

Fyzika II

Jaderná fyzika

- Čtyři základní fyzikální interakce

Typ interakce	Relativní síla	Dosah (m)	Zprostředkující částice
elektromagnetická	10^{-2}	∞	γ foton
gravitační	10^{-38}	∞	G graviton
slabá	10^{-13}	10^{-18}	W^{\pm}, Z^0 intermediální bosony
silná	1	10^{-15} ∞ (hadrony) (kvarky)	g gluony

- Leptony
 - Částice nepodstupující silnou interakci
 - Fermiony ($s = \frac{1}{2}$)
 - Částice bez další vnitřní struktury

Název leptonu	Symbol	Náboj (e)	Antičástice
Elektron	e^{-}	-1	e^{+} (pozitron)
Elektronové neutrino	ν_e	0	$\bar{\nu}_e$
Mion	μ^{-}	-1	μ^{+}
Mionové neutrino	ν_{μ}	0	$\bar{\nu}_{\mu}$
Tauon	τ^{-}	-1	τ^{+}
Tauonové neutrino	ν_{τ}	0	$\bar{\nu}_{\tau}$

- Hadrony
 - Postupují silné interakce
 - Tvořeny kvarky
 - Mají vnitřní strukturu -> jedná se o složené částice
 - Mezony = hadrony, jež jsou zároveň bosony
 - Baryony = hadrony, jež jsou zároveň fermiony (např. protony, neutrony)

Jméno hadronu	Značka	Kvarkové složení	Náboj (e)	Kvantové spinové číslo (s)
proton	p^+	uud	1	1/2
neutron	n^0	udd	0	1/2
omega	Ω^-	sss	-1	3/2
pion	π^+	$u\bar{d}$	+1	0
kaon	K^-	$s\bar{d}$	-1	0
ro	ρ^+	$d\bar{b}$	+1	1

- Standardní model
 - Veškerá známá hmota ve vesmíru se skládá ze šesti druhů kvarků a šesti druhů leptonů a všechny jevy, které ve vesmíru pozorujeme, dovedeme vysvětlit pomocí čtyř druhů interakcí.
 - Klasifikace kvarků

Jméno kvarku	Značka	Hmotnost (MeV)	Náboj (e)	Antikvark
down (dolů)	d	5	-1/3	\bar{d}
up (nahoru)	u	3	+2/3	\bar{u}
strange (podivný)	s	95	-1/3	\bar{s}
charm (převážný)	c	1300	+2/3	\bar{c}
bottom (spodní)	b	4200	-1/3	\bar{b}
top (svrchní)	t	173000	+2/3	\bar{t}

- Formální značení jádra A_ZX , např. ${}^{235}_{92}U$ (U je značka uranu)
 - X – značka prvku
 - Z – protonové číslo (počet protonů v jádře)
 - A – nukleonové číslo (počet protonů a neutronů v jádře)
 - N – neutronové číslo (počet neutronů v jádře) $A = N + Z$

- Empirický vztah pro poloměr jádra $r \approx 1,3 \cdot 10^{-15} A^{\frac{1}{3}} = r_0 A^{\frac{1}{3}} \text{ m}$
 - Poloměr jádra roste s počtem nukleonů v jádře

- Hmotnost jádra $m_j = A \cdot m_u$
 - Atomová hmotnostní jednotka $m_u = \frac{1}{12} m({}^{12}_6C) \approx 1,6604 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$
 - Vyjádření hmotnosti protonu a neutronu z hmotnosti jádra

$$m_n \approx 1,6748 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \approx 1,0086654 \cdot m_u$$

$$m_p \approx 1,6725 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \approx 1,0072766 \cdot m_u$$

- Hustota jádra $\rho_j = \frac{m_j}{V_j} = \frac{Am_u}{\frac{4}{3}\pi r^3} \approx 10^{17} \text{ kg m}^{-3}$

