



Univerzita obrany
v Brně

Kinetika jaderného rozpadu

- základní zákon radioaktivních přeměn
- radioaktivní řady
- generátory radionuklidů
- datování



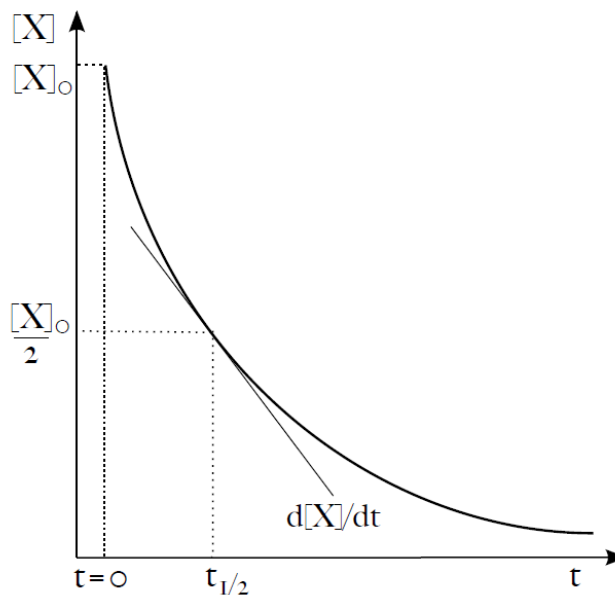
Univerzita obrany
v Brně

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.

$X \rightarrow$ produkty





Kinetika jaderného rozpadu

základní zákon radioaktivních přeměn

- platí dobře pro velké soubory radioaktivních jader
- nelze dopředu určit, který atom se v daném okamžiku rozpadne - statistický charakter přeměny
- za dostatečně krátký časový interval se přemění stejný podíl (stálá část) z přítomného počtu (N) radioaktivních jader

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

λ - přeměnová konstanta

- charakteristická konstanta daného nuklidu



Kinetika jaderného rozpadu

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



přeměnová konstanta

- vyjadřuje pravděpodobnost přeměny radioaktivního atomu za časovou jednotku

- u větvené přeměny je celková pravděpodobnost dána součtem

$$\lambda = \sum \lambda_i$$

- velikost se určuje kvantově-mechanickými výpočty (vlnové funkce jader, typ přeměny apod.)

- přeměna není ovlivněna tlakem a teplotou



přeměnová konstanta

- nezávisí na chemickém stavu atomu
- výjimka je u rozpadů, které jsou spojeny s interakcí obalového elektronu - elektronový záchyt, vnitřní konverze
- nuklidy vázané ve sloučeninách mají menší přeměnovou konstantu než nuklidy v elementární formě

${}^7\text{Be}$ - přeměna elektronovým záchytem

$$\lambda(\text{kov}) < \lambda(\text{BeF}_2)$$

rozdíl 0,1%



Univerzita obrany
v Brně

Kinetika jaderného rozpadu

střední doba života atomu

- pravděpodobnostní charakter radioaktivní přeměny pro velký soubor radioaktivních atomů

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



aktivita A

- časová změna (úbytek) počtu radioaktivních jader za časovou jednotku

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

jednotka aktivity - Becquerel - Bq

- rozpad jednoho atomu radionuklidu za sekundu

1 Bq - 1 rozpad za sekundu

starší jednotka aktivity - 1 Curie, Ci = $3,7 \cdot 10^{10}$ Bq



Kinetika jaderného rozpadu

aktivita vztažená 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.m²



hmotnost s radioaktivním nuklidem

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

λ - přeměnová konstanta

A - aktivita

A_r - relativní atomová hmotnost

N_A - Avogadrova konstanta

- větší hmotnosti radioaktivních nuklidů se mohou vyskytovat pouze s malou λ - ^{226}Ra , ^{238}U
- u nuklidů s větší λ i velká aktivita odpovídá malé hmotnosti



hmotnost radioaktivního nuklidu

^{137}Cs - 1 kBq odpovídá $1,38 \cdot 10^{12}$ atomů $\rightarrow 3,5 \cdot 10^{-10}$ g
velmi nízká hmotnost

koncentrace v 1 l roztoku - $2,3 \cdot 10^{-12}$ mol/l

- nelze provádět standardní chemické postupy - např. srážení
- nutno přidat nosič - chemicky identická, ale neradioaktivní látka - cesná sůl



