

# Jadrové reakcie

Základný prehľad jadrových  
reakcií a zákonitostí





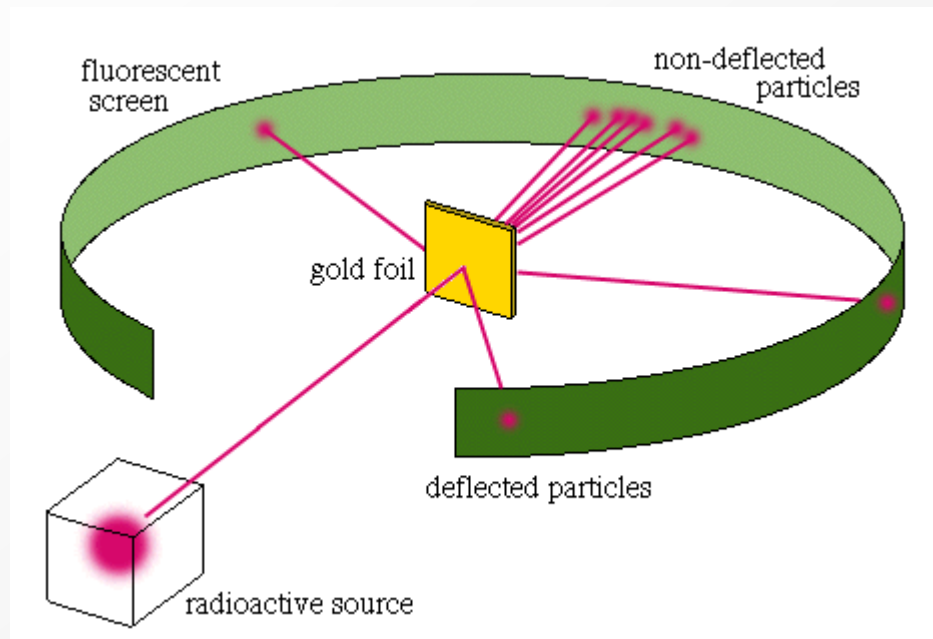
# POČÍATKY FYZIKY JADROVÝCH REAKCIÍ

# 1910 – Rutherfordov experiment



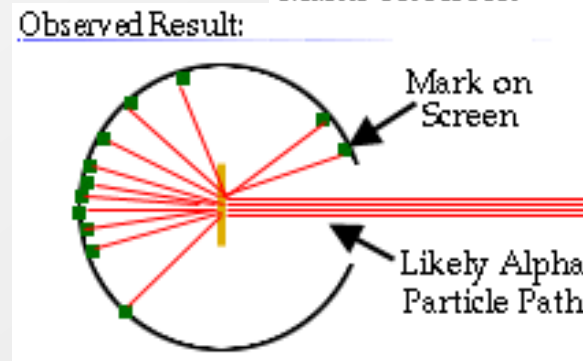
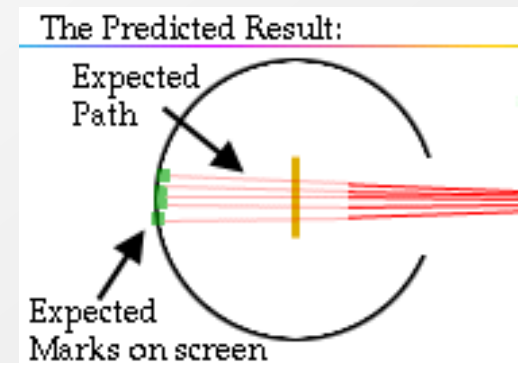
**1908 - 1910** Hans Geiger, Ernest Marsden, Ernest Rutherford (University of Manchester). Sériá viacerých experimentov.

Pružný rozptyl preukázujúci, že pozitívny náboj atómu je koncentrovaný v malom atómovom jadre.



9. 3. 2018

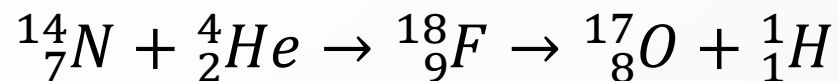
Základný prehľad reakcií



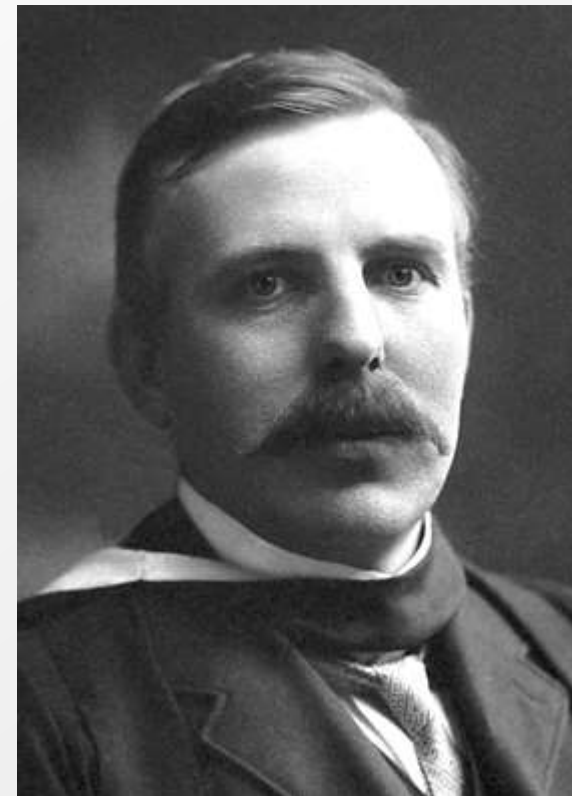
# Prvá jadrová reakcia s premenou jadier



1919 – Ernest Rutherford



Identifikácia pomocou hmlovej komory.



- Typický zápis  $a + X \rightarrow b + Y$   
kde  $a$  je urýchlený projektil,  $X$  terčové jadro,  $Y$  a  $b$  sú produkty reakcie.  
Zvyčajne  $a$  a  $b$  sú ľahké jadrá alebo častice. Niekedy môže byť  $b$  aj  $\gamma$  kvantum (radiačný záchyt)
- Alternatívny spôsob  $X(a,b)Y$  sa využíva aj v súvislosti so všeobecným pomenovaním reakcií, ako napr.  $(\alpha, n)$  alebo  $(n, \gamma)$  a pod.

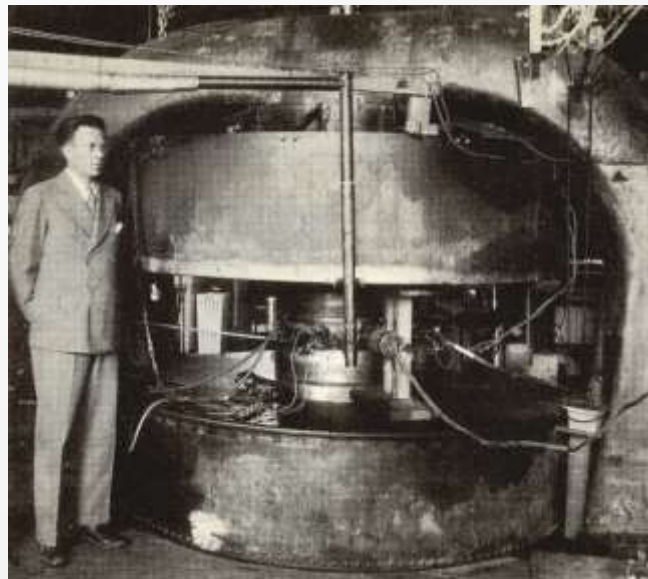
# 1929 – Cyklotrón



**1929** Ernest O. Lawrence – konštrukcia prvého cyklotrónu. Udelená Nobelova cena 1939 „for the invention and development of the cyclotron and for results obtained with it, especially with regard to artificial radioactive elements“

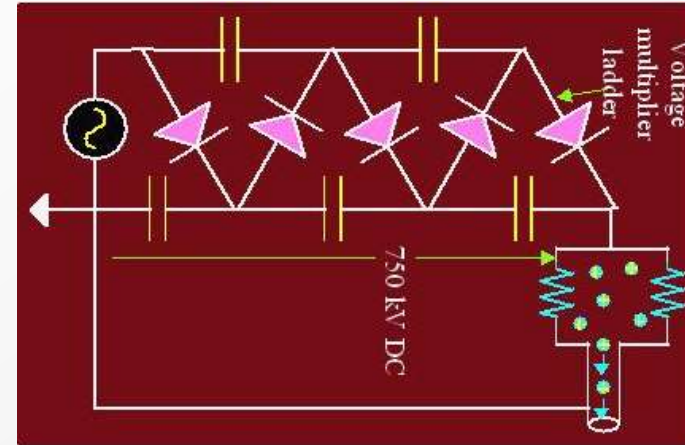
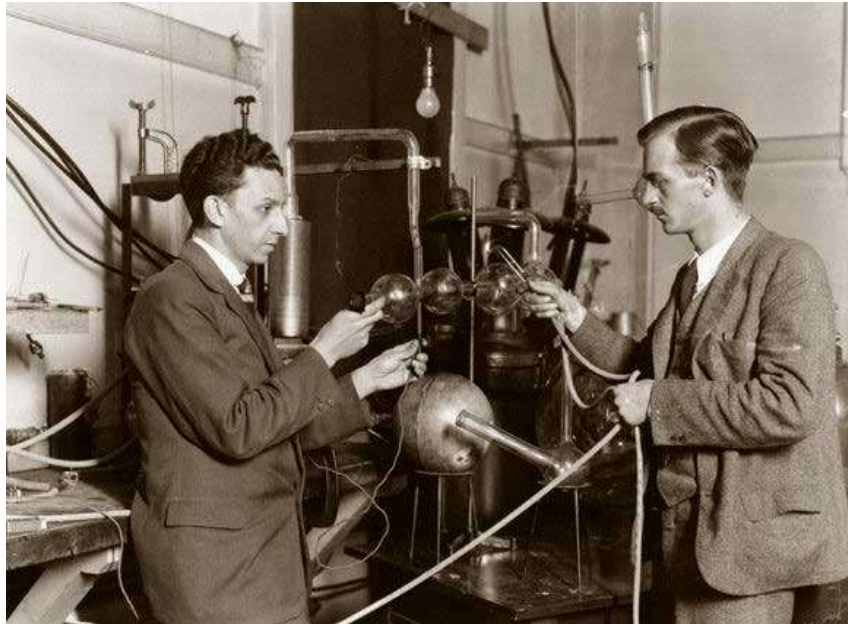


