

2.2 RADIOAKTIVITA

V této kapitole se dozvíte:

- o podstatě radioaktivity;
- o typech a vlastnostech radioaktivního záření;
- o typech a zákonitostech radioaktivních přeměn;
- co to jsou řady radioaktivních přeměn;
- jak posuzujeme stabilitu jader a která jádra jsou stabilní.

Budete schopni:

- definovat pojem radioaktivita;
- objasnit, proč jsou některá jádra radioaktivní;
- vyjmenovat jednotlivé druhy radioaktivního záření a uvést jejich vlastnosti;
- uvést jednotlivé typy radioaktivních přeměn a zákonitosti, jimiž se řídí;
- vysvětlit pojmy radioaktivní přeměnová řada, nakreslit hrubý tvar grafu stability jader a závislosti vazebné energie na jeden nukleon na nukleonovém čísle a objasnit na těchto grafech stabilitu jader.

Klíčová slova této kapitoly:

radioaktivita, radioaktivní záření, radioaktivní přeměna, poločas radioaktivní přeměny, graf stability jader



Čas potřebný k prostudování učiva kapitoly:

2 + 2 hodiny (teorie + řešení úloh)

Radioaktivitu objevil v roce 1895 A. H. Becquerel při výzkumu fosforescence látek. Zjistil, že některé látky vyzařovaly záření, které obdobně jako světlo způsobovalo zčernání fotografické emulze.

Radioaktivita

Jev samovolné (spontánní) jaderné přeměny radionuklidu (tzv. **radioaktivní přeměny**), která je doprovázena emisí **radioaktivního záření** α , β^+ nebo β^- , γ , záchytem elektronů, emisí protonů nebo emisí fragmentů.



Poznámky:

- *Radioaktivní přeměna* se též označuje jako radioaktivní transmutace.
- Radioaktivita přirozených (v přírodě se nacházejících), resp. umělých (laboratorně připravených) radionuklidů se označuje **jako přirozená, resp. umělá radioaktivita.**

2.2.1 DRUHY RADIOAKTIVNÍHO ZÁŘENÍ

Při radioaktivních přeměnách můžeme pozorovat níže uvedené druhy záření.

**Záření alfa**

je tok jader ${}^4\text{He}$ (označují se též jako **částice α**) emitovaných jádrem při jaderných přeměnách.

Rychlost částic alfa při radioaktivních přeměnách se pohybuje okolo 20 000 km/s.

**Záření beta**

je tok elektronů (neboli částic β^-), resp. pozitronů (neboli částic β^+) emitovaných jádrem při jaderných přeměnách.

Částice beta emitované při radioaktivních přeměnách mají rychlosti asi 280 000 km/s.

**Záření gama**

je elektromagnetické záření krátkých vlnových délek $\lambda \leq 10^{-10}$ m (fotonů s vysokou energií) emitované při jaderných přeměnách. Jedná se o pronikavé záření.

Poznámky:

- Výše uvedené typy záření nemusí být pozorovány pouze u radioaktivních přeměn, ale mohou doprovázet libovolný typ jaderných přeměn, tzn. včetně jaderných reakcí, nebo dokonce přeměny elementárních částic. V tomto obecném smyslu pak většinou hovoříme o **jaderném záření.**
- Jako záření beta se označuje také proud elektronů, jehož zdrojem je urychlovač elementárních částic.
- Pod pojem záření gama se často zahrnuje také brzdné záření relativistických částic.

- Obor vlnových délek záření gama se překrývá s oborem záření X neboli rentgenového záření (vlnové délky 10^{-11} až 10^{-8} m). Rentgenové záření ale vzniká při přechodech v elektronovém obalu atomu, případně též jako brzdné záření elektronů v látce. V principu by bylo možné odlišit fotony záření γ delších vlnových délek a fotony záření X pouze na základě porovnání spekter.

2.2.2 TYPY RADIOAKTIVNÍCH PŘEMĚN

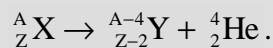
Rozlišujeme následující typy radioaktivních přeměn:

- *přeměna alfa,*
- *přeměna beta plus,*
- *přeměna beta minus,*
- *elektronový záchyt,*
- *přeměna s emisí protonů,*
- *přeměna s emisí fragmentů jader.*

Přeměna alfa



je typ radioaktivní přeměny charakterizovaný emisí záření α . Jde o jadernou přeměnu probíhající podle obecného schématu



Energetické spektrum záření α je diskrétní (čárové). Samovolná přeměna podle uvedeného schématu probíhá pouze za předpokladu, že *separační energie přeměny alfa* S_α je záporná neboli

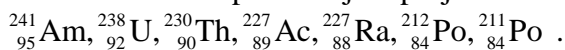
$$S_\alpha(A, Z) = c^2[M(A-4, Z-2) + M(4, 2) - M(A, Z)] < 0,$$

kde $M(A, Z)$ je obecné označení klidové hmotnosti jádra s protonovým číslem Z a nukleonovým číslem A . Výše uvedená podmínka je vyjádřením skutečnosti, že u samovolné přeměny dochází ke snížení celkové klidové energie systému, a to její přeměnou na kinetickou energii produktů přeměny.

Příklady přeměn alfa



Přeměnou alfa se přeměňují např. jádra:



Úkol k textu

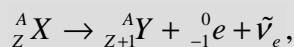
Určete dceřinné nuklidy vznikající přeměnou radionuklidů z předchozího příkladu. Určete i příslušné separační energie.





