

Fizika nevtronskih jedrskih naprav

Skripta v nastajanju po predavanjih prof. dr. Luka Snoj, FMF, IJS

Teodor Jovanovski

8. oktober 2025

Kazalo

1	Jedrske sile in vezavna energija	3
1.1	Osnovne interakcije v jedru	3
1.2	Vezavna energija	3
1.3	Ocene pomembnih količin	3
2	Modeli atomskega jedra	4
2.1	Kapljični model in semiempirična masna formula	4
2.2	Lupinski model in magična jedra	5
3	Stabilnost jeder in energija jedrskih reakcij	5
3.1	Stabilna jedra	5
3.2	Energija razpada	5
3.3	Ocena sproščene energije pri cepitvi	5

1 Jedrske sile in vezavna energija

V naravi poznamo štiri osnovne sile: gravitacijsko, elektromagnetno, šibko jedrsko in močno jedrsko silo. V jedrski fiziki sta ključni slednji dve.

1.1 Osnovne interakcije v jedru

Močna jedrska sila je sila, ki veže nukleone (protone in nevtrone) skupaj v atomsko jedro. Njene ključne lastnosti so:

- Je izjemno močna, vendar ima zelo kratek doseg, ki je reda velikosti premera jedra.
- Deluje le na razdaljah približno med 0.5 fm in 2 fm ($1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$).
- Na manjših razdaljah postane odbojna, kar preprečuje, da bi se nukleoni zlili med seboj.
- Je neodvisna od naboja; deluje enako med protoni-protoni, nevtroni-nevtroni in protoni-nevtroni.

Potencial močne sile si lahko predstavljamo kot potencialno jamo. Nukleoni so ujeti v tej jami, ki predstavlja jedro.

Šibka jedrska sila je odgovorna za nekatere jedrske razpade, predvsem za razpad beta (β). Pri tem razpadu se v jedru nevtron pretvori v proton (ali obratno), kar spremeni vrstno število elementa. Njen doseg je še bistveno krajši od dosega močne sile.

Elektromagnetna sila deluje med nabitimi delci. V jedru povzroča odboj med pozitivno nabitimi protoni. Ker ima neskončen doseg, njen vpliv narašča s številom protonov in pri težjih jedrih pomembno prispeva k nestabilnosti.

1.2 Vezavna energija

Masa atomskega jedra je vedno manjša od vsote mas njegovih sestavnih delov (protonov in nevtronov). Ta razlika v masi, imenovana masni defekt (Δm), se po Einsteinovi enačbi $E = \Delta mc^2$ sprosti v obliki energije ob nastanku jedra. Tej energiji pravimo **vezavna energija** (E_v).

$$E_v = (Z \cdot m_p + N \cdot m_n - m_{\text{jedra}}) \cdot c^2 \quad (1)$$

kjer je Z število protonov, N število nevtronov, m_p masa protona, m_n masa nevtrona in m_{jedra} masa jedra.

Ker je vezavna energija energija, ki jo je treba *dovesti*, da jedro razdelimo na posamezne nukleone, je po dogovoru negativna ($E_v < 0$). Bolj kot je jedro vezano, večja je absolutna vrednost vezavne energije. Pomemben podatek je tudi vezavna energija na nukleon (E_v/A), ki nam pove, kako močno je v povprečju vezan posamezen nukleon. Največjo vrednost doseže pri jedrih v okolici železa (^{56}Fe).

Za pregled lastnosti različnih jeter se uporablja **karta nuklidov**, kot je tista, ki jo vzdržuje IAEA (Mednarodna agencija za atomsko energijo). Na njej so jedra prikazana v odvisnosti od števila protonov (Z) in nevtronov (N), barvno pa so označeni tipi razpadov in drugi podatki.

1.3 Ocene pomembnih količin

Pri delu z jedri si je dobro zapomniti nekatere velikostne rede:

- **Energije v jedru** se običajno merijo v megaelektronvoltih (MeV). $1 \text{ MeV} = 1.602 \times 10^{-13} \text{ J}$.

- **Vezavna energija na nukleon** je za večino jeder reda velikosti 8–10 MeV.
- **Čas preleta** je čas, ki ga hiter nevtron (npr. z energijo 1 MeV) potrebuje, da preleti jedro (premera ~ 10 fm). Ta čas je zelo kratek, reda velikosti 10^{-22} s.
- **Termična energija pri sobni temperaturi** ($T \approx 300$ K) je $k_B T \approx 0.025$ eV. To je mnogo manj od tipičnih jedrskih energij, kar pomeni, da okolica ne more kar tako vzbuditi jedra.

2 Modeli atomskega jedra

Za lažje razumevanje kompleksne strukture in lastnosti atomskih jeder sta bila razvita dva pomembna modela: kapljični in lupinski model.

2.1 Kapljični model in semiempirična masna formula

Kapljični model obravnava jedro kot kapljico nestisljive tekočine, kjer nukleoni igrajo vlogo molekul. Ta analogija je uporabna, ker močna jedrska sila, podobno kot sile med molekulami v kapljici, deluje na kratkih razdaljah in je nasičena (nukleon interagira le z najbližjimi sosedi).

