

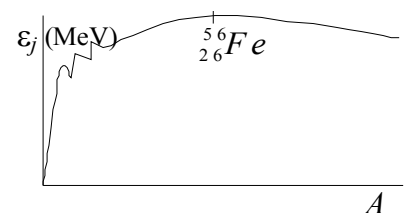
23 Vlastnosti atómového jadra a jadrové reakcie

23.1 časticové zloženie jadier

- atómové jadrá sú zložené sústavy. Skladajú sa z **nukleónov**, t.j. **neutrónov** a **protónov**
- **základné pojmy**:
 - o **protónové (atómové) číslo Z**: udáva počet protónov v jadre ($Z \geq 1$)
 - o **neutrónové číslo N**: udáva počet neutrónov v jadre ($N \geq 0$)
 - o **nukleónové (hmotnostné) číslo A**: udáva počet protónov a neutrónov v jadre ($A = Z + N$)
 - o **elektrický náboj jadra q_j** : závisí od protónového čísla; rozhoduje o stavbe elektrónového obalu, a tým aj o chemických vlastnostiach atómu
 - $q_j = +Ze$, $e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
 - o **chemický prvok ${}_Z X$** : látka, ktorej atómy majú rovnaký počet Z protónov v jadrách
 - o **nuklid ${}_Z^A X$** : látka, ktorej atómy majú jadrá s rovnakým zložením
 - o **izotopy prvku X**: rôzne nuklidy daného prvku
- pre **skutočnú pokojovú hmotnosť $m(X)$** častice X platí:
 - o $m(X) = A_r(X)m_u$, kde A_r je **relatívna atómová hmotnosť** prvku a m_u je **atómová hmotnostná konštanta** ($m_u = 1,660 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$)
- pre hmotnosť jadra platí: hmotnosť jadra je vždy menšia ako súčet hmotností Z protónov a N neutrónov
 - o $m_j < m_j' = Z.m_p + N.m_n$

23.2 hmotnostný úbytok a väzbová energia jadra

- nukleóny v jadre sú viazané oveľa silnejšie ako elektróny v atómovom obale
- **väzbovú energiu E_j** jadra ${}_Z^A X$ definujeme ako energiu, ktorú by sme museli dodať, aby sa jadro rozdelilo na Z protónov a N neutrónov
- podľa Einsteinovho vzťahu $\Delta E = \Delta m.c^2$ každej zmene ΔE vnútornej energie zodpovedá zmena Δm pokojovej hmotnosti sústavy. Pri atómových jadrách je táto zmena daná vzťahom:
 - o $\Delta m = B_j = Z.m_p + N.m_n - m_j$
 - o $\Delta m = B_j = (Z.A_{rp} + N.A_{rn} - A_{rj})m_u$, kde B_j **hmotnostný úbytok**
- **väzbovú energiu E_j** jadra vypočítame podľa vzťahu:
 - o $E_j = \Delta m.c^2 = B_j.c^2$
- na jednu hmotnostnú jednotku pripadá energia:
 - o $E_0 = m_u.c^2 = 931,5 \text{ MeV}$
- čím väčší je B_j (a teda aj E_j), tým je v porovnaní so $Z.m_p + N.m_n$ jadro ľahšie, a tým silnejšie sú nukleóny v jadre viazané. Energiu E_j musíme jadru dodať, ak ho chceme rozložiť na jednotlivé nukleóny. Rovnako veľká energia E_j sa uvoľní pri syntéze jadra z jednotlivých nukleónov.
- **priemerná väzbová energia ϵ_j** pripadajúcu na jeden nukleón vypočítame podľa vzťahu:
 - o $\epsilon_j = \frac{E_j}{A}$
 - o čím je hodnota ϵ_j väčšia, tým ťažšie je rozdeliť dané jadro na jednotlivé nukleóny, alebo z neho niektoré nukleóny oddeliť
- nukleóny v jadre viažu **jadrové sily**:
 - o sú príťažlivé



