

### 6.3.6 Zákon radioaktivních přeměn

**Předpoklady:** 060305

Některé nuklidy se rozpadají. Jak můžeme vysvětlit, že se část jádra (například částice  ${}^4_2\alpha$  v jádře uranu  ${}^{238}_{92}\text{U}$ ) oddělí a vyletí ven?

#### Klasická fyzika

- Pokud má částice  ${}^4_2\alpha$  v jádře dostatečnou energii k překonání silné interakce, která ji drží v jádře, vyletí hned na první pokus (tedy řádově za  $t = \frac{s}{v} = \frac{10^{-15} \text{ m}}{10^7 \text{ m/s}} = 10^{-22} \text{ s}$ ).
- Pokud částice  ${}^4_2\alpha$  dostatečnou energii nemá, nikdy se z jádra nedostane.

#### Kvantová fyzika

Částice  ${}^4_2\alpha$  je v jádře  ${}^{238}_{92}\text{U}$  držena silnou interakcí (jako v potenciálové jámě), během svého neuspořádaného pohybu v jádře se snaží od jádra vzdálit, silná interakce ji v tom brání (částice naráží na zeď bariéry). Protože výška bariéry není nekonečná, existuje nenulová pravděpodobnost, že se částice dostane ven. Konkrétně uran:

- pravděpodobnost úspěchu při tunelování  $10^{-38}$ ,
- počet pokusů za sekundu  $7,6^{20}$ ,
- doba, za kterou pravděpodobnost rozpadu dosáhne 0,5, je přibližně  $4,5 \cdot 10^9$  let.

Máme 1000 jader  ${}^{238}_{92}\text{U}$ . Pozorujeme je  $4,5 \cdot 10^9$  let. Co se po této době stane?

- Každé z nich je rozpadlé s pravděpodobností 0,5.
- Přibližně polovina (500) z nich se rozpadla.
- Přibližně polovina (500) z nich se nerozpadla.
- Došlo k přibližně 500 rozpadům.

**Př. 1:** Jak se bude měnit počet atomů z předchozího výkladu v dalším období?

Po dalších 4,5 mld letech klesne počet jader přibližně na polovinu z 500 tedy na 250, za dalších 4,5 mld let se opět přibližně polovina ze zbývajících 250 atomů rozpadne atd.

Době, za kterou dosáhne pravděpodobnost rozpadu nuklidu hodnoty 0,5 (doba, za kterou se přemění průměrně polovina jader nuklidu), se nazývá **poločas přeměny (poločas rozpadu)**.

**Př. 2:** Najdi časovou závislost počtu jader radioaktivního nuklidu na čase. Při hledání využij konkrétní rozpad nuklidu s vhodným poločasem přeměny (například 2s).

po 0 s .....  $N$  jader

po 2 s .....  $N \cdot \left(\frac{1}{2}\right)$  (rozpadla se polovina atomů)

po 4 s .....  $N \cdot \left(\frac{1}{2}\right)\left(\frac{1}{2}\right) = N \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^2$  (z poloviny atomů, které zbyly po prvních dvou sekundách, se rozpadla zase polovina)

po 6 s .....  $N \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^2 \left(\frac{1}{2}\right) = N \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^3$  (ze zbývajících atomů se po dalších dvou sekundách rozpadla opět polovina)

Dokážeme určit množství látky vždy, když je čas násobkem 2 s, v exponentu mocniny je vždy dvakrát menší číslo, než je dosazovaný čas ( $\Rightarrow$  exponent má tvar  $\frac{t}{2}$ )  $\Rightarrow$  zapíšeme vztah pro libovolný část  $t$ :

po  $t$  s .....  $N \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{2}}$ .

**Počet jader radioaktivního nuklidu se v čase mění podle vzorce:**  $N = N_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T}}$ , kde  $N_0$  je počáteční počet jader a  $T$  je poločas přeměny.

Hmotnost je přímo úměrná počtu částic  $\Rightarrow$  hmotnost radioaktivního nuklidu se v čase mění

podle vzorce:  $m = m_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T}}$ .

S klesajícím počtem jader stejně klesá i počet přeměn nuklidu – **aktivita nuklidu  $A$** , udáváme v becquerelech (1 Bq = 1 přeměna za sekundu)  $\Rightarrow$  aktivita zářiče se v čase mění stejným

způsobem jako počet jader:  $A = A_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T}}$ .

