Jadrové reakcie

1-FYZ-601 Jadrová fyzika

Klasifikácia jadrových reakcií

- Vo všobecnosti, jadrové reakcie prebiehajú v momente, keď sa dve jadrá, príp. častice priblížia na dosah silnej interakcie.
- Za jadrové reakcie však považujeme aj reakcie vyvolané γ 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 γ kvantum
- Alternatívny spôsob $X(a,b)Y$ sa využíva aj v súvislosti so všeobecným pomenovaním reakcií, ako napr. (α,n) alebo (n,γ) a pod.

Reakčné kanály

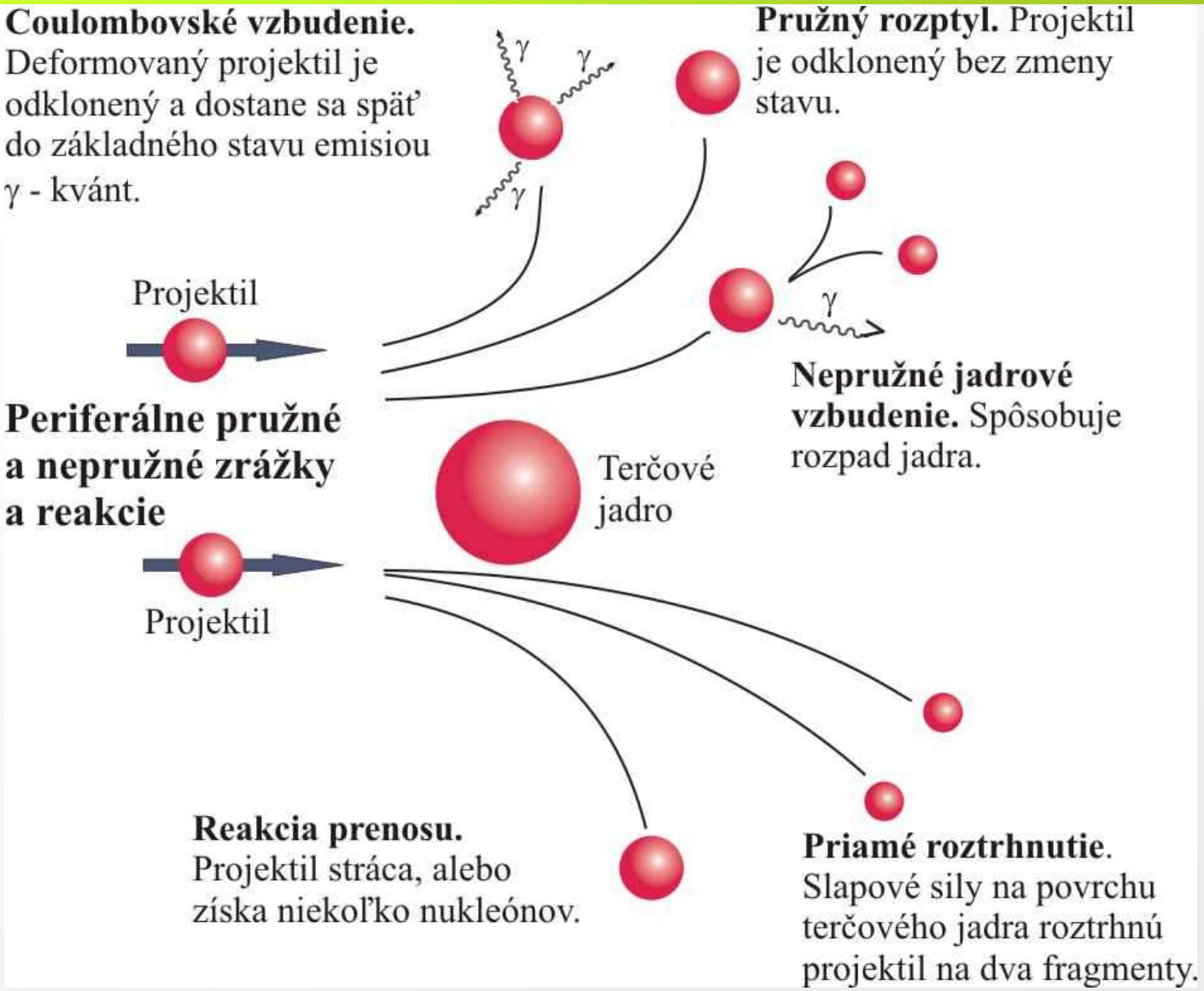
- Pomenovanie reakčný kanál využívame na opis zmeny identity projektillu a terča. Vo všeobecnosti nie sú fináne produkty reakcie jednoznačne definované a sú otvorené rôzne *reakčné kanály*.

$$a + X \rightarrow \begin{array}{l} b_1 + Y_1 \\ b_2 + Y_2 \\ b_3 + Y_3 \\ \ldots \end{array}$$

