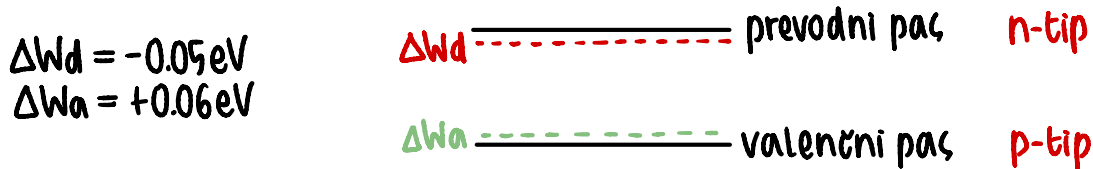


Ocenimo vezavno energijo elektrona v rešetki z arzenom:

$$\rightarrow \text{V H-atomu: } W_0 = -\frac{e^4 m}{32\pi^2 \epsilon_0^2 \hbar^2} = -\alpha^2 \frac{mc^2}{2}; \quad \alpha = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 \hbar c} \approx \frac{1}{137}$$

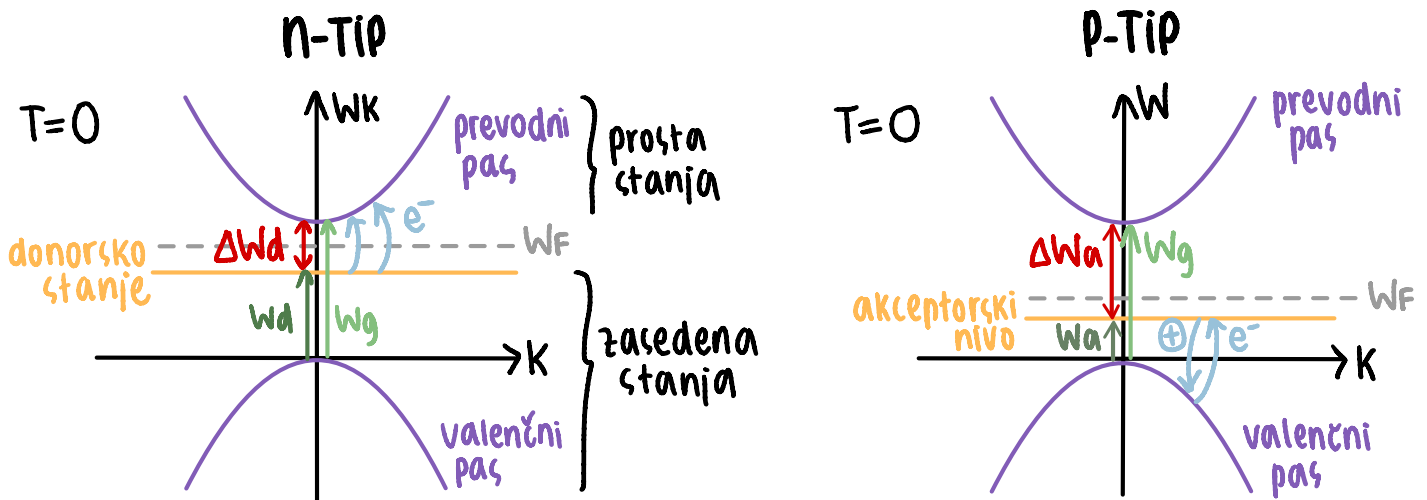
Ko gledamo elektron v kristalu, se ta giblje, kot da bi imel efektivno maso. Poleg tega je  $e^-$  šibko vezan, zato je radij njegove S-orbitale mnogo večji kot v H-atomu. Za  $e^-$  je kristal zvezno sredstvo, zato moramo dodati še  $\epsilon$ :

$$m \rightarrow m_e^* \quad \epsilon_0 \rightarrow \epsilon \epsilon_0 \quad \Rightarrow \quad \Delta W_d = W_0 \cdot \frac{m_e^*}{m} \cdot \frac{1}{\epsilon^2} \quad W \approx \frac{1}{1000} W_0$$