Január 1930  
11,4 cm



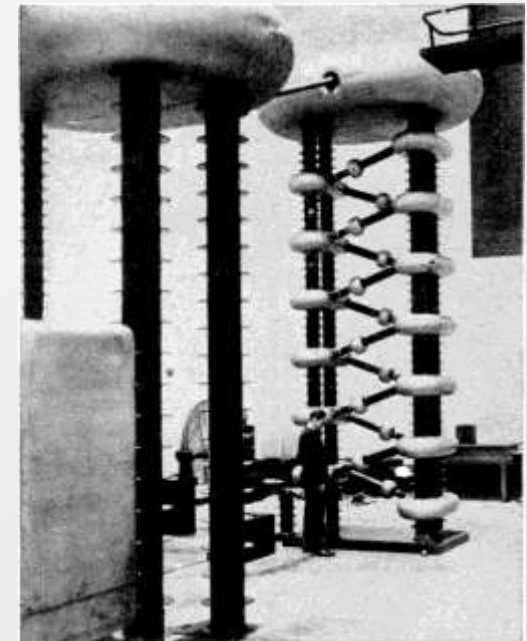
27 inch (180 cm) cyclotrón

# Reakcie s urýchlenými iónmi



John D. Cockcroft and Ernest Walton -  
Cavendish Laboratory, Cambridge, England  
(1932) - prvá umelo realizovaná jad. reakcia:  
 ${}^7\text{Li} + p \rightarrow {}^4\text{He} + {}^4\text{He}$

Nobelova cena (1951) za „for their pioneer work  
on the transmutation of atomic nuclei by artificially  
accelerated atomic particles “.





# DELENIE REAKCIÍ



# Klasifikácia jadrových reakcií



- Vo všeobecnosti, jadrové reakcie prebiehajú v momente, keď sa dve jadrá, príp. častice priblížia na dosah silnej interakcie.
- Za jadrové reakcie však považujeme aj reakcie vyvolané  $\gamma$  kvantami, alebo reakcie vyvolané vplyvom elektromagnetických síl (napr. Coulombovské excitácie).
- V závislosti od typu častice vyvolávajúcu reakciu môžeme klasifikovať reakcie, ako vyvolané:
  - Neutrónmi
  - Nabitými časticami
  - Ťažkými iónmi
  - Gama kvantami
  - Neutrínami



# Zápis jadrových reakcií

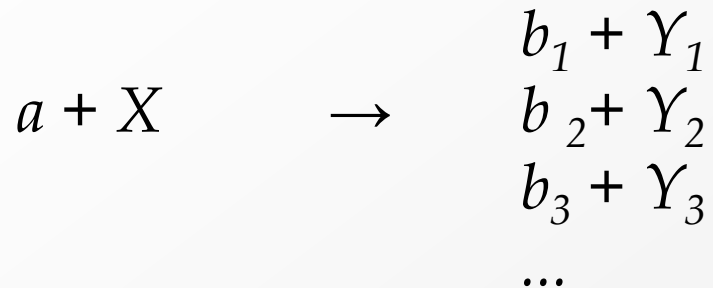


- Typický zápis  $a + X \rightarrow b + Y$   
kde  $a$  je zvyčajne urýchlený projektil,  $X$  je terčové jadro (v laboratórnej sústave zvyčajne statické),  $Y$  a  $b$  sú produkty reakcie.  
Zvyčajne  $a$  a  $b$  sú ľahké jadrá alebo častice. V prípade reakcie nazývanej radiačný záchyt môže  $b$  byť  $\gamma$  kvantum
- Alternatívny spôsob  $X(a,b)Y$  sa využíva aj v súvislosti so všeobecným pomenovaním reakcií, ako napr.  $(\alpha, n)$  alebo  $(n, \gamma)$  a pod.

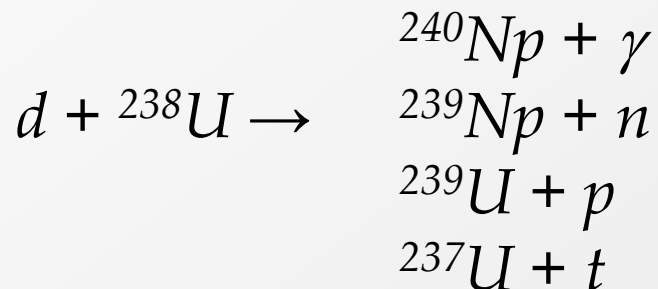
# Reakčné kanály



- Pomenovanie reakčný kanál využívame na opis zmeny identity projektillu a terča. Vo všeobecnosti nie sú finálne produkty reakcie jednoznačne definované a sú otvorené rôzne *reakčné kanály*.



- Konkrétny príklad:



# Delenie podľa zmeny



Pre reakciu  $X(a,b)Y$  môžeme definovať niekoľko základné typy podľa zmeny interagujúcich jadier (resp. častíc):

- Rozptylové reakcie – v tomto prípade je  $a$  rovnaké ako  $b$  a následne aj  $X$  rovnaké ako  $Y$ . Tieto sú
  - pružné ak je jadro  $Y$  v základnom stave
  - nepružné ak je vo vzbudenom stave
- Knockout reakcie - v tomto prípade je  $a$  rovnaké ako  $b$  ale z jadra  $X$  sa vyrazí jeden alebo viac nukleónov.
- Reakcie prenosu (transfer reakcie) – prenáša sa jeden alebo viac nukleónov medzi  $a$  a  $X$ .

# Delenie podľa mechanizmu



V závislosti od mechanizmu rozoznávame reakcie:

- Priame (direct) - interaguje iba niekoľko nukleónov. Významná časť sú napr. reakcie prenosu.
- Mechanizmus zloženého jadra (compound nucleus) – projektil a terč sa na moment zlúčia a prerozdelia si celú energiu.
- Rezonančné reakcie – vytvára sa kvázi-viazaný systém projektilu a terča, ale energia sa kompletne neprerozdelí.

