

Jadrové sily

Hoci medzi protónmi v AJ pôsobia **značné elektrostatické odpudivé sily** a napriek tomu sú v jadre pevne viazané $\Rightarrow \exists$ jadrových síl.

Z experimentov vyplývajú nasledovné vlastnosti.

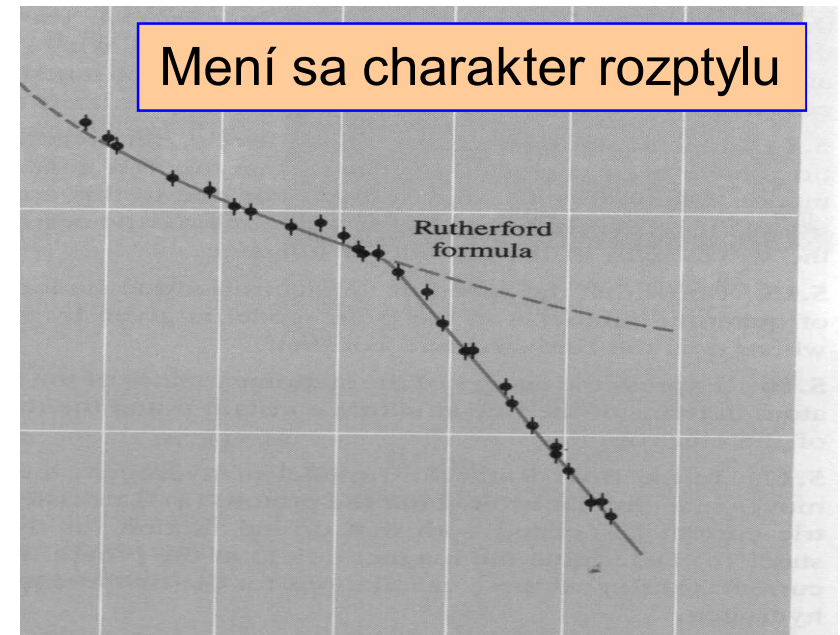
VLASTNOSTI JADROVÝCH SÍL

- malý dosah $< 2 \cdot 10^{-15}$ m
- majú charakter nasýtených síl
- nezávisia od náboja nukleónov
- závisia od spinu nukleónov
- majú výmenný charakter

Jadrové sily

Jadrové sily majú krátky dosah $< 2 \cdot 10^{-15}$ m ~ rozmer nukleónu

Pri pozorovaniach rozptylu p na p sa ukázalo, že pri vysokých E_p rozptyl nezodpovedá Rutherfordovej teórie \Rightarrow medzi p začali pôsobiť sily neCoulombovskej povahy, boli **prít'azlivé s ohraňčeným dosahom pôsobenia**