Na podlagi tega modela je bila razvita **semiempirična masna formula** (tudi Bethe-Weizsäckerjeva formula), ki omogoča oceno vezavne energije jedra $E_v(A, Z)$ na podlagi njegovega masnega števila A in vrstnega števila Z :

$$E_v(A, Z) = a_V A - a_S A^{2/3} - a_C \frac{Z(Z-1)}{A^{1/3}} - a_A \frac{(A-2Z)^2}{A} \pm \delta(A, Z) \quad (2)$$

Posamezni členi v formuli imajo naslednji fizikalni pomen:

1. **Volumski člen** ($a_V A$): Najpomembnejši, pozitiven prispevek, ki izhaja iz dejstva, da vsak nukleon prispeva k vezavi z enako energijo. Vezavna energija je sorazmerna s številom nukleonov, torej z volumnom jedra.
2. **Površinski člen** ($-a_S A^{2/3}$): Ta člen je popravek na volumskega. Nukleoni na površini jedra imajo manj sosedov kot tisti v notranjosti, zato so šibkeje vezani. Ker je število površinskih nukleonov sorazmerno s površino jedra ($R^2 \propto (A^{1/3})^2 = A^{2/3}$), ta člen zmanjšuje absolutno vrednost vezavne energije.
3. **Elektrostatski (Coulombov) člen** ($-a_C \frac{Z(Z-1)}{A^{1/3}}$): Predstavlja elektrostatsko odbojno silo med protoni, ki deluje proti jedrski sili in zmanjšuje vezavno energijo. Energija je sorazmerna s kvadratom naboja ($Z^2 \approx Z(Z-1)$) in obratno sorazmerna s polmerom jedra ($R \propto A^{1/3}$).
4. **Asimetrični (mešalni) člen** ($-a_A \frac{(A-2Z)^2}{A}$): Ta člen upošteva, da je jedro najbolj stabilno, ko je število protonov in nevtronov približno enako ($N = Z$ oziroma $A - Z = Z \Rightarrow A = 2Z$). Vsako odstopanje od te simetrije (razlika $N - Z = A - 2Z$) vodi v zmanjšanje stabilnosti in s tem vezavne energije. Pri težjih jedrih postane zaradi naraščajočega Coulombovega odboja energijsko bolj ugodno imeti več nevtronov kot protonov.
5. **Paritveni člen** ($\pm \delta(A, Z)$): Ta empirični člen upošteva, da so jedra s sodim številom protonov in sodim številom nevtronov (sodo-soda jedra) najbolj stabilna, medtem ko so liho-liha najmanj stabilna. To je posledica tendence nukleonov, da se združujejo v pare z nasprotnim spinom.

2.2 Lupinski model in magična jedra

Kapljični model ne pojasni vseh opazovanih lastnosti jeder. Eksperimentalno je bilo ugotovljeno, da so jedra z določenim številom protonov ali nevtronov—t.i. **magična števila** (2, 8, 20, 28, 50, 82, 126)—izjemno stabilna.

To stabilnost pojasni **lupinski model**, ki predpostavlja, da se nukleoni v jedru, podobno kot elektroni v atomu, razporejajo po energijskih nivojih oziroma lupinah. Ko je zunanja lupina polna (pri magičnem številu nukleonov), je jedro posebej stabilno, podobno kot žlahtni plini v kemiji.

3 Stabilnost jeder in energija jedrskih reakcij

3.1 Stabilna jedra

Jedra so stabilna, ko imajo optimalno razmerje med številom protonov in nevtronov. Na karti nuklidov stabilna jedra ležijo na t.i. *dolini stabilnosti*. Za lažja jedra je to razmerje približno $N \approx Z$. Pri težjih jedrih pa zaradi naraščajočega vpliva elektrostatskega odboja med protoni postane energijsko bolj ugodno, da imajo jedra presežek nevtronov ($N > Z$). Nevtroni z močno jedrsko silo prispevajo k vezavi, ne pa tudi k elektrostatskemu odboju.

3.2 Energija razpada

Jedra, ki ležijo izven doline stabilnosti, so nestabilna in sčasoma razpadejo. Energija, ki se sprosti pri jedrski reakciji ali razpadu, se imenuje **razpadna energija** (Q). Izračunamo jo kot razliko med mirovno maso reaktantov in mirovno maso produktov:

$$Q = (m_{\text{reaktanti}} - m_{\text{produkti}}) \cdot c^2 \quad (3)$$

Če je $Q > 0$, se energija sprosti (eksotermna reakcija), če je $Q < 0$, pa je treba energijo dovesti (endotermna reakcija).

3.3 Ocena sproščene energije pri cepitvi

Ocenimo, kakšno moč bi sproščal 1 kg urana-235 (^{235}U), če bi vsi atomi v njem izvedli cepitev v enem dnevu. Pri cepitvi enega jedra ^{235}U se v povprečju sprosti približno $c = 215$ MeV energije.

Število jeder (N) v masi $m = 1$ kg urana dobimo z enačbo:

$$N = \frac{m}{M} N_A \quad (4)$$

kjer je $M \approx 235$ g/mol molska masa ^{235}U , $N_A = 6.022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ pa Avogadrovo število.

Celotna sproščena energija (E) je:

$$E = N \cdot c = \frac{m}{M} N_A c \quad (5)$$

Moč (P) je energija, sproščena v časovni enoti $t = 1$ dan = 86 400 s:

$$P = \frac{E}{t} \quad (6)$$

Izračun:

$$N = \frac{1000 \text{ g}}{235 \text{ g/mol}} \cdot 6.022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1} \approx 2.56 \times 10^{24}$$

$$E = 2.56 \times 10^{24} \cdot 215 \text{ MeV} \approx 5.5 \times 10^{26} \text{ MeV}$$

$$= 5.5 \times 10^{26} \text{ MeV} \cdot 1.602 \times 10^{-13} \text{ J/MeV} \approx 8.81 \times 10^{13} \text{ J}$$

$$P = \frac{8.81 \times 10^{13} \text{ J}}{86\,400 \text{ s}} \approx 1.02 \times 10^9 \text{ W} = 1.02 \text{ GW}$$

To je moč reda velikosti gigavata, kar je primerljivo z močjo velike elektrarne.