Přeměna beta minus

je typ radioaktivní přeměny charakterizovaný emisí záření β^- . Jde o jadernou přeměnu probíhající podle obecného schématu

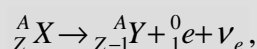


při které vzniká **elektron** ${}^0_{-1} e$ a **elektronové antineutrino** $\tilde{\nu}_e$.



Přeměna beta plus

je typ radioaktivní přeměny charakterizovaný emisí záření β^+ . Jde o jadernou přeměnu probíhající podle obecného schématu



při které vzniká **pozitron** ${}^0_{+1} e$ a **elektronové neutrino** ν_e .

Pozitron je antičástice elektronu, která má stejnou klidovou hmotnost, ale opačné znaménko elektrického náboje. **Neutrino** a **antineutrino** jsou neutrální částice, jejichž hmotnost je nulová nebo velmi malá. Vzhledem k těmto vlastnostem se neutrino, resp. antineutrino, neobjeví v bilanci elektrického náboje a klidové hmotnosti. Musíme ale započítat jejich kinetickou energii, resp. hybnost, v rámci zákona zachování energie, resp. zákona zachování hybnosti.

Energetické spektrum záření β^\pm je spojité. Podmínkou samovolné přeměny je opět záporná hodnota příslušné separační energie:

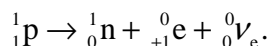
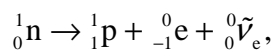
$$S_{\beta^-}(A, Z) = c^2 [M(A, Z+1) + m_e - M(A, Z)] < 0,$$

$$S_{\beta^+}(A, Z) = c^2 [M(A, Z-1) + m_e - M(A, Z)] < 0.$$

Přeměna beta je vyvolána novým typem interakce, který se označuje jako **slabá interakce**.

Podstata přeměny beta

Podstatou této přeměny je přeměna nukleonů v jádře, a to neutronu na proton a naopak podle schémat



Vidíme, že neutron, resp. proton, který je v jádře na vyšší energetické hladině, se může přeměnit na proton, resp. neutron, na nižší energetické hladině.

Poznámka:

- V případě volných nukleonů se samovolně přeměňuje pouze volný neutron na proton, který má nižší klidovou energii než neutron, a to podle horního schématu. Volný proton je dle standardních teorií stabilní.

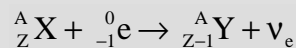
Příklady přeměn beta

Přeměnou β^- se přeměňuje např. tritium ${}^3_1\text{H}$ na ${}^3_2\text{He}$. Přeměnou β^+ se přeměňuje neklid ${}^{30}_{15}\text{P}$, který je uměle připraven reakcí ${}^4_2\alpha + {}^{27}_{13}\text{Al} \rightarrow {}^{30}_{15}\text{P} + {}^1_0\text{n}$, na ${}^{30}_{14}\text{Si}$.

Jádro ${}^{80}_{35}\text{Br}$ se může přeměňovat přeměnou beta plus, beta minus a navíc i záchytem elektronu.

**Záchyt elektronu**

(též záchyt K) je jaderná přeměna, při níž dochází k zachycení a pohlcení elektronu slupky K jádrem. Přeměna probíhá podle schématu



Přestože přeměna jádra musí být v tomto případě vyvolána jinou částicí (elektronem), může proces v případě, že jádro je součástí atomu (tj. má elektronový obal), proběhnout samovolně. Bývá proto zvykem řadit záchyt elektronu mezi radioaktivní přeměny.

Záchyt elektronu se projevuje buď následným charakteristickým rentgenovým zářením nebo emisí Augerových elektronů. Ve většině případů je jádro Y v excitovaném stavu, proto následuje přechod do stavu základního spojený nejčastěji s vyzářením fotonu záření γ (přechod γ). Celý proces se tak jeví jako radiační záchyt elektronu.

Úkol k textu

Určete, na jaké nuklidy se může přeměnit ${}^{80}_{35}\text{Br}$ z předchozího příkladu. Určete i příslušné separační energie.



Kromě výše uvedených radioaktivních přeměn, které jsou jadernými přeměnami v tom smyslu, že při nich dochází ke změně typu jádra (změna čísel Z, A), se zde často formálně zařazují i procesy, ve kterých dochází pouze ke změně energetického stavu jádra. Jedná se o **deexcitaci jádra**, tj. přechod z excitovaného stavu (všechny energetické stavy kromě základního) do stavu základního, což je stav s nejnižší energií.

2.2.3 DEEXCITACE JADER

Po radioaktivních přeměnách, které vedou ke změně ve složení atomového jádra (např. přeměny α , β , záchyt K), může vzniknout jádro v excitovaném stavu, proto dochází k deexcitaci, buď formou **přechodu gama**, nebo **vnitřní konverzí**.



Přechod gama

(též emise γ) je proces deexcitace atomového jádra emisí fotonu záření γ .

Energetické spektrum záření γ je diskrétní (čárové). Protože záření γ je jeden z typů radioaktivního záření, řadí se často přechod gama nevhodně mezi radioaktivní přeměny. V případě přechodu gama však nedochází ke změně ve složení atomového jádra (tj. změně protonového a neutronového čísla).



Vnitřní konverze

proces deexcitace atomového jádra, při kterém se energie excitovaného jádra předá prostřednictvím přímé elektromagnetické interakce některému z elektronů atomového obalu a ten z atomu vylétá.

Vnitřní konverze je konkurujícím procesem *přechodu* γ . Energetické spektrum konverzních elektronů je diskrétní (čárové).

Poznámka:

- Pojmenování jevu pochází z historického označení „vnitřní konverze záření γ “, které vzniklo na základě mylné domněnky, že k emisi elektronů dochází v důsledku absorpce fotonu γ , který je emitován jádrem (viz přechod gama), v atomovém obalu. I když i k tomuto procesu může docházet, jeho podíl na emisi elektronů je zanedbatelný.