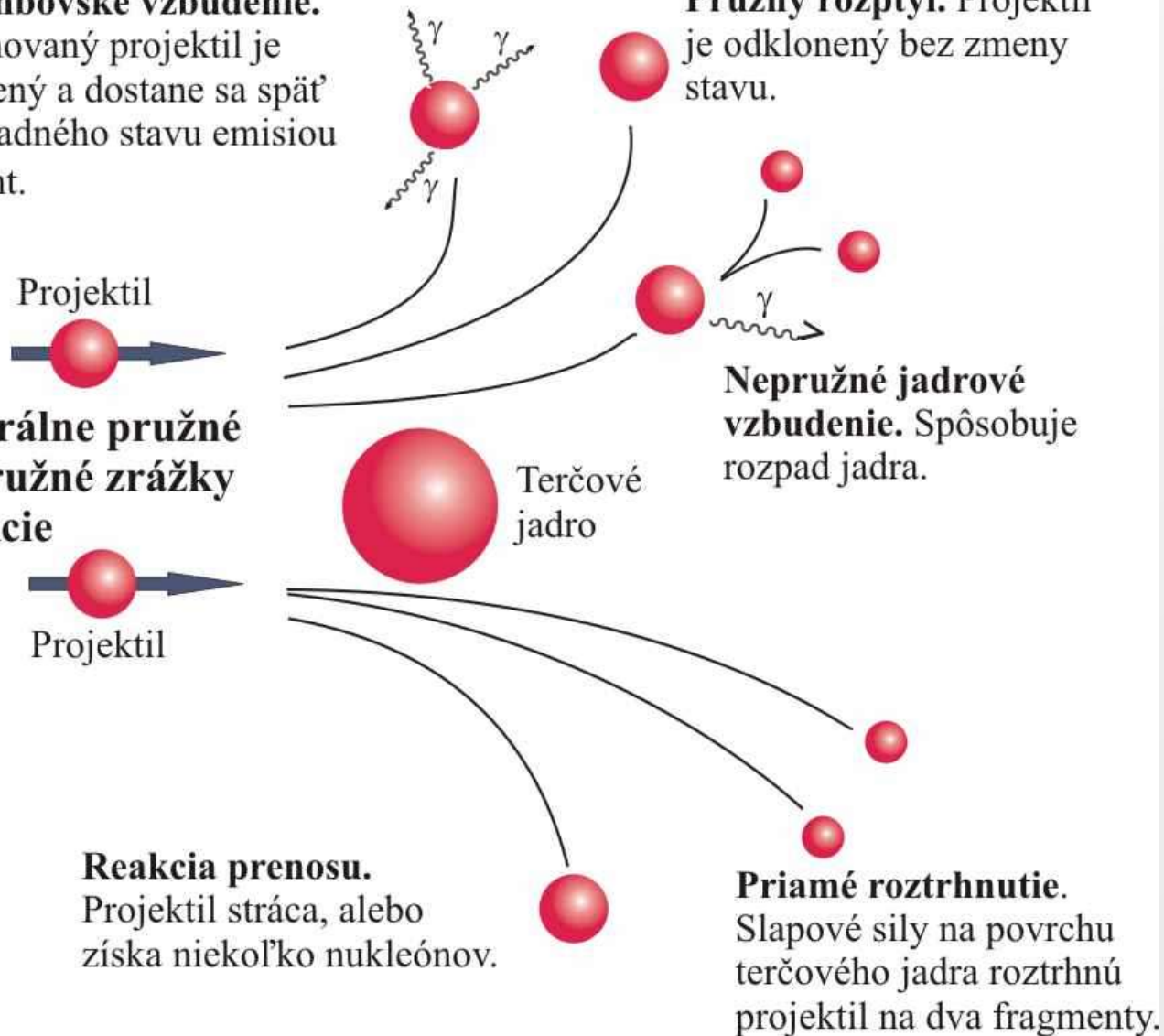
# Periferálne zrážky

**Coulombovské vzбудenie.**  
Deformovaný projektil je odklonený a dostane sa späť do základného stavu emisiou  $\gamma$  - kvánt.

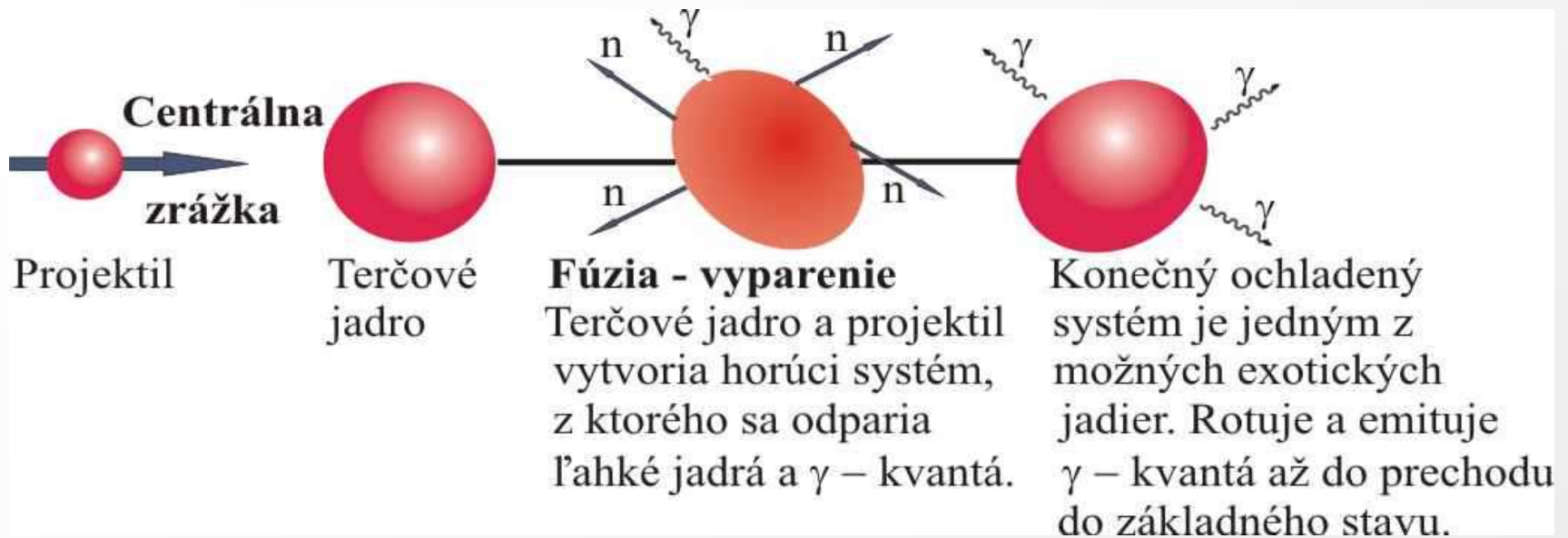
**Pružný rozptyl.** Projektil je odklonený bez zmeny stavu.

**Periferálne pružné a nepružné zrážky a reakcie**

**Nepružné jadrové vzбудenie.** Spôsobuje rozpad jadra.



# Centrálne zrážky



# Delenie podľa energie



V závislosti od mechanizmu rozoznávame reakcie:

- Podbariérové reakcie – energia interagujúcich jadier je menšia ako odpudivá kulombovská bariéra.
- Oblasť nad kulombovskou bariérov ( $\sim 10 \text{ MeV/u}$ ).
- Relativistické reakcie ( $\sim 100 \text{ MeV/u}$ )
- Ultrarelativistické ( $E > 1 \text{ GeV/u}$ )



# Vstupné a výstupné parametre



## Vstupné parametre

- Typ terčového a projektilového jadra
- Vlnové vektory
- Energia relatívneho pohybu
- Vzájomné momenty hybnosti

## Výstupné parametre

- Účinný prierez (absolútny aj diferenciálny)
- Pomery výstupných kanálov
- Energetické a uhlové rozdelenia produktov reakcie
- Excitačná funkcia
- Orientácia spinu (pri polarizačných experimentoch)
- Vzbudenie produktov reakcie

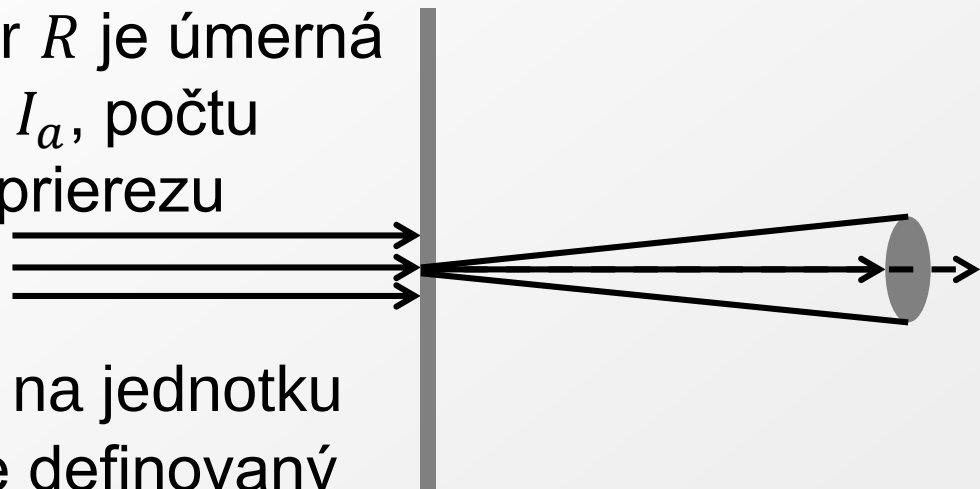


# ÚČINNÝ PRIEREZ REAKCIE

# Účinný prierez



Množstvo produkovaných jadier  $R$  je úmerná počtu interagujúcich projektilov  $I_a$ , počtu terčových častíc  $N$  a účinného prierezu reakcie  $\sigma$ .



Pri definovaní hustoty jadier  $N_b$  na jednotku plochy je účinný prierez reakcie definovaný ako  $\sigma = \frac{R}{I_a N} [m^2]$  a teda má rozmer plochy.

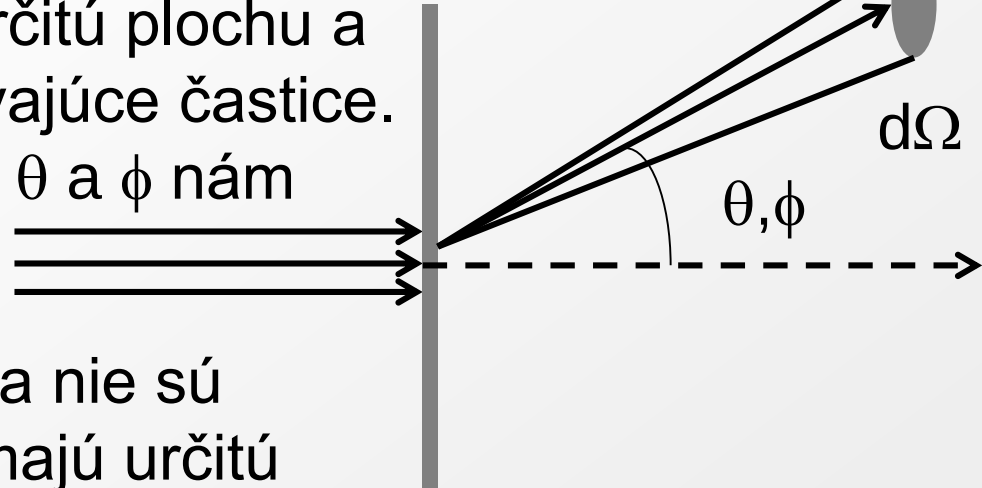
Jadro s polomerom 6 fm má geometrickú plochu  $100 \text{ fm}^2 = 1 \text{ b}$ . Účinný prierez záchytu neutrónu na  $^{135}\text{Xe}$  môže dosiahnuť aj 106 b, zatiaľ čo menej pravdepodobné reakcie môžu mať 1 mb.