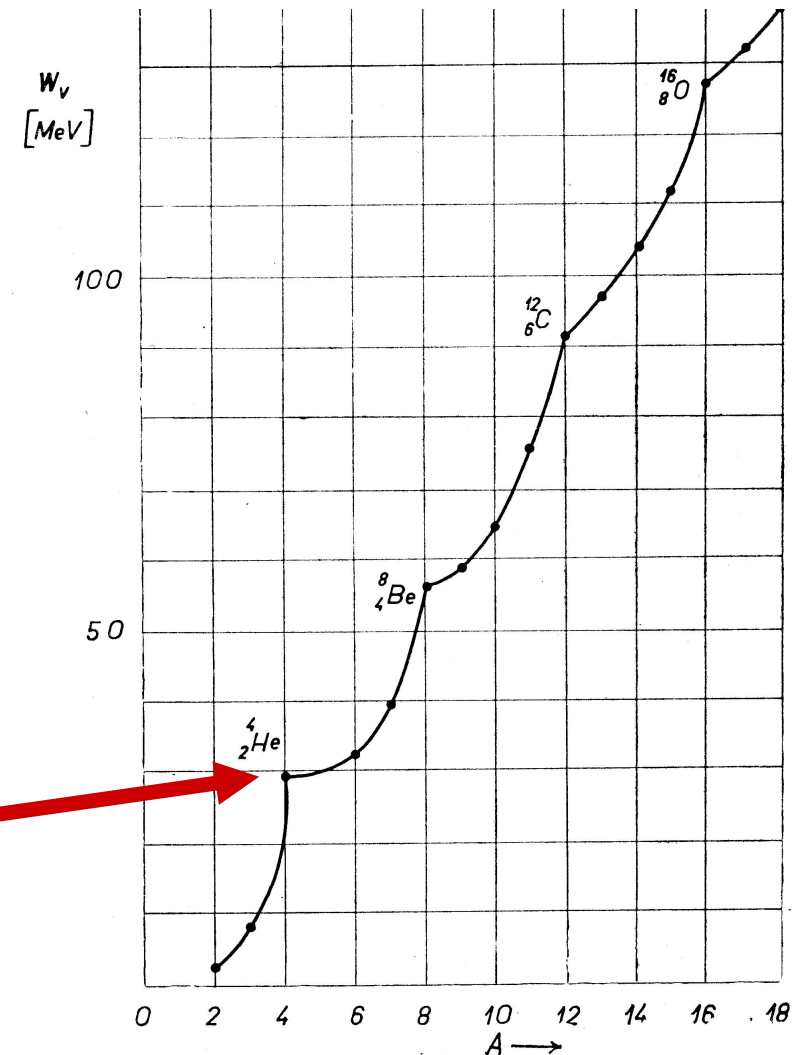
Jadrové sily

Jadrové sily majú charakter nasýtených síl

Väzbová energia $E_v \sim A$. Ak by každá častica interagovala so všetkými ostatnými časticami v jadre \Rightarrow počet interakčných párov $\sim A(A-1) \Rightarrow E_v \sim A^2 \Rightarrow$ **nukleóny neinteragujú so všetkými ostatnými nukleónmi, iba s malým počtom najbližších susedov**

Väzbová energia nukleónov v jadre pri zvýšení počtu nukleónov nerastie a ostáva viac-menej konštantná

najefektívnejšia interakcia medzi nukleónmi pri takom počte nukleónov v jadre, pri ktorom nastáva zlom – nasýtenie (ďalšia častica by už bola prebytočná)