2.2.4 ZÁKON RADIOAKTIVNÍ PŘEMĚNY

Nejdříve si definujeme veličinu, která charakterizuje rychlost radioaktivní přeměny, tzv. aktivitu.



Aktivita A

(neboli aktivita zářiče) je úbytek počtu dosud nepřeměněných jader za časovou jednotku. Pro daný čas t je aktivita A definována vztahem

$$A(t) = -\frac{dN(t)}{dt},$$

kde $N(t)$ je počet dosud nepřeměněných jader.

Jednotkou aktivity je becquerel, značka Bq, rozměr jednotky je s^{-1} .

Poznámky:

- Dá se říci, že *aktivita* udává rychlost přeměny radionuklidu na výsledný nuklid.
- Úbytek počtu dosud nepřeměněných jader je roven přírůstku produktů radioaktivní přeměny. Určuje tedy i počet přeměn za časovou jednotku a

těž počet částic radioaktivního záření (α , β) emitovaných zářičem za časovou jednotku.

- Ve starší literatuře se objevuje jednotka aktivity curie ($1\text{Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{Bq}$), která se již nemá používat.

Pro praktické účely se definuje tzv. hmotnostní aktivita.

Hmotnostní aktivita a

(neboli měrná aktivita) je definována jako podíl aktivity a celkové hmotnosti radioaktivní látky, tzn. součtu hmotností všech radionuklidů i stabilních nuklidů v látce obsažených.

Nyní přistupme k formulaci zákona radioaktivní přeměny. Nestabilní jádra se samovolně přeměňují na jádra jiná pouze s určitou pravděpodobností (je to důsledek platnosti zákonů kvantové mechaniky). Proto se ve vzorku radioaktivní látky nepřemění všechna jádra najednou, ale postupně, takže stále ubývá počet atomů této výchozí látky. Příslušnému úbytku odpovídá přírůstek atomů produktů přeměny. Děje se tak podle následujícího zákona.

Zákon radioaktivní přeměny

Podle tohoto zákona je aktivita zářiče A přímo úměrná počtu dosud nepřeměněných jader N daného radionuklidu, tedy

$$A(t) = \lambda N(t),$$

kde λ je **přeměnová konstanta** pro daný radionuklid.



Tento zákon můžeme vyjádřit rovněž v diferenciálním tvaru

$$-\frac{dN(t)}{dt} = \lambda N(t)$$

nebo v exponenciálním tvaru

$$N(t) = N(0)e^{-\lambda t},$$

který dostaneme integrací diferenciálního tvaru zákona. Zákon má statistický charakter, lze jej tedy použít pouze pro velké soubory nuklidů.

Úkol k textu

Odvoďte exponenciální tvar zákona z diferenciálního tvaru. Hledáte vlastně řešení příslušné diferenciální rovnice pro $N(t)$ metodou separace proměnných. Pokud si s úkolem nevíte rady, alespoň se přesvědčte dosazením, že uvedená exponenciální závislost diferenciálnímu tvaru zákona vyhovuje.



Konstanta radioaktivní přeměny λ

(též přeměnová konstanta) je konstanta úměrnosti, která vystupuje v zákonu radioaktivní přeměny. Charakterizuje průběh a rychlost radioaktivní přeměny.



Poznámka:

- Dlouho se tradovalo, že je to konstanta nezávislá na všech fyzikálních a chemických podmínkách. Ukázalo se však, že při procesech, kterých se bezprostředně účastní elektrony obalu (záchyt elektronu, vnitřní konverze), lze chemickou cestou dosáhnout změny λ .

Názornější veličinou, která se používá jako charakteristika radionuklidu místo přeměnové konstanty λ , je **poločas přeměny**.

**Poločas přeměny T (resp. $T_{1/2}$)**

(přesněji **čas polopřeměny**, dříve též poločas rozpadu) je doba, za níž se přemění polovina z počátečního počtu $N(0)$ dosud nepřeměněných jader.

S konstantou radioaktivní přeměny je poločas přeměny vázán vztahem

$$T\lambda = \ln 2.$$

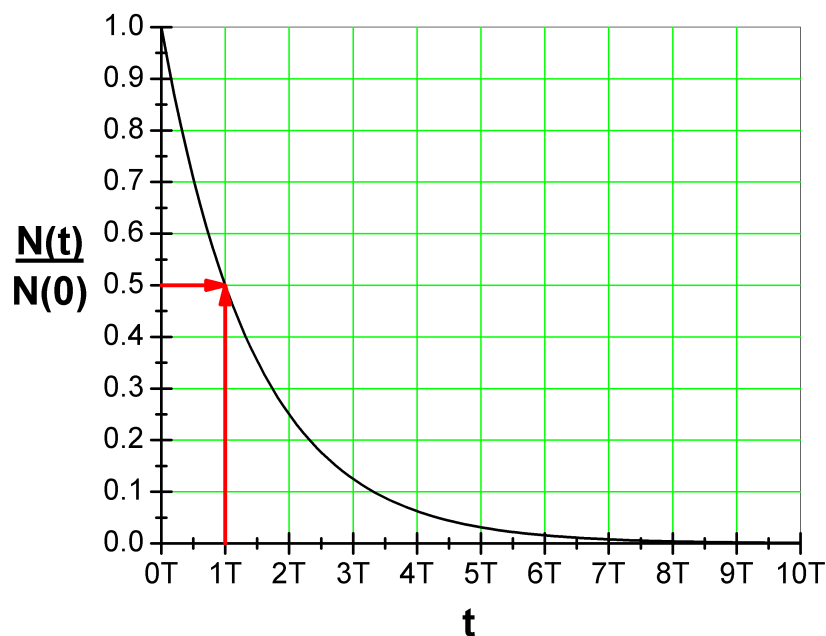
**Úkol k textu**

Odvoďte s využitím exponenciálního tvaru zákona a definice poločasu přeměny předcházející vztah.