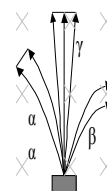
- pôsobia bez rozdielu medzi protónmi a neutrónmi
- pôsobia len na malý počet okolitých nukleónov
- majú krátky dosah (rádovo $10^{-15}m$; do týchto vzdialeností prekonávajú elektrostatické sily). Dosah jadrových síl približne určuje vzťah:
 - $R = R_0 \cdot A^{\frac{1}{3}}$, kde $R_0 = 1,3 \cdot 10^{-15} m$ a A je nukleónové číslo (tento vzťah vychádza z predpokladu, že atóm má tvar gule a celý priestor vnútri gule je úplne vyplnený nukleónmi)

23.3 jadrové reakcie

- pri mnohých jadrových procesoch sa mení časticové zloženie jadier
- rozlišujeme dva typy jadrových reakcií:
- **syntéza (fúzia)** ľahkých jadier na ťažšie ($A < 56$, zvyčajne $A \ll 56$)
 - ${}^2_1H + {}^3_1H \rightarrow {}^4_2He + {}^1_0n + E_r = 17,6MeV$
 - táto reakcia prebieha pomaly na Slnku
 - ${}^2_1H + {}^2_1H \rightarrow {}^3_2He + {}^1_0n + E_r = 3,25MeV$
 - ${}^2_1H + {}^2_1H \rightarrow {}^3_1H + {}^1_1H + E_r = 4,03MeV$
 - tieto reakcie prebiehajú ľahko, no je nedostatok trícia
 - ${}^1_1p + {}^{11}_5B \rightarrow 3{}^4_2He + E_r = 8,7MeV$
 - ${}^3_2He + {}^3_2He \rightarrow {}^4_2He + 2{}^1_1H + E_r = 12,8MeV$
 - ekologicky čisté reakcie
- **štiepenie** ťažkých jadier na ľahké ($A > 56$, zvyčajne $A > 200$)
 - ${}^1_0n + {}^{235}_{92}U \rightarrow {}^{144}_{56}Ba^* + {}^{89}_{36}Kr^* + 3({}^1_0n)$
 - ${}^1_0n + {}^{235}_{92}U \rightarrow {}^{91}_{38}Sr^* + {}^{140}_{54}Xe^* + 5({}^1_0n)$
 - tieto reakcie majú dve spoločné vlastnosti:
 - v každej reakcii sa uvoľňuje asi 200 MeV energie, z toho asi 80 % ako kinetická energia jadier a neutrónov v koncovom stave
 - vo väčšine reakcií vznikajú opäť neutróny, ktoré vyvolávajú ďalšie štiepenie – vzniká reťazová reakcia. Určitému usporiadaniu vzorky zodpovedá istý **stredný počet účinných neutrónov k** (priemerný počet neutrónov uvoľnených z jadra pri štiepení, ktoré vyvolávajú ďalšie štiepenie). Pri $k > 1$ sa reťazová reakcia **lavínovite zväčšuje**, pri $k < 1$ **vyhasína**, pri $k = 1$ je **stacionárna**.
- pre všetky jadrové procesy, vrátane reakcií, pri ktorých sa mení časticové zloženie jadier, platia zákony zachovania hybnosti, relativistickej hmotnosti a energie, počtu nukleónov a elektrického náboja

23.4 prirodzená a umelá rádioaktivita, jadrové žiarenie

- rozlišujeme tri zložky **jadrového žiarenia** – α , β , γ (sú rozdelené podľa zvyšujúcej sa prenikavosti)
- tri zložky jadrového žiarenia sa v magnetickom poli správajú rozlične. Žiarenie γ sa neodchyľuje, žiarenia α , β sa odchyľujú na opačné strany.
- jadrové žiarenie vzniká pri samovoľných premenách niektorých atómových jadier. Nuklidy, ktorých jadrá vysielajú jadrové žiarenie, nazývame **rádioaktívne**.
- existuje asi 2 000 nuklidov, z toho v prírode sa vyskytuje asi 264 stabilných a 50 nestabilných nuklidov
- **α – rozpad:**
 - uvoľňuje sa α -častica; má malú prenikavosť