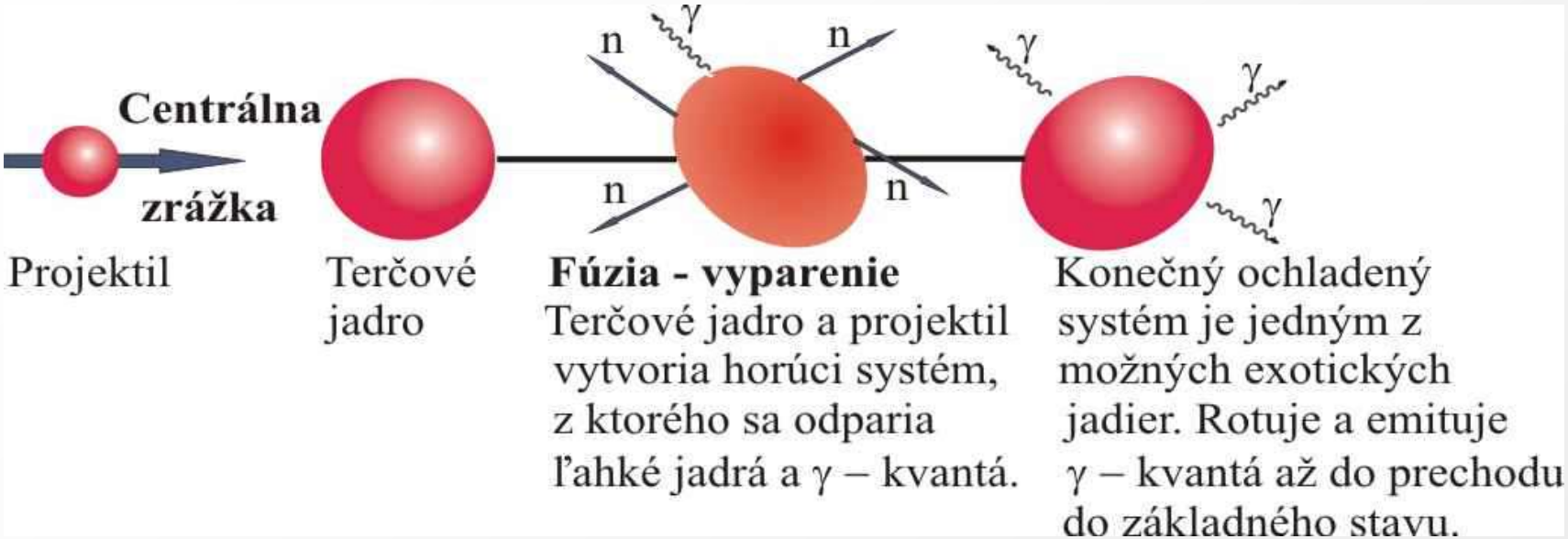
- Konkrétny príklad:

$$d + {}^{238}U \rightarrow \begin{array}{l} {}^{240}Np + \gamma \\ {}^{239}Np + n \\ {}^{239}U + p \\ {}^{237}U + t \end{array}$$

Periferálne zrážky



Centrálne zrážky



Delenie podľa energie

V prípade nabitých častíc pôsobí odpudivý kulombovský potenciál

$$V_{coul} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Z_a Z_X e^2}{r}$$

V závislosti od mechanizmu a energie, preto rozoznávame reakcie:

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

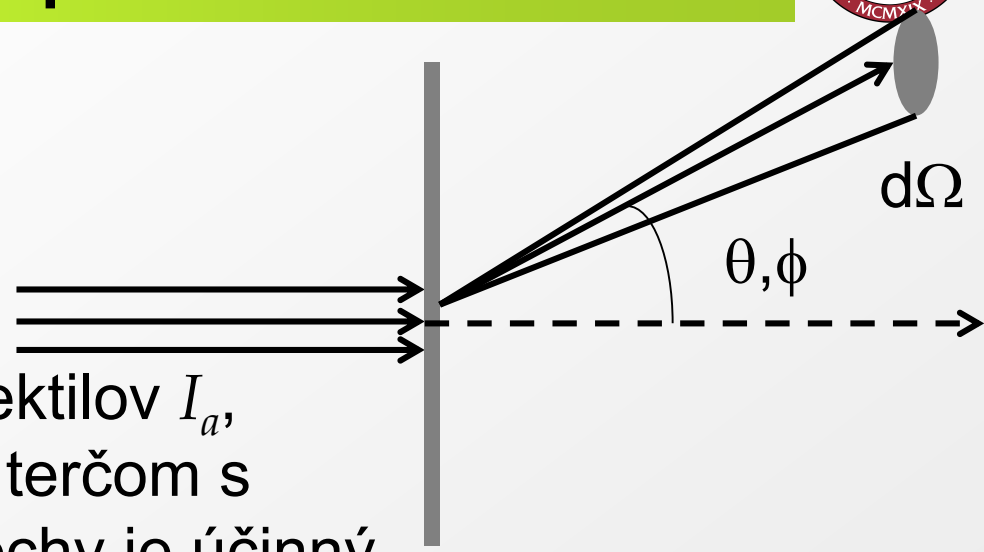
Zákony zachovania

- Zákon zachovania elektrického náboja $\sum q_1 = \sum q_2$ (všeobecne platný zákon vo fyzike).
- Zákon zachovania baryónového čísla $\sum b_1 = \sum b_2 \Leftrightarrow$ Zákon zachovania počtu nukleónov. Pri nízkych energiách (pod ~ 140 MeV; produkcia mezónov) sa zachováva počet protónov a neutrónov.
- Zákon zachovania momentu hybnosti $\sum \vec{I_i} + \overrightarrow{I_{rel,i}} = \sum \vec{I_f} + \overrightarrow{I_{rel,f}}$
- Zákon zachovania parity
- Zákon zachovania energie

