

Zastoupení jednotlivých nuklidů v rozpadových řadách (A5)

Karel Rauner, Pedagogická fakulta ZČU, Plzeň

Tento článek je určen studentům řešícím FO v kategorii A. Redakce doporučuje jeho rozmnožení a rozdáni studentům.

Jak jsem již ukázal v článku [1], stále se ještě najdou vzdělání lidé, kteří z přírodního výskytu nuklidů s krátkými poločasy rozpadu dělají chybné závěry.

Většina atomů, ze kterých se skládají lidé, jejich okolí a celá Země, vznikala zčásti v době před nějakými 5 miliardami let, kdy byla hmota naší původní mlhoviny přetvořena výbuchem supernovy, zčásti jsou atomy na Zemi a ve sluneční soustavě mnohem starší: pocházejí z raného stadia vzniku vesmíru po velkém třesku. Jen malá část atomů na Zemi má novější původ: některé vznikly z původně radioaktivních prvků, jiné přetvořením původních atomů kosmickým zářením, další skupinu tvoří atomy vyrobené (fragmenty štěpení z jaderných zbraní a elektrárén, složené atomy z termonukleárních výbuchů a výzkumných experimentů). Protože je podíl člověkem vytvořených radioaktivních nuklidů na Zemi zanedbatelný, budeme se dále zmiňovat jen o radioaktivních nuklidech přírodních.

V současné době tvoří většinu radioaktivních nuklidů v přírodě izotopy prvků s protonovým číslem nad 82, podléhající radioaktivní přeměně α a β^- . Protože se při α -rozpadu nukleonové číslo zmenší o 4 a při β^- -přeměně se nukleonové číslo nemění, lze těžké radioaktivní nuklidy zařadit do 3 rozpadových řad:

1. řada uranová

- všechny její součásti mají nukleonové číslo typu $4n+2$,
- začíná izotopem uranu ${}^{238}_{92}\text{U}$,
- v přírodě se vyskytuje díky velkému poločasu tohoto nuklidu: $4,5 \cdot 10^9$ let,

2. řada aktiniová

- všechny její součásti mají nukleonové číslo typu $4n+3$,
- začíná izotopem uranu ${}^{235}_{92}\text{U}$,
- v přírodě se vyskytuje díky velkému poločasu tohoto nuklidu: $7,0 \cdot 10^8$ let,

3. řada thoriová

- všechny její součásti mají nukleonové číslo typu $4n$,
- začíná izotopem uranu ${}^{232}_{90}\text{Th}$,
- v přírodě se vyskytuje díky velkému poločasu tohoto nuklidu: $1,4 \cdot 10^{10}$ let.

Naopak řada těžkých prvků s nukleonovým číslem typu $4n+1$ (neptuniová) se v přírodě již nevyskytuje, poločas rozpadu počátečního prvku: ${}^{241}_{94}\text{Pu}$ je příliš malý (14,4 let), nuklid s nejdelším poločasem v této řadě ${}^{237}_{93}\text{Np}$ má poločas rozpadu $2,14 \cdot 10^6$ let. Jednoduchým výpočtem můžeme zjistit, že za 300 poločasů, tedy za „pouhých“ $6,4 \cdot 10^8$ let, klesne množství neptunia na $4,9 \cdot 10^{-91}$ násobku původního množství, což z hlediska fyziky znamená, že ve vesmíru nezbude ani jeden atom. Další radioaktivní nuklidy: ${}^{40}_{19}\text{K}$, ${}^{87}_{37}\text{Rb}$, ${}^{115}_{49}\text{In}$, ${}^{138}_{57}\text{La}$, ${}^{150}_{60}\text{Nd}$, ${}^{147}_{62}\text{Sm}$, ${}^{176}_{71}\text{Lu}$, ${}^{187}_{75}\text{Re}$ se v přírodě dosud vyskytují díky velkým poločasům rozpadu (větším než miliarda let).

• rauner@kof.zcu.cz

Příklad 3

Před 3 miliardami let (τ) vznikl vzorek, který tvořil 1 kg (hmotnost m) čistého uranu 238. Předpokládejte, že ve vzorku zůstanou všechny produkty rozpadů s výjimkou hélia (z částic

- α a β^- se vytvoří atomy hélia ${}^4_2\text{He}$) a neutrin. Vypočtěte
 a) poměrné zastoupení jednotlivých nuklidů v současné době,
 b) hmotnostní zastoupení jednotlivých nuklidů v současné době,
 c) počet uniklých atomů hélia,
 d) současnou aktivitu vzorku,
 e) aktivitu vzorku před 3 miliardami let.

