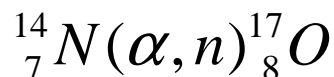
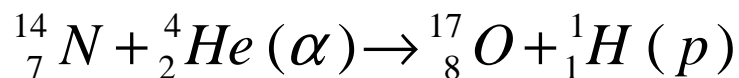
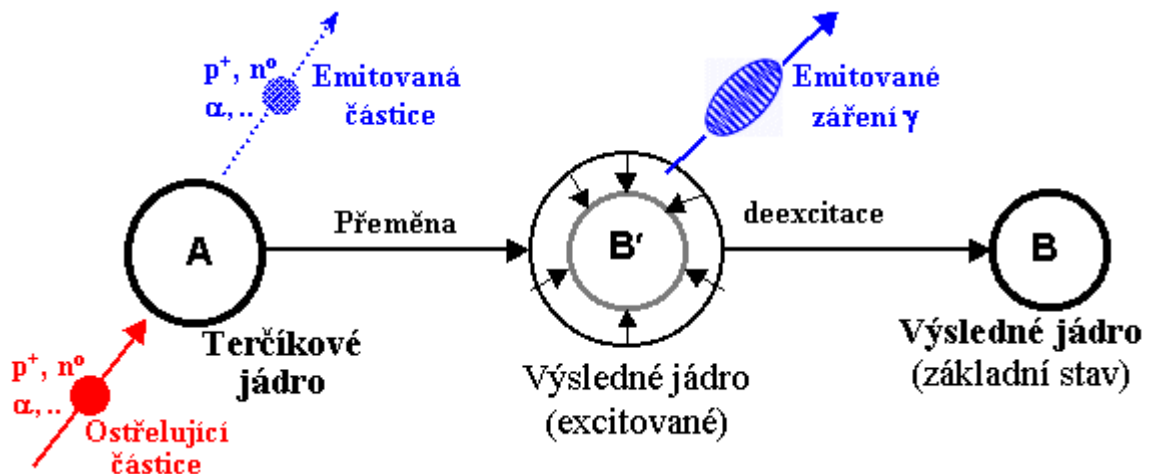


7. JADERNÉ REAKCE

Jadernou reakcí se rozumí **binukleární proces přeměny jadra**.



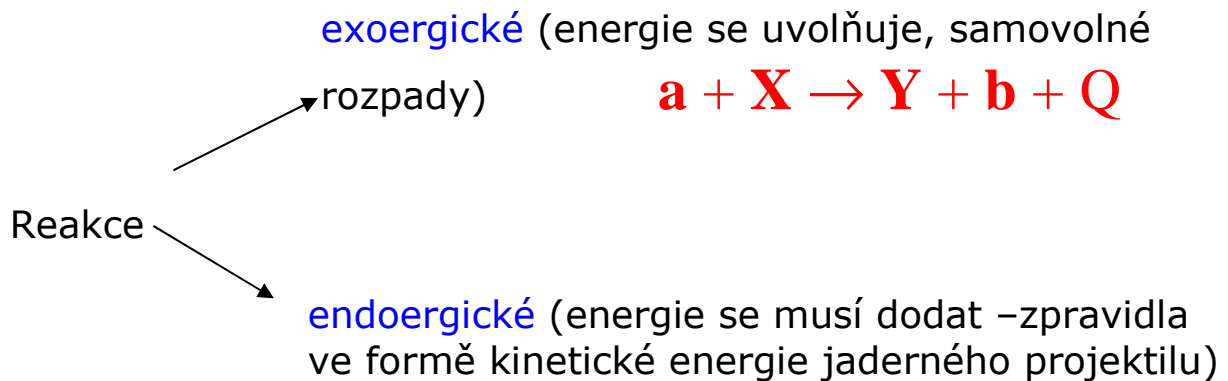
Platí:

- zákony zachování nábojového, nukleonového, protonového čísla
- energie
- hybnosti

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

(α, p); (α, n); (n, γ); (d, p) aj.

A) Energetika jaderných reakcí



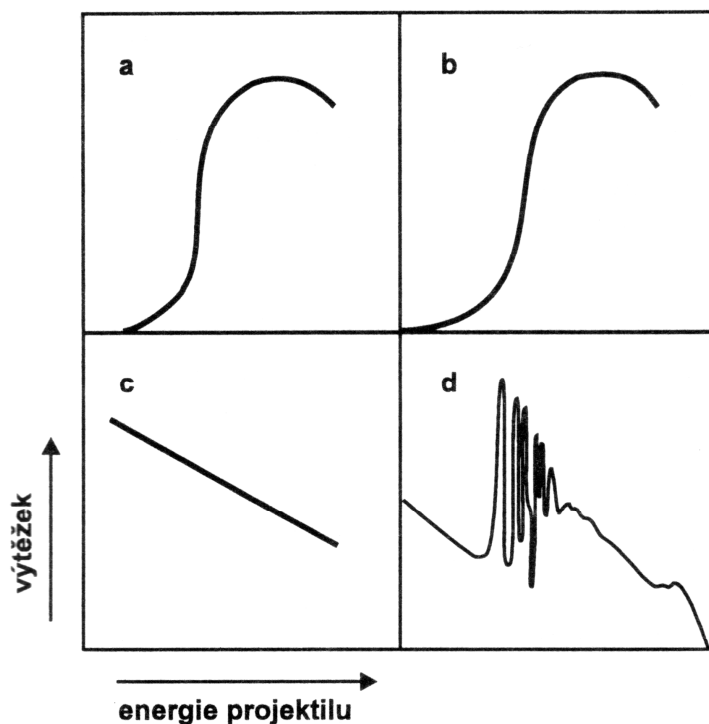
Rozhodující je porovnání klidových hmotností částic před reakcí a po ní:

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

(energie 931,5 MeV je ekvivalentní hmotnostní jednotce)

Reakce proběhne, jestliže má projektil tzv. **prahovou energii** – (její 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)



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

- exoergické reakce nemívají prahovou energii
- u kladných projektilů je však nutná jistá kinetická energie, aby se překonala coulombická bariéra
- exoergické reakce neutronů probíhají s největším výtěžkem při nulové kinetické energii neutronů
- někdy se pravděpodobnost reakce zvyšuje – rezonance (odpovídá např. energetickým hladinám nukleonů apod.)

B) Charakteristiky jaderných reakcí

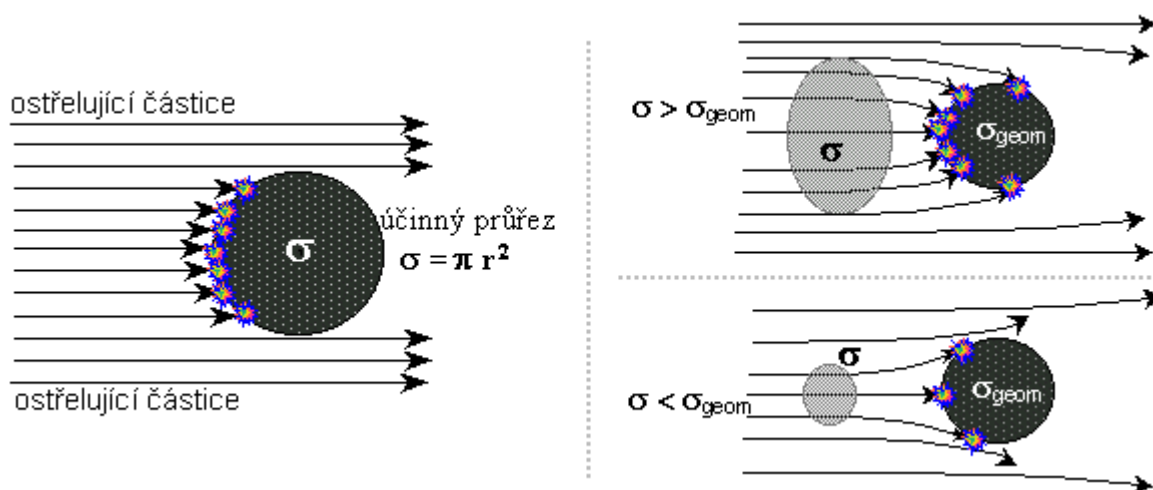
Okamžitá rychlost jaderné reakce = časová změna (přírůstek) počtu atomů vznikajícího nuklidu (N^*)

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

ϕ - **tok částic** (počet projektilů dopadajících na plošnou jednotku terče za časovou jednotku)

N - počet terčových jader

σ - **účinný průřez** [m^2] – závisí na energii projektilu, na typu jaderné reakce a na excitační funkci (zpravidla se liší svou hodnotou od geometrického průřezu)
-vyjadřuje pravděpodobnost zásahu terč. Jádra



| Reakce | σ (m ²) | Pozn. |
|--|----------------------------|--------------------------|
| $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ | $3,8 \cdot 10^{-25}$ | pomalé neutrony |
| $^{238}\text{U}(n,\gamma)^{239}\text{U}$ | $2,7 \cdot 10^{-28}$ | pomalé neutrony |
| $^{249}\text{Cf}(^{15}\text{N},4n)^{260}\text{Rf}$ | $3 \cdot 10^{-33}$ | vliv coulombické bariéry |

Výtěžek jaderné reakce = poměr počtu vznikajících atomů k počtu projektilů dopadajících na terč (plocha terče je S)

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

- velké výtěžky jsou typické pro exoergické reakce pomalých neutronů
- výtěžek reakce se zpravidla vyjadřuje **aktivitou** vzniklého radionuklidu

Kinetika jaderné reakce = závislost počtu atomů vzniklých jadernou reakcí ozařováním (N^*) na době ozařování

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

Vzniká-li radioaktivní nuklid, dochází během ozařování k jeho rozpadu

$$\frac{dN^*}{dt} = R - \lambda N^*$$

$$N^* = \frac{R}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t})$$

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

- aktivita vznikajícího nuklidu roste zpočátku poměrně rychle
- během delšího ozařování člen $(1 - e^{-\lambda t}) \rightarrow 1$ a aktivita limituje ke konstantní hodnotě – **nasycená aktivita A_s** (obdobu trvalé radioaktivní rovnováhy)