DIFERENCIÁLNY ÚČINNÝ PRIEREZ

Účinný prierez

Detektor umiestnený pod uhlami θ a ϕ nám definuje priestorový uhol dΩ.



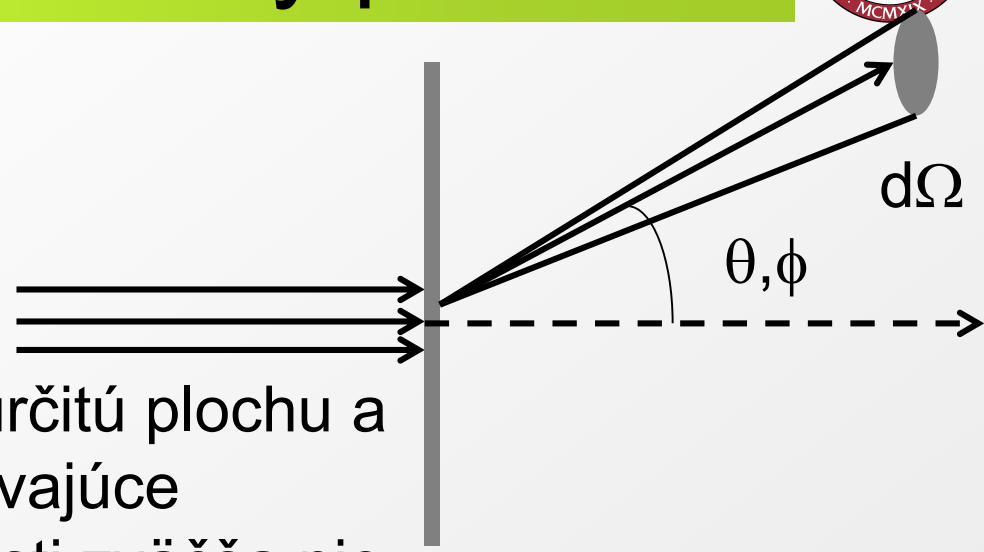
Pri intenzite nalietavajúcich projektilov I_a, počte vylietavajúcich častíc R_b a terčom s počtom N_b jadier na jednotku plochy je účinný prierez reakcie definovaný ako $\sigma = \frac{R_b}{I_a N}\ [m^2]$.

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

Na účinný prierez treba hľadieť ako na plochu úmernu pravdepodobnosti reakcie.

Diferenciálny účinný prierez

Detektor umiestnený pod uhlami θ a ϕ nám definuje priestorový uhol $d\Omega$.

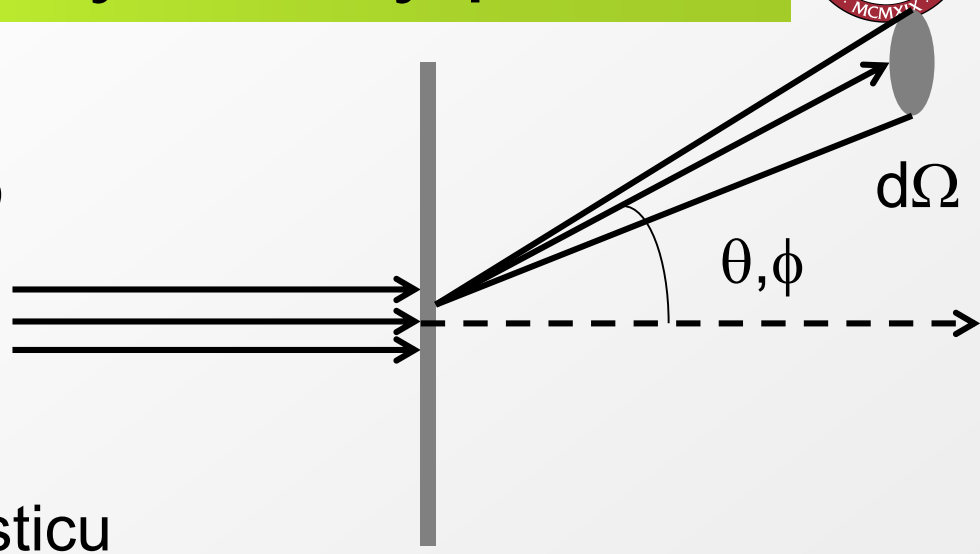


Detektor zvyčajne pokrýva len určitú plochu a preto neregistruje všetky vylietavajúce častice. Naviac vylietavajúce časti zväčša nie sú distribuované rovnomerne, ale majú určitú uhlovú distribúciu $r(\theta, \phi)$.