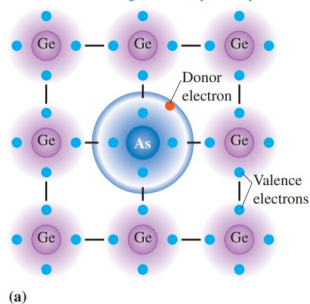


Pri sobni T se bo znaten del elektronov preselil iz donorskega nivoja v prevodni pas in znaten del vrzeli v valenčni pas (to pomeni, da gre  $e^-$  gor)

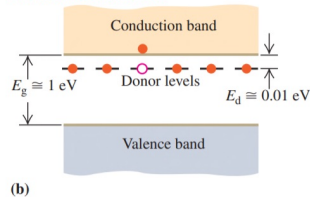
$\Rightarrow W_F$  bo bližju donorskega nivoja v n-tipu ož. bližju akceptorskega nivoja v p-tipu



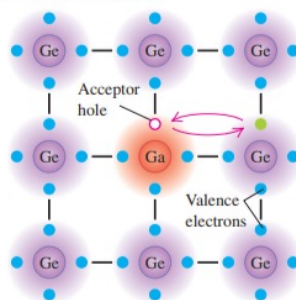
A donor (*n*-type) impurity atom has a fifth valence electron that does not participate in the covalent bonding and is very loosely bound.



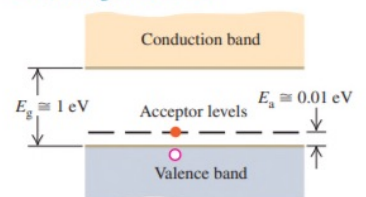
Energy-band diagram for an *n*-type semiconductor at a low temperature. One donor electron has been excited from the donor levels into the conduction band.



An acceptor *p*-type impurity atom has only three valence electrons, so it can borrow an electron from a neighboring atom.

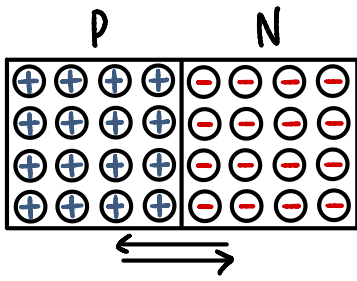


Energy-band diagram for a *p*-type semiconductor at a low temperature. One acceptor level has accepted an electron from the valence band, leaving a hole behind.



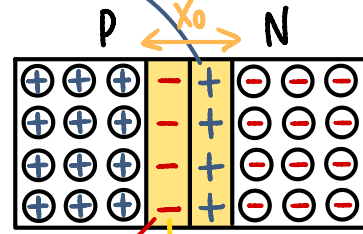
Večina elektronov iz donorskega pasu bo termično ekcitala v prevodni pas – efektivno donorsko stanje se bo izpraznilo. Fermijeva energija se zato premakne pod donorski pas (ko je  $T > 0$ ).

# P-N stik



Tu je  $A_s$ , ki je ostal brez  $e^-$  in postal pozitiven

Tu je  $Al$ , ki je ostal brez vrzeli in postal negativen

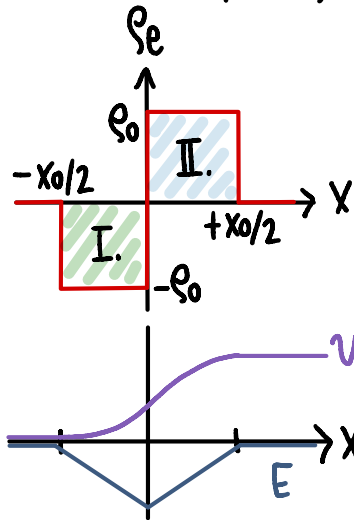


osiromašena plast

Vmesna plast preprečuje, da bi  $e^-$  iz desne strani prehajali na levo in da bi vrzeli prehajale na desno.

$e^-$  in vrzeli se lahko z difuzijo gibljejo iz strani P na stran N in obratno. Ko se vrzel in  $e^-$  srečata,  $e^-$  zapolni vrzel.

