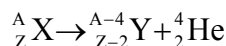


# VI. JADERNÁ FYZIKA

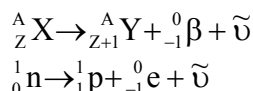
## TEORIE

**Typy radioaktivních přeměn:**

a) přeměna  $\alpha$  (jádra hélia)

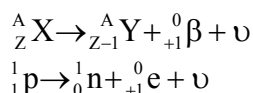


b) přeměna  $\beta^-$  (elektrony)



kde  $\tilde{\nu}$  je antineutrino.

c) přeměna  $\beta^+$  (pozitrony)



d) přeměna  $\gamma$  (fotony)



[ pomocí uvedených vztahů se řeší v části VI. příklady 1.1. až 1.7. ]

Při pronikání gama záření a neutronů látkou klesá intenzita úzkého svazku záření exponenciálně s tloušťkou  $x$  absorpčního materiálu podle vztahu:

$$I = I_0 e^{-\mu x},$$

kde  $\mu$  je koeficient absorpce daného prostředí. Pro jiná pole gama záření a neutronů je exponenciální zeslabení jen odhadem.

*Polotloušťka* materiálu je tloušťka, která zeslabí intenzitu radioaktivního záření na polovinu:

$$d_{0,5} = \frac{\ln 2}{\mu}$$

[ pomocí uvedených vztahů se řeší v části VI. příklady 1.8. a 1.9. ]

**Časový zákon radioaktivní přeměny:**

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

kde  $N_0$  je počet nepřeměněných jader v čase  $t = 0$ ,  $N(t)$  je počet dosud nepřeměněných jader v čase  $t$  a  $\lambda$  je konstanta přeměny (přeměnová konstanta), která udává pravděpodobnost přeměny jádra za 1 s.

*Polčas přeměny (rozpadu)* – doba, během níž klesne počet radioaktivních jader dané látky na polovinu:

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

*Střední doba života* – doba, za kterou klesne počet  $N_0$  radioaktivních jader dané látky na hodnotu

$$N = \frac{N_0}{e} \approx 0,368 N_0$$

**Aktivita zářiče** - počet jader, která se přemění za 1 s.

$$A = \left| \frac{dN}{dt} \right| = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = \lambda N \quad \text{jednotka: Bq}$$

Označíme-li aktivitu zářiče v čase  $t = 0$   $A_0$ , platí:

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

[ pomocí uvedených vztahů se řeší v části VI. příklady 1.10. až 1.23., 1.47. ]

**Vazebná energie** – energie potřebná k rozložení jádra na volné nukleony. Charakterizuje stabilitu jádra.

Hmotnostní schodek: 
$$B_j = Zm_{op} + (A - Z)m_{on} - m_{oj} ,$$

kde  $Z$  je protonové číslo,  $A$  je nukleonové číslo,  $m_{op}$  je klidová hmotnost protonu,  $m_{on}$  je klidová hmotnost neutronu,  $m_{oj}$  je klidová hmotnost jádra.

Vazebná energie: 
$$E_j = B_j c^2 ,$$

kde  $c$  je rychlost světla ve vakuu.

**Energetická bilance jaderné reakce**

$$Q = (\alpha_{in} - \alpha_{out}) \cdot 931,4; \quad \text{jednotka:}$$

MeV,

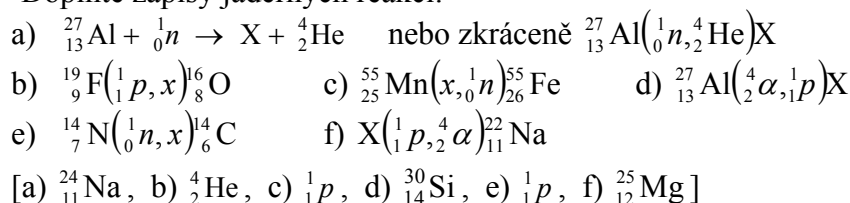
$\alpha_{in}$  - součet relativních atomových hmotností částic vstupujících do reakce,

$\alpha_{out}$  - součet relativních atomových hmotností částic vystupujících z reakce.