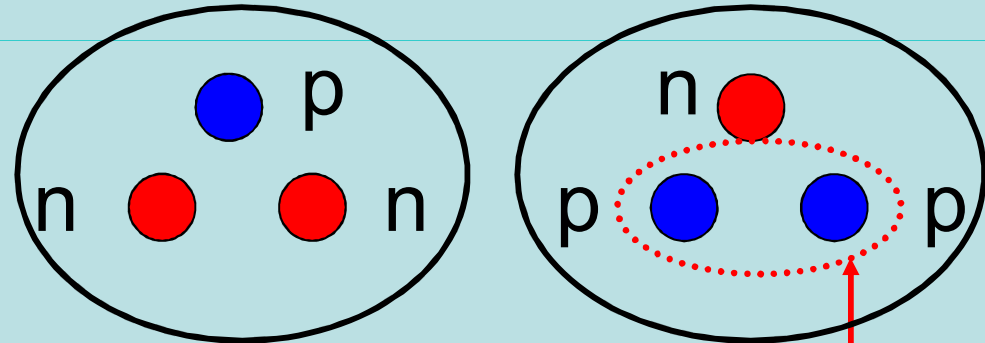


Jadrové sily

Jadrové sily nezávisia od náboja nukleónov

Jadrové sily (p-p) (p-n) (n-n) rovnaké

DôKAZ – zrkadlové jadrá $Z_1=N_2$ $N_1=Z_2$



Coulombovská interakcia

$$W({}^3_1H) = 8.482 \text{ MeV} \quad W({}^3_2He) = 7.711 \text{ MeV}$$

$$W({}^3_1H) = W({}^3_2He) + W_c$$

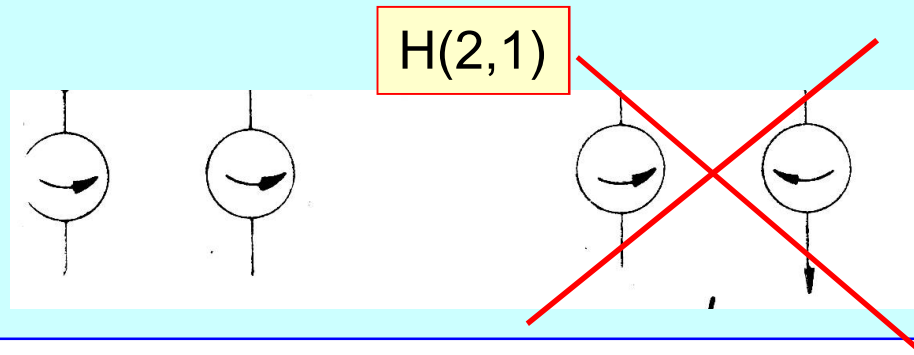
$$W_c = \frac{3}{5} \frac{Z^2 e^2}{4\pi\epsilon_0 R_{He}} = 0.771 \text{ MeV}$$

Jadrové sily

Jadrové sily závisia od spinu nukleónov

Veľkosť vzájomného posobenia nukleónov v jadre nezávisí len od vzdialenosti ale aj od vzájomnej orientácie spinov

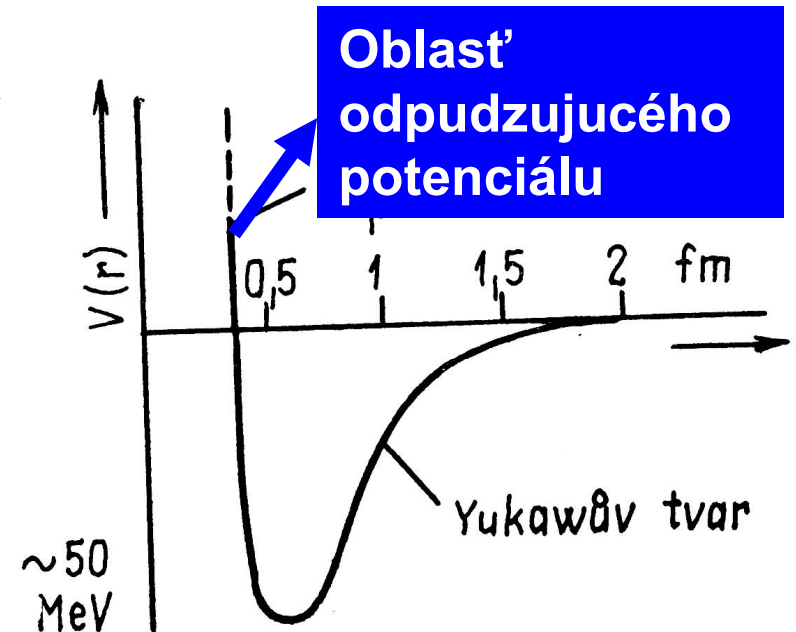
EXPERIMENT – medzi p a n nastáva väzba iba vtedy, ak sú spiny **rovnoobežné** $H(2,1) \Rightarrow$ sila závisí od orientácie spinu a je slabšia u antiparalelných spinov (**neexistuje** $H(2,1)$ s **antiparalelnými spinmi**).



