Univerzita obrany
v Brně

Jaderné reakce

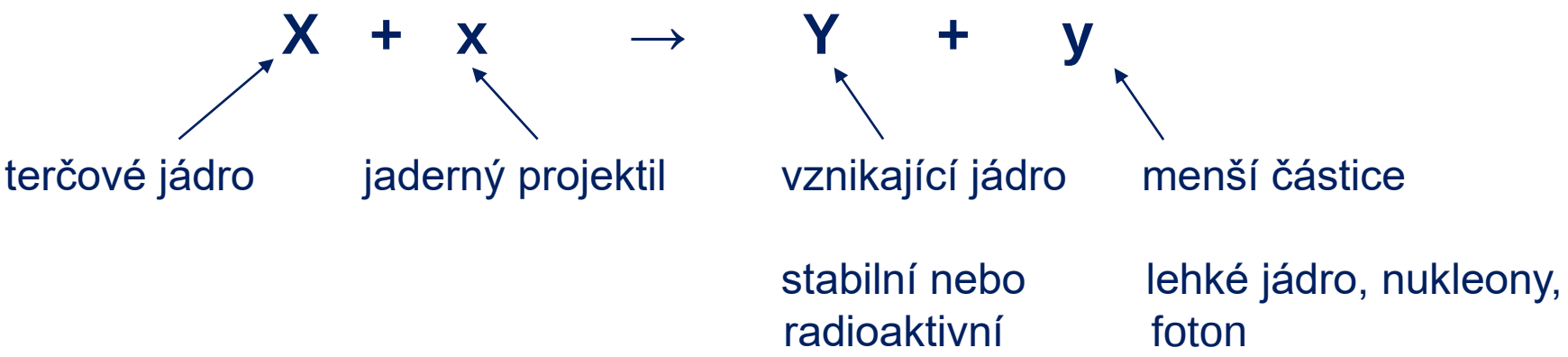
- základní typy jaderných reakcí
- mechanismus jaderné reakce
- charakteristiky jaderných reakcí

Jaderné reakce

jaderná reakce

- binukleární proces přeměny jádra

- interakce jádra s jiným jádrem, nukleonem, fotonem



Univerzita obrany
v Brně

Jaderné reakce

příklad $^{14}_{7}\mathrm{N} + {}^{4}_{2}\mathrm{He}(\alpha) \rightarrow {}^{17}_{8}\mathrm{O} + {}^{1}_{1}\mathrm{H}(\mathrm{p})$

$$^{14}_{7}\mathrm{N}(\alpha, \mathrm{p})\,^{17}_{8}\mathrm{O}$$

Zkrácený zápis jaderných reakcí umožňuje snadné členění reakcí na reakce typu:

(α,p); (α,n); (n,γ); (d,p)

Při všech jaderných reakcích platí zákony zachování :

- nábojového, nukleonového, protonového čísla
- energie
- hybnosti

Univerzita obrany
v Brně

Jaderné reakce

energetické zabarvení jaderných reakcí

závisí na součtu klidových hmotností produktů reakce

- menší než interagující částice - **exoergická**
- větší než interagující částice - **endoergická**

$$Q = -931{,}5\ \Delta m \quad \text{(MeV)}$$

$\Delta m < 0$, $Q > 0$ **exoergická reakce**

$\Delta m > 0$, $Q < 0$ **endoergická reakce**

Jaderné reakce

endoergická reakce

projektil musí mít určitou minimální kinetickou energii
- **prahová energie**
- velikost lze odvodit ze zákona zachování hybnosti

výtěžek jaderné reakce při prahové energii projektilu je malý

prakticky se reakce provádí s jaderným projektilem o vyšší energii, než je energie prahová

výtěžek jaderné reakce je funkcí energie jaderného projektilu (excitační funkce)

