

1. Úvod

A) Vznik a vývoj jaderné chemie

Vznik jaderné chemie lze datovat do období konce 19. století a souvisí s objevem radioaktivity (Becquerel, 1896)

Jaderná chemie je vědní obor, který se zabývá vlastnostmi hmoty a jevy chemické a fyzikální povahy, jejichž původcem je nebo se na nich podílí jádro atomu a jeho přeměny, a který využívá vlastností jádra a jeho projevů ke studiu a řešení chemických problémů.

B) Třídění jaderné chemie

Obecná jaderná chemie

„Radiochemie“

Radiační chemie

Ostatní přidružené disciplíny

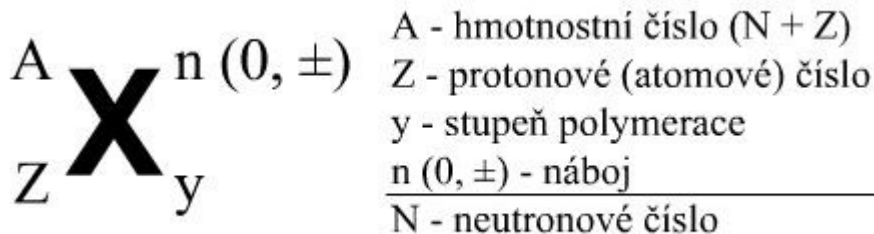
2. Atomové jádro a jeho stabilita

Atom je nejmenší hmotnou a **chemicky nedělitelnou částicí**.

Je tvořen **jádrem**, které obsahuje protony a neutrony, a **elektronovým obalem**.

Elementární částice tvořící atom				
Elementární částice	Objevitel (rok)	Hmotnost	Náboj e/C	Symbol
		m/u		
proton	Rutherford (1920)	1,0072	kladný $1,60210 \cdot 10^{-19}$	p^+ nebo 1_1p
neutron	Chadwick (1932)	1,0086	nemá náboj	n^0 nebo 1_0n
elektron	Thomson (1897)	$5,4857 \cdot 10^{-4}$	záporný $1,60210 \cdot 10^{-19}$	e^- nebo ${}^0_{-1}e$

- **protonové (atomové) číslo Z** (počet protonů v jádře),
- **neutronové číslo N** udává počet neutronů



- Soubor atomů, které mají stejné atomové číslo Z (N mohou mít různé) se nazývá **prvkem**
- Soubor naprosto identických atomů, které mají stejné atomové číslo Z a neutronové číslo N, přičemž $Z \neq A$ (jediná výjimka je jádro lehkého vodíku ^1_1H), se nazývá **nuklidem**
- Pojem **izotop** je nutno na rozdíl od pojmu nuklid chápat spíše kvalitativně. Tento pojem vyjadřuje skutečnost, že prvek je tvořen několika typy jader, tedy atomy, které mají stejné Z, ale mohou se lišit počtem neutronů v jádře. Použití pojmu izotop (izotopy) snad nejlépe vyplývá z tvrzení: Vodík je přírodě zastoupen třemi izotopy. Jsou to nuklidy ^1_1H , ^2_1H a ^3_1H .

3. RADIOAKTIVITA

Radioaktivita je projevem nukleární nestability jader. Spočívá v jejich přeměně na jiný nuklid, přičemž dochází současně k eliminaci některé z elementárních částic, ev. jejich skupin, z prostoru rozpadajícího se jádra.



mateřské **dceřiné jádro**

Pro radioaktivní rozpad platí následující charakteristiky:

- přeměna je děj samovolný (spontánní)
- nezávisí na chemickém stavu atomu
- platí zákon zachování hmotnosti a energie
- platí zákon zachování nukleonového a atomového čísla

$$\mathbf{A} = \mathbf{A}_1 + \mathbf{A}_2 ; \quad \mathbf{Z} = \mathbf{Z}_1 + \mathbf{Z}_2$$

- při radioaktivní přeměně se **vždy** uvolňuje energie (**exoergický děj**)

4 . TYPY RADIOAKTIVNÍCH PŘEMĚN

- přeměna se zachováním **A, Z** se mění (**β přeměny**)
- přeměny se současnou změnou **A i Z** (**přeměny α, emise nukleonu nebo těžších jader, samovolné štěpení**)
- přeměny spojené s pouhou deexcitací jádra (**A i Z zůstává zachováno**) – **přeměny γ, vnitřní konverze**