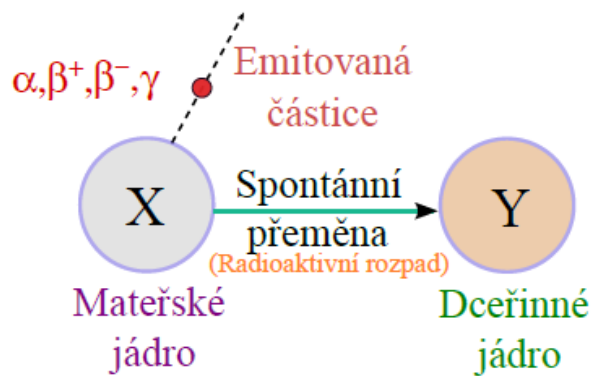
- Definice pojmů
 - Prvek – skupina atomů se stejným Z
 - Nuklid – atom o dané hodnotě A a Z
 - Nestabilní nuklidy – radionuklidy
 - Izotop – nuklidy se stejným Z a různými A (resp. N)
 - Izobar – nuklidy se stejným A a různými Z
 - Izoton – nuklidy se stejným N a různými Z

- Hmotnostní úbytek $\Delta m = Zm_p + (A - Z)m_n - m_j \neq 0$

- Vazební energie $E_V = \Delta mc^2$

- Magická čísla
 - Jádra atomů, jejichž počet protonů či neutronů se rovná magickému číslu, jsou ta nejstabilnější
 - 2, 8, 20, 28, 50, 82, (pro neutron) 126

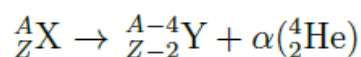
- Kapkový model atomového jádra
 - Analogie mezi kapkou kapaliny a atomovým jádrem
 - Jádro je kapka kapaliny, v níž se projevují objemové a povrchové síly
 - Nukleony představují molekuly vody (naráží, konají tepelný pohyb)
 - Objemová energie jádra $E_o = 6AU$ $E_o = a_1 A$
 - Povrchová energie jádra $E_{po} = -a_2 A^{\frac{2}{3}}$
 - Celková vazební energie (Weizächerův semiempirický vzorec vazební energie)
 - Součet objemové, povrchové, coulombické energie a symetrizačního členu
$$E_V = a_1 A - a_2 A^{\frac{2}{3}} - a_3 \frac{Z(Z-1)}{A^{\frac{1}{3}}} - a_4 \frac{(N-Z)^2}{A}$$
- Slupkový model atomového jádra
 - Snaží se vysvětlit existenci magických čísel a jiných jaderných vlastností na základě interakce jednotlivých nukleonů se silovým polem ostatních nukleonů
 - Užívá se funkce potenciální energie – pravoúhlé jámy se zaoblenými rohy
 - Neutrony a protony obsazují odlišné skupiny dovolených stavů
- Kolektivní model atomového jádra
 - Kombinace obou předchozích modelů
 - Počítá již i s možností kmitání a rotací jádra jako celku
 - Výrazně složitější
- Radioaktivní rozpad
 - 270 nuklidů stabilních
 - Cca 1200 nuklidů nestabilních – radionuklidy
 - Radioaktivita
 - Spontánní jaderná přeměna radionuklidů doprovázena emisí radioaktivního záření
 - Přirozená X umělá
 - Jaderná přeměna
 - Proces, při němž dochází ke změně ve složení atomového jádra (mění se hodnota Z nebo N)
 - Radioaktivní zářiče
 - Látky a předměty obsahující radionuklidy



- Rozpadový zákon (λ – rozpadová konstanta) $N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$
- Rychlost rozpadu (aktivita) $R = R_0 e^{-\lambda t}$ $R = \lambda N(t)$
- Poločas rozpadu $T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$
- Střední doba života jádra $\tau = 1/\lambda$
- Základní (hmotnostní) podmínka $m(X) > m(Y) + m(\text{částice})$
 - Přeměnová energie $Q = [m(X) - m(Y) - m(\text{částice})]c^2$

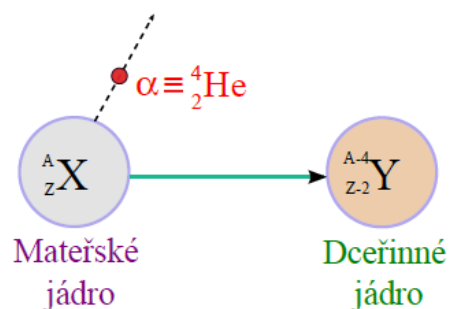
○ Radioaktivita (rozpad) α

- Převážně u nuklidů těžkých prvků
- Při rozpadu se tvoří α částice, která představuje jádro hélia