Jaderné reakce

exoergické reakce

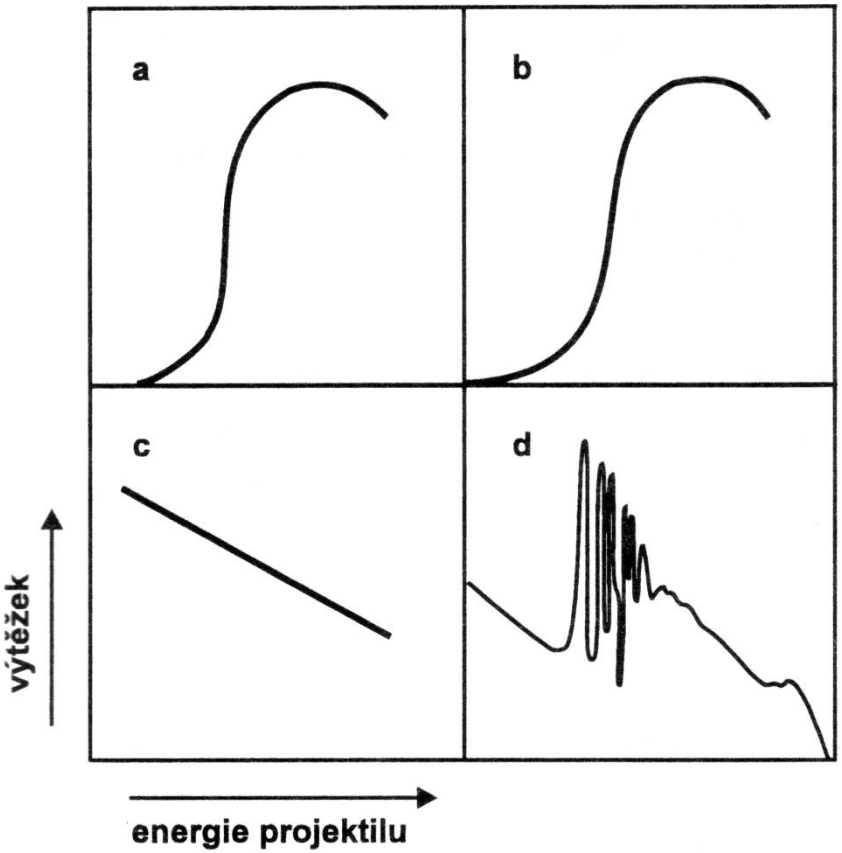
- nemívají prahovou energii

- u kladných projektilů je však nutná jistá kinetická energie, aby se překonala coulombovská bariéra

- exoergické reakce neutronů probíhají s největším výtěžkem při nulové kinetické energii neutronů

- někdy se pravděpodobnost reakce zvyšuje - **rezonance**
  - jestliže je excitační energie jádra blízká některé jeho energetické hladině

Jaderné reakce



Excitační funkce jaderných reakcí: a – endoergická reakce; b – exoergická reakce kladných projektilů; c – exorgická reakce neutronů; d – reakce s rezonancemi.

Jaderné reakce

charakteristiky jaderných reakcí

okamžitá rychlost jaderné reakce
časová změna, přírůstek, počtu atomů vznikajícího nuklidu

$$R = \frac{dN^*}{dt} \sigma \phi N$$

Φ - tok částic - počet projektilů dopadajících na plošnou jednotku terče za časovou jednotku
N - počet terčových jader
N^* - počet atomů vznikajícího nuklidu
σ - účinný průřez

Jaderné reakce

účinný průřez $[\sigma] = m^2$

- stará jednotka 1 Barn = 10^{-28} m^2
- je úměrný pravděpodobnost zásahu projektilu do terčového jádra
- zpravidla se liší svou hodnotou od geometrického průřezu
- závisí
  - na energii projektilu
  - na typu jaderné reakce
  - na excitační funkci

Jaderné reakce

účinný průřez

Reakce	σ (m²)	Pozn.
$^{10}B(n,\alpha)^{7}Li$	$3{,}8.10^{-25}$	pomalé neutrony
$^{238}U(n,\gamma)^{239}U$	$2{,}7.10^{-28}$	pomalé neutrony
$^{249}Cf(^{15}N,4n)^{260}Rf$	3.10^{-33}	vliv coulombické bariéry

Jaderné reakce

výtěžek jaderné reakce B

- poměr počtu vznikajících atomů k počtu projektilů dopadajících na terč

$$B = \frac{dN^*}{dt} \cdot \frac{1}{\phi S} = \frac{\sigma N}{S}$$

S - plocha terče

Jaderné reakce

výtěžek jaderné reakce B

- velké výtěžky jsou typické pro exoergické reakce pomalých neutronů

- počet *N**je ve srovnání s počtem projektilů malý, nevyjadřujeme tedy výtěžek v %