časová změna aktivity

integrací zákona radioaktivní přeměny dostaneme
- počet radioaktivních atomů v libovolném čase

$$N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

- časová změna aktivity

$$A(t) = A_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

N_0 - počáteční počet atomů

exponenciální pokles



Kinetika jaderného rozpadu

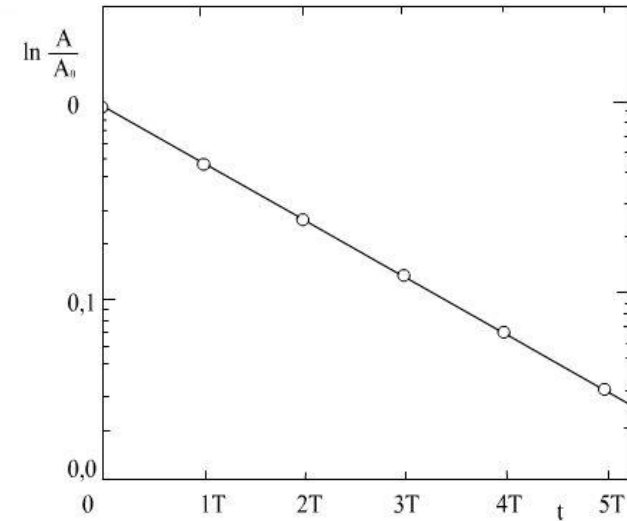
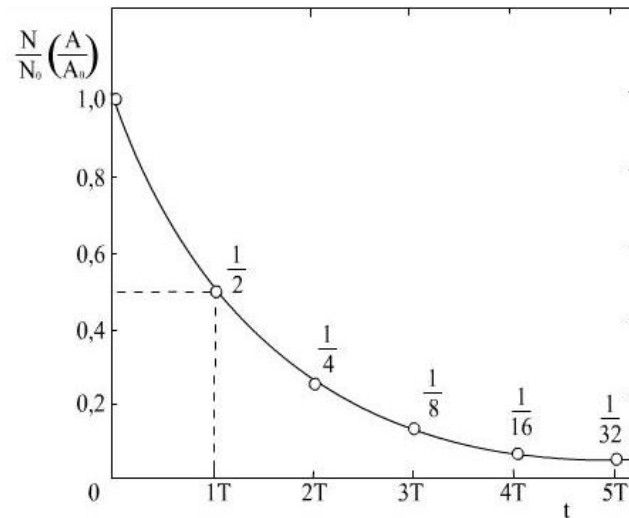
poločas přeměny