Električno polje in gostota naboja v P-N stiku:



$$\nabla \vec{E} = \frac{\rho_e}{\epsilon \epsilon_0}, \quad \frac{dE}{dx} = \frac{\rho_e}{\epsilon \epsilon_0}$$

$$I.: E = -\frac{\rho_0}{\epsilon \epsilon_0} \cdot (x + \frac{x_0}{2})$$

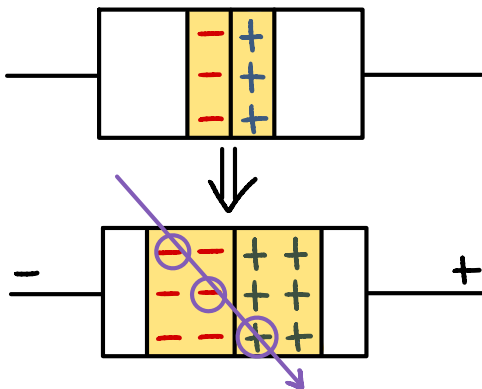
$$II.: E = E(x=0) + \frac{\rho_0}{\epsilon \epsilon_0} \cdot x = \frac{\rho_0}{\epsilon \epsilon_0} (x - \frac{x_0}{2})$$

$$U = -\int E dx$$

$$I.: U = -\frac{\rho_0}{\epsilon \epsilon_0} \int (x + \frac{x_0}{2}) dx = \dots = +\frac{\rho_0}{\epsilon \epsilon_0} (x^2 + x \cdot x_0 + \frac{x_0^2}{4})$$

Med robova osiromašenege pasu dohimo potencialno razliko

Zdaj naš polprevodnik priključimo na zunanjo napetost:

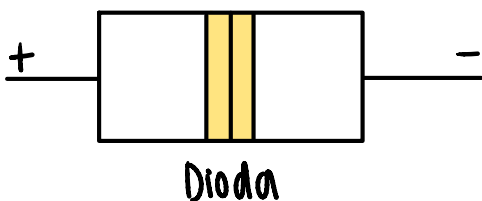


Pozitiven priključek privlači  $e^-$  na desni strani, zato tam ostane še več atomov  $A_s$  brez  $e^-$ , ki so zato  $+$  nabiti  $\Rightarrow$  Osiromašena plast se poveča

**NAPETOST V ZAPORNI smeri**

Pri dovolj veliki napetosti bo cel kristal osiromašena plast.

Takšen P-N stik je osnova za polprevodniške detektorje delcev in fotonov: Če tu namreč mimo pletati nabiti delec, bo interagirал in naredil dodatne  $e^-$  in vrzeli, ki bodo EDINI prosti nosilci nabojev in jih bomo lahko zaznali. V navadnem kristalu bi se signal izgubil v statističnih fluktuacijah  
 $\rightarrow$  Fotodiode, CCD (vsak pixel je ena fotodiode)