Elementární částice při radioaktivní přeměně	Symbol částice	Typ radioaktivního rozpadu
jádro ${}^4_2\text{He}$ (helion)	α	α - proces
elektron pozitron (kladný elektron)	β^- β^+	β - proces (negatronová nebo pozitronová přeměna)
foton	γ	γ - proces
neutron	n	samovolné štěpení

Přeměny β

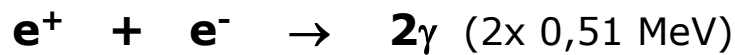
Typ interakce	Zprostředkování slabé interakce mezi nukleony	Chemická změna (Fajans-Soddyho posunová pravidla)
přeměna β^- (negatronová přeměna)	$n \rightarrow p^+ + e^- + \tilde{\nu}_e$	${}^A_Z X \xrightarrow{\beta^-} {}^A_{Z+1} Y^+ + e^- + \tilde{\nu}_e$
přeměna β^+ (pozitronová přeměna)	$p^+ \rightarrow n + e^+ + \nu_e$	${}^A_Z X \xrightarrow{\beta^+} {}^A_{Z-1} Y^- + e^+ + \nu_e$
elektronový záchyt (EZ)	$p^+ + e^- \rightarrow n + \nu_e$	${}^A_Z X \xrightarrow{EZ} {}^A_{Z-1} Y + \nu_e$

Pozn.: $\tilde{\nu}_e$ - elektronové antineutrino
 ν_e - elektronové neutrino

Tok vznikajících leptonů, tj. elektronů nebo pozitronů, se pak nazývá **zářením β^-** , resp. **β^+** .

Pozitronová přeměna se vyskytuje pouze u nuklidů připravených jadernými reakcemi s relativním nadbytkem protonů.

Pozitron (antičástice elektronu) je poměrně nestálý ($\sim 10^{-10}$ s), po zpomalení srážkami dochází k interakci s elektronem (**anihilační reakce**)



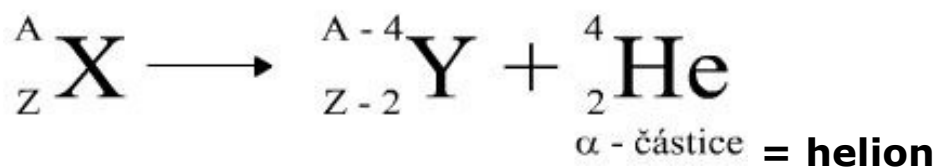
vznikající fotony se využívají při měření pozitronických radioaktivních nuklidů

Př.

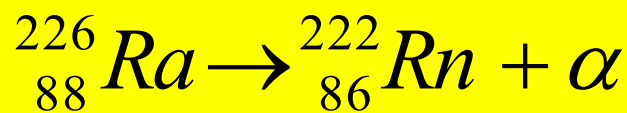


Přeměna α

Přeměna α je typická pro těžká přirozená i umělá jádra, kde je silné odpuzování protonů v jádrech.



Př:



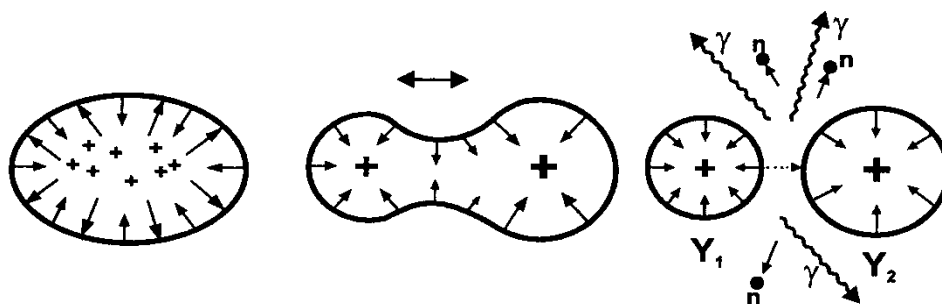
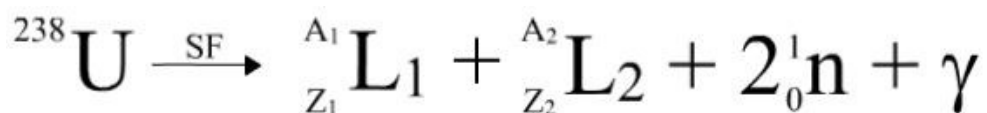
Vznikající částice α :

- má vysokou střední vazebnou energii (stabilní částice)
- relativně vysokou hmotnost