Na účinný prierez treba hľadiť ako na plochu úmernu pravdepodobnosti reakcie ale nemusí zodpovedať geometrii reakcie.

# Diferenciálny účinný prierez



Detektor zvyčajne pokrýva len určitú plochu a preto neregistruje všetky vylietavajúce častice. Detektor umiestnený pod uhlami  $\theta$  a  $\phi$  nám definuje priestorový uhol  $d\Omega$ .



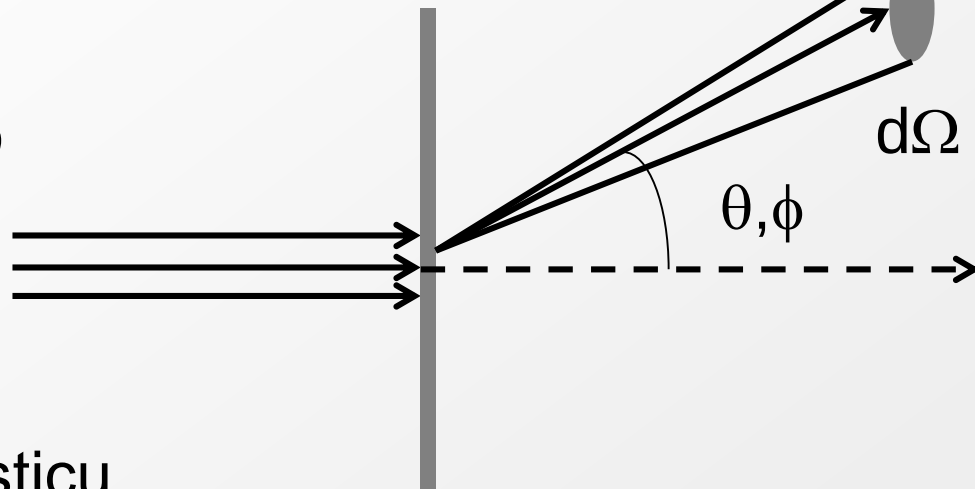
Naviac vylietavajúce časti zväčša nie sú distribuované rovnomerne, ale majú určitú uhlovú distribúciu  $r(\theta, \phi)$ , takže môžeme definovať počet jadier vylietavajúcich do definovaného priestorového uhla  $dR_b = d\Omega/4\pi$  ( $4\pi$  je kvôli normalizácii).

Potom dostávame tzv. diferenciálny účinný prierez  $\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{r(\theta, \phi)}{4\pi I_a N}$ . Ten v sebe nesie dôležitú informáciu o uhlovej distribúcii produktov. Podobne môžeme definovať diferenciálny účinný prierez ako pravdepodobnosť realizácie reakcie s určitou energiou  $\frac{d\sigma}{dE}$ .

# Dvojitý diferenciálny účinný prierez

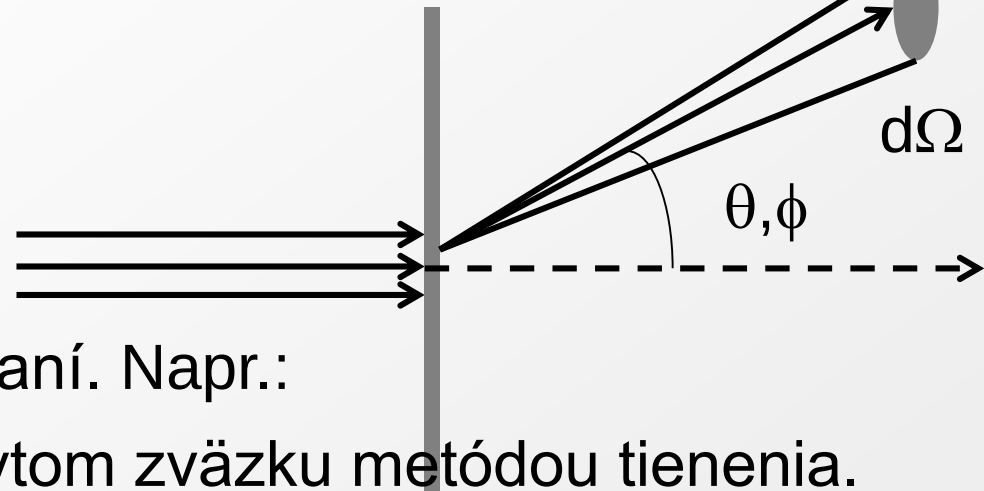


Často nás zaujíma pri meraní nielen uhlová závislosť účinného prierezu, ale aj energetická.



Pre pravdepodobnosť nájsť časticu vylietavajúcu pod určitým uhlom s určitou energiou zavádzame dvojitý diferenciálny účinný prierez  $\frac{d^2\sigma}{d\Omega dE_b}$ .

# Dvojitý diferenciálny účinný prierez



Využívajú sa rôzne varianty meraní. Napr.:

Celkový účinný prierez  $\sigma_t$  záchytom zväzku metódou tienenia.  
Reakčný účinný prierez  $\sigma$  nezávisle od uhlu a energie (napr. produkcia rádiofarmák).

Diferenciálny  $\frac{d\sigma}{d\Omega}$  vedúca na konkr. energetický stav vs. uhol  $\theta$ .

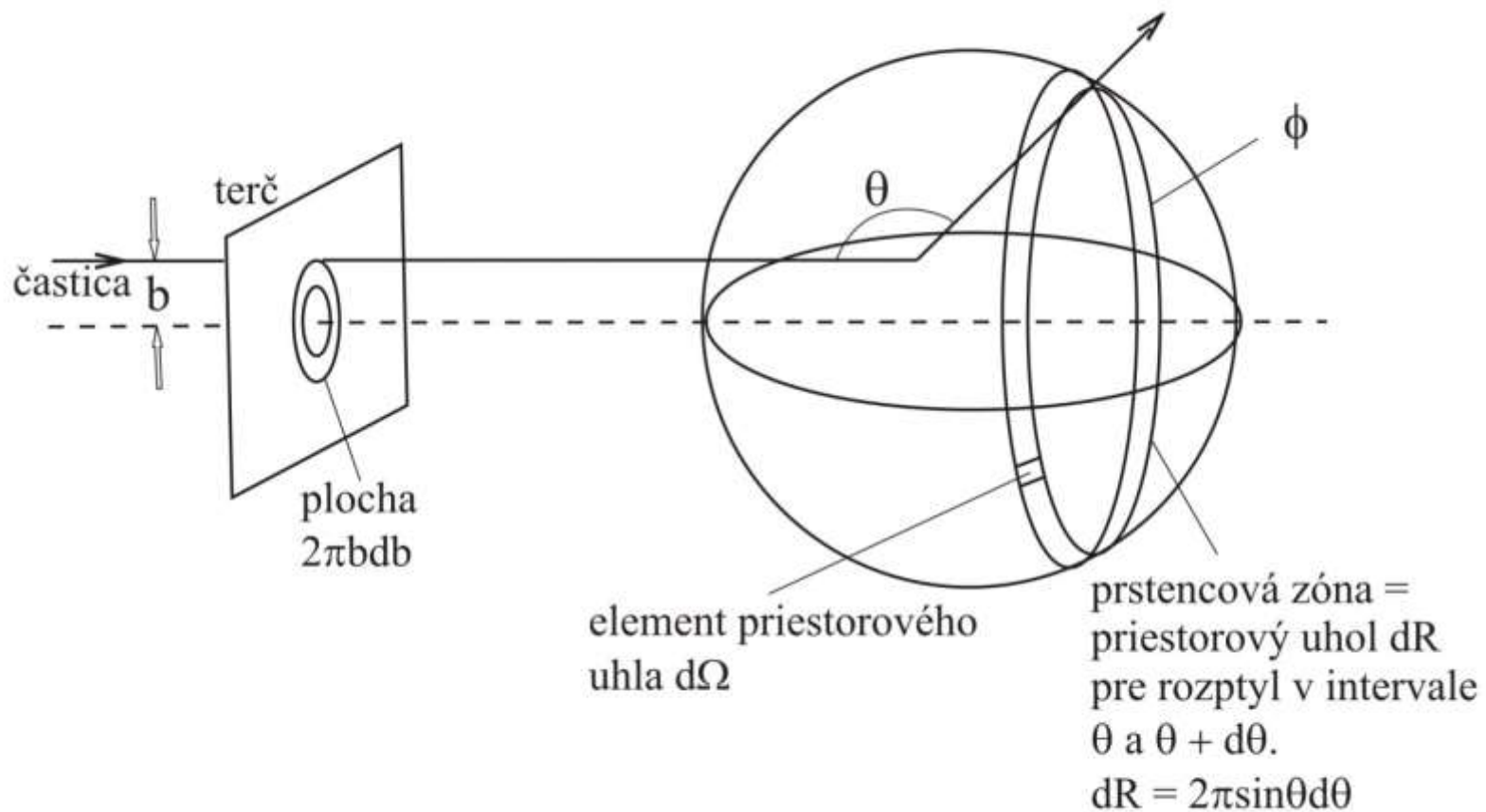
Excitačná funkcia  $\frac{d\sigma}{dE}$  (bez merania uhla) napr. meraním exc. energií jadier pomocou deexcitácie  $\gamma$  kvantami

Dvojitý účinný prierez poskytujúcu informáciu o uhlovej aj energetickej distribúcii.