Mezónová teória jadrových síl

Jadrové sily majú výmenný charakter

- JS nie sú výlučne príťažlivé – inak by stačilo ku stabilite **malé jadro** $r=2\text{fm}$ a interagovali by všetky nukleóny navzájom.
- Medzi JS musí pôsobiť aj **odpudivá sila**, ktorá bráni **skolabovaniu jadra** t.j závislosť od vzdialenosti musí byť iná ako pre gravitačné a elmag. sily



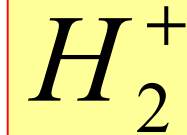
JS – zmes príťažlivých a odpudivých

Výmenný charakter jadrových síl

Jadrové sily majú výmenný charakter

Silové pôsobenie sa tvorí dôsledkom prenosu hybnosti medzi nukleónmi prostredníctvom „virtuálnych“ častíc

Ión H_2^+ viazaný **výmennou** (premiestňovanie) e^- medzi jadrami H.V závislosti od ψ systému voči zámene častíc bola výsledná sila **príťažlivá** (ψ_s) alebo **odpudivá** (ψ_a)



•1932 **Heisenberg**: predpokladal, výmenu nabitých častíc medzi nukleónmi (inšpirovaný β rozpadom) predpokladal výmenu: e^+ , e^-

Tieto sily sú veľmi malé na udržanie stability jadier

$$n \rightarrow e^- + p$$

$$p \rightarrow e^+ + n$$

$$p + e^- \rightarrow n$$

$$n + e^+ \rightarrow p$$

Výmenný charakter jadrových síl

Jadrové sily majú výmenný charakter

Čo si vymieňajú nukleóny ?

- 1932 **Heisenberg**: predpokladal, výmenu nabitých častíc medzi nukleónmi (inšpirovaný b rozpadom) prdpokladal výmenu: e^+ , e^-

*Tieto sily sú veľmi malé
na udržanie stability jadier*

$$n \rightarrow e^- + p$$

$$p \rightarrow e^+ + n$$

$$p + e^- \rightarrow n$$

$$n + e^+ \rightarrow p$$

Výmenný charakter jadrových síl

1935 **YUKAVA** vymieňajú si častice **mezóny**, sila interakcie je postačujúca

Mezóny – viac druhov (neutrálne π^0 , nabité π^- , π^+)
– hmotnosť $273 m_e$ (ťažšie ako e)

Podľa teórie nukleóny sa skladajú z rovnakého vnútrajška obklopeného oblakom mezónov

N = (holý nukleón) + oblak (1 alebo viac mezónov)

Jediný rozdiel medzi n a p je v zložení mezónových oblakov

Priebeh interakcie medzi nukleónmi

(p,p) , (n,n) – cez výmenu

π^0

(n,p) (p,n) – cez výmenu

π^+ π^-

$n \rightarrow p + \pi^-$

$p + \pi^- \rightarrow n$

$p \rightarrow n + \pi^+$

$n + \pi^+ \rightarrow p$

Výmena mezónov

Symetrické procesy výmeny mezónov

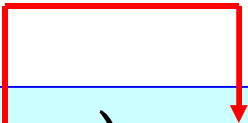
$$n \rightarrow p + \pi^-$$


$$p + \pi^- \rightarrow n$$

$$p \rightarrow n + \pi^+$$

$$n + \pi^+ \rightarrow p$$

Proton vyšle π^+ a zmení sa na neutrón. Neutrón pohltí vyslaný mezón, ktorý mu odovzdá istú hybnosť a zmení sa na protón


$$p + n \rightarrow (n' + \pi^+) + n \rightarrow n' + (n + \pi^+) \rightarrow n' + p'$$