**Př. 3:** V urychlovači bylo vyrobeno 6  $\mu\text{g}$  radioaktivního jódu  $^{132}_{53}\text{I}$  s poločasem přeměny 2 h. Kolik gramů látky budeme mít k dispozici po 5 hodinách? Co to znamená pro její využití v lékařství?

$m_0 = 6 \mu\text{g}$ ,  $T = 2 \text{ h}$ ,  $t = 5 \text{ h}$ ,  $m = ?$

$m = m_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T}} = 6 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{5}{2}} \mu\text{g} = 1,06 \mu\text{g}$

Po 5 hodinách budeme mít k dispozici pouze 1,06  $\mu\text{g}$  radioaktivního jódu.

Protože není možné rozpad zpomalit, je nutné využít radioaktivní nuklid ihned (většinou se speciální vyšetření, která jej využívají, provádějí v nemocnicích, které leží blízko místa, kde se nuklid vyrábí).

**Př. 4:** Poločas rozpadu uranu  $^{235}_{92}\text{U}$  je 700 miliónů let. Za kolik let se jeho množství v zemské kůře zmenší na třetinu původního stavu?

$m = \frac{1}{3} m_0$ ,  $T = 700 \text{ mil let}$ ,  $t = ?$

$m = m_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T}}$

$$\frac{1}{3}m_0 = m_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{700}}$$

$$\frac{1}{3} = \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{700}}$$

$$\log \frac{1}{3} = \log \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{700}} = \frac{t}{700} \log \frac{1}{2}$$

$$t = 700 \cdot \frac{\log \frac{1}{3}}{\log \frac{1}{2}} \text{ mil let} = 1110 \text{ mil let}$$

Množství uranu  ${}_{92}^{235}\text{U}$  se na třetinu původního množství zmenšilo za 1,11 mld let.

**Př. 5:** Množství radioaktivní látky se během jedné hodiny zmenšilo o 70%. Urči poločas přeměny.

$$m = 0,3m_0, \quad t = 1 \text{ h}, \quad T = ?$$

$$m = m_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T}}$$

$$0,3m_0 = m_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{1}{T}}$$

$$0,3 = (0,5)^{\frac{1}{T}}$$

$$\log 0,3 = \log 0,5^{\frac{1}{T}} = \frac{1}{T} \log 0,5$$

$$T = 1 \cdot \frac{\log 0,5}{\log 0,3} \text{ h} = 0,57 \text{ hod} = 34,5 \text{ min}$$

Zkoumaná látka má poločas přeměny 34,5 minuty.

**Př. 6:** Radioaktivní uran  ${}_{92}^{236}\text{U}$  má poločas přeměny 23 milionů let. Jaké množství tohoto nuklidu obsahuje v současnosti zemská kůra, pokud předpokládáme počáteční obsah na  $10^{25}$  kg (hmotnost Země  $6 \cdot 10^{26}$  kg)? Stáří Země je 4,5 mld let.

$$m_0 = 10^{25} \text{ kg}, \quad T = 23 \text{ mil let}, \quad t = 4,5 \text{ mld let} = 4500 \text{ mil let}, \quad m = ?$$

$$m = m_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T}} = 10^{25} \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{4500}{23}} \text{ kg} = 1,26 \cdot 10^{-34} \text{ kg}$$

Zemská kůra obsahuje v současnosti  $1,26 \cdot 10^{-33}$  kg uranu  ${}_{92}^{236}\text{U}$  (lépe řečeno neobsahuje žádný uran  ${}_{92}^{236}\text{U}$ , protože vypočtená hmotnost je menší než hmotnost elektronu  $9,1 \cdot 10^{-31}$  kg).

Co vyplývá z posledního příkladu? Původní hmotnost uranu  ${}_{92}^{236}\text{U}$  byla zjevně nadsazená (ve skutečnosti uran určitě vážil méně šedesátinu hmotnosti Země), přesto dodneška nevydržel

zřejmě ani jediný atom  $\Rightarrow$  nuklidy s poločasem přeměny menším než 100 mil nemohly vydržet po celou dobu existence planety  $\Rightarrow$  nuklidy s poločasem přeměny kratším než 100 mil let musejí vznikat už po vzniku planety Země.

Dvě základní možnosti:

- nuklid je členem jedné z rozpadových řad (přes které se rozpadají prvky s velkým poločasem přeměny jako uran),
- nuklid vzniká jadernou reakcí vyvolanou kosmickým zářením.

Kosmické záření: proud částic, které přilétají z vesmíru a mají často obrovskou energii, která dostačuje k tomu, aby vyvolaly jadernou reakci s neradioaktivním jádrem.