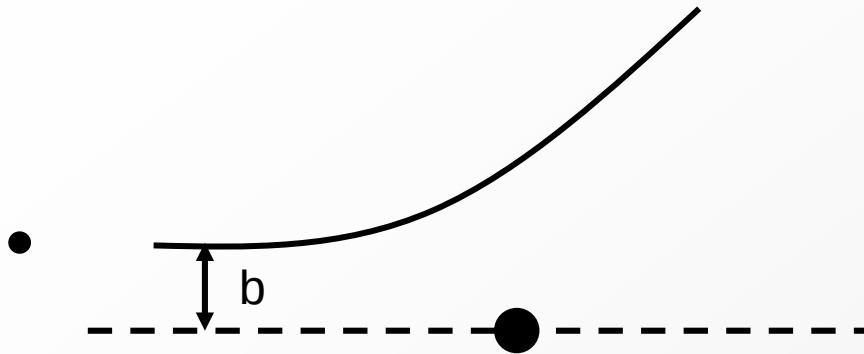
# PRUŽNÝ ROZPTYL

# Pružný rozptyl





# Pružný rozptyl



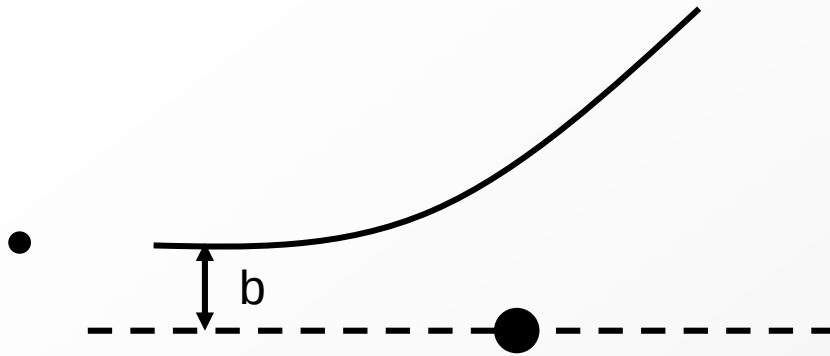
Pri malej energii projektilu, sa uplatňujú iba sily súvisiace s kulombovskou interakciou.

Projektil ma kinetickú energiu  $T_a = \frac{1}{2} m_a v^2$  a moment hybnosti  $|\mathbf{r} \times m\mathbf{v}| = mv_0 b$ . Postupne prenáša svoju kinetickú energiu na potenciálnu. V prípade čelnej zrážky keď dochádza k maximálnemu priblíženiu by to bolo  $V = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Z_a Z_X e^2}{d}$  kde  $d$  je energia maximálneho priblíženia.

V prípade zrážky s nenulovým impakt parametrom platí

$$\frac{1}{2} m v_0^2 = \frac{1}{2} m v^2 + \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Z_a Z_X e^2}{r}$$

# Pružný rozptyl



Nakoľko kulombovská sila je sférická, tak meranie nezávisí od azimutálneho uhla  $\phi$ . Preto ak sa nachádza projektil vo vzdialenosti  $(b, b+db)$ , rozptyluje sa do uhla  $(\theta, \theta+d\theta)$

Podiel terčových jadier, podieľajúcich sa na rozptyle, ktoré sú v rámci kruhu zodpovedajúceho vzdialenosti  $(b, b+db)$ , je  $df = nx(2\pi b db)$ .

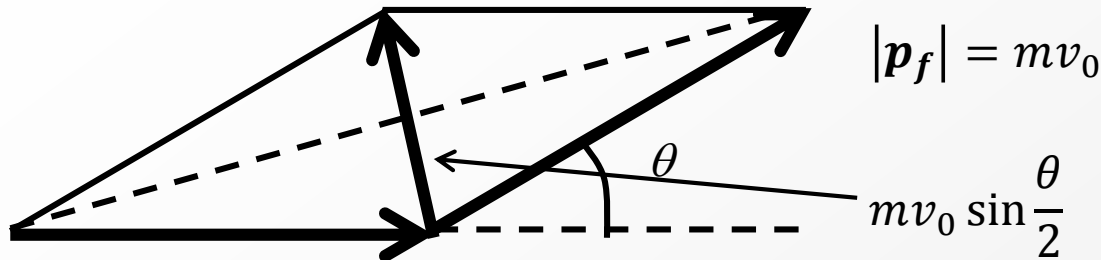
Podiel jadier s menším impakt parametrom (a teda rozptýlených pod väčším uhlom) je  $f = nx\pi b^2$ .

$n$  je objemová hustota jadier a  $x$  je hrúbka terča.

# Závislosť rozptylu do uhlu $\theta$ a impakt parametra $b$



Pre zjednodušenie predpokladáme, že každý projektil sa rozptýli iba raz.

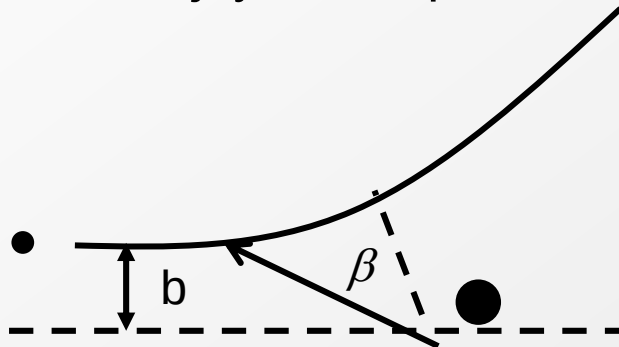


Celková zmena hybnosti je

$$\Delta p = 2mv_0 \sin \frac{\theta}{2}$$

$$|p_i| = mv_0$$

Podľa druhého Newtonovho zákona platí pre silu  $F = dp/dt$ . Takže pre celkovú zmenu hybnosti dostávame  $\Delta p = \int dp = \int F dt = \frac{zZe^2}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{dt}{r^2} \cos \beta$  kde  $\beta$  je uhol medzi vektorom  $r$  lokalizujúcim časticu a kolmicou na trajektóriu v momente najvyššieho priblíženia.

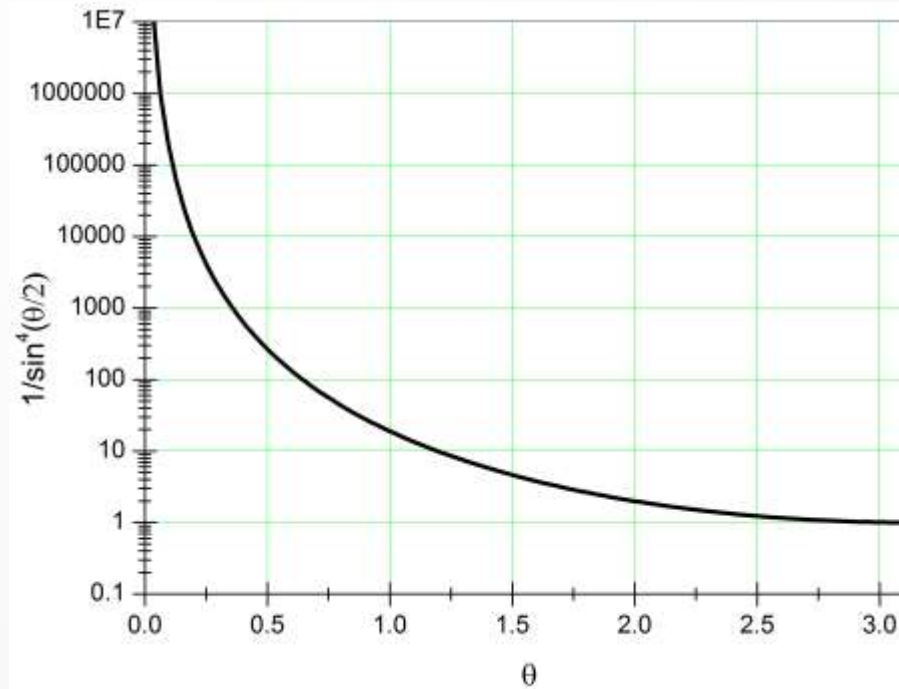


Postupne možno odvodiť pre diferenciálny účinný prierez

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \left( \frac{zZe^2}{4\pi\epsilon_0} \right)^2 \left( \frac{1}{4T_a} \right)^2 \frac{1}{\sin^4 \frac{\theta}{2}}$$

Details – Jadrová Fyzika pre Bc. stupeň.

# Závislost' od uhla



Veľmi výrazný pokles s rastúcim uhlom. Počet jadier rozptýlených do spätného smeru je o mnoho rádov nižší ako počet jadier rozptýlených pod malými uhlami. Takže rozptyl do uhla  $180^\circ$  v Rutherfordovom experimente, je proces s veľmi malou pravdepodobnosťou!



# ZÁKONY ZACHOVANIA JADROVÝCH REAKCIÍ

# Zákony zachovania baryónov



- Zákon zachovania baryónového čísla  $\sum b_1 = \sum b_2$



(Pozn. Baryóny – 3-kvarkové častice s „polčíselným“ spinom. Patria medzi fermióny. Tvorí skupiny nukleónov a hyperónov ( $\Delta$ ,  $\Lambda$ ,  $\Sigma$ ,  $\Xi$ ,  $\Omega$ )).