Potom počet vylietavajúcich jadier je $dR_b = d\Omega/4\pi$ (4π je kvôli normalizácii). Potom dostávame tzv. diferenciálny účinný prierez $\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{r(\theta,\varphi)}{4\pi I_a N}$. Ten v sebe nesie dôležitú informáciu o uhlovej distribúcii produktov.

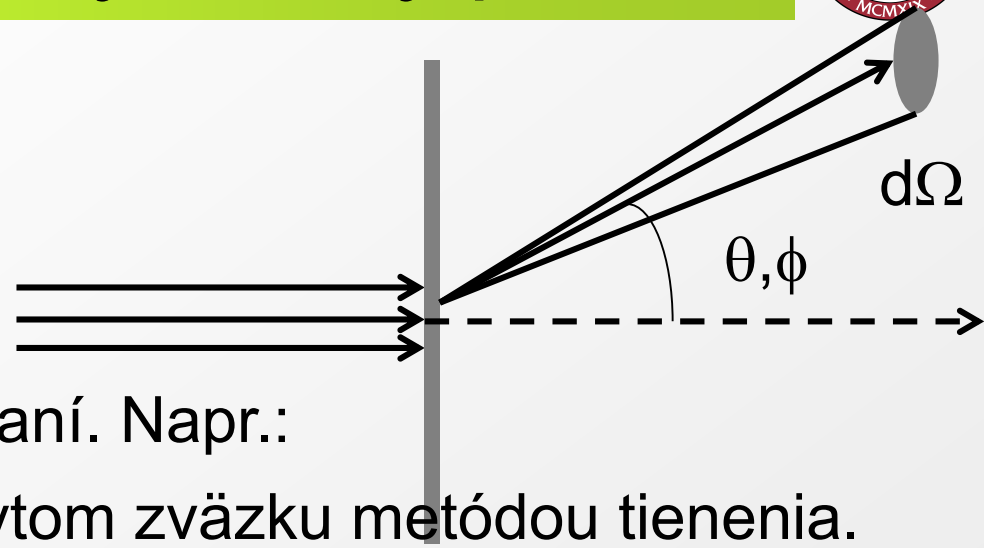
Dvojitý diferenciálny účinný prierez

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



Pre pravdepodobnosť náisť 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 σ_t záchytom zväzku metódou tienenia.
Reakčný účinný prierez σ nezávisle od uhlu a energie (napr. produkcia rádiofarmák).
Diferenciálny $\frac{d\sigma}{d\Omega}$ vedúca na konkr. energetický stav vs. uhol θ.
Excitačná funkcia $\frac{d\sigma}{dE}$ (bez merania uhla) napr. meraním exc. energií jadier pomocou deexcitácie γ kvantami
Dvojitý účinný prierez poskytujúcu informáciu o uhlovej aj energetickej distribúcii.

Jadrové reakcie vedúce na zložené jadro. Preukázanie aplikovateľnosti teórie vzniku zloženého jadra

REAKCIE SO VZNIKOM ZLOŽENÉHO JADRA

Základná idea

Jadro, príp. nukleón, nalietavajúci na jadro odovzdá pri viacnásobných zrážkach postupne celú energiu a uviazne v terčovom jadre.

Pravdepodobnosť procesu závisí od energie nalietavajúceho jadra a dostupných kvantovaných hladín v jadre.

Nie je to jednokrokový proces.

1) Uviaznutie nukleónu a obsadenie niektorej hladiny
2) Re-distribúcia energie ces dvojtelesové interakcie medzi uviaznutým nukleónom a zvyšnými nukleónmi
3) Vytvorenie relatívne dlhožijúceho jadra.

Vplyv kvantovania hladín

Jadrová reakcia takto cíti dostupnosť a kvantovanie hladín. Ak je energia zodpovedajúca niektorým hladinám, pravdepodobnosť procesu je vyššia (podobne ako napr. pri rádioaktívnom rozpade).

V dôsledku komplexnosti procesu (napr. redistribúcie energie) sa zvyšuje aj komplexnosť výťažkov.

Výťažky z reakcií pre rôzne široké intervaly energií protónov.