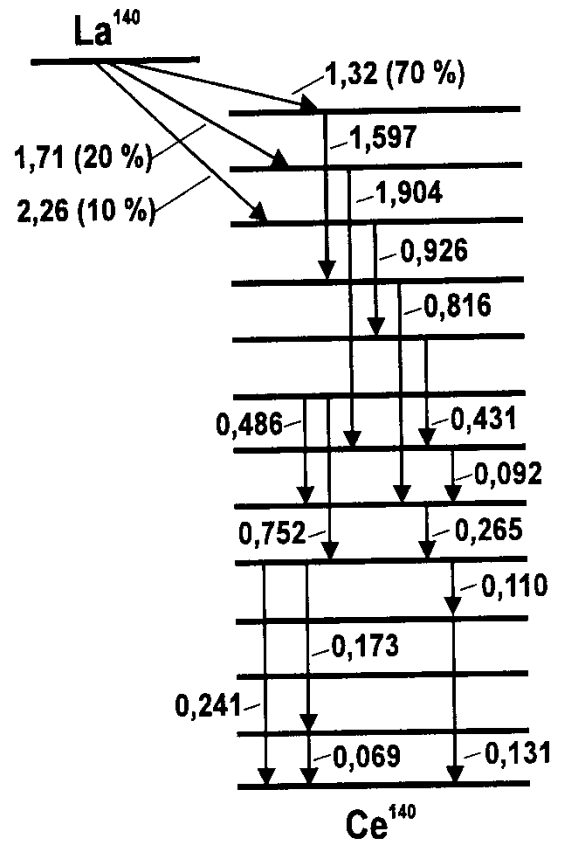
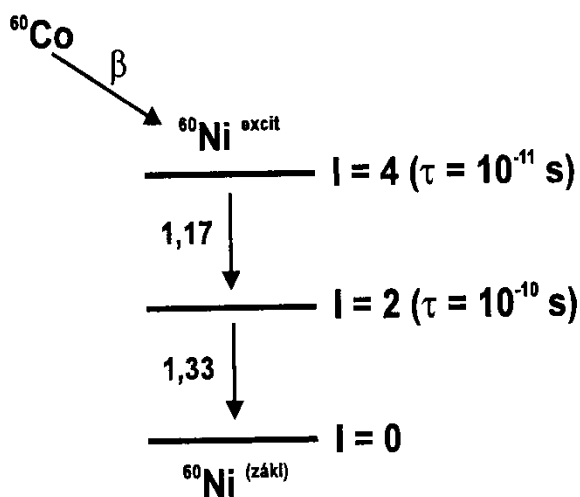
Samovolné štěpení

se vyskytuje u jader:

- s vysokým počtem protonů
- s elipsoidním tvarem jádra
- musí platit hmotnostní podmínka
- vznikají přitom **2** tzv. **trosky** a zpravidla **2-3 neutrony**
- jde zpravidla o konkurenční reakci k procesu α