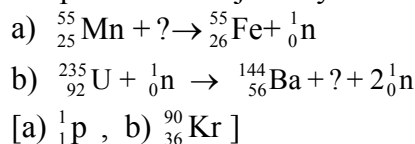
[ pomocí uvedených vztahů se řeší v části VI. příklady 1.24. až 1.28., 1.31., 1.36., 1.37., 1.40., 1.41. ]

## PŘÍKLADY

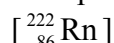
VI.1.1 Doplňte zápisy jaderných reakcí:



VI.1.2 Doplňte rovnice jaderných reakcí:



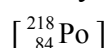
VI.1.3 Určete složení jádra izotopu prvku, který vznikne z uranu  ${}_{92}^{238}\text{U}$  po čtyřech přeměnách  $\alpha$  a dvou přeměnách  $\beta^-$ .



VI.1.4 Konečným produktem radioaktivních přeměn  ${}_{90}^{232}\text{Th}$  je izotop olova  ${}_{82}^{208}\text{Pb}$ . Vypočítejte, kolik částic  $\alpha$  a kolik částic  $\beta^-$  se při této přeměně uvolní.

[  $6\alpha + 4\beta^-$  ]

VI.1.5 Který nuklid vznikne z izotopu uranu  ${}_{92}^{238}\text{U}$  vyzářením pěti částic  $\alpha$  a dvou částic  $\beta^-$ ?



- VI.1.6 Radionuklid  $^{82}_{35}\text{Br}$  vysílá záření  $\beta^-$  a  $\gamma$ . Určete složení dceřiného atomu.  
 [ $^{82}_{36}\text{Kr}$ ]
- VI.1.7 Po ostřelování železa  $^{56}_{26}\text{Fe}$  neutrony vzniká izotop manganu s nukleonovým číslem 56. Ten je nestabilní a vykazuje  $\beta^-$  rozpad. Napište rovnice obou přeměn.
- VI.1.8 Při výbuchu štěpné bomby vzniká  $\gamma$  záření o střední energii 2 MeV. Jak silná musí být vrstva betonu, aby poskytovala stejnou ochranu jako ocelový pancíř tloušťky 10 cm? Lineární součinitel zeslabení  $\mu$  má pro energii 2 MeV hodnoty pro beton  $11\text{ m}^{-1}$  a pro ocel  $33\text{ m}^{-1}$ . Předpokládejte exponenciální průběh zeslabení.  
 [ $d = 30\text{ cm}$ ]
- VI.1.9 Vypočtete zeslabení hustoty toku neutronů pancířem tloušťky 10 cm, víte-li, že pro neutrony příslušné energie je polotloušťka 12 cm. Předpokládejte exponenciální průběh zeslabení.  
 [ $I = 0,56I_0$ ]
- VI.1.10 Radioaktivní preparát obsahuje  $10^6$  jader nuklidu s poločasem přeměny 1 minuta. Kolik jader se za 10 minut  
 a) přemění,  
 b) nepřemění?  
 [a)  $N_p = 999023$  b)  $N_{np} = 977$ ]
- VI.1.11 Za jakou dobu klesne počet nepřeměněných jader nuklidu s poločasem přeměny  $T$  pod jednu milióntinu původního počtu jader?  
 [ $t = 19,93T$ ]
- VI.1.12 Při radioaktivním rozpadu 4 kg polonia  $^{210}_{84}\text{Po}$  vzniklo během jedné hodiny množství helia, které zaujímá za normálních podmínek objem  $V = 89,29\text{ cm}^3$ . Určete poločas rozpadu polonia.  
 [ $T = 138\text{ d}$ ]
- VI.1.13 Najděte přeměnovou konstantu  $^{226}\text{Ra}$ , je-li poločas přeměny radia 1 550 let. Vypočtete střední dobu života atomu radia.  
 [ $\lambda = 1,42 \cdot 10^{-11}\text{ s}^{-1}$ ,  $\tau = 2\,236\text{ r}$ ]
- VI.1.14 Kolik atomů radia se rozpadá za 1 sekundu v 1 g preparátu  $^{226}\text{Ra}$ ? Přeměnová konstanta radia je  $1,42 \cdot 10^{-11}\text{ s}^{-1}$ .  
 [ $\Delta N = 3,78 \cdot 10^{10}$ ]
- VI.1.15 Kolik mililitrů helia vznikne během jednoho roku při rozpadu 1 g  $^{226}\text{Ra}$ ? Předpokládejte, že helium má teplotu  $0^\circ\text{C}$  a tlak  $1,013 \cdot 10^5\text{ Pa}$ .  
 [ $V = 0,043\text{ ml}$ ]
- VI.1.16 Konstanta přeměny  $\lambda$  izotopu rubidia  $^{89}\text{Rb}$  je  $0,00077\text{ s}^{-1}$ . Určete poločas přeměny a střední dobu života jádra.  
 [ $T = 892\text{ s}$ ,  $\tau = 1287\text{ s}$ ]
- VI.1.17 Určete poločas rozpadu radioaktivní látky, jestliže víte, že za 120 s se zmenší její množství o 20%.  
 [ $T = 373\text{ s}$ ]
- VI.1.18 Určete přeměnovou konstantu a poločas rozpadu radioaktivní látky, jestliže za 1 h klesla aktivita látky o 15%.  
 [ $\lambda = 4,51 \cdot 10^{-5}\text{ s}^{-1}$ ,  $T = 1,54 \cdot 10^4\text{ s}$ ]