Dioda

Dohili homo tok:  $I = I_0 (e^{\beta e U} - 1)$

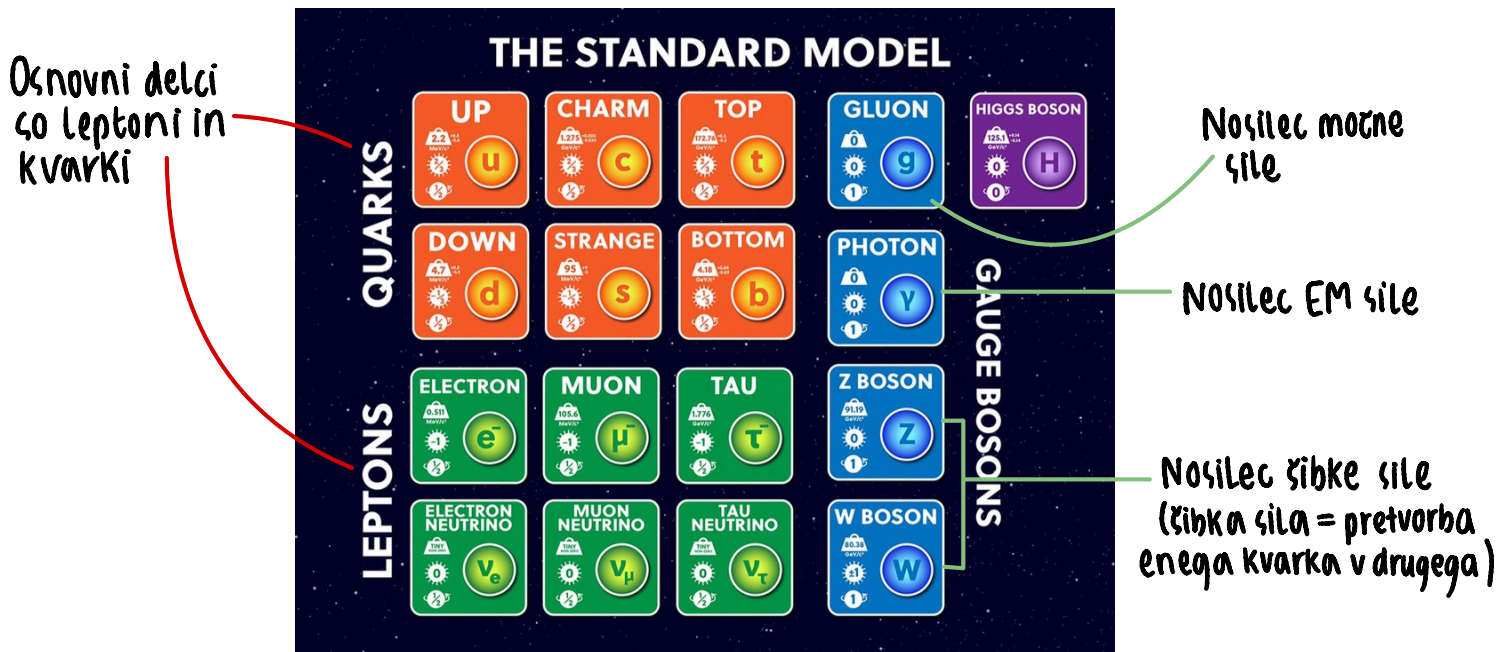
**NAPETOST V prevodni smeri**

# Jedra in osnovni delci

## Uvod

Zgodnje vesolje je bilo vroče: delci so imeli velike hitrosti, med sabo so trkali (takšne razmere poskušamo poustvariti v pospeševalnikih).

Fizika osnovnih delcev se začne L. 1897 z odkritjem  $e^-$  v katodni cevi.



Standardni model pravi, da imamo 2 vrsti osnovnih delcev (leptoni in kvarki) in 3 vrste interakcij + delec, ki poskrbi za maso vseh ostalih (=Higgsov bozon). Osnovni delci interagirajo med sabo preko nosilcev sile.

Težava: Izmerjena kršitev simetrije med delci in antidelci je za 10 redov velikosti premajhna, da bi pojasnila razliko med količinama snovi in anti-snovi v vesolju. Poleg tega standardni model ne vsebuje 4. interakcije - gravitacije.

Iskanje "nove fizike" poteka na več načinov:

- neposredno iskanje novih delcev
- iskanje odstopanj od pričakovanih značilnosti procesov
- študij lastnosti nevtrinov
- neposredno iskanje delcev temne snovi

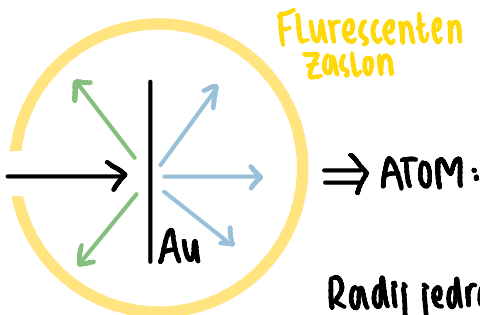
# Jedrska fizika

## Lastnosti jedra

### Velikost

• Rutherfordov eksperiment

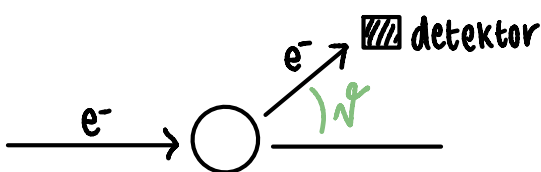
svinčena žakla:  $\alpha$  delci gredo skozi luknjico v ravni liniji