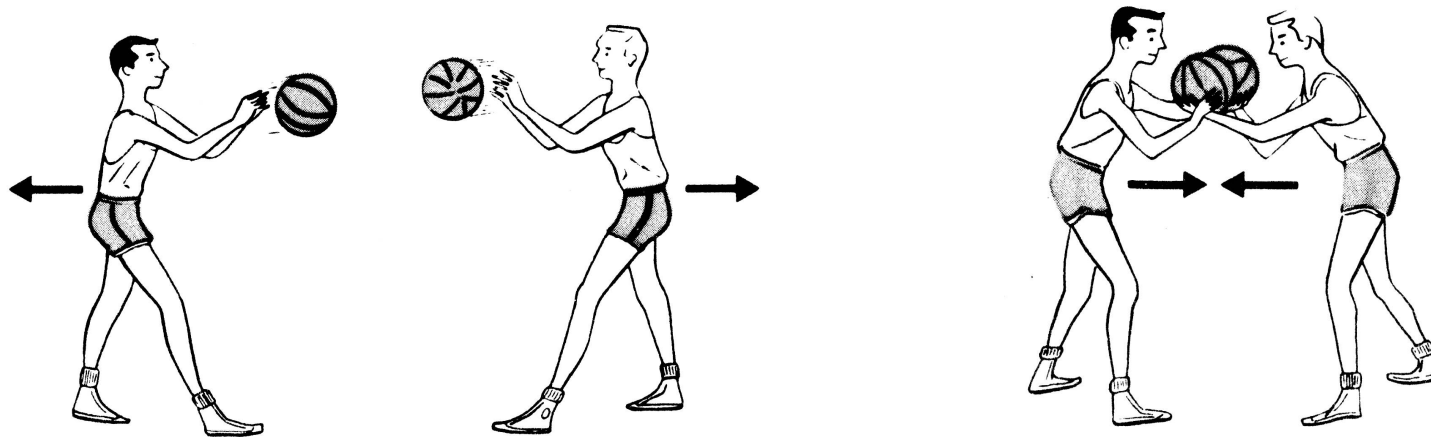

$$p + n \rightarrow p + (\pi^- + p') \rightarrow (p + \pi^-) + p' \rightarrow n' + p'$$

Na mieste neutrónu sa objaví protón a opačne, čo je to isté, ako keby si protón a neutrón vymenili miesta

„Predstava“ vzniku síl pri výmene častíc

ILUSTRÁČNÝ PRÍKLAD:

Basketbalisti – hodia loptu, pohnú sa dozadu
chytiť loptu pohnú sa dozadu ešte viac
bijú sa o loptu (trhajú si) loptu z ruky \Rightarrow príťažlivá sila



Silový účinok – v dôsledku **zmeny hybnosti** medzi oboma nukleónmi prostredníctvom vysielaných častíc

Minimálna hmotnosť mezónu

Emisia mezónu nukleónom nie je z hľadiska zákonov klasickej fyziky možná – bolo by treba dodať energiu zodpovedajúcu vlastnej hmotnosti mezónu.

Podľa kvantovej teórie poľa môže emisia nastať, ak mezón existuje krátky čas Δt , po uplynutí ktorého je opäť absorbovaný.

Výmena častíc sa musí odohrať v čase kratšom ako Δt , za ktorý sa virtuálna častica pohybujúca sa rýchlosťou blízkou $v \sim c$ môže dostať do vzdialenosti dosahu JS (polomeru jadra) $R \sim 1.7 \text{ fm}$. Ak sa na tejto vzdialenosti stretne s iným nukleónom, môže ním byť pohltená, v opačnom prípade musí byť mezón pohltený, tým istým nukleónom, ktorý ho emitoval

$$\Delta t \geq \frac{\hbar}{\Delta E} \quad \frac{R}{c} \geq \frac{\hbar}{m_{\pi} c^2}$$

**„nezachovanie energie $\Delta E \sim m_{\pi} c^2$ “
Energia ΔE potrebná na vytvorenie π mezónu**

$$m_{\pi} \geq \frac{\hbar}{Rc} = 1.9 \times 10^{-28} \text{ kg}$$

$$m_{\pi} \approx 200 m_e$$

Verifikácia

- súhlasí s experimentom
- vysvetľuje (anomálne) magnetické momenty protónu a neutrónu

OČAKÁVANIE:

$$\mu_p = \frac{e\hbar}{2m_p}$$

$$\mu_n = 0$$

REALITA

$$\mu_p = 2.8 \frac{e\hbar}{2m_p}$$

$$\mu_n = -1.9 \frac{e\hbar}{2m_p}$$

VYSVETLENIE: Nukleóny majú štruktúru, ktorú tvorí holý nukleón + **oblak mezonov a ten prispieva k pozorovaným mag. momentom**
 π mezony boli nájdené