- Aby mohlo k radioaktivitě dojít, musí být splněna podmínka

$$m(X) > m(Y) + m(\alpha)$$

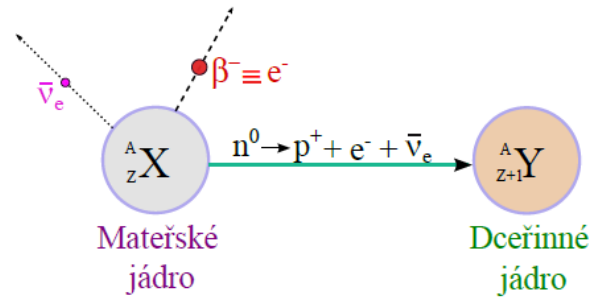
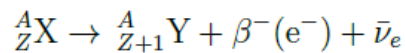


- Přeměnová energie $Q = K_Y + K_\alpha = \frac{1}{2} m_Y v_Y^2 + \frac{1}{2} m_\alpha v_\alpha^2$

- Radioaktivita β
 - Nejčastější a nejdůležitější druh radioaktivity

- Radioaktivita β^-

- Nukleonové číslo je konstantní
- Protonové číslo se zvýší o 1
- Při rozpadu se tvoří elektron a elektronové antineutrino



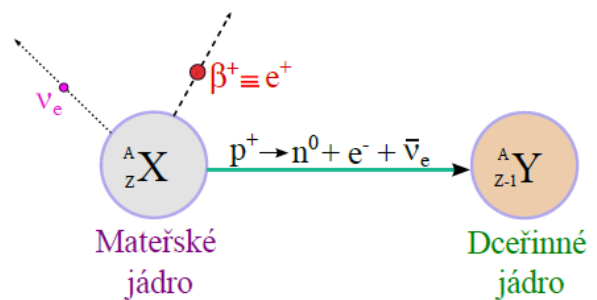
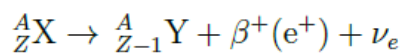
- Aby mohlo k radioaktivitě dojít, musí být splněna podmínka

$$m(X) > m(Y) + m_e$$

- Vyskytuje se u jader s přebytkem neutronů
- Volný neutron je nestabilní
 - Přebytečný neutron podstoupí přeměnu $n^0 \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}_e$
- Přeměnová energie $Q = [m(X) - m(Y) - m_e]c^2 = K_{\beta^-} + K_{\bar{\nu}_e} > 0$

- Radioaktivita β^+

- Stejný počet nukleonů
- Protonové číslo se sníží o 1
- Při rozpadu se tvoří pozitron a elektronové neutrino



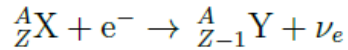
- Aby mohlo k radioaktivitě dojít, musí být splněna podmínka

$$m(X) > m(Y) + m_e$$

- Vyskytuje se u jader s přebytkem protonů
 - Přebytečný proton podstoupí přeměnu $p^+ \rightarrow n^0 + e^+ + \nu_e$

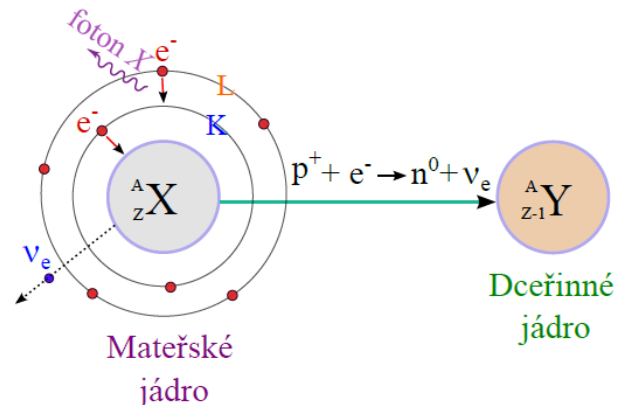
- Elektronový záchyt (druh β radioaktivity)