**Úkol k zamyšlení**

Podle jakého zákona se bude měnit s časem aktivita vzorku, resp. kolikrát se sníží aktivita vzorku po uplynutí jednoho poločasu přeměny?

V následujícím obrázku je graficky znázorněn exponenciální úbytek přeměňujících se radioaktivních jader.



Úkol k textu

Za jakou dobu se přemění tři čtvrtiny radioaktivní látky, jejíž poločas přeměny T je znám?

**Poločasy přeměn pro vybrané látky**

Poločasy přeměn pro různé radioaktivní látky mohou nabývat značně rozdílných hodnot.



Nuklid	Poločas přeměny
${}_{92}^{238}\text{U}$	4 500 000 000 let
${}_{88}^{226}\text{Ra}$	1 620 let
${}_{47}^{115}\text{Ag}$	20 minut
${}_{84}^{212}\text{Po}$	0,000 000 3 s

2.2.5 ŘADY RADIOAKTIVNÍCH PŘEMĚN

Při radioaktivních přeměnách dochází často k situaci, že dceřinné jádro vzniklé některým typem radioaktivní přeměny je opět radioaktivní a může se opět samovolně přeměňovat. Taková situace se pak může opakovat několikrát. Hovoříme pak o *řadách radioaktivních přeměn*.

Řada radioaktivních přeměn

(též *přeměnová řada*) je řada *radionuklidů*, ve které každý radionuklid (člen řady) s výjimkou prvního vzniká radioaktivní přeměnou předešlého radionuklidu v řadě. *Přeměnová řada* končí vždy *stabilním nuklidem*, který se již dále nepřeměňuje.

Radionuklidy řady se postupně přeměňují *přeměnami* α a β . V případě, že se daný radionuklid může přeměnit více způsoby, dochází ke vzniku „větví“ řady, které se ale opět spojují u některého dalšího radionuklidu v řadě, takže řada končí u jediného stabilního nuklidu.

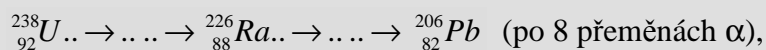
Tyto řady se pojmenovávají podle prvního radionuklidu v řadě, popřípadě podle svého typického členu. Existují pouze čtyři radioaktivní rozpadové řady. To je mimo jiné důsledek toho, že pouze při přeměně α dochází ke změně počtu nukleonů, a to o 4 nukleony. Sousední členy dané řady se tedy buď neliší v počtu nukleonů, anebo se musí lišit právě o 4 nukleony. Radionuklid lišící se pouze o 1, 2 nebo 3 nukleony nemůže patřit do stejné řady.

Jsou známy tři přirozené přeměnové řady, jejichž členy se vyskytují v přírodě, a jedna tzv. umělá přeměnová řada, jejíž počáteční radionuklid – neptunium se běžně v přírodě nenachází a musí být připraven uměle.

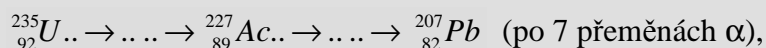


Druhy přeměnových řad

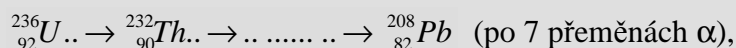
- **uranová** (urano-rádiová)



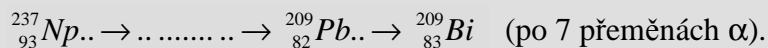
- **aktiniová** (urano-aktiniová)



- **thoriová** (urano-thoriová)



- **neptuniová**



Úkol k zamyšlení

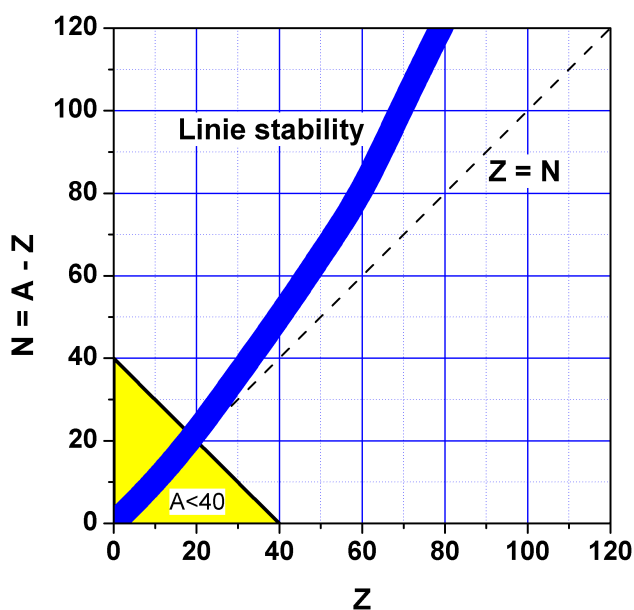
Pro první radionuklid v řadě můžeme napsat rovnici popisující jeho úbytek s časem přesně podle uvedeného **zákona radioaktivní přeměny**. Další členy řady sice rovněž ubývají vlastní přeměnou, současně však vznikají přeměnou předchozího členu řady. Dokázali byste napsat příslušnou rovnici popisující tuto situaci?