- VI.1.19 Zářič, který obsahuje 1 g izotopu  $^{238}_{92}\text{U}$  vyzářuje  $1,24 \cdot 10^4$  částic  $\alpha$  za 1 s. Vypočítejte poločas rozpadu tohoto izotopu a jeho aktivitu.  
 $[T = 4,5 \cdot 10^9 \text{ roků}, A = 1,24 \cdot 10^4 \text{ Bq}]$
- VI.1.20 Aktivita 1 g uranu  $^{238}_{92}\text{U}$  je  $1,24 \cdot 10^4$  Bq. Vypočítejte přeměnovou konstantu a poločas přeměny uranu.  
 $[\lambda = 4,9 \cdot 10^{-18} \text{ s}, T = 4,5 \cdot 10^9 \text{ r}]$
- VI.1.21 Aktivita nuklidu  $^{82}_{35}\text{Br}$  poklesne za 5 hodin o 9,7 %. Produktem jaderné přeměny je  $^{82}_{36}\text{Kr}$ . Rozhodněte, jaký druh radioaktivního záření emituje jádro při rozpadu. Vypočítejte poločas přeměny a střední dobu života atomu  $^{82}_{35}\text{Br}$ .  
 $[\lambda = 5,669 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}, T = 1,42 \text{ dne}, \tau = 2,042 \text{ dne}]$
- VI.1.22 Určete stáří dřevěných předmětů, jejichž hmotnostní aktivita (tj. aktivita 1 kg látky) radioaktivního izotopu  $^{14}_6\text{C}$  je rovna 60 % aktivity  $^{14}_6\text{C}$  v čerstvě poražených stromech. Aktivita je v obou případech způsobena rozpadem izotopu uhlíku  $^{14}_6\text{C}$ , který se zabuduje do organických molekul během růstu stromů. Poločas přeměny  $^{14}_6\text{C}$  je 5 730 roků.  
 $[t = 4223 \text{ roků}]$
- VI.1.23 Určete přeměnovou konstantu radioaktivní látky, víte-li, že za hodinu klesne aktivita jejího záření  $\beta$  o 10 %. Produkt přeměn není radioaktivní.  
 $[\lambda = 2,93 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}]$
- VI.1.24 Jaká energie odpovídá hmotnostnímu úbytku 1 mg?  
 $[E = 90 \text{ GJ}]$
- VI.1.25 Jaká klidová energie odpovídá 1 u (atomové hmotnostní konstantě)?  
 $[E = 931,4 \text{ MeV}]$
- VI.1.26 Jakou energii mají produkty jaderné reakce  $^{27}_{13}\text{Al} + ^4_2\text{He} \rightarrow ^{30}_{14}\text{Si} + ^1_1\text{H}$ , když relativní atomová hmotnost izotopu hliníku je 26,9899 a izotopu křemíku 29,9832?  
 $(u = 1,66056 \cdot 10^{-27} \text{ kg}, m_p = 1,6726 \cdot 10^{-27} \text{ kg})$   
 $[\Delta E = 1,92 \text{ MeV}]$
- VI.1.27 Jakou energii má 1 g heliových jader vytvořených z protonů a neutronů, jestliže  $m_n = 1,6741 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ ,  $\alpha_{\text{He}} = 4,002604$  a  $N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ .  
 $[\Delta E = 4 \cdot 10^{30} \text{ eV}]$
- VI.1.28 Jakou energii mají produkty reakce  $^{10}_5\text{B} + ^2_1\text{D} \rightarrow ^{11}_5\text{B} + ^1_1\text{H}$ , jestliže relativní atomová hmotnost izotopu  $^{10}_5\text{B}$  je 10,016018, izotopu  $^{11}_5\text{B}$  je 11,01284 a izotopu  $^2_1\text{D}$  je 2,01472.  
 $[E = 9,3 \text{ MeV}]$
- VI.1.29 Jádro  $^{235}_{92}\text{U}$  se štěpí pomalým neutronem na dvě středně těžká jádra a několik neutronů. Produkty štěpení mají průměrně energii 200 MeV. Vypočítejte:  
 a) Energií štěpných produktů vzniklých štěpením 1 kg  $^{235}_{92}\text{U}$ .  
 b) Za jakou dobu se spotřebuje 1 kg  $^{235}_{92}\text{U}$  v reaktoru elektrárny o elektrickém výkonu 1000 MW? Její elektrická účinnost je 33 % tepelného výkonu.  
 $[E = 8,20 \cdot 10^{13} \text{ J}, t = 7,5 \text{ h}]$