- Elektron z K (nebo L) slupky atomu je zachycen jádrem

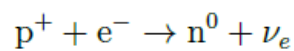


- Aby mohlo k radioaktivitě dojít, musí být splněna podmínka

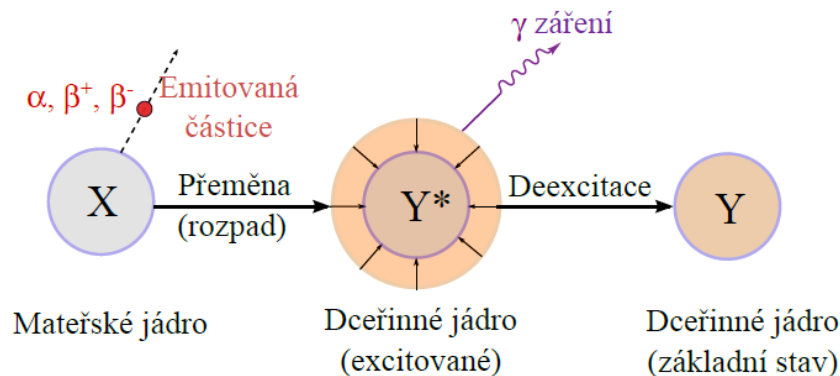
$$m(X) + m_e > m(Y)$$



- Jádro se zbavuje přebytečných protonů, že dojde k jeho reakci s elektronem



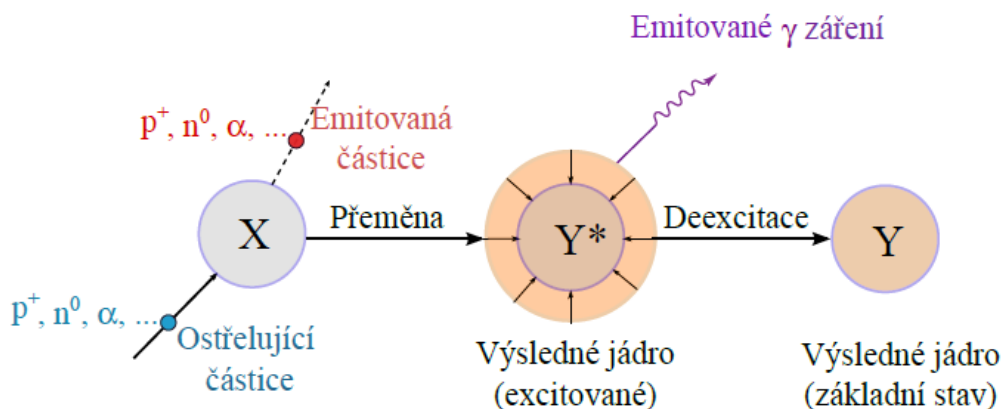
- Radioaktivita γ

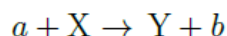


- Neexistují žádné čisté přirozené γ zářiče
- Většina radionuklidů jsou smíšené zářiče ($\alpha - \gamma$ nebo $\beta - \gamma$)

- Jaderná reakce

- Jaderná přeměna vyvolaná vnějším zásahem (interakcí s další částicí / jádrem)





kde a značí nalétající (ostřelující) částici (příp. jádro), X ostřelované (terčíkové) jádro, Y je složené jádro a b je emitovaná částice.