Řešení:

a) Nejprve vypočítáme poměrné zastoupení P uranu 238 v současné době. Z (3) vyplývá:

$$P = 2 \frac{t_3}{T_{238}} \quad (9)$$

číselně $P = 0,630$. Poměrná zastoupení členů rozpadové řady P_i s výjimkou olova 206 vypočítáme ze vztahu (6). Číselné výsledky ukazuje tab. 1, ve které je zastoupení olova 206 vypočteno jako doplněk k 1^{****}.

b) Počet atomů (bez hélia) je stále stejný a můžeme jej určit jako počet atomů uranu 238 před 3 miliardami let:

$$N_{0\ 238} = \frac{m}{A_{238} \cdot u} \quad (10)$$

kde A_{238} je relativní atomová hmotnost, u je atomová hmotnostní jednotka. Za relativní atomovou hmotnost můžeme dosadit nukleonové číslo, nedopouštíme se tak větší chyby než 0,1 %. Vzhledem k přibližné platnosti zákona radioaktivní rovnováhy (6) to není podstatná chyba. Počty atomů v současnosti vypočítáme ze vztahu

$$N_i = P_i \cdot N_{0\ 238} \quad (11)$$

Pro výpočet hmotnosti jednotlivých složek využijeme vztahu

$$m_i = N_i \cdot A_i \cdot u \quad (12)$$

do kterého lze opět dosazovat za A_i nukleonová čísla.

c) Počet atomů hélia je možno určit jako

$$N_{\text{He}} = 8 \cdot N_{\text{Pb}} \quad (13)$$

kde N_{Pb} je současný počet atomů olova 206^{*****}. K vzniku každého atomu ${}^{206}_{82}\text{Pb}$ musí totiž proběhnout 8 α rozpadů.

d) Pro aktivitu i -té složky platí

$$C_i = \lambda_i \cdot N_i = \frac{\ln 2}{T_i} \cdot N_i \quad (14)$$

kde λ_i jsou rozpadové konstanty a T_i poločasy rozpadů. Využijeme-li vztah (6), dostáváme pro mnohé možná nečekaný výsledek:

**** Tabulka 1 byla získána v Excelu, proto byly číselné hodnoty ponechány v původním tvaru.

***** Skutečný počet atomů hélia by měl být zvětšen o atomy uniklé z jednotlivých mezproduktů. Lze se však přesvědčit, že tento příspěvek je zanedbatelný.

$$C_i = \frac{\ln 2}{T_i} \cdot N_i, \quad (15)$$

kde T_i je poločas rozpadu a N_i současný počet atomů uranu 238. Aktivita každého radioaktivního nuklidu ve vzorku je tedy stejná: $7,78 \cdot 10^6$ Bq. Protože v řadě je 14 radioaktivních nuklidů, je celková aktivita

$$C = 14 \cdot \frac{m \cdot \ln 2}{T_i \cdot A_{238} \cdot u} \cdot 2 \frac{t}{T_{238}} \quad (16)$$

Číselně je $C = 1,09 \cdot 10^8$ Bq.

d) Aktivita před 3 miliardami let je

$$C_0 = \frac{\ln 2}{T_{238}} \cdot N_0 \quad (17)$$

číselně $C_0 = 1,24 \cdot 10^7$ Bq. Ke stejnému výsledku dojdeme výpočtem ze vztahu $C_0 = \frac{C_1}{P}$.

nuklid	poločas rozpadu T_i / rok	poměrné zastoupení P_i	počet atomů v současnosti N_i	hmotnost m_i / kg
U 238	4,50E+9	6,3E-01	1,59E+24	6,30E-01
Th 234	6,57E-2	9,2E-12	2,33E+13	9,04E-12
Pa 234	7,64E-4	1,1E-13	2,71E+11	1,05E-13
U 234	2,50E+5	3,5E-05	8,86E+19	3,44E-05
Th 230	7,50E+4	1,05E-05	2,66E+19	1,01E-05
Pa 226	1,60E+3	2,2E-07	5,67E+17	2,13E-07
Rn 222	1,05E-2	1,5E-12	3,72E+12	1,37E-12
Po 218	5,89E-6	8,2E-16	2,09E+09	7,55E-16
Pb 214	5,13E-5	7,2E-15	1,82E+10	6,45E-15
Bi 214	3,80E-5	5,3E-15	1,35E+10	4,78E-15
Po 214	5,07E-12	7,1E-22	1,80E+03	6,38E-22
Pb 210	2,20E+1	3,1E-09	7,79E+15	2,72E-09
Bi 210	1,37E-2	1,9E-12	4,85E+12	1,69E-12
Po 210	3,83E-1	5,4E-11	1,36E+14	4,73E-11
Pb 206	∞	3,7E-01	9,36E+23	3,20E-01
celkem bez He			2,53E+24	9,50E-01
He 4	∞		7,49E+24	4,98E-02

Tab. 1

Literatura:

[1] Rauner K.: *Kdy byla celá Země z radia?*, Školská fyzika VI, mimořádné číslo (1999), 98.