Radij jedra  $\ll$  velikosti atoma

• Če  $\lambda \gg d \Rightarrow$  valovanje se na predmetu siplje izotropno  
Valovanja za meritev velikosti jedra:  $\gamma, e^-, p, n$

Kako izgleda poskus?



$$\frac{\Delta N}{\Delta \Omega}(\theta) \rightarrow \frac{d\sigma}{d\Omega}(\theta) \text{ DIFERENCIALNI SIPALNI PRESEK}$$

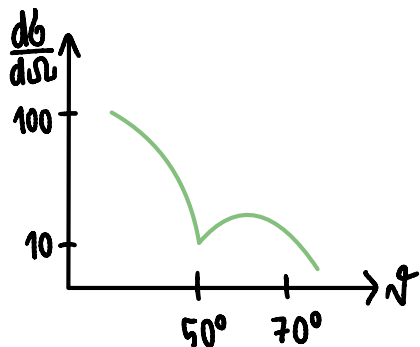
$\hookrightarrow$  detektor

Velikost jedra:  $\sim r_j = 1 \text{ fm}; d = 2 \text{ fm}$

• Če  $\lambda = d$ :  $p = \frac{h}{\lambda} = \frac{h \cdot c}{d \cdot c} = \frac{2\pi \hbar c}{d \cdot c} = \frac{2\pi \cdot 200 \text{ MeV} \cdot \text{fm}}{2 \text{ fm} \cdot c} \approx 600 \text{ MeV}/c$

$$\Rightarrow E = \sqrt{p^2 c^2 + m_e^2 c^4} = \sqrt{(600 \text{ MeV})^2 + (0.5 \text{ MeV})^2} \approx 600 \text{ MeV}$$

Primer: Diferencialni sipalni presek (Gibalna količina:  $p = 420 \text{ MeV}/c$ ,  $e^-$  se sipljejo na jedru  $^{12}\text{C}$ )



Ocena za minimum (okrogla reža):

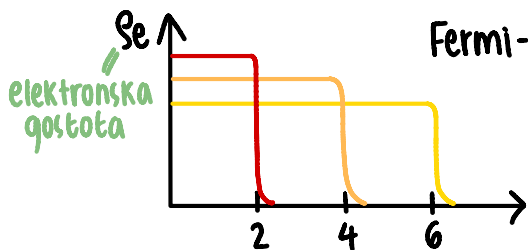
$$1. \text{ minimum: } \sin \theta_{\min} = 1.22 \frac{\lambda}{d} \Rightarrow d = \frac{1.22 \lambda}{\sin \theta_{\min}}$$

$$\Rightarrow r_j = r_0 \cdot A^{1/3}; r_0 = 1.1 \text{ fm}$$

V jedra  $\propto A = \text{št. nukleonov}$

A - atomsko št. = Z + N

Poskusi s projektili, kjer je  $\lambda < d$  iz sipanja  $e^- \Rightarrow$  Porazdelitev naboja v jedru!



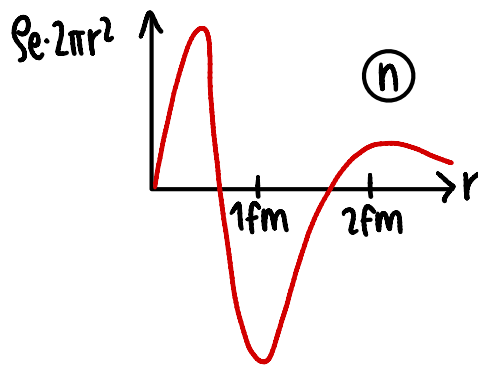
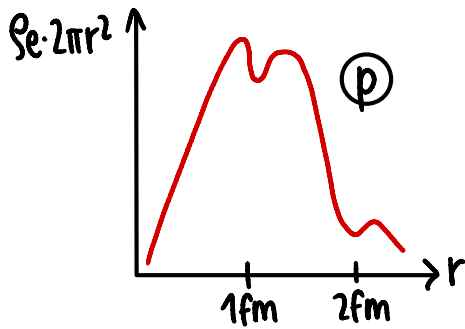
Fermi-Diracova porazdelitev:

$$\rho_e = \frac{\rho_0}{e^{(r-r_j)/\alpha} + 1}$$

$\rho_0$  → konstanta, ki določa strmino padca

Pri večjih jedrih več nevtronov  $\Rightarrow$  manjša  $\rho_e$

Porazdelitev naboja v p in n :



## Masa

A nukleonov → 16  
 Z protonov → 8  
 N nevtronov → 8

$$A = Z + N$$

Kako merimo maso?