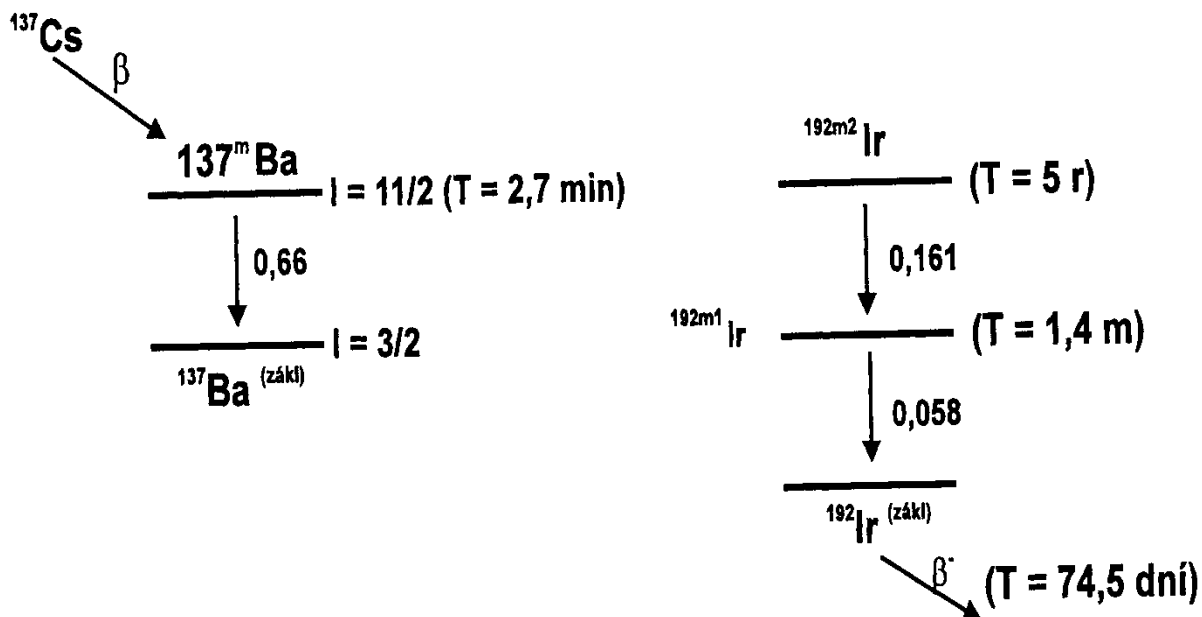
Přeměnová schemata



Přeměna γ + vnitřní konverze

- vyskytuje se často u excitovaných jader
- **deexcitace** probíhá vyzářením jednoho nebo více fotonů elektromagnetického záření
- emise fotonů je dějem mezi diskrétními energetickými stavy o určité energii \Rightarrow spektrum γ je čárové

- deexcitace může nastat postupnou emisí několika **femise**



fotonů se projevív delším poločasem deexcitace

10^{-3} s až roky) – **zpožděná emise γ záření (vznik jaderných izomerů)**

- emise γ záření je velmi významná – umožňuje měření aktivity nuklidů, slouží k jejich identifikaci

- zdroje γ záření

^{60}Co , ^{137}Cs , $^{192\text{m}}\text{Ir}$

5. 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):

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

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

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
- Velikost konstanty λ 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**

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.

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

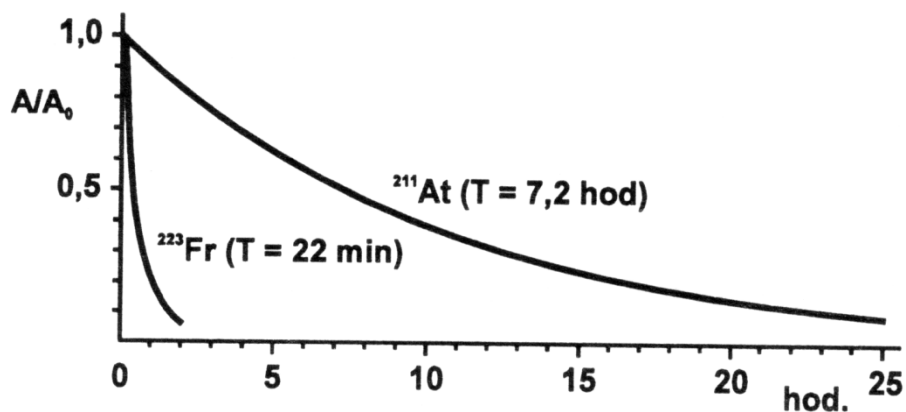
Poločas přeměny $T_{1/2}$ je čas, za který se přemění právě polovina z přítomného počtu atomů radionuklidu.

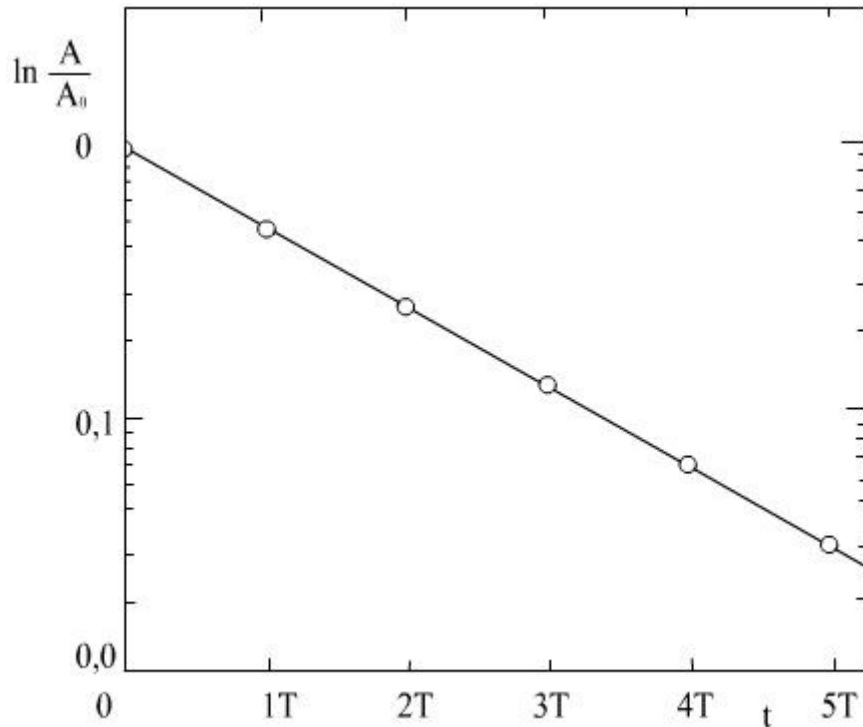
Jeho souvislost s přeměnovou konstantou vyplývá z následujícího odvození:

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

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

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





6. DATOVÁNÍ A URČOVÁNÍ STÁŘÍ NEROSTŮ

A) Datování s využitím kosmogenních nuklidů

UHLÍKOVÁ METODA

- ^{14}C se tvoří v horních vrstvách atmosféry $^{14}\text{N} (n,p) ^{14}\text{C}$
- je založena na změně aktivity ^{14}C
- datovat lze předměty cca do 40 000-50 000 let
- 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 $^{14}\text{C} \Rightarrow$ jeho zastoupení v přírodě dáno hlavně rovnováhou mezi ^{14}C a atmosféře a oceánech a je konstantní:

**na 1 g uhlíku v živé hmotě připadá
15,3 rozpadu za minutu (rovnovážná měrná aktivita)**

- 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 – obsah ^{14}C pak lze korigovat
- poměr radioaktivního uhlíku se udržuje po dobu života organismu (koloběh uhlíku v přírodě)
- starší vzorky mají nízkou aktivitu ^{14}C , která se nedá spolehlivě stanovit

Datování - radiokarbonová metoda

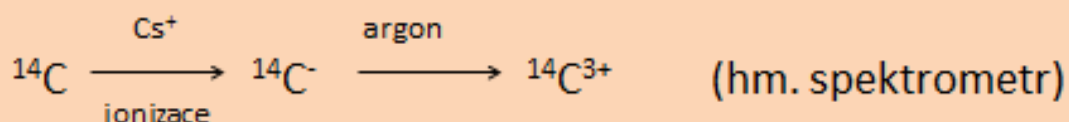
- poměr radioaktivního uhlíku se udržuje po dobu života organismu (koloběh uhlíku v přírodě)
- v případě, že organismus odumře, řetězec koloběhu se přeruší a radioaktivní uhlík pouze vymírá - proměřením aktivity archeologického vzorku obsahujícího uhlík se dá stanovit s jistou přesností datum úmrtí organismu

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

- tato metoda umožňuje datovat vzorky až do 100 000 let (při tomto stáří obsahuje vzorek cca $3 \cdot 10^5$ atomů ^{14}C)

Starší vzorky mají nízkou aktivitu ^{14}C , která se nedá spolehlivě stanovit ⇒

Urychlovačová hmotnostní spektrometrie



Weizmannův institut, Rehovot, Izrael

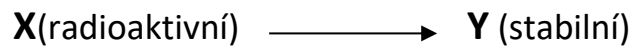


Lineární urychlovač spojený s detekcí pomocí hmotnostní spektrometrie



Jaderná chronologie – určování stáří nerostů

Pro hromadění stabilního nuklidu, který vzniká procesem



Lze odvodit vztah (Hála str. 59-60):
$$N_Y = N_X (e^{\lambda t} - 1)$$

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

Předpokládá se totiž, že:

- v době krystalizace nerostu je v něm obsažen pouze dlouhodobý radioaktivní nuklid **X**
- ten se rozpadá a stabilní produkt rozpadu **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

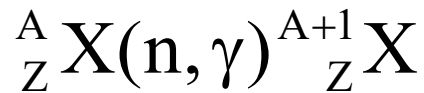
$$t = \frac{1}{\lambda} \left(\frac{N_Y}{N_X} + 1 \right)$$

Metoda draslík-argonová



- obsah ^{40}K se zjistí z celkového obsahu draslíku a jeho zastoupení v přírodní směsi (0,012 %)
- ^{40}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**

Reakce (n, γ) – radiační záchyt neutronu



- produktem je izotop terčového jádra, protože nízká excitační energie složeného jádra nestačí k uvolnění nukleonu – deexcitace probíhá vyzářením fotonu γ
- zvýšený počet neutronů vede často k nuklidům, které podléhají přeměnám β -
- reakce má praktický význam pro průmyslovou produkci radionuklidů (výroba ${}^{32}\text{P}$, ${}^{60}\text{Co}$ aj.)