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

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

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

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





Univerzita obrany
v Brně

Kinetika jaderného rozpadu

poločas přeměny

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



kinetika hromadění produktu

- stabilního $X \rightarrow Y$ úbytek $X =$ přírůstek Y

$$N_Y = N_X (e^{\lambda t} - 1)$$

- radioaktivního $X(\lambda_X) \rightarrow Y(\lambda_Y) \rightarrow \dots$

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



trvalá radioaktivní rovnováha $X \rightarrow Y$

- $T_{1/2}(X)$ je velmi dlouhý

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

pak se aktivita nuklidu X v reálném čase prakticky nemění

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

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

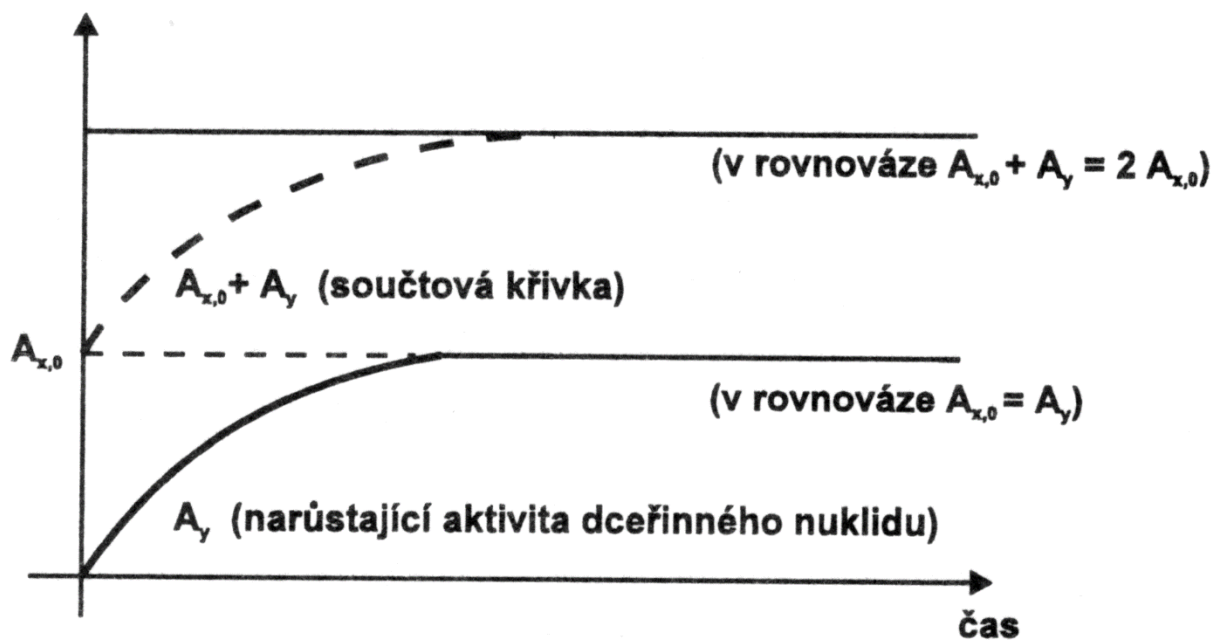
pro dostatečně dlouhý pozorovací čas $t \rightarrow \infty$

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



Kinetika jaderného rozpadu

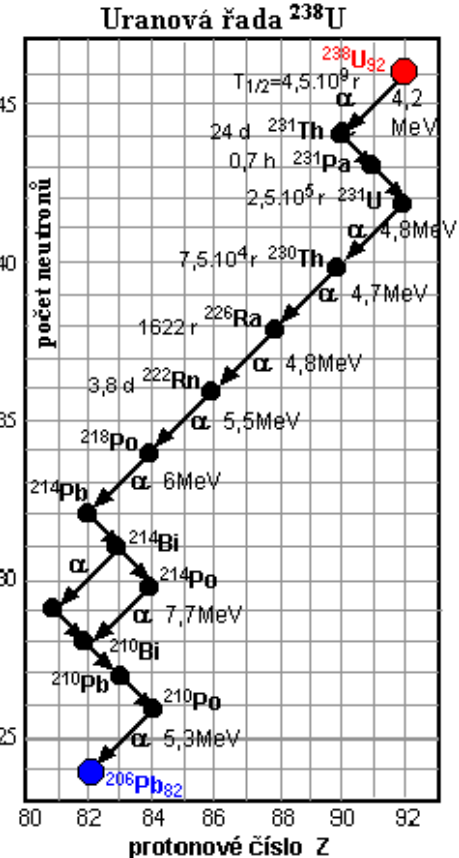
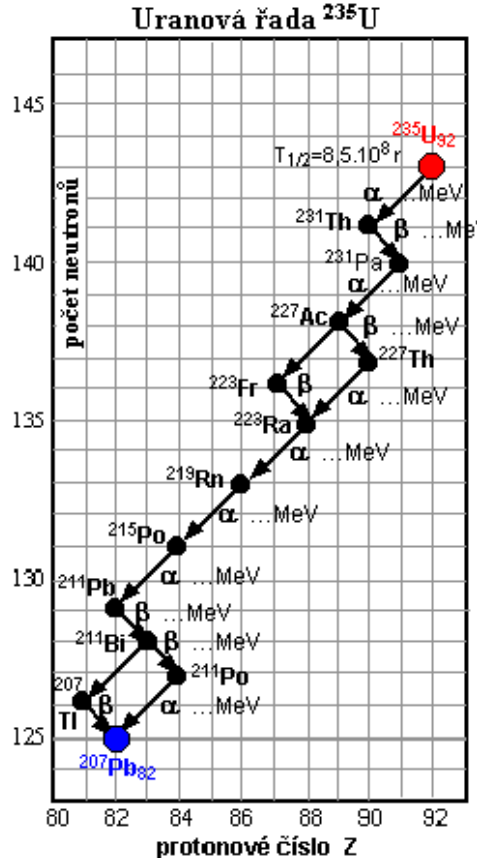
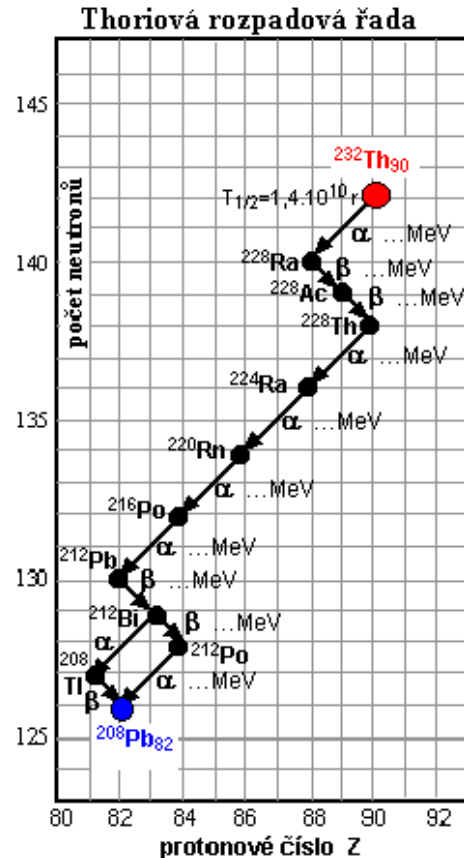
průběh aktivity mateřského a dceřiného nuklidu v případě
ustavení trvalé radioaktivní rovnováhy