- Zákon zachovania počtu nukleónov. Pri nízkych energiách (pod  $\sim 140$  MeV; produkcia mezónov) sa zachováva počet protónov a neutrónov. Predpokladom je, že na časovej škále jadrových reakcií ( $10^{-16} - 10^{-22}$  s) je vplyv slabej interakcie zanedbateľný.

Pozn. Pri niektorých reakciách môže prichádzať k zmene protónu na neutrón (a opačne). Príkladom sú napr. vytvárania „piónových atómov“ s  $\pi^-$  na atómovom orbitale v reakcii  $^{206}\text{Pb}(d, ^3\text{He})^{205}\text{Pb} \otimes \pi^-$ .

# Zákony zachovania náboja



- Zákon zachovania elektrického náboja  $\sum q_1 = \sum q_2$
- Všeobecne platný zákon vo fyzike.

# Zákon zachovania momentu hybnosti



Zopakovanie z minulých ročníkov.

Moment hybnosti jadra (vo všeobecnosti)  $I = J \omega$

$J$  – moment zotrvačnosti;  $\omega$  - uhlová rýchlosť telesa

Moment zotrvačnosti (zjednodušené)  $J = m R^2$   
V prípade pevného elipsoidu  $J = 2/5 m R_{av}^2 (1 + 0.31 \beta)$

Súčet orbitálnych momentov hybnosti je len súčtom jednotlivých interagujúcich jadier  $\sum \vec{I}_i = I_X + I_a$

Relatívny orbitálny moment hybnosti označíme veličinou  $\overrightarrow{I_{rel,i}}$  zúčastnených jadier a dosahuje celočíselné hodnoty 0,1,2...

Celkový počiatkový moment hybnosti  $I_{i,tot} = \sum \vec{I}_i + \overrightarrow{I_{rel,i}}$



# Pozn. k hodnote orb. momentu hybosti



Zopakovanie z minulých ročníkov.

Pre vstupný kanál máme  
analogicky pre výstupný kanál

$$\sum \vec{I}_i = I_X + I_a,$$

$$\sum \vec{I}_f = I_Y + I_b$$

Pritom  $I_X$ ,  $I_a$ ,  $I_Y$  a  $I_b$  sú:

- a) celočíselné pre jadrá s párnym  $A$  a nepárnym  $Z$  a  $N$   
(polčíselné spiny sa skombinujú do celého čísla)
- b) „polčíselné“ pre jadrá s párnym  $Z$  a nepárnym  $N$  príp.  
nepárnym  $Z$  a párnym  $A$  ( $1/2$ ,  $3/2$  a pod.). Rozhoduje  
nespárovaný nukleón.
- c) Nulové pre páro-párne jadrá (párne  $Z$  a  $N$ ). Teda  $0+$ .

Výnimkou sú prípady, keď interagujú vzбудené jadrá (napr. izoméryných zväzky alebo terčov). Detailnejšie k izomérom vid' prednášky Fyz. At. Jadra, resp. Metd. štúdia jadr. Štruktúry.

# Zákon zachovania momentu hybnosti



Vo všeobecnosti sa v procese jadrovej reakcie zachováva celkový moment hybnosti pôsobiacich častíc (total angular momentum).

$$\sum \vec{I}_i + \vec{I}_{rel,i} = \sum \vec{I}_f + \vec{I}_{rel,f}$$

$I_i$  a  $I_f$  je uhlový moment jadier v počiatočnom a koncovom stave. Takže  $\sum \vec{I}_i = I_X + I_A$  a  $\sum \vec{I}_f = I_Y + I_b$ .

$I_{rel,i}$  a  $I_{rel,f}$  je relatívny uhlový moment jadier vo vstupnom a výstupnom kanále.

# Príklad k zákonu zach. mom. hybnosti



Majme reakciu  $^{10}\text{B} + ^4\text{He} \rightarrow ^1\text{H} + ^{13}\text{C}$

Izotop  $^{10}\text{B}$  má v základnom stave  $I_X = 3$  a  $\alpha$  častica  $I_\alpha = 0$ . Ak je zachytená ako s-vlna ( $l_i = 0$ ), dočasne vzniknuté zložené jadro je v stave s  $I_C = 3$ .

Oba produkty reakcií majú uhlové momenty jadier  $1/2$ , takže ich súčet nadobúda hodnoty 0 alebo 1.

Preto bude relatívny uhlový moment finálnych produktov reakcie  $l_f = 2, 3$ , alebo 4.

# Zákon zachovania parity



Zopakovanie z minulých ročníkov.

Základ z QM: Parita vyjadruje symetriu voči zámene súradníc.

$x \rightarrow -x$ ;  $y \rightarrow -y$ ;  $z \rightarrow -z$  v prípade kartézskych súradníc

$r \rightarrow r$ ;  $\theta \rightarrow \pi - \theta$ ;  $\phi \rightarrow \pi + \phi$ ; v prípade sférických

Vo vlnovej funkcii rozpísanej na radiálnu a uhlovú časť

$$\Psi(\mathbf{r}) = R_{n\ell} Y_{\ell m}$$

Uhlová časť sa správa ako  $Y_{\ell m}(\pi - \theta, \pi + \phi) = (-1)^{\ell} Y_{\ell m}(\theta, \phi)$

Takže parita stavu je kladná v prípade párneho  $\ell$  a záporná pre nepárne  $\ell$

# Zákon zachovania parity



V systémoch viacerých častíc je parita celého systému súčinom parít jednotlivých častíc. Parita sa pri silných interakciách zachováva. V jadrových reakciách je však previazané spoločné zachovanie uhlového momentu hybnosti a parity a platí pravidlo  $\pi_a \pi_X (-1)^{l_a} = \pi_b \pi_Y (-1)^{l_b}$

Príklad:

Vráťme sa k reakcii  $^{10}\text{B} + ^4\text{He} \rightarrow ^1\text{H} + ^{13}\text{C}$

Izotop  $^{10}\text{B}$ ,  $\alpha$  častica a protón majú rovnakú (kladnú) paritu, zatiaľ čo  $^{13}\text{C}$  má zápornú paritu. Preto ak  $l_i = 0$ , tak finálny relatívny uhlový moment produktov reakcie musí byť nepárny. Teda nevyhnutne musí byť  $l_f = 3$ .

Je možný aj opačný proces, ak vieme orbitálny moment, dokážeme určiť paritu obsadzovaného stavu.

# Zákon zachovania energie



V dôsledku veľkej vzdialenosti atómov od seba ( $\sim 10^{-10}$  m) a krátkemu dosahu jadrových síl ( $\sim 10^{-15}$  m), môžeme považovať interagujúce jadrá za uzavretý systém.

$$m_X + m_a + T_X + T_a = m_Y + m_b + T_Y + T_b$$

V analógii s rádioaktívnym rozpadom definujeme  $Q$  hodnotu reakcie ako:

$$Q = (m_{initial} - m_{final}) = m_X + m_a - m_Y - m_b$$

Čo je to isté ako prebytok energie *finálnych* produktov:

$$Q = (m_{initial} - m_{final}) = T_X + T_a - T_Y - T_b$$

Potom je reakcia v prípade

$Q > 0$  exotermická (resp. exoenergetická)

$Q < 0$  endotermická (resp. endoenergetická) – môžu prebiehať iba pri dostatočnej energii nalietaujúcich častíc.

Ak  $Q = 0$  ide o pružný rozptyl pri ktorom sa zachováva energia aj hmotnosť.

# Poznámka k spinu nukleónu



- Pri interakcii nukleónu s okolitými časticami nezáleží na hodnote jeho intristického spinu ( $+1/2$  a  $-1/2$ ). To je podstatné, až keď uvažujeme aj vplyv magneticého poľa (interakcia nukleónu závisí od orientácie jeho spinu vzhľadom na smer magnetického poľa).  
Samotný spin, zvyčajne vystupuje až pri štatistickom spracovaní interakcií (napr. pri vyhodnocovaní počtu častíc na hladine).
- Podobne nepotrebujeme zvyčajne rozlišovať medzi protónom a neutrónom, pokiaľ neuvažujeme aj elektromagnetickú interakciu. To vedie k analógii so spinom jadra a zavádzame na odlíšenie týchto stavov veličinu nazývanú *izospin*.



# IZOSPIN



# Izospin



- S izospinom pracujeme podobne ako s inými vektorovými spinmi, napr. zavádzame dĺžku izospinového vektora

$$\sqrt{t(t+1)}\hbar$$

- Označenie pre protón  $T_\pi = +1/2$  a neutrón  $T_v = -1/2$
- Celkový izospin jadra je  $T = \sum_{k=1}^A T_k = \frac{1}{2}(Z - N)$

- Napr.