→ Jedro pospešimo v el. polju, nato pa ga spustimo v magnetno polje, kjer začne krožiti. Iz radija kroženja lahko direktno izračunamo maso:

$$eU = W_k = \frac{1}{2}mv^2 \quad (\text{ker } v \ll c)$$

$$m \cdot \frac{v^2}{R} = e v B \Rightarrow \frac{m}{R} \sqrt{\frac{2eU}{m}} = eB \Rightarrow \sqrt{m} = \frac{eBR}{\sqrt{2eU}}$$

$$m = \frac{e^2 B^2 R^2}{2U}$$

Če je sistem vezan, bo njegova en. manjša od posameznih nukleonov :

$$m_j c^2 < Z m_p c^2 + N m_n c^2 \quad \text{Pogoj za vezano stanje}$$

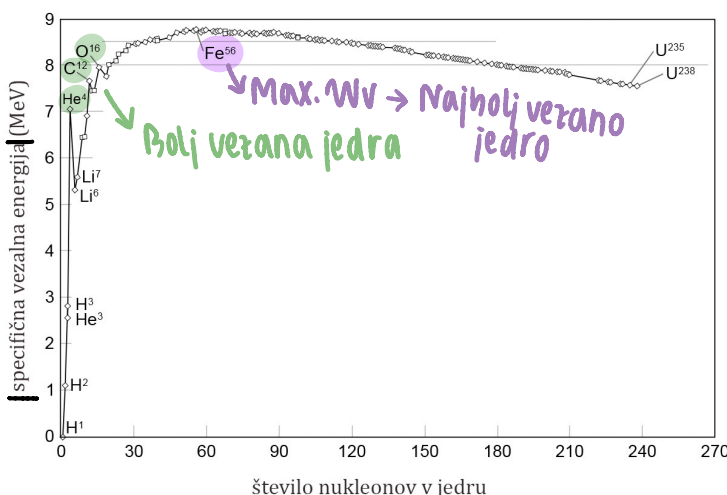
$$m_p c^2 = 938,27 \text{ MeV}$$

$$m_n c^2 = 939,57 \text{ MeV}$$

$$m_j c^2 = Z m_p c^2 + N m_n c^2 + W_v$$

$$W_v = (m_j - Z m_p - N m_n) c^2 \quad \text{VEZAVNA ENERGIJA}$$

$$w_v = \frac{W_v}{A} \quad \text{SPECIFIČNA VEZAVNA ENERGIJA}$$



Za veliko večino jeder je specifična vezavna energija med -7.5 in -8.5 MeV  
 ⇒  $w_v$  je na 10% natančno konst.

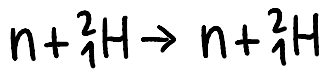
⇒  $w_v \propto A$  Presenetljivo!

Coulombovska sila:  $W_e \propto (Ze)^2$ , ker vsak interagira z vsakim. To sledi iz tega, ker ima Coulombovska sila dolg doseg

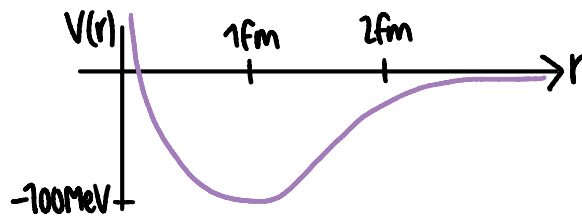
⇒ JEDRSKA SILA IMA KRATEK DOSEG!

Kako izmerimo doseg jedrske sile?

→ Sipljemo proton na nevtronu (ali p na p, n na n).



Potencial jedrske sile je neodvisen od vrste nukleonov.