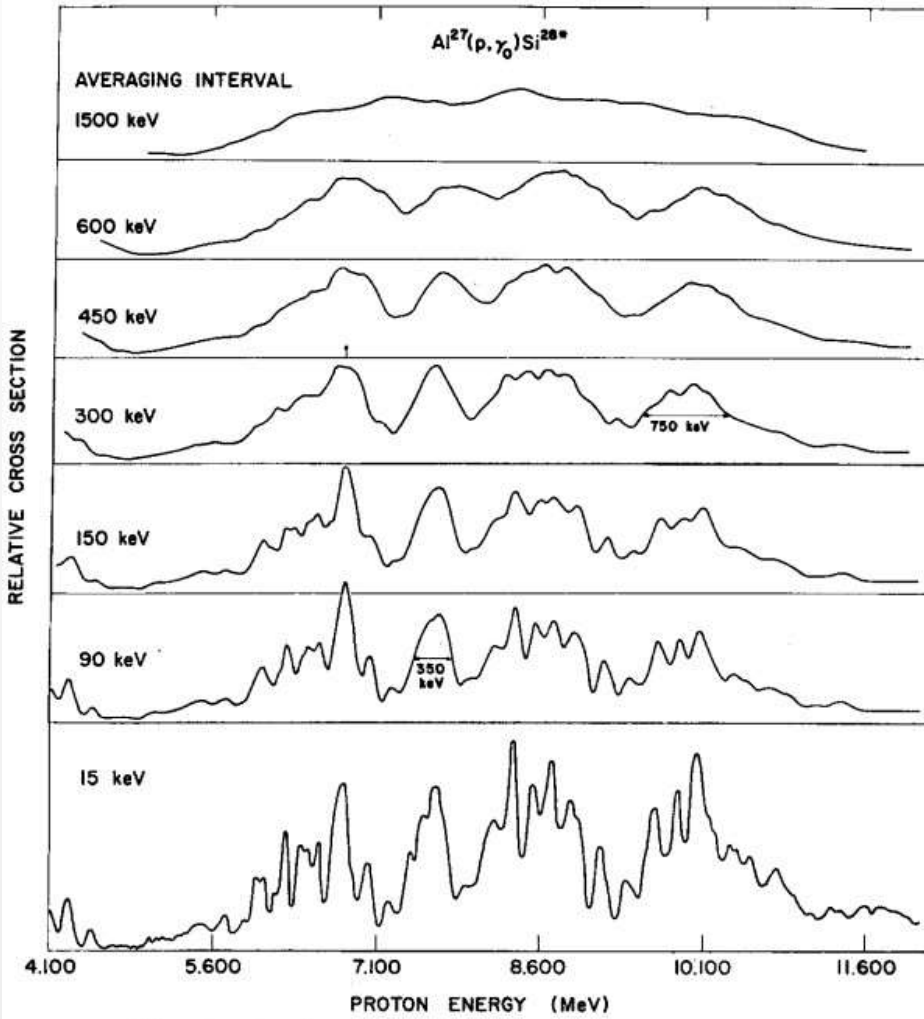


Fig. 12. The yield curve for γ_0 for various averaging intervals.

A. Budzanowski et al. Phys. Rev. C17, 951 (1978)

Doba života zloženého jadra

Po vytvorení zloženého jadra, nie je excitačná energia pripadajúca na jeden nukleón postačujúca na jeho emisiu.

Náhodnou redistribúciou nukleón-nukleónovými zrážkami v jadre sa energia prenesie na jeden, alebo viac nukleónov (príp. prefromovanú alfa časticu) čo môže spôsobiť ich emisiu.

Pomalý proces $\approx 10^{-14}$ - 10^{-16} s (vs. 10^{-22} s potrebnej na fúziu).

Dôležitý dôsledok: Výstupný kanál reakcie (následna emisia nukleónov z excitovaného jadra) nezávisí od vstupného kanálu.

Vznik zloženého jadra schematicky

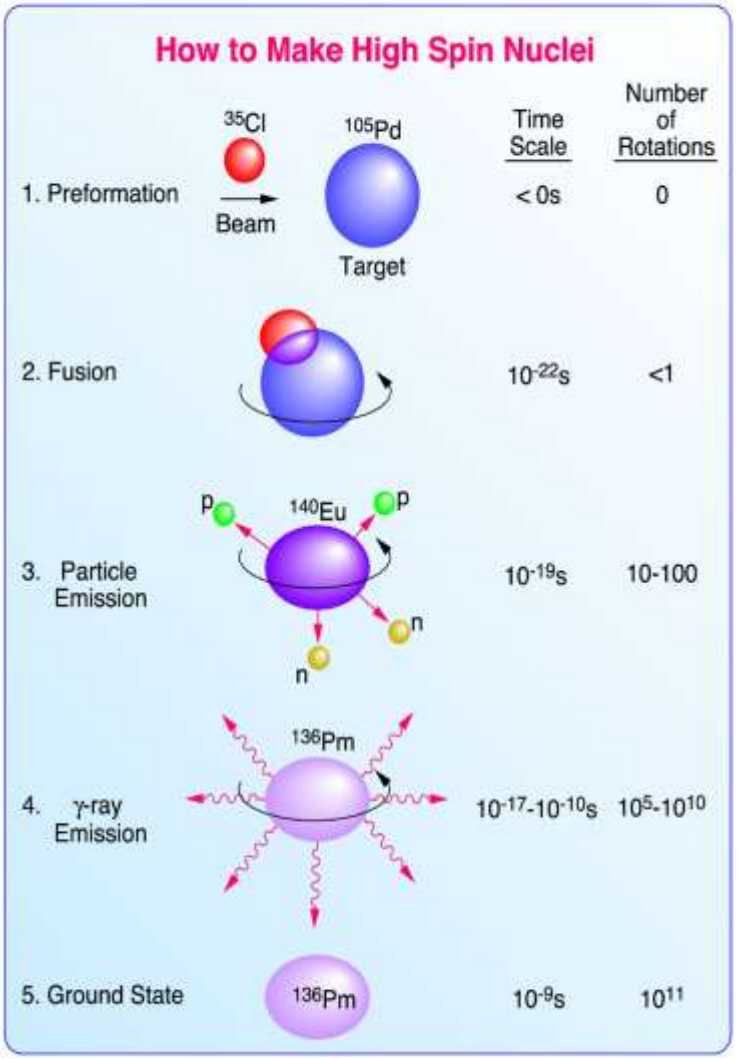
$$a + A \rightarrow C^* \rightarrow B + b$$