Víme už, že některá jádra jsou nestabilní a mohou se přeměňovat některým typem radioaktivní přeměny. Každá přeměna je náhodný proces. Ten má ovšem přesně určenou pravděpodobnost, což znamená, že z dostatečně velkého souboru jader se v určitém čase přemění určitá část těchto jader. To popisuje zákon radioaktivní přeměny, který nám však neříká nic o tom, které jádro se v dané chvíli přemění.

Nyní uvidíte, že i když přeměna nestabilního jádra je náhodný proces, stabilita jader náhodná není, a také se dozvíte, jak posuzovat stabilitu jádra.

2.2.6 STABILITA JADER

Pokud budeme vynášet do grafu hodnoty protonového čísla Z a neutronového čísla N stabilních nuklidů, zjistíme, že se body $[Z, N]$ odpovídající těmto nuklidům nachází v blízkosti tzv. **linie stability** $N = f(Z)$, což je křivka proložená vynesnými body. Její přibližný tvar vidíme na obrázku.

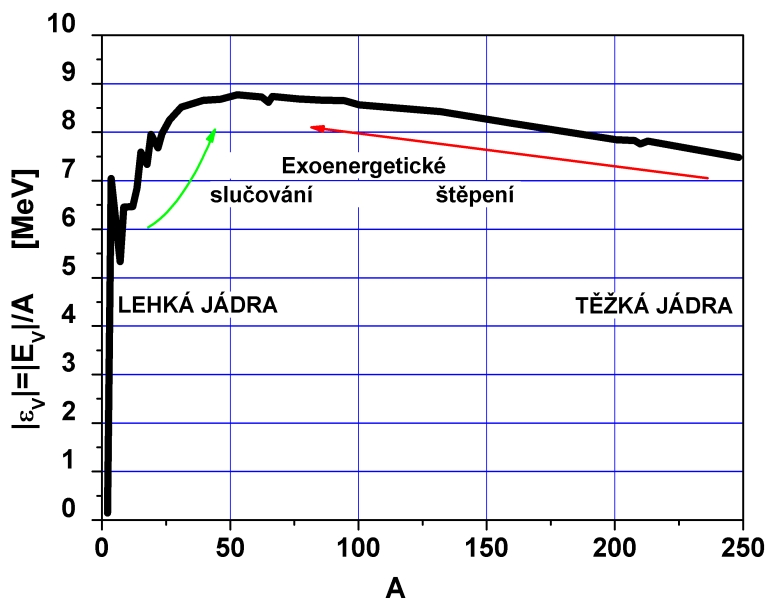


Poznámky:

- **Linii stability** zavádíme pouze z názorných důvodů. Musíme si uvědomit, že hodnoty Z a N nabývají pouze hodnot přirozených čísel.
- Pro stabilní jádra s $A \leq 40$ platí, že se soustřeďují v okolí přímky $N = Z$. Pro nejstabilnější jádra pak platí, že mají v jádře stejný počet protonů a neutronů, tzn. jsou **symetrická** (tuto skutečnost lze objasnit např. s pomocí slupkového modelu jádra).
- Pro $A > 40$ začíná u stabilních jader postupně převažovat počet neutronů nad protony. To je způsobeno skutečností, že při vzrůstajícím Z roste odpudivá coulombická interakce protonů v jádře (náboj jádra je úměrný Z). Pro snížení celkové energie jádra je tedy výhodnější přítomnost dalších neutronů než protonů.

Stabilitu jader je vhodné posuzovat podle **vazebné energie na jeden nukleon** $\varepsilon_V = E_V/A$. Podle její hodnoty můžeme posoudit, zda k většímu snížení celkové klidové energie ("energeticky výhodnější stav") určitého množství nukleonů dojde při vytvoření většího počtu lehčích jader nebo menšího počtu jader těžších.

Pokud si vyneseme $|\varepsilon_V|$ pro jednotlivé **nuklidy** v závislosti na **nukleonovém čísle** A , zjistíme, že příslušné body, zejména pro větší hodnoty A , leží v blízkosti určité křivky. Její přibližný tvar je vidět na obrázku.



Poznámky:

- Nulovou $|\varepsilon_V|$ má nuklid ^1_1H .
- Největší hodnoty $|\varepsilon_V|$ jsou pro **středně těžké prvky** s $50 < A < 90$. Pro tyto hodnoty dochází jen k malým změnám $|\varepsilon_V|$. Maxima pak dosahuje $|\varepsilon_V|$ pro prvky ze skupiny železa (hlavně $^{56}_{26}\text{Fe}$ a $^{60}_{28}\text{Ni}$).
- Dá se zhruba říci, že pro **lehká jádra** s $A < 50$ dochází k prudkému růstu $|\varepsilon_V|$ s rostoucím A , nicméně dochází k významným výkyvům $|\varepsilon_V|$ (např. pro He).
- Pro **těžká jádra** s $A > 90$ dochází naopak k pozvolnému poklesu $|\varepsilon_V|$ s rostoucím A .
- Nejtěžší stabilní izotop je $^{209}_{83}\text{Bi}$. Zde končí tzv. "**pevnina stability**" (oblast stabilních jader v okolí linie stability). Další těžší nuklidy, které jsou známy, patří mezi nestabilní.
- Předpokládá se existence "**ostrova stability**" (další izolované oblasti stabilních jader) tvořené supertěžkými jádry. V roce 1998 byl v Dubne objeven nový prvek s protonovým číslem 114, který je oproti ostatním těžkým prvkům (s poločasy rozpadu okolo tisícín až milióntin s) poměrně stabilní (poločas rozpadu je asi 30 s). Tento prvek je považován za první "výspu" zmíněného ostrova stability.

