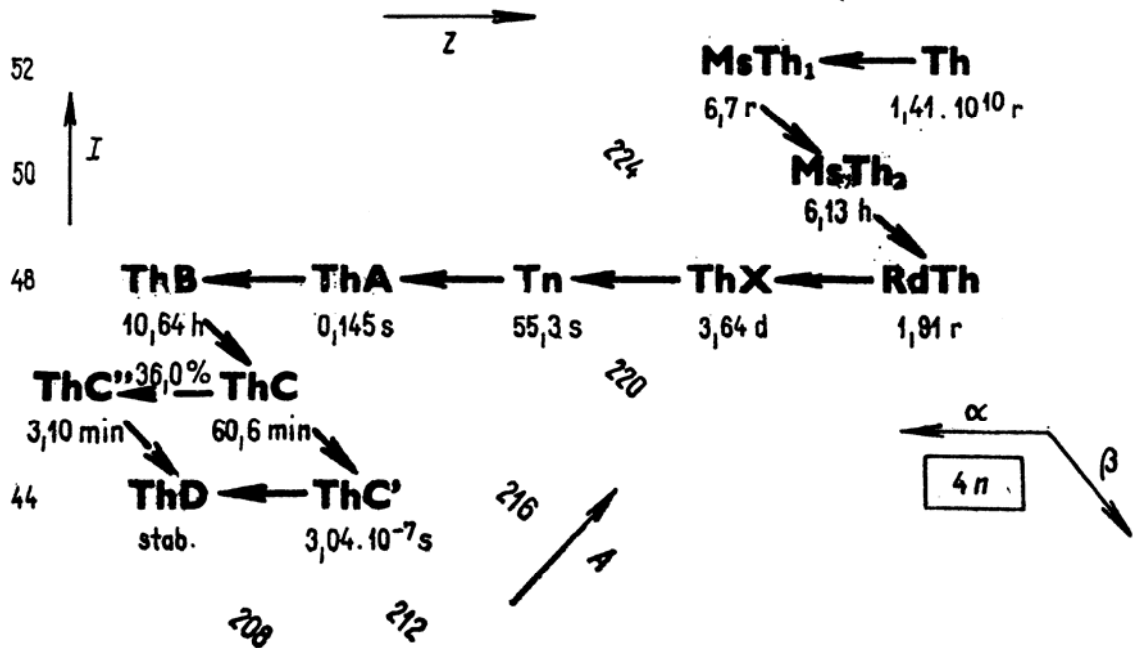
Pro dostatečně dlouhý pozorovací čas ($t \rightarrow \infty$)... $A_Y = A_{X,0}$



II	III	IV	V	VI	VII	0	I	II	III	IV	V	VI
Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn	Fr	Ra	Ac	Th	Pa	U
80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92

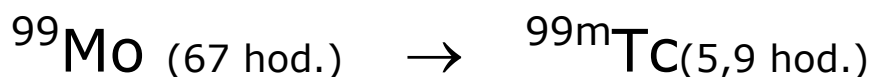


III	IV	V	VI	VII	0	I	II	III	IV
Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn	Fr	Ra	Ac	Th
81	82	83	84	85	86	87	88	89	90



- 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 ^{237}Np , končí ^{209}Bi , neobsahuje izotop radonu)

Přechodná radioaktivní rovnováha

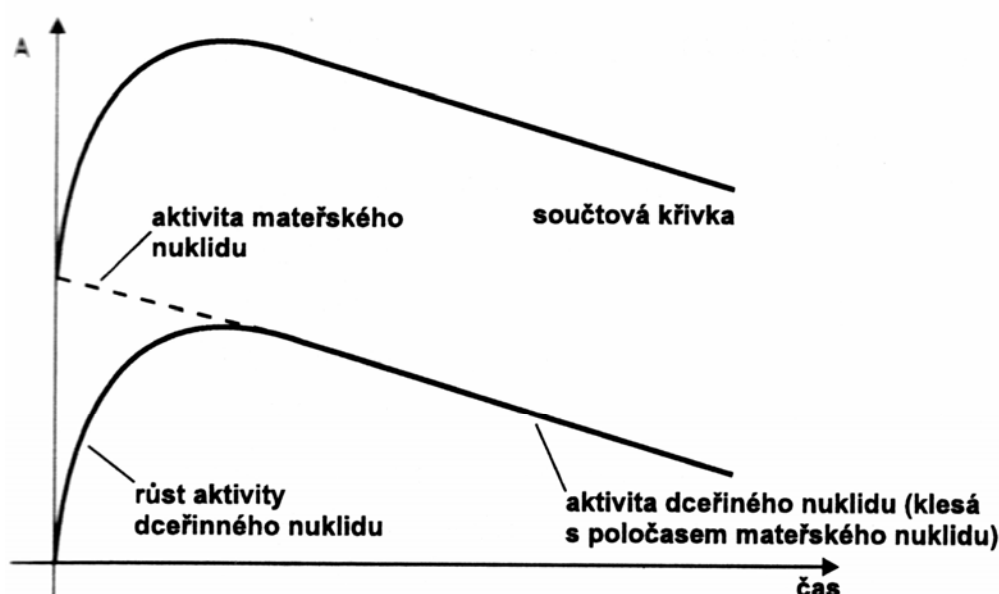


$T_{1/2}(X)$ je sice dlouhý, ale oba poločasy jsou srovnatelné

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

Pro aktivitu platí vztah:

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

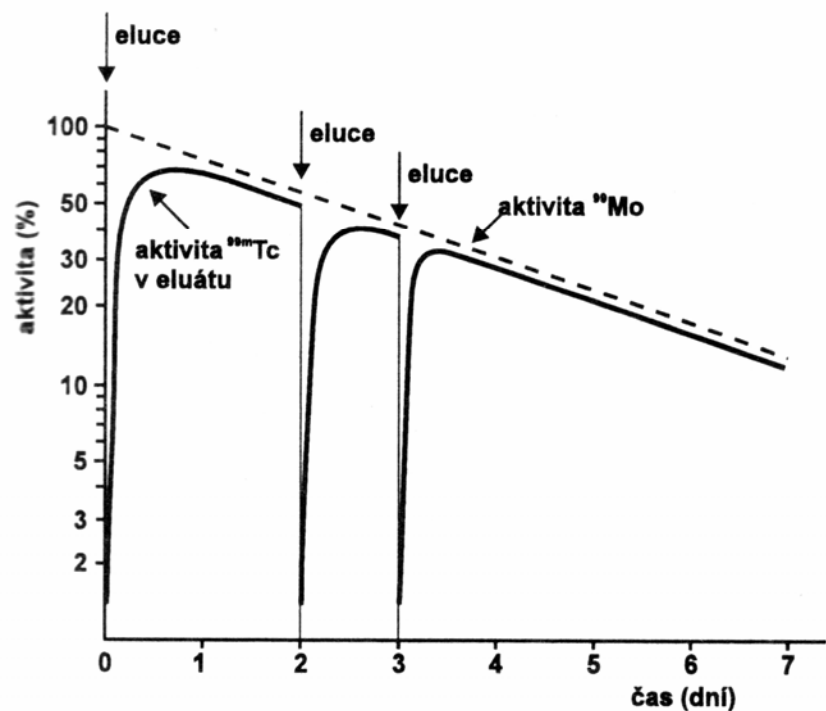
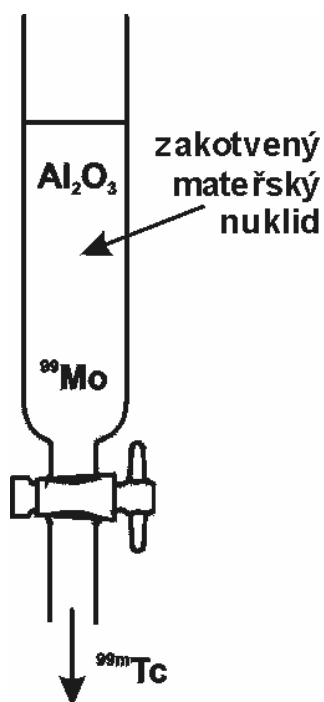


- aktivita mateřského nuklidu je největší na počátku a časem se zmenšuje
- poměr aktivit obou nuklidů je konstantní
- celá přeměna se řídí rozpadem nuklidu s větším poločasem (nuklid X)
- aktivita obou nuklidů po dosažení maxima klesá se stejnou rychlostí

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 \(diagnostické metody\)](#)

Přirozená radioaktivita

Není fyzikálního rozdílu mezi přirozenými a umělými nuklidy

1. nuklidy s poločasem přeměny $> 10^8$ let

Některé přírodní radioaktivní nuklidy s velkými poločasy přeměny

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

- vznikly při vzniku vesmíru a existují dodnes
- radioaktivita nuklidů s extrémně dlouhými poločasy je velmi nízká (1 kg ^{209}Bi $A=0,23\text{ Bq}$)

2. Nuklidy s kratšími poločasy přeměny

- vznikají v přírodě jako produkty radioaktivní přeměny mateřských nuklidů radioaktivních řad
- jadernými reakcemi v zemské atmosféře a působením kosmického záření (^3H , ^{14}C , ^{10}Be)

Některé kosmogenní radioaktivní nuklidy.

Nuklid	vzniká reakcí	Poločas (roků)
^3H	$^{14}\text{N}(n,^3\text{H})$	12,35
^{14}C	$^{14}\text{N}(n,p)$	5736
^{10}Be	$^{14}\text{N}(n,\alpha p)$	$1,6 \cdot 10^6$
^{27}Al	tříštění ^{40}Ar	$7,2 \cdot 10^5$
^{36}Cl	tříštění ^{40}Ar	$3,1 \cdot 10^5$
^{129}I	tříštění Xe	$1,6 \cdot 10^7$

Pojem **radioaktivní prvek** lze použít pouze pro prvky:

- které nemají stabilní nuklidy
- mohou se vyskytovat v přírodě nebo jsou připraveny uměle
- neoznačují se tak prvky, které mají pouze jeden radioaktivní izotop s malou aktivitou.