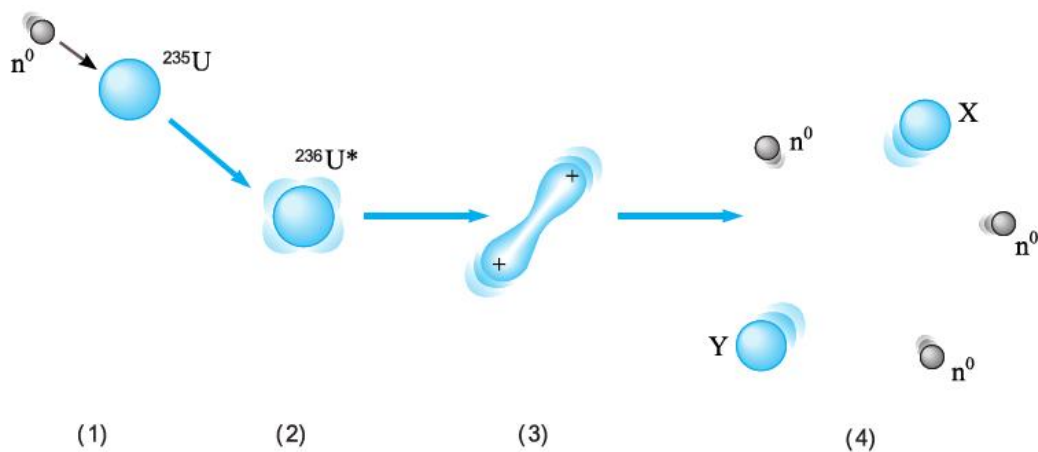
- Jaderné reakce musí splňovat následující tři zákony zachování
 1. Zachování nukleonového čísla A , tj. celkový počet nukleonů musí stejný před reakcí, tak po reakci.
 2. Zachování náboje, tj. součet nábojů před reakcí se musí rovnat součtu nábojů po reakci.
 3. Zachování energie, hybnosti a momentu hybnosti. Tyto veličiny se zachovávají, protože jaderná reakce zahrnuje jen vnitřní síly mezi terčíkovým jádrem a ostřelující částicí (příp. jádrem).

- Reakční energie $Q = (K_Y + K_b) - K_a = (m_X + m_a - m_Y - m_b)c^2$

Je-li reakční energie Q kladná, tak hovoříme o **exoenergetické (exotermické) reakci**, naopak je-li reakční energie Q záporná, tak hovoříme o **endoenergetické (endotermické) reakci**.

- Dělení reakcí
 - Interakce probíhají dvěma způsoby (více info str. 326)
 - Přímý proces
 - Proces složeného jádra
 - Mezi další jednoduché jaderné reakce patří (více info str. 327)
 - Radiační záchyt
 - Fotojaderná reakce
 - Dělení reakcí podle typu ostřelujících částic
 - Reakce s nabitými částicemi
 - Reakce s neutrony
 - Reakce s fotony
 - Štěpná jaderná reakce
 - Termojaderná reakce
 - Vždy nemusí docházet k jaderným reakcím, ale jen např. k interakci na úrovni rozptylu
 - Pružný rozptyl $a + X \rightarrow X' + a'$
 - Nepružný rozptyl $a + X \rightarrow X^* + a'$

- Štěpení atomových jader (popis procesu štěpení)



1. Těžké jádro zachytí neutron.
2. Tento záchyt má za následek, že se zvýší počet nukleonů v daném jádře (zvýší se nukleonové číslo), nové jádro se velmi krátkou dobu se dostane do excitovaného stavu (značeno hvězdičkou) a počne oscilovat.
3. Jádro se počne deformovat, protony z obou polovin jádra se začnou výrazně odpuzovat, čímž podpoří deformaci jádra do tvaru jakési „činky“, vibrace se stávají nestabilními, dochází k zaškrcování „krku“ mezi oběma polovinami.
4. Pokračující zaškrcování vede následně k rozštěpení těžkého jádra na dva fragmenty (lehčí jádra) X a Y, což je současně doprovázeno emitováním několika neutronů.

- Řetězová jaderná reakce
$$n(t) = n_0 e^{\frac{k-1}{\tau_n} t}$$
 - Multiplikační faktor k
 - Střední doba neutronového cyklu τ_n
 - Rozdělení reakcí
 - Neřízená reakce (jaderná bomba) $k > 1$
 - Řízená reakce (jaderný reaktor) $k = 1$

- Syntéza lehkých jader
 - Oproti získávání energie štěpením jader mnoho výhod (čistota, bezpečnost)
 - Exoenergetická reakce

$$Q = E_{Vf} - E_{Vi} = \bar{E}(A_1 + A_2) - A_1\bar{E}_1 + A_2\bar{E}_2 = A_1(\bar{E} - \bar{E}_1) + A_2(\bar{E} - \bar{E}_2) > 0$$

- Střední vazební energie na nukleon
$$\bar{E} = \frac{E_V}{A}$$
- Příklad využití: deuterium a tritium