Využití jaderných reakcí pro kvalitativní a kvantitativní chemickou analýzu (Aktivační analýza)

- využívá se známé jaderné reakce terčového jádra
- proměří se radioaktivní charakteristiky nuklidu vzniklého touto reakcí (gama spektrum apod.) --tímto způsobem se identifikuje terčový nuklid
- z velikosti aktivity pak lze soudit na kvantitu prvku
- k vyhodnocení kvantity slouží standardy o známé hmotnosti, které se ozařují za stejných podmínek

Neutronová aktivační analýza

- (n, γ) probíhající v jaderném reaktoru (vysoký tok neutronů)
- vysoká citlivost (jako důsledek velkých účinných průřezů)
- lze analyzovat více složek najednou
- záření nuklidů vzniklých aktivací se analyzuje polovodičovým detektorem

- nedestruktivní analýza přímo v ozářeném vzorku (měření lze automatizovat)
- v případech příliš složitých směsí je nutno vzorek chemicky dělit (extrakce, ionexy aj.)

8. OCHRANA PŘED IONIZUJÍCÍM ZÁŘENÍM

Při práci se zdroji záření spočívá v zeslabení dávky záření na hodnotu, při níž je riziko ozáření sníženo na zanedbatelnou hodnotu:

- udržování patřičné vzdálenosti od zdroje
- odstínění zdroje
- co nejkratší doba pobytu v prostoru zdroje

Ochrana vzdáleností:

$$I = \frac{I_0}{4\pi l^2}$$

(tok částic klesá o 3 řády při změně vzdálenosti z 1→32 cm)

Ochrana stíněním:

- využívá se vždy
- výjimkou jsou α -zářiče (absorbují se ve skle, obalech)
- materiál vhodné tloušťky

β -záření (1-2 cm vrstva hliníku, skla, plexiskla)

brzdné záření, γ -záření, rtg záření, pozitronové zářiče (vrstva olova, barytu, oceli)

neutronové záření (ochrana spočívá v jejich zpomalení látkami s vysokým obsahem vodíku - parafin, polyethylen, záření γ , které vzniká při konečné absorpci zpomalených neutronů reakcí (n,γ) se odstíní vrstvou olova.

MĚŘENÍ IONIZUJÍCÍHO ZÁŘENÍ

Záření je nutno měřit při:

- každém použití radionuklidů či jiného zdroje ionizujícího záření
- měření dávek v dozimetrické kontrole
- průmyslovém nebo léčebném ozařování
- monitorování radioaktivity v životním prostředí

Nebezpečnost ionizujícího záření je dána:

- jeho neviditelností
- není vnímáno ani jinými smysly

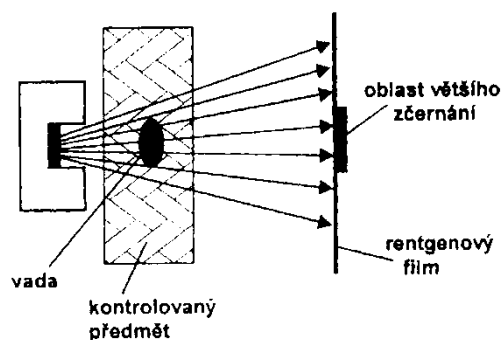
Měření ionizujícího záření:

- je dáno jeho interakcí s hmotou a procesy, které záření vyvolává při absorpci v hmotě
- je prováděno elektronicky, fotograficky, optickými spektrálními metodami (rtg.) aj.