VI.1.30 Vypočítejte vlnovou délku záření, které by mohlo vyvolat vytvoření elektron-pozitronového páru.

$$[\lambda_m = 1,213 \text{ pm}]$$

VI.1.31 Ve druhém stadiu syntézy jader ve hvězdách dochází ke spojení tří jader  ${}^4_2\text{He}$  do jednoho jádra  ${}^{12}_6\text{C}$ . Vypočítejte energii uhlíkových jader vytvořených syntézou. Relativní atomová hmotnost hélia je 4,00260.

$$[E = 7,29 \text{ MeV}]$$

VI.1.32 Elektrický výkon jaderné elektrárny je 1000 MW. Palivové články jejích reaktorů obsahují 82000 kg uranu obohaceného na 5 %  ${}^{235}_{92}\text{U}$ . Tepelný výkon elektrárny je 3300 MW.

a) Jaká je účinnost výroby elektřiny v elektrárně ?

b) Jaká je denní spotřeba  ${}^{235}_{92}\text{U}$  za předpokladu, že se tepelný výkon realizuje plně štěpením  ${}^{235}_{92}\text{U}$  a energie produktů jednoho štěpení je průměrně 200 MeV.

c) Jaká je teoretická doba fungování reaktoru z jedné vsázky paliva, spotřebuje-li se štěpitelný  ${}^{235}_{92}\text{U}$  na jednu pětinu původního obohacení ?

$$[\eta = 33 \%, m = 1,05 \text{ kg}, t = 8,53 \text{ roků}]$$

VI.1.33 Pomocí zákona zachování mechanické energie a hybnosti dokažte, že při centrální pružné srážce nalétávající částice o hmotnosti  $m$  a terčové částice o hmotnosti  $M$  (terčová částice je před interakcí v klidu) předá nalétávající částice terčové relativní energii

$$\frac{E - E'}{E} = \frac{4mM}{(m + M)^2}, \text{ kde } E \text{ a } E' \text{ jsou kinetické energie nalétávající a terčové částice.}$$

*Návod:* vyjádřete pomocí kinetických energií nalétávající částice její relativní úbytek při interakci, potřebné rychlosti vypočítejte z obou zákonů zachování.

VI.1.34 Pro jaký poměr hmotností nalétávající a terčové částice bude ztráta energie nalétávající částice největší při centrálním pružném rozptylu ?

*Návod:* Využijte výsledku předchozí úlohy.

$$[\text{pro } m = M \text{ } 100 \%]$$

VI.1.35 Jakou část své kinetické energie ztratí neutron při centrálním pružném rozptylu na jádru

a) lehkého vodíku,

b) deuteria,

c) uhlíku,

d) na železu?

$$[100 \%, 89 \%, 28,4 \%, 6,89 \%]$$

VI.1.36 Může dojít k samovolné emisi protonu z jádra  ${}^{238}_{92}\text{U}$  za vzniku  ${}^{237}_{91}\text{Pa}$  ?

$$\alpha({}^{238}_{92}\text{U}) = 238,05079, \alpha({}^{237}_{91}\text{Pa}) = 237,05121, \alpha(\text{p}) = 1,00783.$$

[ Ne, jde o endotermický proces ]

VI.1.37 Může dojít k samovolné emisi  ${}^{238}_{92}\text{U} \rightarrow {}^{234}_{90}\text{Th} + {}^4_2\text{He}$  ?

$$\alpha({}^{234}_{90}\text{Th}) = 234,04363, \alpha({}^4_2\text{He}) = 4,00260.$$

[ Ano, jde o exotermický proces ]

VI.1.38 Jakou kinetickou energii získá částice alfa v předchozím příkladě ? Předpokládejte, že jádro uranu před emisí je v klidu.