Tímto způsobem vzniká z atmosférického dusíku  ${}^1_7\text{N}$  ve vyšších vrstvách atmosféry radioaktivní uhlík  ${}^{14}_6\text{C}$ . Tento uhlík s poločasem přeměny 5730 let se mísí s běžným uhlíkem v atmosféře tak, že jeden atom  ${}^{14}_6\text{C}$  připadá na  $10^{13}$  atomů uhlíku  ${}^{12}_6\text{C}$ .

**Př. 7:** Navrhni, jak využít radioaktivní uhlík  ${}^{14}_6\text{C}$  k datování stáří organických zbytků.

Uhlík v živých organismech pochází z atmosférického  $\text{CO}_2$   $\Rightarrow$  obsahuje stejný podíl radioaktivního uhlíku jako atmosféra. Jakmile živý organismus zemře, výměna uhlíku s atmosférou ustane a protože radioaktivní uhlík se rozpadá, začne se jeho obsah v organickém zbytku zmenšovat. Z poměru radioaktivního a normálního uhlíku tak můžeme zjistit, jaká část radioaktivního uhlíku se rozpadla a tedy jak dlouho je organismus po smrti.

**Př. 8:** Obsah uhlíku  ${}^{14}_6\text{C}$  ve dřevě odpovídá 86% jeho obsahu v atmosféře. Který vladař seděl při své korunovaci na trůně, který je z dřeva vyroben?

$$m = 0,86 m_0, T = 5730 \text{ let}, t = ?$$

$$m = m_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T}}$$

$$0,86 m_0 = m_0 \cdot (0,5)^{\frac{t}{5730}}$$

$$0,86 = (0,5)^{\frac{t}{5730}}$$

$$\log 0,86 = \log (0,5)^{\frac{t}{5730}} = \frac{t}{5730} \log \frac{1}{2}$$

$$t = 5730 \cdot \frac{\log 0,86}{\log 0,5} \text{ let} = 1250 \text{ let}$$

Strom, ze kterého je dřevo byl pokácen před 1250 lety (tedy v roce 762). Mohl na něm sedět Karel Veliký nebo jeho otec Pipin Krátký.

Radionuklidů, které se využívají k datování, je celá řada. K datování stáří hornin se například využívá radioaktivní izotop draslíku  ${}^{40}_{19}\text{K}$  s poločasem rozpadu 1,25 mld let, který se mění na stabilní izotop vzácného plynu argonu  ${}^{40}_{18}\text{A}$ .

**Př. 9:** Proč je možné určit z počtu atomů  ${}^{40}_{19}\text{K}$  a  ${}^{40}_{18}\text{A}$  v hornině její stáří? Jak?

Argon je plyn  $\Rightarrow$  hornina při svém vzniku neobsahovala žádné atomy plynu (unikly by)  $\Rightarrow$  všechny atomy  ${}^{40}_{18}\text{A}$  vznikly přeměnou atomů  ${}^{40}_{19}\text{K}$   $\Rightarrow$  můžeme určit původní i konečný počet atomů  ${}^{40}_{19}\text{K}$  v hornině a tím její stáří.

**Př. 10:** Měření měsíční horniny prokázalo, že počet atomů  ${}^{40}_{18}\text{A}$  je 10,3 krát větší než počet atomů  ${}^{40}_{19}\text{K}$ . Urči stáří horniny.

$$N_A = 10,3 N_K, T = 1,25 \text{ mld let}, t = ?$$

$$N = N_0 \cdot 0,5^{\frac{t}{T}} \quad (\text{dosadíme } N = N_K, N_0 = N_K + N_A)$$

$$N_K = (N_K + N_A) \cdot 0,5^{\frac{t}{1,25}}$$

$$\frac{N_K}{N_K + N_A} = \frac{N_K}{N_K + 10,3N_K} = \frac{1}{11,3} = 0,5^{\frac{t}{1,25}}$$

$$\log \frac{1}{11,3} = -\log 11,3 = \log 0,5^{\frac{t}{1,25}} = \frac{t}{1,25} \log 0,5$$

$$t = -1,25 \cdot \frac{\log 11,3}{\log 0,5} \text{ mld let} = 4,37 \text{ mld let}$$

Měsíční hornina vznikla před 4,37 mld lety.

**Shrnutí:** Po uplynutí poločasu přeměny se množství radioaktivní látky zmenší vždy na polovinu předchozího stavu.