Kinetika jaderného rozpadu

zvláštní případ radioaktivní rovnováhy - radioaktivní řady





radioaktivní řady

- postupnými přeměnami alfa beta- 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 tedy v rovnováze i samy mezi sebou
- v každé řadě se vyskytuje určitý izotop radonu
- dříve označovaná jako umělá řada neptuniová, začíná ^{237}Np , končí ^{205}Tl - neobsahuje izotop radonu



Kinetika jaderného rozpadu

přechodná radioaktivní rovnováha

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

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

příklad ^{99}Mo (67 hod.) \rightarrow $^{99\text{m}}\text{Tc}$ (5,9 hod.)

pro aktivitu platí vztah

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



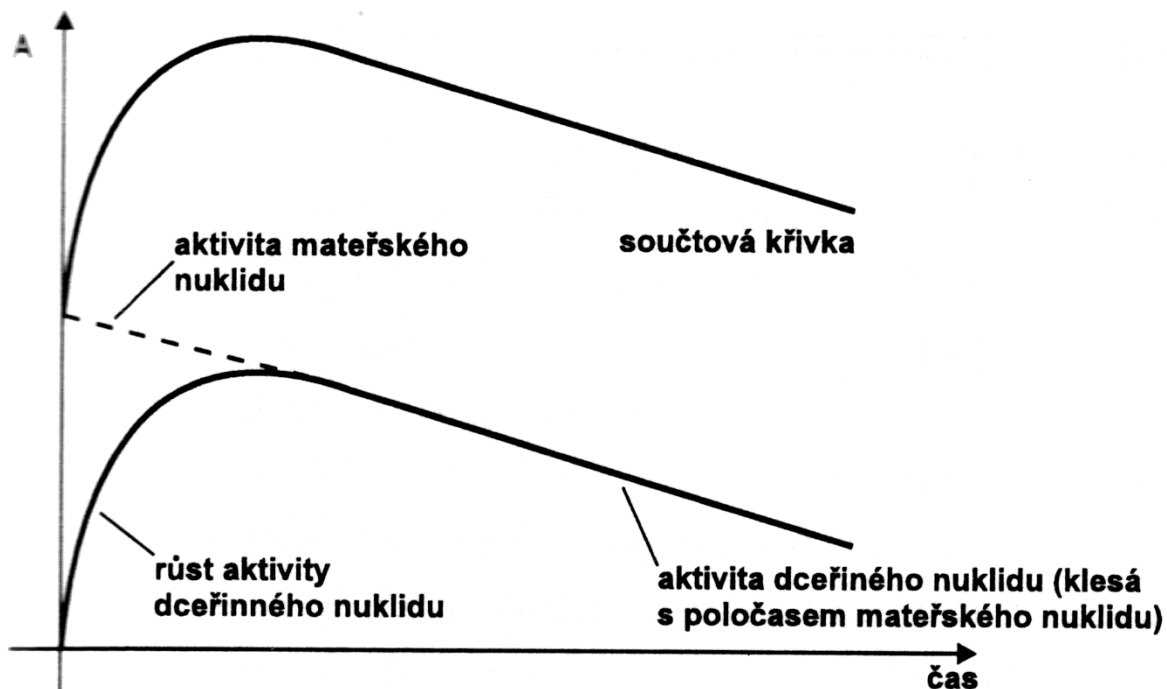
přechodná radioaktivní rovnováha

- 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



Kinetika jaderného rozpadu

přechodná radioaktivní rovnováha

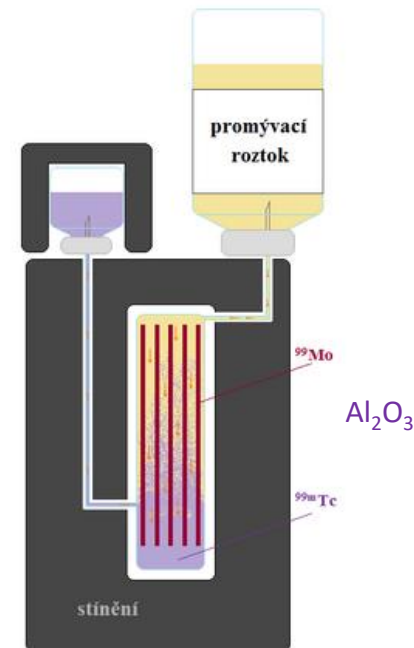




Kinetika jaderného rozpadu

generátory radioaktivních nuklidů

- metoda pro opakované získávání některých nuklidů
- využívá se existence trvalé nebo přechodné radioaktivní rovnováhy
- experimentální zařízení
 - kolonka
- použití v nukleární medicíně diagnostické metody





Univerzita obrany
v Brně

Kinetika jaderného rozpadu

generátory radioaktivních nuklidů

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



datování a určování stáří nerostů

- využitím kosmogenních nuklidů - uhlíková metoda
 - je založena na změně aktivity ^{14}C
 - izotop ^{14}C se tvoří v horních vrstvách atmosféry jadernou reakcí $^{14}\text{N} (n,p) ^{14}\text{C}$
 - atomy uhlíku vznikají ve vysoce excitovaném stavu a rychle reagují na $^{14}\text{CO}_2$
 - $^{14}\text{CO}_2$ se asimiluje v rostlinách, účastní se potravinového řetězce, rozpouští se ve vodě