- V současnosti jsou známy prvky až do protonového čísla 118 (zatím s výjimkou několika nižších protonových čísel, a to 113,115,117). V této chvíli je pravděpodobně tato informace už zastaralá.
- Prvky počínaje prvkem s protonovým číslem 104 dostaly své definitivní názvy teprve nedávno, nebo ještě nebyly pojmenovány ($Z \geq 110$).
- Místo grafu stability se často používá „*mapa nuklidů*“, ve které jsou nuklidy uspořádány (stejně jako body v grafu stability) v řádcích podle rostoucího Z a ve sloupcích podle rostoucího N . Do jednotlivých políček se pak zapisují vlastnosti jader nuklidů. Mapa nuklidů tedy hraje v případě jader podobnou úlohu jako periodická tabulka prvků pro atomy.
- Ve třech rozměrech můžeme na základně mapy nuklidů (vodorovné osy Z a N) znázornit (ve svislé ose) také vazebnou energii na jeden nukleon pro odpovídající nuklid. Jednotlivá políčka mapy nuklidů zatlačíme do hloubky odpovídající velikosti ε_v . Nejnižší hodnoty ε_v (nejvyšší hodnoty $|\varepsilon_v|$) jsou přítomny v okolí linie stability. Jedná se tedy o zobrazení funkce $\varepsilon_v(Z, N)$, které se pro svůj tvar označuje jako „*údolí nuklidů*“ (jeho dno leží na linii stability).
- Údolí nuklidů dává názornou představu radioaktivních přeměn. Nukleony se snaží dostat do stavu s nejnižší ε_v (padají do nižších poloh v údolí). Mohou tak ale činit pouze některým typem radioaktivní přeměny. Z levého resp. pravého úbočí „padají“ nukleony k linii stability prostřednictvím přeměny beta plus resp. beta minus. Podél linie stability pak přeměnami alfa.
- Závislost vazebné energie jádra na Z a A je možné přibližně popsat pomocí empirické *Weizsäckerovy-Fermiho formule*.
- Pro jádra s $A > 90$ se ε_v mění jen málo, tzn. vazebná energie je přibližně úměrná A , což znamená, že nukleony se vážou jen s omezeným počtem nukleonů (svých nejbližších sousedů). Říkáme, že *jaderné síly* mají vlastnost *nasycení*.
- Coulombické (elektrostatické) síly se nenasycují, jelikož jsou úměrné Z^2 .
- Pro určité hodnoty čísel Z , N nebo A existují lokální minima ε_v (maxima $|\varepsilon_v|$). Tato čísla se označují jako **magická čísla**. Jádra odpovídající magickým číslům jsou tak stabilnější než okolní s trochu jinými hodnotami čísel Z , N nebo A .
- Hodnoty magických čísel jsou 2, 8, 20, 28, 50, 82 v případě protonových a neutronových čísel (u těch též 126) a 4, 12, 16, 20, 24 v případě nukleonových čísel. Tuto skutečnost je možné objasnit s pomocí propracovanějších slupkových modelů jádra.



Průvodce studiem

Abyste věděli, že z radioaktivity lze mít i užitek, podívejte se na pár následujících příkladů aplikací poznatků, s nimiž jste se seznámili v této kapitole. Určitě mezi vám ale existují i tací, kterým fyzika učarovala nejen tím, že přispívá k našemu pohodlí mnoha užitečnými vynálezy, ale také tím, jak dokáže jevy a poznatky kolem nás vysvětlit.

Aktivační analýza

Chemikové si často nevěděli rady s určením přítomnosti některých prvků v látkách. Bylo to dáno tím, že tyto prvky mají velmi podobné chování v chemických reakcích, a tak je běžné analytické postupy nedokáží odhalit. Pokud vzorek takové látky vystavíme působení vhodně zvoleného jaderného záření (můžeme ji bombardovat protony, neutrony, částicemi alfa apod.), mohou se původně **stabilní nuklid** detekovaného prvku přeměnit jadernou reakcí na známé radionuklidy. Tomuto procesu se říká **aktivace** vzorku. Vzniklé **radionuklidy** se přeměňují některým typem **radioaktivní přeměny**. Jejich **aktivita**, tudíž i intenzita emitovaného **radioaktivního záření**, je úměrná počtu vzniklých radionuklidů, a ten zase počtu původních nuklidů detekovaného prvku. Tak je možné v principu určit počet atomů daného prvku ve vzorku látky. Nejčastěji se používá metoda jako srovnávací, tzn. nejdříve aktivujeme srovnávací vzorek látky se známým zastoupením detekovaného prvku, poté totéž provedeme s měřeným vzorkem. Intenzity záření (měřené vždy po uplynutí stejné doby od aktivace) jsou ve stejném poměru jako množství detekovaného prvku v obou vzorcích. Odtud určíme množství tohoto prvku v měřené látce.



Určení galia v oceli

Hevesy a Levi v r. 1936 poprvé určovali **aktivační analýzou** obsah dysprosia a europia ve vzácných zeminách, které byly ostřelovány neutrony. Seaborg a Livingood na jejich experimenty navázali a změřili obsah galia v oceli, k jejíž **aktivaci** použili deuterony.