*Návod :* Použijte zákonů zachování mechanické energie a hybnosti.

$$[ E_{k\alpha} = 4,1758 \text{ MeV} ]$$

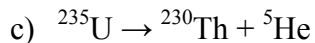
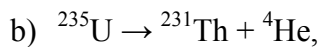
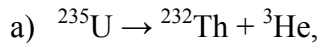
VI.1.39 Srovnajte hustoty jádra  $^{235}_{92}\text{U}$  a protonu.

$$[ \rho_U = 1.15 \cdot 10^{18} \text{ kgm}^{-3}, \rho_p = 1.15 \cdot 10^{18} \text{ kgm}^{-3} ]$$

VI.1.40 Porovnejte vazební energii připadající na jeden nukleon  $^4_2\text{He}$  v jádře  $^4_2\text{He}$  a práci  $W_o$ , kterou musíme vykonat na odstranění jednoho protonu z jádra.

$$[ E_v/A = 7,07 \text{ MeV/nukleon}, W_o = 19,82 \text{ MeV} ]$$

VI.1.41 Která z teoreticky možných jaderných přeměn může proběhnout samovolně ?



$$\alpha(^{235}\text{U}) = 235,0429, \alpha(^{232}\text{Th}) = 232,0381, \alpha(^{231}\text{Th}) = 231,0363, \alpha(^{230}\text{Th}) = 230,0331,$$

$$\alpha(^3\text{He}) = 3,0160, \alpha(^4\text{He}) = 4,0026, \alpha(^5\text{He}) = 5,0122,$$

VI.1.42 Jaké zvýšení teploty lidského těla by způsobilo zvýšení vnitřní energie molekul o přírůstek rovnající se letální (smrtné) dávce záření 5 Gy?

$$[ \Delta T = 0,0012 \text{ K} ]$$

VI.1.43 Jakou dávku by obdržel při celotělovém ozáření člověk, vzrostla-li teplota jeho těla o 0,1 K?

*Návod:* Předpokládejte, že měrná tepelná kapacita těla je srovnatelná s měrnou tepelnou kapacitou vody.

$$[ 420 \text{ Gy, což je s jistotou letální dávka} ]$$

VI.1.44 Kolik protonů energie 5 MeV vytvoří v nádoru objemu  $10^{-6} \text{ m}^3$  dávku 40 Gy?

$$[ 5 \cdot 10^{10} \text{ protonů} ]$$

VI.1.45 Jakou celkovou kinetickou energii musí mít deutron a triton, aby se k sobě přiblížily na vzdálenost dosahu silných jader sil  $10^{-15} \text{ m}$  ? Při jaké teplotě takové kinetické energie dosáhnou ? Jakým napětím musíte urychlit deutron, aby získal potřebnou kinetickou energii?

*Nápověda:* Použijte zákon zachování mechanické energie a předpokládejte centrální pružný rozptyl; dále předpokládejte, že kinetická energie deutronu a tritonu se určí jako kinetická energie molekuly ideálního plynu s pěti a šesti stupni volnosti.

$$[ E_k = 1,43 \text{ MeV}, T = 3 \cdot 10^9 \text{ K}, U = 1,43 \text{ MV} ]$$

VI.1.46 Z grafu závislosti vazební energie připadající na jeden nukleon zjistíme hodnoty této veličiny pro několik jader.

a)  $\epsilon(^7\text{Li}) = 5,60 \text{ MeV/nukleon}$

b)  $\epsilon(^{84}\text{Kr}) = 8,72 \text{ MeV/nukleon}$

c)  $\epsilon(^{239}\text{Pu}) = 7,56 \text{ MeV/nukleon}$

Jakou energii byste získali syntézou uvedených jader z protonů a neutronů, kdyby byla technicky proveditelná?

$$[ E_{Li} = 39,2 \text{ MeV}, E_{Kr} = 732,5 \text{ MeV}, E_{Pu} = 1807 \text{ MeV} ]$$

VI.1.47 Vypočítejte, kolikrát se zmenší aktivita zářiče po uplynutí deseti poločasů přeměny.  
[ 1024 krát ]