9. Využití fyzikálních vlastností ionizujícího záření v praxi

Gama radiografie

– slouží ke zjišťování vad a nehomogenity v kovových předmětech (metoda je podobná rtg diagnostickým metodám v lékařství) – kontrola svárů potrubí apod.
zdroj: ^{60}Co , ^{192}Ir

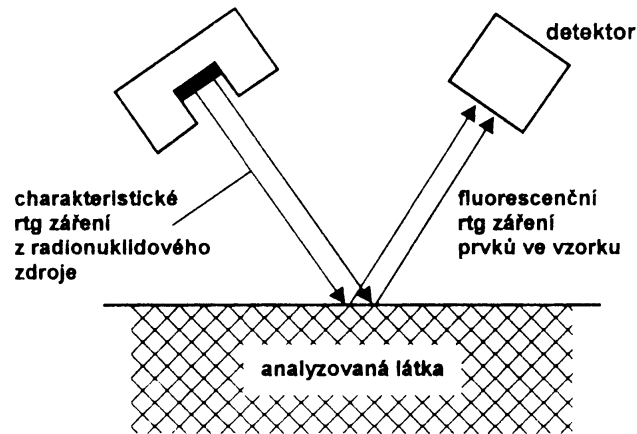


Gama radiografie.

Fluorescenční rtg. analýza

- rtg. nebo γ -záření o $E < 100$ keV se při průchodu hmotou absorbuje převážně fotoefektem \Rightarrow následuje emise **charakteristického rtg záření** (fluorescenční záření)
- energie tohoto záření závisí na atomovém čísle atomu (**Moseleyho zákon**)
- z polohy jednotlivých linií se určí kvalitativní složení atomů tvořících vzorek
- z intenzity pak lze soudit na kvantitativní zastoupení

- radionuklidová fluorescenční rtg analýza (**XRF**) využívá ke stanovení prvků ve vzorku radionuklidový zdroj rtg. záření



Radionuklidová rentgenová fluorescenční analýza.

- metoda je velmi citlivá a univerzální, lze stanovit všechny prvky počínaje Mg
- zařízení může existovat v mobilní (přenosné) formě
- analýza slitin, rudných koncentrátů a hornin

Emisi fluorescenčního rtg záření lze vyvolat i protony urychlenými na energii 1-3 MeV

- tyto protony interagují s absorbuující látkou, vyrážejí z vnitřních orbitalů atomů elektrony ⇒ vznik charakteristického rtg záření
- komerční metoda pro stanovení prvků od Al se nazývá **PIXE** (proton induced X-ray emission)
- tato metoda je velmi citlivá a umožňuje stanovit prvky na ploše několika μm^2 – **protonová mikrosonda**
- užití při analýze malých zrněk minerálů v horninách, mikrostruktur v elektronice a studia chemické nehomogenity povrchů

10. Chemické účinky ionizujícího záření

Jde o chemické změny vyvolané absorpcí ionizujícího záření v látkách ⇒ **radiačně - chemické reakce**

RADIAČNÍ CHEMIE

- chemické změny v látkách jsou důsledkem tzv. **radiolýzy** (rozklad látek účinkem záření)
- společně s radiolýzou však mohou probíhat i **reakce syntetické** mezi zpravidla velmi reaktivními produkty radiolýzy

A. vliv záření na polymery

Záření vyvolává v hotových polymerech následné reakce:

- **zesítování** – PE, kaučuky, silikonové kaučuky, polyamidy
- **degradaci** – nepříznivý vliv, zhoršují se vlastnosti polymerů

Radiační polymerace (nejčastěji pomocí ^{60}Co)

- působením záření na monomery vznikají radikály, které startují polymerační reakce
- konzervace předmětů kulturního dědictví po jejich poškození atmosférickými vlivy nebo škůdci (monomer se nechá vsáknout do předmětu a pak se zpolymeruje ozářením)

- povrchové radiační roubování (na povrch polymeru, skla, kamene apod. se nanese tenká vrstva monomeru a „naroubuje“ se na podklad ozářením)
- tento postup zlepšuje vlastnosti materiálu – zvyšuje se odolnost, nehořlavost, barvitelnost, hydrofobnost nebo naopak hydrofilnost apod.
- vytvrzování nátěrových hmot ozářením
- ozářené polymerní fólie mají zlepšenou schopnost potisku, metalizace apod.
- textilní tkaniny se vyznačují sníženou mačkavostí a zvýšenou barvitelností
- ve farmacii se na nosič roubováním dodá aktivní složka, která se pak postupně v těle uvolňuje

11. Biologické účinky ionizujícího záření

- jsou studovány od počátku 20. století, kdy bylo zjištěno, že záření (i rtg) poškozuje kůži
- obecně lze konstatovat, že účinky jsou nepříznivé, v některých případech je však i pozitivní
- vliv záření je rozdílný podle druhu organismu

Druhy působení ionizujícího záření na buňku

(buňka je chápána jako vodný roztok solí a nízkomolekulárních látek, v němž jsou dispergovány látky makromolekulární)