- výtěžek reakce se zpravidla vyjadřuje aktivitou vzniklého radionuklidu

Jaderné reakce

kinetika jaderné reakce

- závislost počtu atomů vzniklých jadernou reakcí (N^*) na době ozařování

$$N^* = Rt = \sigma \Phi N t$$

R má význam rychlostní konstanty

- aktivita vznikajícího nuklidu $$A = R(1 - e^{-\lambda t})$$

- limitní hodnota - nasycená aktivita

Jaderné reakce

průběh jaderné reakce

- do 10 MeV na nukleon projektilu

- projektil je pohlcen terčovým jádrem

- vznikne **složené jádro** - vychází z kapkového modelu jádra

- složené jádro je ve vysoce excitovaném stavu

- excitační energie pochází z kinetické energie projektilu a vazebné energie uvolněné při zachycení projektilu v jádře

Jaderné reakce

průběh jaderné reakce

- příklad $${}^{14}_{7}\mathrm{N} + {}^{4}_{2}\mathrm{He} \rightarrow [{}^{18}_{9}\mathrm{F}_{s}^{excit}]$$

- energie jednotlivých nukleonů se neustále přerozděluje vzájemnými srážkami
- může se stát, že některý nukleon získá takovou energii, která mu umožní opustit složené jádro a nastává druhá fáze procesu - rozpad složeného jádra

$$[{}^{18}_{9}\mathrm{F}_{s}^{excit}] \rightarrow {}^{17}_{8}\mathrm{O} + {}^{1}_{1}\mathrm{H}$$

Univerzita obrany
v Brně

Jaderné reakce

rozpad složeného jádra

- excitační energie složeného jádra se zmenší o vazebnou a kinetickou energii emitované částice

- je-li excitační energie složeného jádra značná, může se uvolnit i více nukleonů

reakce typu (α, pn) (n, 2n) (těžký ion, 4n)

Univerzita obrany
v Brně

Jaderné reakce

rozpad složeného jádra

- nadbytečná energie, která již nestačí k emisi nukleonu, se vyzáří jako fotony - γ záření

- jediný způsob deexcitace u nízkých excitačních energií

  reakce typu (n, γ)

- doba života složeného jádra je 10^{-16} - 10^{-14} s

- doba dostatečná k přerozdělení energie - nukleony projektilu jsou nerozlišitelné od nukleonů terče

Jaderné reakce

rozpad složeného jádra

- existují tedy různé možnosti rozpadu složeného jádra

- při ostřelování určitého terče určitým projektilem probíhá často několik jaderných reakcí současně

$$
\begin{aligned}
{}^{23}\mathrm{Na} + \alpha \rightarrow \ [{}^{27}\mathrm{Al}]_s \quad &\rightarrow {}^{25}\mathrm{Mg} + \mathrm{d} \\
&\rightarrow {}^{26}\mathrm{Mg} + \mathrm{p} \\
&\rightarrow {}^{27}\mathrm{Al} + \gamma \\
&\rightarrow {}^{26}\mathrm{Al} + \mathrm{n}
\end{aligned}
$$

Jaderné reakce

rozpad složeného jádra

- různými reakcemi může vznikat tentýž nuklid

$$
\begin{aligned}
^{59}\mathrm{Co} + \mathrm{n} &\rightarrow [^{60}\mathrm{Co}] \rightarrow {}^{60}\mathrm{Co} + \gamma \\
^{59}\mathrm{Co} + \mathrm{d} &\rightarrow [^{61}\mathrm{Ni}] \rightarrow {}^{60}\mathrm{Co} + \mathrm{p} \\
^{62}\mathrm{Ni} + \mathrm{d} &\rightarrow [^{64}\mathrm{Cu}] \rightarrow {}^{60}\mathrm{Co} + \alpha \\
^{60}\mathrm{Ni} + \mathrm{n} &\rightarrow [^{61}\mathrm{Ni}] \rightarrow {}^{60}\mathrm{Co} + \mathrm{p} \\
^{63}\mathrm{Cu} + \mathrm{n} &\rightarrow [^{64}\mathrm{Cu}] \rightarrow {}^{60}\mathrm{Co} + \alpha
\end{aligned}
$$