 - po určité době se ustaví v zemské kůře rovnováha mezi tvorbou a rozpadem ^{14}C



Univerzita obrany
v Brně

Kinetika jaderného rozpadu

datování a určování stáří nerostů

- zastoupení ^{14}C v přírodě dáno hlavně rovnováhou mezi obsahem v atmosféře a oceánech a je konstantní
- na 1 g uhlíku v živé hmotě připadá 15,3 rozpadu za minutu (rovnovážná měrná aktivita)
- datovat lze předměty cca do 40 000-50 000 let



datování a určování stáří nerostů

- koloběhu uhlíku se účastní především $^{14}\text{CO}_2$ z atmosféry, které však může být ovlivněno např. sluneční aktivitou
- bylo to zjištěno proměřením aktivity letokruhů borovice osinaté
- lze zpětně vystopovat léta zvýšené sluneční aktivity a obsah ^{14}C pak lze korigovat
- poměr radioaktivního uhlíku se udržuje po dobu života organismu (koloběh uhlíku v přírodě)
- v případě, že organismus odumře, řetězec koloběhu se přeruší a radioaktivní uhlík pouze vymírá



datování a určování stáří nerostů

- proměřením aktivity archeologického vzorku obsahujícího uhlík se dá stanovit s jistou přesností datum úmrtí organismu

$$A(t) = A_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

- $A(t)$ - současná měrná aktivita vzorku
- A_0 - rovnovážná měrná aktivita ^{14}C
- t - stáří předmětu, tj. doba od smrti organismu

- starší vzorky mají nízkou aktivitu ^{14}C , která se nedá spolehlivě stanovit



Univerzita obrany
v Brně

Kinetika jaderného rozpadu

datování a určování stáří nerostů

- urychlovačová hmotnostní spektrometrie (Accelerator Mass Spectrometry - AMS)

- metoda slouží k absolutnímu stanovení zbytkového ^{14}C
- vzorek se bombarduje urychlenými ionty Cs^+
- metoda umožňuje datovat vzorky až do 100 000 let
- při tomto stáří obsahuje vzorek cca $3 \cdot 10^5$ atomů ^{14}C