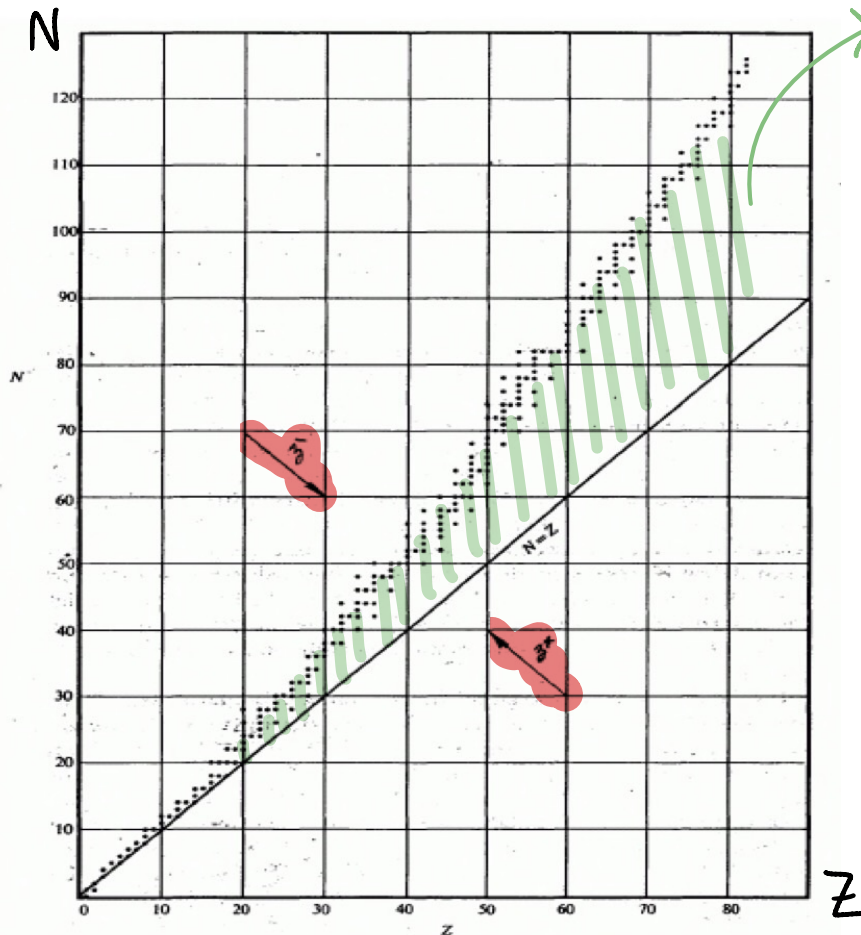


Primerjamo z elektrostatikko:  $V_e = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r} \cdot \frac{1 \cdot \hbar c}{1 \cdot \hbar c} = \alpha \cdot \frac{\hbar c}{r} \xrightarrow{\text{za } 1 \text{ fm}} V_e(r=1 \text{ fm}) = 1.4 \text{ MeV}$

↳ Pri  $r=1 \text{ fm}$  je  $|V_j| \gg |V_e|$

Ker ima  $\chi$  minimum pri  $A=56$ , bodo manjša jedra težila k zlivanju, večja jedra pa k cepitvi, saj sistem vedno teži k energijsko bolj ugodnem stanju.

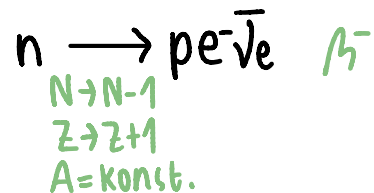
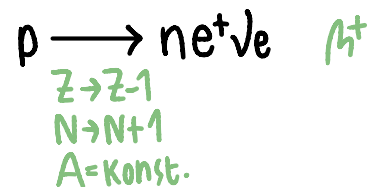
## Stabilna jedra



↳ DOLINA STABILNOSTI

Pri težjih jedrih je presežek nevtronov energijsko ugoden, ker zmanjšuje coulombsko en. (večja razdalja med protoni).

Če imamo jedro, ki ima prevelik  $Z$  pri danem  $N$  pride do  $\beta^+$  razpada:



Slika 6: Stabilna jedra v odvisnosti od  $N$  in  $Z$