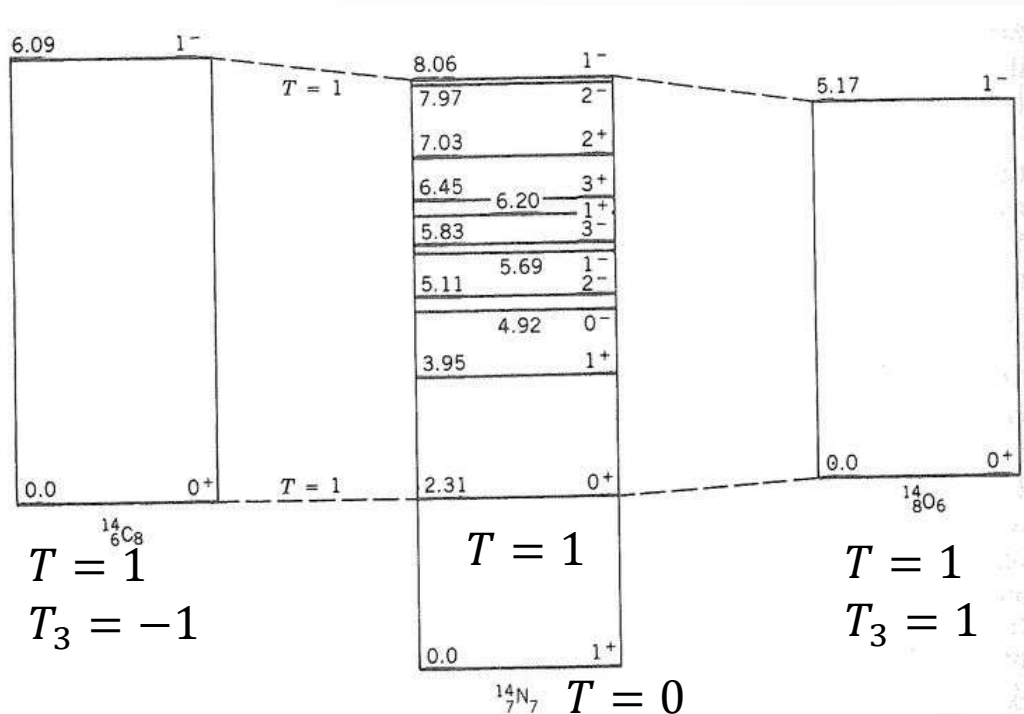
$${}^{45}_{20}\text{Ca} \quad T = 1/2 (20-25) = -5/2$$

$${}^{45}_{23}\text{V} \quad T = 1/2 (23-22) = +1/2$$

$${}^{45}_{22}\text{Ti} \quad T = 1/2 (22-23) = -1/2$$

$${}^{45}_{23}\text{V} \quad T = 1/2 (23-22) = +1/2$$

# Izospin v izobaroch

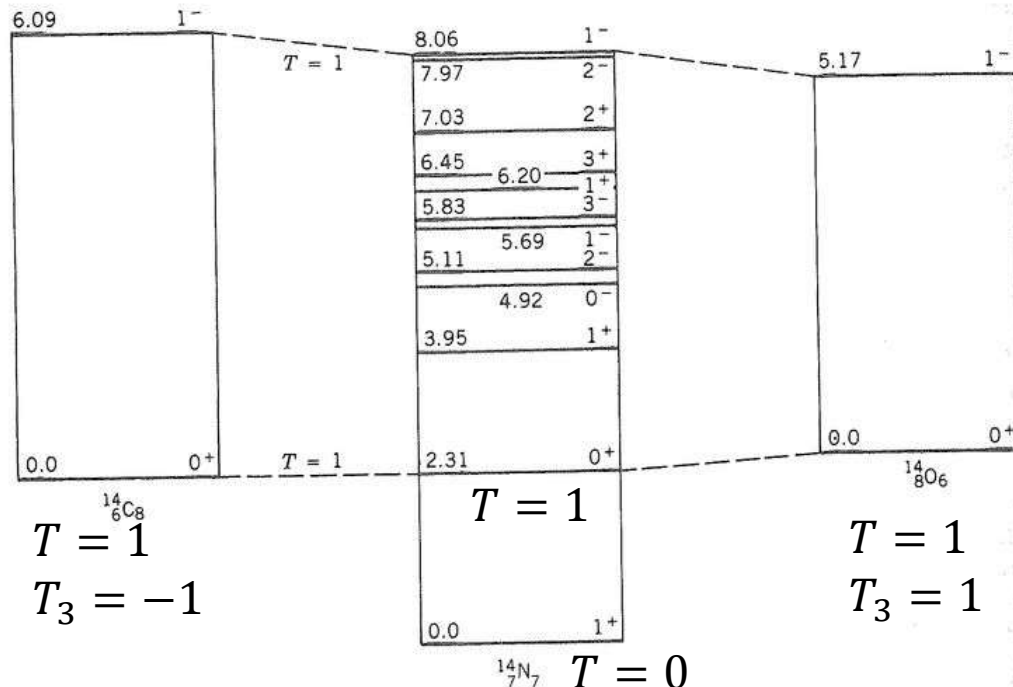


**Figure 11.5** Lower energy levels of  $A = 14$  isobars. The ground states of  $^{14}\text{C}$  and  $^{14}\text{O}$  have been shifted relative to  $^{14}\text{N}$  by the neutron-proton mass difference and the Coulomb energy; the respective shifts are 2.36 and 2.44 MeV. Energy levels in  $^{14}\text{C}$  and  $^{14}\text{O}$  have  $T = 1$ ; levels in  $^{14}\text{N}$  have  $T = 0$  except the  $T = 1$  levels at 2.31 and 8.06 MeV. Based on data compiled by F. Ajzenberg-Selove, *Nucl. Phys. A* **449**, 53 (1986).

V dôsledku nerozlíšiteľnosti protónu a neutrónu sa v jednotlivých izotopoch, izotonoch a izobaroch zvyknú jednotlivé stavy „opakovať“.

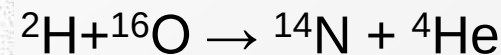
Samozrejme, v prípade nepárno-nepárneho jadra, je počet stavov, ktoré sa môžu vyskytnúť väčší.

# Vplyv izospinu na reakciu



**Figure 11.5** Lower energy levels of  $A = 14$  isobars. The ground states of  $^{14}\text{C}$  and  $^{14}\text{O}$  have been shifted relative to  $^{14}\text{N}$  by the neutron-proton mass difference and the Coulomb energy; the respective shifts are 2.36 and 2.44 MeV. Energy levels in  $^{14}\text{C}$  and  $^{14}\text{O}$  have  $T = 1$ ; levels in  $^{14}\text{N}$  have  $T = 0$  except the  $T = 1$  levels at 2.31 and 8.06 MeV. Based on data compiled by F. Ajzenberg-Selove, *Nucl. Phys. A* **449**, 53 (1986).

Izotop  $^{14}\text{N}$  môžeme produkovať v reakcii

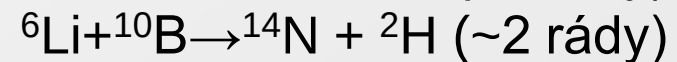
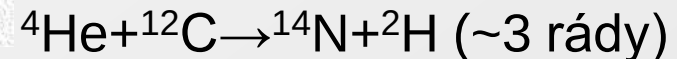


Excitovaný stav v  $^4\text{He}$  je vysoko ( $E_{\text{exc}} \sim 20$  MeV) a pri nízkej energii reakcie sa neobsadzuje.

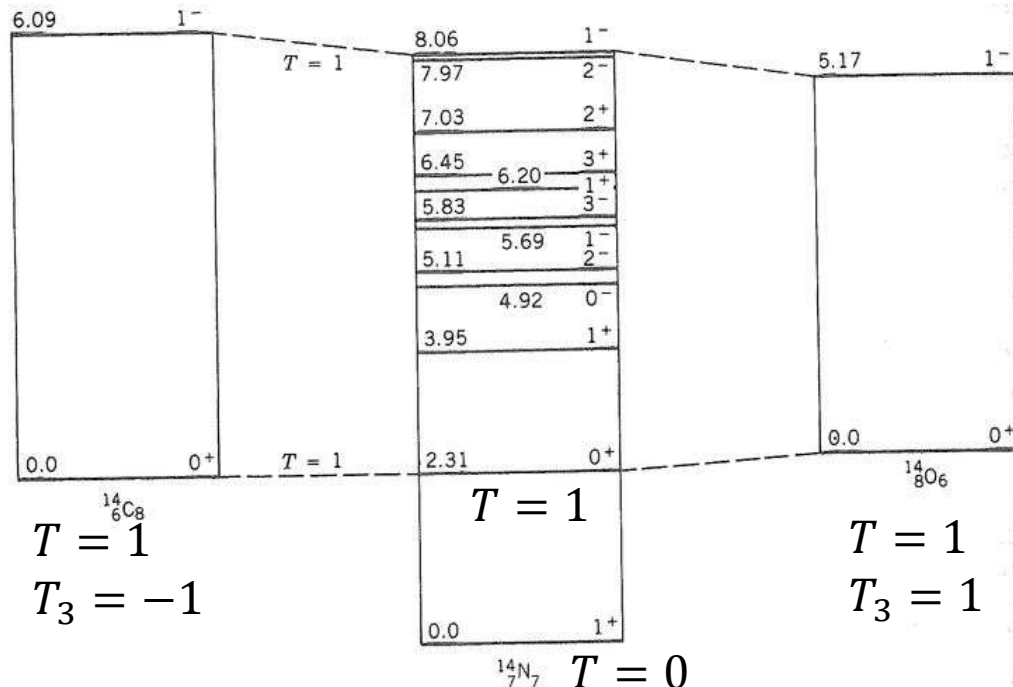
Základný stav  $^4\text{He}$  má  $T=0$  tak sa aj v jadre  $^{14}\text{N}$  obsadzujú stavy s izospinom  $T=0$ .

Stav s  $T=1$  (celkový izospin;  $T_z = 0$ ) na 2.31 MeV je potlačený o  $\sim 2$  rády.