Metoda radioaktivních indikátorů

Často bychom rádi zjistili, jakým způsobem se šíří nebo kde se usazuje vybraná chemická látka v rámci určitého systému, což může živý organismus, ekosystém nebo nějaký průmyslový provoz. Jednou z možností je využít skutečnosti, že chemické vlastnosti prvku závisí především na stavbě jeho elektronového obalu. Migrace prvku se tudíž neovlivní, pokud místo stabilního jádra bude obsahovat jádro nestabilní. Ve sledované látce nahradíme některý vybraný prvek – **stabilní izotop** – (většinou opět aktivací připraveným) izotopem radioaktivním (**radioizotopem**). **Radioaktivní záření** vzniklé jeho přeměnou můžeme detekovat a z naměřené **aktivity** určit s použitím zákona radioaktivní přeměny její množství v příslušné části zkoumaného systému.



Kriminalistika

Zajímavou aplikací je přibližné určení původu oběti vraždy podle obsahu ^{226}Ra , které se dostává do těla s pitnou vodou. Obsah tohoto nuklidu ve zdrojích pitné vody v různých oblastech se liší.

Radioizotopové generátory

Při *radioaktivní přeměně* se uvolňuje (separační) energie ve formě kinetické energie produktů přeměny. Uvnitř látky se mění tato energie na teplo. Ve fyzice pevných látek jsou známy termočlánky, které dovedou rozdíl teplot využít k výrobě elektrické energie. Kombinací obého můžeme vyrobit dlouhodobě fungující zdroj elektrické energie nezávislý na dodávkách energie zvenčí. Využívá se energie radioaktivní přeměny. Pozor, nezaměňujte takovýto postup s výrobou elektrické energie v *jaderné elektrárně*, která využívá *štěpnou jadernou reakci*.

Kosmické sondy

U kosmických sond směřujících do vnějších oblastí sluneční soustavy není vzhledem k nízkému toku slunečního záření vhodné použít sluneční články jako zdroje elektrické energie pro palubní přístroje a počítač. Proto jsou zde používány právě *radioizotopové generátory* na slunečním záření nezávislé. Kosmickou sondu Pioneer 10, která je nejvzdálenějším tělesem, které bylo vyrobeno lidmi, vydržel radioizotopový generátor zásobovat energií více než 30 let.



Radioizotopové metody určování stáří

Podle *zákona radioaktivní přeměny* závisí počet nepřeměněných jader vybraného *radionuklidu* (a také jeho *aktivita*) exponenciálně na čase. Tuto závislost je možné využít k určování stáří hornin nebo archeologických nálezů. Je třeba ovšem zvolit vhodný radionuklid obsažený ve vzorku. Dále musí být jisté, že od určitého počátečního okamžiku nedochází k jiným změnám počtu atomů tohoto radionuklidu, než k jejich úbytku radioaktivní přeměnou. V této souvislosti je třeba také definovat pojem stáří vzorku a tedy zvolit onen počátečního okamžik. Změřit počet nepřeměněných atomů nebo jejich aktivitu v současném okamžiku nečiní problém. Pro určení stáří ale potřebujeme zjistit příslušné hodnoty v počátečním okamžiku. Podle volby radionuklidu a určení počátečního množství jeho atomů rozlišujeme různé metody určování stáří.

Metoda radioaktivního uhlíku

Jde o metodu, která využívá radioaktivní izotop uhlíku – ^{14}C , který vzniká v ovzduší vlivem kosmického záření. Ve formě CO_2 jej přijímají rostliny i živočichové, takže se vytvoří určitá rovnováha mezi jeho zastoupením v ovzduší a v živých organismech. Předpokládá se, že v historické době se jeho koncentrace v ovzduší a tudíž ani jeho rovnovážná hodnota v živých organismech nemění, tím je známa počáteční koncentrace radionuklidu. Měřením jeho aktivity (jde o zářič beta) určíme jeho okamžitou koncentraci. Používá se především k určování archeologických nálezů. Stáří nálezů je počítáno od doby, kdy ustala výměna CO_2 zajišťující ustavení rovnováhy, tedy od doby úmrtí živého organismu. Uvedený popis je zjednodušený a praktické použití metody může narazit na řadu problémů.



**Test**

Vyberte správná tvrzení (podrobný návod je uveden v testu na konci první kapitoly), označte je v tabulce za úkolem a srovnajte se správným řešením z klíče.

Úkol 9

- A. Rozpad alfa
 B. Rozpad beta plus
 C. Rozpad beta minus
 D. Elektronový záchyt
 E. Přejít gama

- a) je možným způsobem deexcitace jádra
 b) probíhá pod vlivem silné interakce
 c) probíhá pod vlivem slabé interakce
 d) je doprovázen emisí jader He
 e) je doprovázen emisí elektronů
 f) je doprovázen emisí pozitronů
 g) je doprovázen emisí částic alfa
 h) je doprovázen emisí částic beta (minus)
 i) je transmutací prvku v jiný prvek, který se nachází o dvě místa vlevo v per. tab. prvků
 j) je transmutací prvku v jiný prvek, který se nachází o jedno místo vlevo v per. tab. prvků
 k) je transmutací prvku v jiný prvek, který se nachází o jedno místo vpravo v per. tab. prvků

Tabulka pro označení správných odpovědí:

9. A	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k
9. B	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k
9. C	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k
9. D	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k
9. E	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k

**Otázky**

- 1. Radioaktivita.** Objasněte jev radioaktivity. Vysvětlete pojem radioaktivní přeměna a srovnajte s pojmem jaderná přeměna. Uveďte známé typy radioaktivního záření. Objasněte podstatu jednotlivých typů radioaktivního záření. Vysvětlete rozdíl mezi umělou a přirozenou radioaktivitou. Napište diferenciální tvar zákona radioaktivní přeměny a popište jednotlivé veličiny, které v něm vystupují. Objasněte statistickou podstatu tohoto zákona. Definujte aktivitu a její jednotku. Na základě diferenciálního tvaru zákona určete využitím metody separace proměnných exponenciální tvar tohoto zákona. Slovně definujte poločas přeměny T . S využitím exponenciálního

tvaru zákona určete jeho vztah s rozpadovou konstantou. Nakreslete graf závislosti počtu nepřeměněných jader v závislosti na čase. Na grafu demonstруйте význam poločasu přeměny. Za jakou dobu se přemění všechna jádra radioaktivní látky? Jakých hodnot může poločas přeměny nabývat, uveďte příklady.