- ${}^A_Z X \rightarrow {}^4_2 \text{He} + {}^{A-4}_{Z-2} Y$
- β – rozpad:
 - β^+ :
 - protón sa premieňa na neutrón, uvoľňuje sa pozitron ${}^0_{+1} e$ a neutríno ν
 - ${}^1_1 p \rightarrow {}^1_0 n + {}^0_{+1} e + \nu$
 - ${}^A_Z X \rightarrow {}^A_{Z-1} Y + {}^0_{+1} e + \nu$
 - β^- :
 - neutrón sa premieňa na protón, uvoľňuje sa elektrón ${}^0_{-1} e$ a antineutríno $\bar{\nu}$
 - ${}^1_0 n \rightarrow {}^1_1 p + {}^0_{-1} e + \bar{\nu}$
 - ${}^A_Z X \rightarrow {}^A_{Z+1} Y + {}^0_{-1} e + \bar{\nu}$
- γ :
 - má najväčšiu prenikavosť
 - ${}^0_{-1} e + {}^0_{+1} e \rightarrow \gamma + \gamma$ (označuje sa ako **anihilácia**)

23.4.1 časový priebeh rádioaktívnej premeny

- počet rozpadnutých častíc v čase závisí od počtu častíc na začiatku a od uplynutého času (úbytok častíc vyjadruje znamienko mínus):
 - $-dN = \lambda \cdot N \cdot dt$, kde λ je **rozpadová konštanta**; jednotkou rozpadovej konštanty je **Bequerel** ($[\lambda] = s^{-1} = Bq$)
- pre počet aktívnych častíc N po uplynutí času t platí:
 - $\frac{dN}{N} = -\lambda \cdot dt \Rightarrow \int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = -\lambda \int_0^t dt \Rightarrow \ln \frac{N}{N_0} = -\lambda t \Rightarrow \frac{N}{N_0} = e^{-\lambda t} \Rightarrow N = N_0 e^{-\lambda t}$, kde N_0 je počet aktívnych častíc na začiatku
- **polčas rozpadu T** :
 - čas, za ktorý sa rozpadne polovica aktívnych častíc
 - $\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T} \Rightarrow \frac{1}{2} = e^{-\lambda T} \Rightarrow \ln 1 - \ln 2 = -\lambda T \ln e \Rightarrow \ln 2 = \lambda T \Rightarrow T = \frac{\ln 2}{\lambda}$
- **aktivita A** :
 - určuje počet premien vo vzorke určitého rádionuklidu za 1 s
 - $A = -\frac{dN}{dt} = -\frac{d}{dt}(N_0 e^{-\lambda t}) = -N_0 e^{-\lambda t} (-\lambda) = N_0 \lambda e^{-\lambda t} = A_0 e^{-\lambda t}$

23.5 elementárne častice

- všetky interakcie medzi časticami možno rozdeliť do štyroch skupín:
 - **silná interakcia**: pôsobí napr. medzi nukleónmi v jadre
 - **elektromagnetická interakcia**: medzi všetkými elektricky nabitými časticami
 - **slabá interakcia**: uplatňuje sa napr. pri rádioaktívnej premene ${}^1_0 n \rightarrow {}^1_1 p + {}^0_{-1} e + \bar{\nu}$
 - **gravitačná interakcia**
- najmenšie častice, z ktorých sa skladajú protóny, neutróny, mezóny π a pod., nazývame **kvarky**
- pre častice látky platí:

Sústava	Stavebné kamene	Pôvod väzby	Typická väzbová energia
pevné látky, kvapaliny	atómy	chemické sily	1 eV
atóm	elektróny, jadro	elektrické sily	10 eV
atómové jadro	nukleóny	jadrové sily	1 MeV = 10^6 eV
protóny, neutróny	kvarky	medzikvarkové sily	1 GeV = 10^9 eV