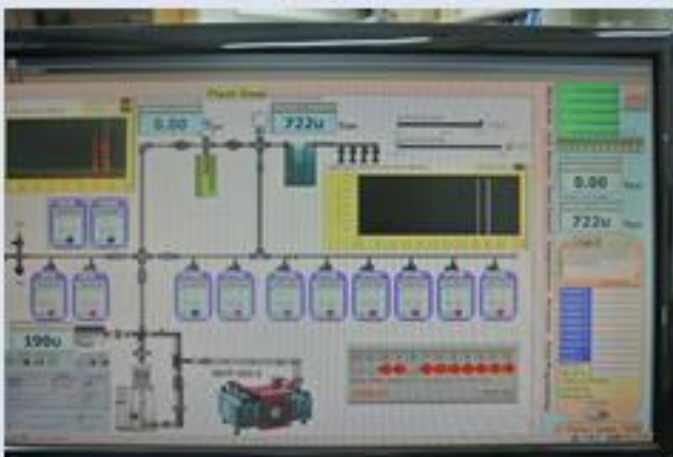


Univerzita obrany
v Brně

Kinetika jaderného rozpadu

datování a určování stáří nerostů

Weizmannův institut, Rehovot, Izrael





datování a určování stáří nerostů

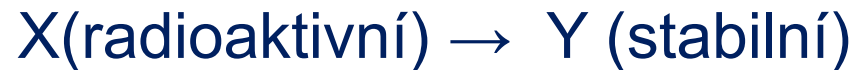
- AMS je použitelná pro určování stáří i jiných kosmogenních nuklidů

stanovovaný nuklid	výskyt	urychlovaná částice	poznámka
^{10}B	mořské sedimenty, polární led	$^{10}\text{B}^{16}\text{O}^-$ $^{10}\text{B}^{3+}$	10^7 atomů
^{36}Cl , ^{129}I	podzemní vody		
^{27}Al	mořské sedimenty		
^3H	uzavřené vody		rovnovážné koncentrace jsou ovlivněny atomovými výbuchy



datování a určování stáří nerostů - jaderná geochronologie

pro hromadění stabilního nuklidu, který vzniká procesem



Ize odvodit vztah $N_Y = N_X (e^{\lambda t} - 1)$

kde N_Y a N_X jsou počty částic dceřiného a mateřského nuklidu v době t , což je doba, která uplynula od krystalizace nerostu



datování a určování stáří nerostů - jaderná geochronologie

- v době krystalizace nerostu je v něm obsažen pouze dlouhodobý radioaktivní nuklid X
- ten se rozpadá a stabilní produkt Y se v nerostu pouze hromadí nepředpokládají se jeho ztráty do okolí, např. difuzí
- známe-li tedy obsah obou nuklidů v době stanovení stáří, pak platí pro stáří nerostu vztah

$$t = \frac{1}{\lambda} \left(\frac{N_Y}{N_X} + 1 \right)$$



datování a určování stáří nerostů - jaderná geochronologie

metoda draslík-argonová



- obsah ${}^{40}\text{K}$ se zjistí z celkového obsahu draslíku a jeho zastoupení v přírodní směsi (0,012 %)
- ${}^{40}\text{Ar}$ se stanoví po zahřátí vzorku v křemenné aparatuře na 2000 °C, uvolněný argon se stanoví hmotnostní spektrometrií
- stáří pozemských hornin je cca $(2-3) \cdot 10^9$ let
- stáří měsíčních hornin a kamenných meteoritů kolem $4,5 \cdot 10^9$ roků



datování a určování stáří nerostů

- jaderná geochronologie - další metody

metoda rubidium-stronciová



- obsah v přírodním Rb je 27,85%

metoda rhenium-osmiová

- pro molybdenity, které obsahují malé množství rhenia



- obsah v přírodním Re je 62,93%



datování a určování stáří nerostů

- jaderná geochronologie - další metody

metoda lutecium-hafniová



- obsah v přírodním Lu je 2,6%

metoda samarium-neodymová



- obsah v přírodním Sm je 14,97%



Univerzita obrany
v Brně

Kinetika jaderného rozpadu

datování a určování stáří nerostů

- jaderná geochronologie - další metody

metoda uranová

- využívá se samovolného štěpení

^{238}U ($T=1.10^{16}$ roků) \rightarrow nuklidy Xe (hm. spektrometrie)

- obsah v přírodním U je 99,3%

odkaz na kurz geochronologie

<https://petrol.natur.cuni.cz/~janousek/izokurz/index.html>