2. **Radioaktivní přeměna.** Objasněte pojem radioaktivní přeměny. Uveďte známé typy radioaktivních přeměn. U každé přeměny uveďte schéma přeměny a objasněte jaký prvek po přeměně vzniká, případně pod vlivem které ze základních interakcí přeměna probíhá. Definujte separační energii pro jednotlivé typy radioaktivních přeměn. Jaké znaménko musí mít hodnota těchto separačních energií? Objasněte pojem radioaktivní přeměnová řada (rozpadová řada). Kolik je známo typů přeměnových řad a proč existuje pouze tento počet řad? Jmenujte jednotlivé typy řad (uveďte alespoň jeden významný člen a konečný člen každé řady).
3. **Stabilita jader.** Objasněte graf stability atomových jader. Definujte protonové a neutronové číslo. Nakreslete náčrtek grafu stability a objasněte na něm pojem linie stability. Objasněte, proč pro lehká jádra leží linie stability na přímce $Z = N$, zatímco pro těžší jádra je N mírně větší než Z . Definujte vazebnou energii na jeden nukleon – ε_v . Proč je ε_v vhodnější charakteristikou k posouzení stability jádra než vazebná energie jádra? Nakreslete graf závislosti ε_v na nukleonovém čísle. Která jádra jsou nejstabilnější a proč? Ukažte na tomto grafu, které typy reakcí jsou exoenergetické. Objasněte pojmy: mapa nuklidů, údolí nuklidů, pevnina nuklidů a ostrov stability.

Korespondenční úkol

Zpracujte písemně otázky zadané tutorem, řiďte se přitom jeho pokyny.





Shrnutí kapitoly

Radioaktivita je proces samovolné přeměny nestabilního, resp. radioaktivního jádra v jádro jiné, doprovázený emisí radioaktivního záření.

Známe různé typy radioaktivního záření jako je záření α , β , γ nebo také protonové záření. Záření alfa je tvořeno letícími jádry helia, záření beta emitovanými elektrony nebo pozitrony, záření gama je krátkovlnné elektromagnetické záření.

Jádro se může přeměnit několika typy přeměn. Jsou to zejména přeměna alfa s emisí jader helia, přeměna beta minus s emisí elektronů, přeměna beta plus s emisí pozitronů, záchyt elektronu, dále také přeměna s emisí protonů nebo přeměna s emisí fragmentů jader.

Tyto přeměny bývají doprovázeny deexcitací jádra prostřednictvím emise fotonu gama záření nebo vnitřní konverzí, při níž energie atomového jádra předaná elektronu atomového obalu způsobí jeho emisi.

Radioaktivní přeměny se řídí obecnými zákony zachování v jaderných přeměnách. Rychlost přeměny v daném čase vyjádřená aktivitou je podle zákona radioaktivní přeměny úměrná přeměnové konstantě a počtu nepřeměněných jader. Místo přeměnové konstanty se také používá s ní spojená veličina, tzv. poločas přeměny, což je doba, za níž se přemění polovina z původního počtu jader. Poločas přeměny různých radionuklidů může nabývat velmi rozdílných hodnot – od velmi malých zlomků sekundy až po miliardy let.

Mimo stabilních jader existují nestabilní radioaktivní nuklidy. Zejména těžší nuklidy jsou většinou radioaktivní. Existují tzv. řady radioaktivních prvků, kde s výjimkou prvního členu vzniká každý následující přeměnou předchozího členu řady. Hlavní linie přeměn je tvořena přeměnami alfa a končí vždy izotopem olova. Vedlejší linie jsou vytvářeny alternativními přeměnami beta. V linii přeměn alfa se sousední členy liší vždy o čtyři nukleony a proto existují pouze čtyři přeměnové řady: tři přirozené a jedná umělá, jejíž počáteční nuklid – neptunium – je nutno připravit uměle.

Vyneseme-li do grafu závislost A na Z ve formě bodů odpovídajících stabilním nuklidům, zjistíme, že stabilní jádra se sdružují v blízkosti linie stability. Příslušný graf se většinou označuje jako graf stability jader. Linie stability je pro lehčí jádra tvořena přibližně přímkou, která odpovídá symetrickým jádrům se stejným počtem protonů a neutronů. Pro těžší jádra je typický malý nadbytek neutronů, způsobený elektrostatickou repulzí protonů.

Pro posouzení stability jádra je vhodné graficky zobrazit průměrnou vazebnou energii připadající na jeden nukleon jádra v závislosti na nukleonovém čísle. Z grafu zjistíme, že nejstabilnější jádra jsou středně těžká jádra, zejména jádra železa a niklu. Jejich přeměnami na jiná jádra nukleony již dále nesníží svou energii. Kromě samovolných procesů v podobě radioaktivních přeměn mohou nukleony snižovat svou energii také štěpením těžkých jader na lehčí nebo naopak slučováním lehčích jader na těžší až po železo a nikl. V těchto procesech se energie uvolňuje. Opačné procesy mohou probíhat jen po dodání energie.