A) Přímý účinek

- je dán přímým zásahem makromolekuly ionizující částicí nebo sekundárním elektronem při ozařování γ nebo rtg zářením
- zvláště nebezpečný je zásah nukleových kyselin v jádře, kde dochází k jejich degradaci

B) Nepřímý účinek

- je dán především radiolýzou vody a chápou se tak účinky produktů této radiolýzy na obsah buňky

12. Účinky ionizujícího záření na lidský organismus

A) Nestochastické účinky

- Projeví se po ozáření zpravidla celého těla (jednorázově) takovou ekvivalentní dávkou, která vyvolá v zasaženém jedinci během krátké doby klinicky pozorovatelné účinky
- Klinicky pozorovatelný účinek se objeví proto, že se nestačí uplatnit opravné mechanismy
- Existuje jistá **prahová dávka** pro vznik poškození, které se zjistí při jednorázovém ozáření skupiny osob z 1-5%

Mezi nestochastické účinky patří:

- Akutní nemoc z ozáření **při celotělovém ozáření vysokými dávkami (poruchy krvetvorby, trávicího ústrojí nebo CNS)**

Nemoc se projevuje při ozáření ekvivalentní dávkou cca **2 Sv**, prahová hodnota je **1 Sv**

Projevy:

- **1. fáze:** nevolnost, skleslost, bolesti hlavy, změny v krevním obraze
- **2. fáze:** období latence
- **3. fáze:** rozvinutí počátečních příznaků, padání vlasů, vnitřní krvácení, náchylnost k infekcím.

Při ozáření dávkou >6 Sv: (4-6 dní)

- převládá **hematologická forma nemoci** (poškození kostní dřeně a krvetvorby)
- při vyšších dávkách i **forma střevní** (odumírání střevní výstelky)
- pravděpodobnost úmrtí je 80 %, při dávkách >10 Sv je 100 %

Ozáření dávkou vyšší než 50 Sv – **neurologická forma nemoci** (psychická dezorientovanost, zmatenost, křeče, bezvědomí, smrt během několika hodin či dní)

- **lokální akutní poškození kůže** (radiační dermatitida)

(prahová dávka 3 Sv, nejčastější typ při nehodách se zdroji záření)

- **zarudnutí kůže**
- **hlubší poškození kožní tkáně**
- **vznik vředů**

➤ **poškození plodu (prahová dávka 0,05 Sv)**

➤ **poruchy plodnosti**

u mužů je prahová dávka 0,1 – 1 Sv

u žen min. 1,5 Sv

➤ **zákal oční čočky (prahová dávka 1,5-2 Sv)**

B) Stochastické účinky (náhodné)

- Jsou důsledkem poškození malého počtu buněk (stačí jen jediné)
- Mohou se projevit při jednorázovém ozáření podprahovou dávkou z hlediska nestochastických účinků nebo při chronickém ozařování určité tkáně nebo celého těla malými dávkami
- Podprahové dávky nevyvolávají v krátké době po ozáření žádné klinicky pozorovatelné poškození, ale mohou způsobit s jistou pravděpodobností poškození za delší dobu
- Stochastické účinky ozáření se projevují za delší dobu po léčbě nádorů ozařováním

Projevy:

- nádorová onemocnění (latentní období 10-40 let)
- leukémie (latentní období 5-20 let)
- genetické poškození další generace

C) Účinky ionizujícího záření na hmyz

- hmyz je vůči působení ionizujícího záření více než 100x odolnější než obratlovci
- ozáření hmyzu

Potemník (při ochraně skladovaného obilí)	100 Gy	sterilizace
	$5 \cdot 10^3$ Gy	usmrcení
Dřevokazný hmyz (červotoči, tesaříci)	500 Gy	usmrcení

- hubení hmyzu v přírodě spočívá ve vypěstování a vypouštění sterilních sameček v množství, které převyšuje jejich přirozený výskyt

D) Účinky ionizujícího záření na mikroorganismy

- **radiační sterilizace**
 - zdravotnický materiál**
 - desinfekce kalů z odpadních vod**
 - radiační ošetření potravin (prodloužení doby jejich trvanlivosti – potraviny se ozařují zmražené)**

E) Účinky ionizujícího záření na rostliny

- **Ozařování semen vede k užitečným mutacím (radiační šlechtění)**
- **ozáření vede k omezení klíčivosti (např. u brambor)**