Vstupný kanál — Zložené jadro — Výstupný kanál

$$a + A \rightarrow C^* \rightarrow B_1 + b_1$$
$$\rightarrow B_2 + b_2$$
$$\rightarrow B_3 + b_3$$
$$\rightarrow \ldots$$

V dôsledku dlhéj doby života musíme uvažovať s rôznymi variantami pre výstupný kanál

Schematický náčrt



Experimentálne overenie konceptu zloženého jadra

PHYSICAL REVIEW VOLUME 80, NUMBER 6 DECEMBER 15, 1950

An Experimental Verification of the Theory of Compound Nucleus*

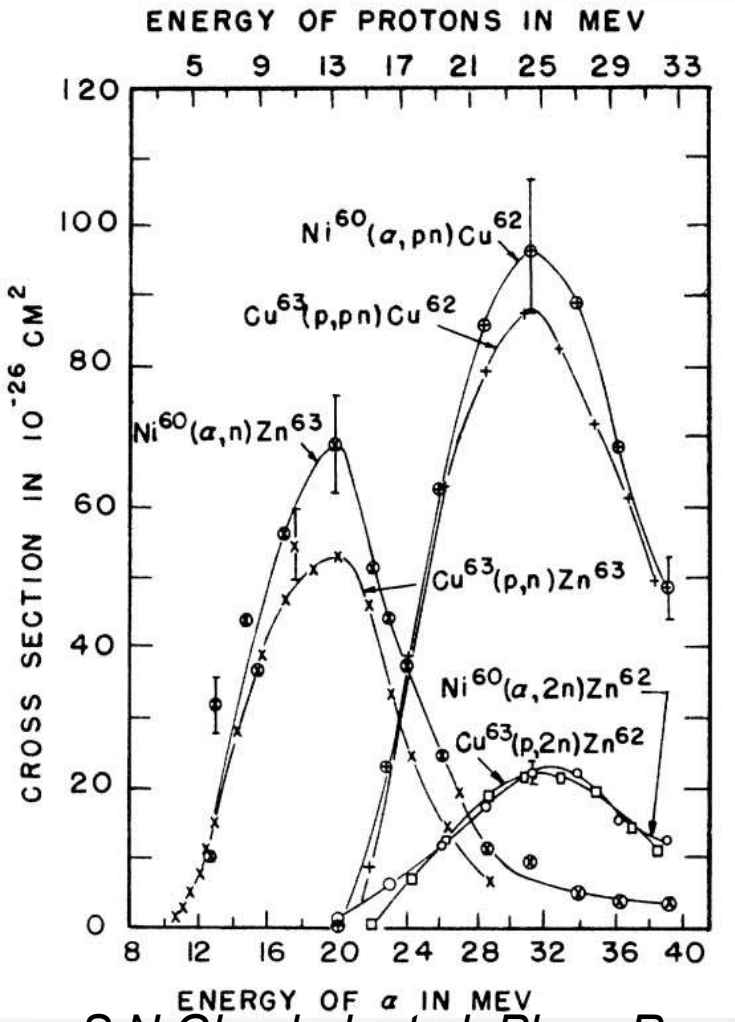
S. N. GHOSHAL†
Radiation Laboratory, Department of Physics, University of California, Berkeley, California

(Received July 28, 1950)

The compound nucleus Zn^{64} was formed by bombarding Ni^{60} with α-particles and Cu^{63} with protons. The ratios of the cross sections $\sigma(\alpha,n):\sigma(\alpha,2n):\sigma(\alpha,pn)$ for Ni^{60} were found to agree with the ratios $\sigma(p,n):\sigma(p,2n):\sigma(p,pn)$ for Cu^{63}, giving a direct verification of the theory of compound nucleus. The observed cross sections for the (p,n), $(p,2n)$, and (p,pn) reactions on Cu^{63} and (α,n), $(\alpha,2n)$, and (α,pn) reactions on Ni^{60} have been compared with the theoretical cross sections calculated on the basis of the statistical model. The observed anomalous behavior of the (p,pn) and (α,pn) cross sections with respect to the $(p,2n)$ and $(\alpha,2n)$ cross sections respectively are discussed.

Porovnanie výťažkov produkcie zloženého jadra ^{64}Zn pre rôzne spôsoby jeho produkcie ako aj rozpadu.