Podobne aj v ďalších reakciách s  $T=0$ :



# Vplyv izospinu na reakciu



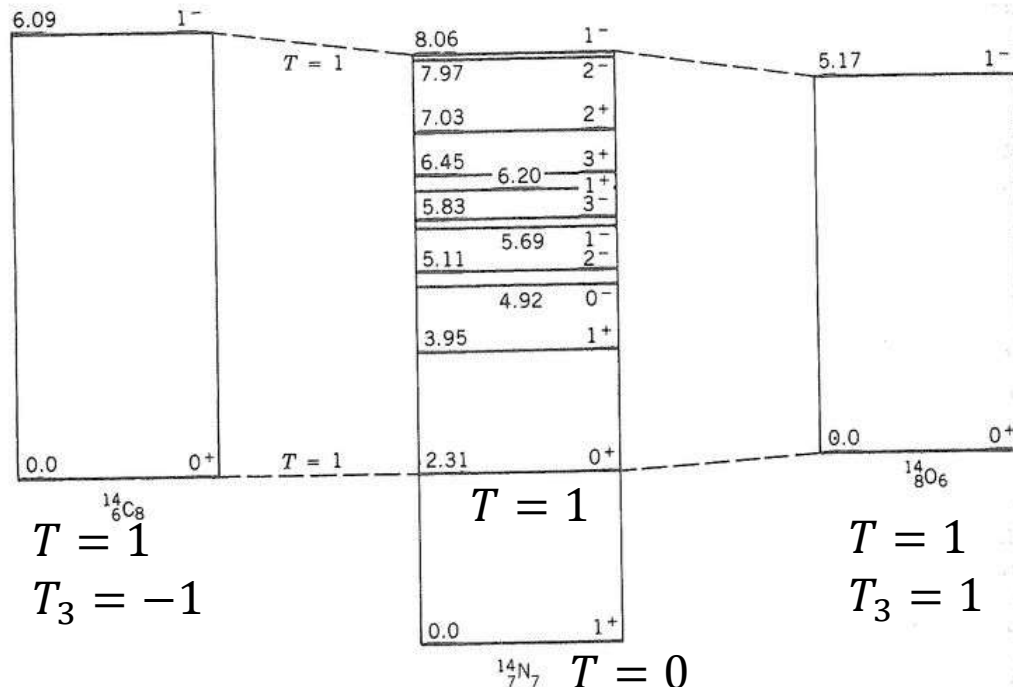
**Figure 11.5** Lower energy levels of  $A = 14$  isobars. The ground states of  $^{14}\text{C}$  and  $^{14}\text{O}$  have been shifted relative to  $^{14}\text{N}$  by the neutron-proton mass difference and the Coulomb energy; the respective shifts are 2.36 and 2.44 MeV. Energy levels in  $^{14}\text{C}$  and  $^{14}\text{O}$  have  $T = 1$ ; levels in  $^{14}\text{N}$  have  $T = 0$  except the  $T = 1$  levels at 2.31 and 8.06 MeV. Based on data compiled by F. Ajzenberg-Selove, *Nucl. Phys. A* **449**, 53 (1986).

Izotop  $^{14}\text{N}$  môžeme produkovať aj v reakcii  
 $^{10}\text{B} + ^7\text{Li} \rightarrow ^{14}\text{N} + ^3\text{H}$

Pôvodné jadrá majú sumárne izospin  $+1/2$ . Jadro  $^3\text{H}$  má izospin  $+1/2$  a môže sa nakombinovať buď so stavom  $T=0$  alebo  $T=1$  v jadre  $^{14}\text{N}$  s výsledkom  $T=1/2$  pre výstupný kanál.

Skutočne, sa  $T=1$  aj  $T=0$  obsadzujú porovnateľne.

# Analógové stavy v ťažších jadrách



**Figure 11.5** Lower energy levels of  $A = 14$  isobars. The ground states of  $^{14}\text{C}$  and  $^{14}\text{O}$  have been shifted relative to  $^{14}\text{N}$  by the neutron-proton mass difference and the Coulomb energy; the respective shifts are 2.36 and 2.44 MeV. Energy levels in  $^{14}\text{C}$  and  $^{14}\text{O}$  have  $T = 1$ ; levels in  $^{14}\text{N}$  have  $T = 0$  except the  $T = 1$  levels at 2.31 and 8.06 MeV. Based on data compiled by F. Ajzenberg-Selove, *Nucl. Phys. A* **449**, 53 (1986).

Pozn. V stredne ťažkých a ťažkých jadrách sú analógové stavy pre zámene protónu a neutrónu výrazne vyššie v priestore orbitalov vrstvového modelu (10 a viac MeV) a preto sa pri nízko-energetických reakciách a rozpadoch neobsadzujú.



# ODSTREDIVÝ POTENCIÁL

# Definícia potenciálu



Pri interakcii dvoch jadier musíme uvažovať kulombovskú bariéru v dôsledku ich elektrických nábojov.

Ak dochádza pri interakcii častíc k prenosu uhlového momentu hybnosti, musíme uvažovať dodatočné zvýšenie potenciálu v dôsledku odstredivej interakcie.

Veľkosť odstredivého potenciálu (centrifugal potencial) je:

$$V_0 = \frac{l(l+1)\hbar^2}{2mr^2}$$

Kde  $m$  je hmotnosť interagujúceho nukleónu a  $r$  je relatívna vzdialenosť nukleónov.



# Odstredivý potenciál



V prípade interakcie dvoch jadier  $a+X$  využijeme pre odstredivý potenciál ich redukovanú hmotnosť sústavy

$$\mu = \frac{m_a m_X}{m_a + m_X}$$

Takže pre odstredivý potenciál dostávame

$$V_0 = \frac{l(l+1)\hbar^2}{2\mu r^2}$$

Relatívnu vzdialenosť dvoch jadier v momente interakcie je možné odhadnúť ako:

$$r = 1.2 \times \left( A_X^{1/3} + A_a^{1/3} \right)$$



# Odhad výšky potenciálu



Pre interakciu projektilu so 4 nukleónmi a terčového jadra so 100 nukleónmi je redukovaná hmotnosť približne  $\mu = 3.8$ . Polomer interakcie je cca  $7.5 \text{ fm}$ . Pre  $l = 2$  potom dostaneme

$$\begin{aligned} V_O &= \frac{l(l+1)\hbar^2}{2\mu r^2} = \frac{l(l+1)(\hbar c)^2}{2\mu c^2 r^2} \\ &= \frac{6 \times (197.3 \text{ MeV/fm})^2}{2 \times 3.8u \times 931.5 \text{ MeV/u} \times (7.5 \text{ fm})^2} = 0.58 \text{ MeV} \end{aligned}$$

V prípade  $l = 3$  je  $V_O = 1.2 \text{ MeV}$ .

Pre ľahší projektil s  $A_a=2$  (napr. deutérium) a rovnakú hodnotu  $l = 3$  dostávame  $V_O = 2,55 \text{ MeV}$ .

Takže odstredivý potenciál narastá s  $l$  a s redukovanou hmotnosťou systému (napr. s klesajúcou hmotnosťou projektilu)

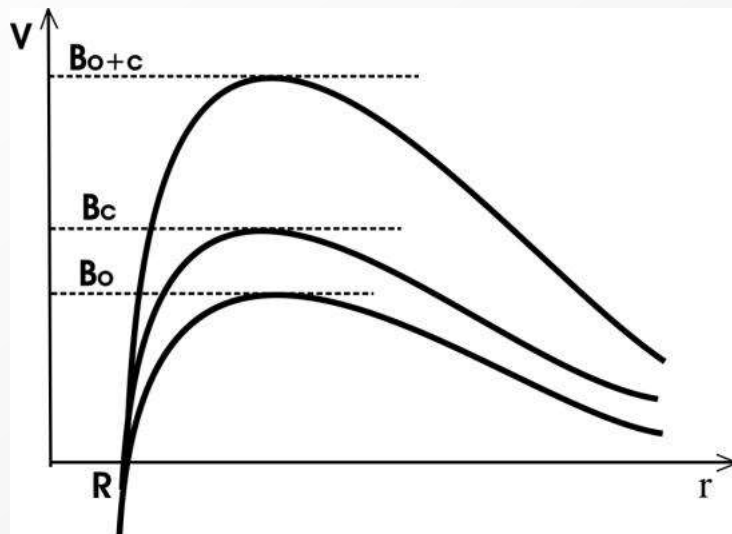
# Odstredivý potenciál pre nabité častice



Samozrejme v prípade nabitých častíc sa oba potenciály spočítavajú. Takže celková bariéra bariéra pre interakciu nabitého projektilu s terčom je

$$V_{tot} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Z_a Z_X e^2}{r} + \frac{l(l+1)\hbar^2}{2\mu r^2}$$

Pozn. Ďalšie potenciály ale tie si spomenieme neskôr



- Pre ľahké jadrá so  $Z < 8$  môže byť rozhodujúci odstredivý potenciál.
- Pre ťažšie jadrá však dominuje práve kulombovský odpudivý potenciál.

Napr. Pre reakciu  $^{48}\text{Ca} + ^{238}\text{U}$  je kulombovská bariéra až 225 MeV

# Využitá literatura



- K.S. Krane, Introductory Nuclear Physics, John Wiley & Sons, 1988.
- C.A.Bertulani, P. Danielewicz, Introduction to Nuclear Reactions, IoP Publishing Ltd 2004.
- T. Mayer-Kuckuk, Fyzika Atomového jádra, SNTL 1979.



**THE END**