Jaderné reakce

reakce neutronů

- velmi časté reakce s vysokými výtěžky

- pro neutron neexistuje potenciálová bariéra terčového jádra

- pravděpodobnost záchytu neutronu je tím větší, čím je neutron pomalejší - déle se zdržuje v okolí jádra

Univerzita obrany
v Brně

Jaderné reakce

reakce neutronů

- **pomalé neutrony**
  - tepelné neutrony, E = 0,002 - 0,5 eV
  - rezonanční neutrony, E = 0,5 eV -1 keV
- **rychlé neutrony** E > 1 keV

Jaderné reakce

reakce (n, γ) - radiační záchyt neutronu

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

- produktem je izotop terčového jádra, protože nízká excitační energie složeného jádra nestačí k uvolnění nukleonu - deexcitace probíhá vyzářením fotonu

- zvýšený počet neutronů vede často k nuklidům, které podléhají přeměnám β^-

- reakce má praktický význam pro průmyslovou produkci radionuklidů - např. výroba ^{32}P,^{60}Co

Univerzita obrany
v Brně

Jaderné reakce

reakce jader se Z >10 s pomalými neutrony

- jde o reakce (n, γ)

- exoergické, Q = 6-10 MeV

- probíhají téměř se všemi jádry

- výtěžky bývají velké

Univerzita obrany
v Brně

Jaderné reakce

reakce jader se Z <10 s pomalými neutrony

- zpravidla probíhají reakce typu (n, p), (n,α) - převládají nad reakcemi (n, γ)

- mají vysoké výtěžky a jsou exoergické

- emise kladné částice je umožněna existencí nižší coulombické bariéry a existuje vyšší pravděpodobnost, že nukleon (nebo 2p + 2n) získají potřebnou energii k opuštění jádra

Jaderné reakce

reakce jader se Z <10 s pomalými neutrony

- reakce se prakticky využívají

$^{6}Li(n,\alpha)^{3}H$	výroba tritia
$^{14}N(n,p)^{14}C$	výroba ^{14}C
$^{10}B(n,\alpha)^{7}Li$	měření a absorpce neutronů

Jaderné reakce

reakce těžších jader s neutrony o vyšších energiích

- s rostoucí energií neutronů klesá výtěžek záchytné reakce

- s rychlými neutrony (0,5 - 10 MeV) roste pravděpodobnost reakcí typu (n, p) a (n, α)

- reakce jsou však zpravidla endoergické a mají malý význam

- významnější jsou reakce typu (n, 2n)

Univerzita obrany
v Brně

Jaderné reakce

reakce kladně nabitých projektilů

- tyto projektily musí při průniku do jádra překonat coulombovskou bariéru

- nižší výtěžky reakcí ve srovnání s reakcemi neutronů

- u exoergických reakcí musí mít projektil určitou kinetickou energii

- proton - p, deuteron - d, α - částice, ^{3}He, těžká jádra

Univerzita obrany
v Brně

Jaderné reakce

neutronová aktivační analýza

- využití jaderných reakcí pro kvalitativní a kvantitativní chemickou analýzu
- nedestruktivní analýza prováděná přímo vložením vzorku do ozařovacího kanálu ozařovacího zařízení (měření lze automatizovat)
- využívá se známé jaderné reakce terčového jádra
- po aktivaci se analyzuje gama spektrum z přímého ozařování („prompt gama“)
- z velikosti aktivity pak lze soudit na kvantitu prvku
- k vyhodnocení kvantity slouží standardy o známé hmotnosti, které se ozařují za stejných podmínek

Jaderné reakce

neutronová aktivační analýza

- stanovení příměsí v čistých materiálech, horninách, kovech

- archeologie - obsah stopových prvků umožňuje stanovit původ použitých surovin

- výtvarné umění - cca 1 mg vzorku barvy umožní stanovit různé pigmenty charakteristické pro určité období
  - lze odhalit falzifikáty

- kriminalistika - stopové množství spalin po střelbě ze zbraně