Experimentálne overenie konceptu zloženého jadra



S.N.Ghoshal et al. Phys. Rev. 80, 939 (1950)

$$p + {}^{63}Cu \rightarrow {}^{64}Zn \rightarrow {}^{63}Zn + n$$

$$\alpha + {}^{60}Ni \rightarrow {}^{64}Zn \rightarrow {}^{62}Cu + n + p$$

$$\rightarrow {}^{62}Zn + 2n$$

Relatívne výťažky reakcií sú nezávislé od toho ako zložené jadro vzniklo.

Účinný prierez

Počet jadier, vytvorených za jednotku času je určený vzťahom

$$N_{Re} = \sigma N_{Proj} n$$

σ je účinný prierez reakcie, n je počet jadier terča pripadajúci na jednotku plochy v smere nalietajúcich častíc a N_{Proj} je počet nalietajúcich častíc za jednotku času.

Počet jadier terča určíme ako $n = f \frac{N_A}{S} \frac{m}{M_m} = f \frac{N_A}{M_m} d$ kde d je hrúbka terča v jednotkách g/cm^2, f je izotopická čistota terča a M_m je mólová hmotnosť terčových jadier.

INTERAKCIA NEUTRÓNOV

Základy

- Interakcia neutrónov predstavuje jeden z načastejších prípadov jadrovej interakcie. Na rozdiel od nabitých častíc neutróny prenikaju voľne do jadra.
- Možné formy interakcie neutrónov

(n,γ): ${}^{A}_{Z}X + n \rightarrow {}^{A+1}_{Z}X + \gamma$

(n,p): ${}^{A}_{Z}X + n \rightarrow {}^{A}_{Z-1}X + p$

(n,α): ${}^{A}_{Z}X + n \rightarrow {}^{A-3}_{Z-2}X + \alpha$

(n,f): ${}^{A}_{Z}X + n \rightarrow A_1 + A_2 + xn + \gamma$

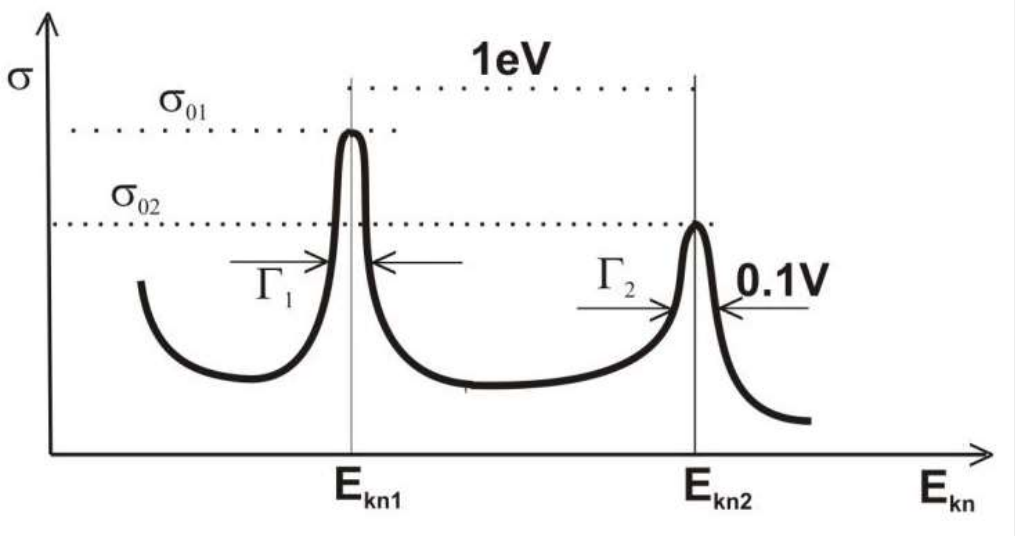
Pri vyššej energii je možné uvažovať aj reakcie ako (n,2n) (n,pn), (n,nα) a pod.

Energie neutrónov

- Podľa energie delíme neutróny na:
  Thermal (tepelné) E~ 0.025 eV
  epithermal E~ 1 eV
  Pomalé E~ 1 keV
  Rýchle E~ 100 keV – 10 MeV

Rezonancie neutrónov

Pri štúdiu rôznych reakcií neutrónov s jadrami sa zistilo, že pri určitých energiách pravdepodobnosť záchytu prudko narastie (rezonančné neutróny)...

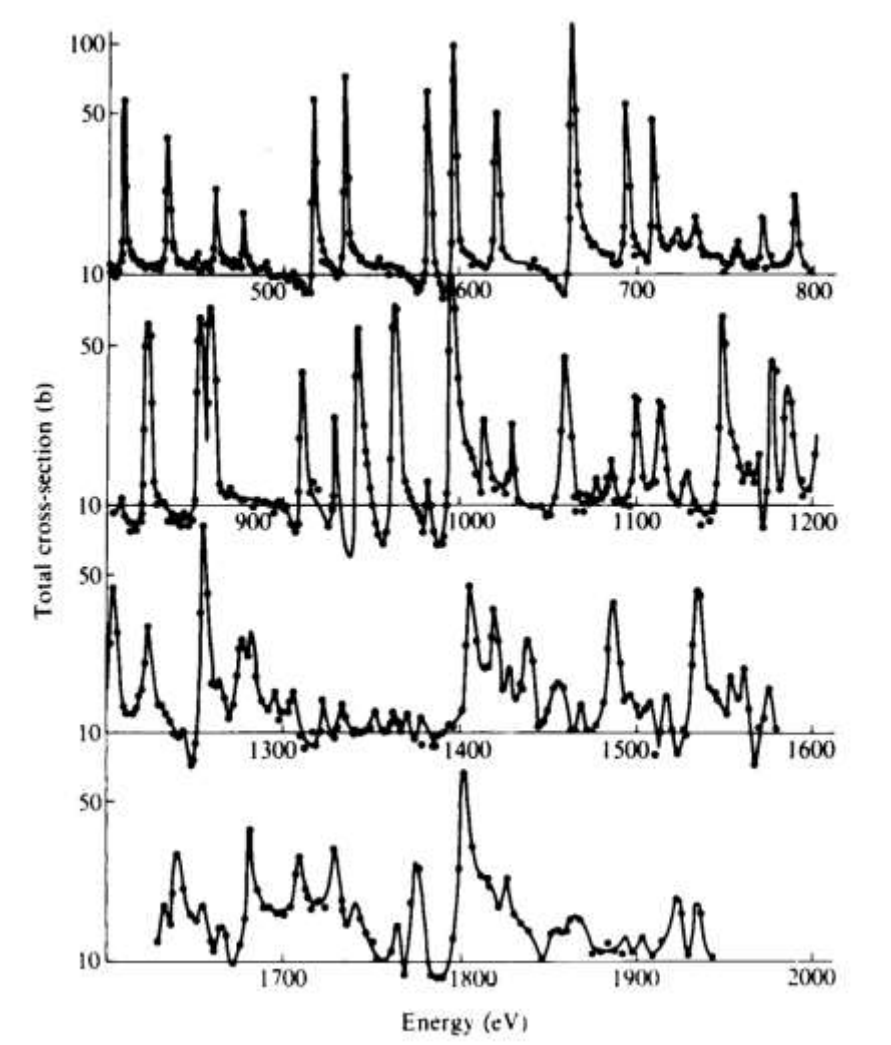


Z princípu neurčitosti platí $\Delta E \Delta t \approx \hbar$ kde $\hbar = 6.6 \times 10^{-16} eV.s$

V prípade ak $\Delta E = 0.1\ eV$ sa doba života hladiny

$\tau = \frac{6.6 \times 10^{-16} eV.s}{0.1 eV} = 10^{-14} s$. Takže reakcia prechádza cez zložené jadro...

Rezonancie pomalých neutrónov



Celkový účinný prierez interakcie nízkoenergetických neutrónov s jadrom ^{238}U vykazuje rezonančnú štruktúru (Firk 1960).

Poznámka k neutrónovému záchytu

Aj pomalý neutrón,akostane viazaný po prieniku v jadre, prispieva k excitácii svojou väzbovou energiou. Táto excitačná energia umožňuje emisiu γ kvánt de-excitáciou - (n, γ) reakcie.

Taktiež sa jadromôže štiepiť (indukované štiepenie)

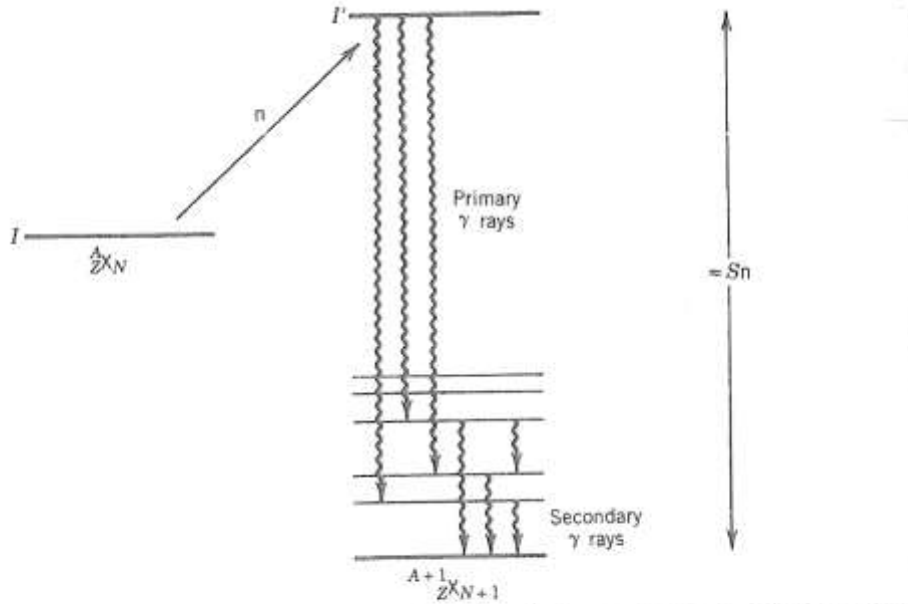


Figure 12.13 Low-energy neutron capture leads to a state I', which emits primary γ rays followed by secondary γ rays.