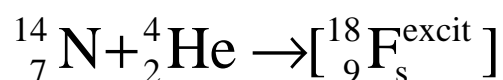
$$A_s = \sigma \phi N$$

- delším ozařováním nelze získat delší aktivitu
- A_s je dána typem ozařovacího zařízení, terčem, druhem projektilu a jeho energií
- pokud vzniká radionuklid s dlouhým poločasem rozpadu (tj. rychlost jeho přeměny je ve srovnání s rychlostí jeho vzniku malá), pak se soustava chová, jakoby vznikal stabilní nuklid – delší ozařování se tedy projeví větším výtěžkem

Průběh jaderné reakce

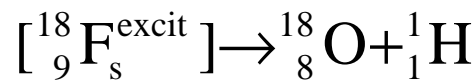
Složené jádro (vychází z kapkového modelu jádra)

Vzniká při pohlcení jaderného projektilu terčovým jádrem



- excitační energie pochází z kinetické energie projektilu a z vazebné energie, která se uvolní při zachycení projektilu
- tato energie se rovnoměrně rozdělí mezi nukleony
- energie nukleonů se při vzájemných srážkách neustále přerozděluje

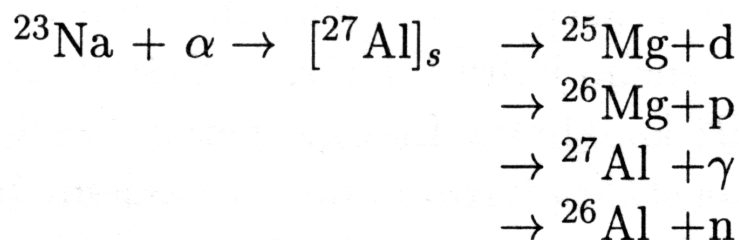
- může se stát, že některý nukleon získá takovou energii, která mu umožní opustit složené jádro ⇒ nastává druhá fáze procesu (**rozpad složeného jádra**)



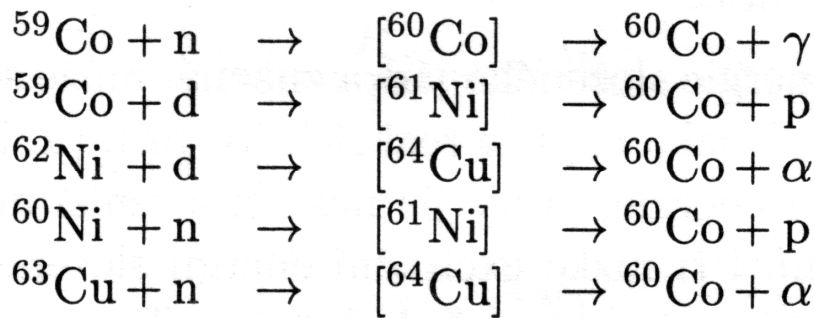
- excitační energie složeného jádra se zmenší o vazebnou a kinetickou energii emitované částice
- je-li excitační energie složeného jádra značná, může se uvolnit i více nukleonů

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

- 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
- osud složeného jádra nezávisí na jeho vzniku a při rozpadu složeného jádra mohou vznikat různé produkty

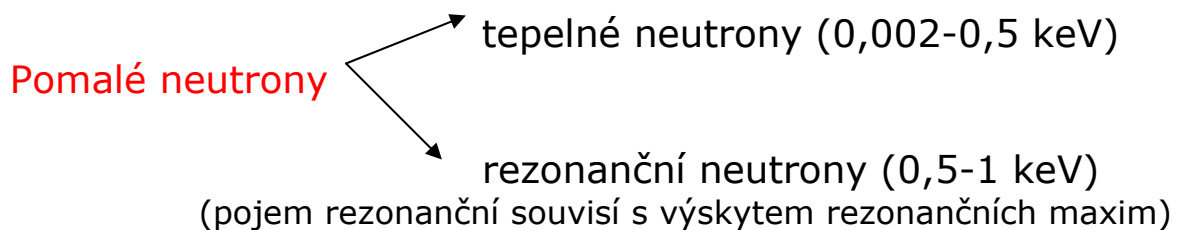


- různými reakcemi může vznikat tentýž nuklid



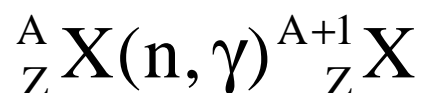
REAKCE NEUTRONŮ

- 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)



Rychlé neutrony $E > 1 \text{ keV}$

1. Reakce (n,γ) – radiační záchyt neutronu



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

- zvýšený počet neutronů vede často k nuklidům, které podléhají přeměnám β^-
- reakce má praktický význam pro průmyslovou produkci radionuklidů (výroba ^{32}P , ^{60}Co aj.)

2. Reakce jader o $Z > 10$ s pomalými neutrony

- jde o reakce (n, γ) , které jsou exoergické ($Q = 6-10$ MeV)
- probíhají téměř se všemi jádry
- výtěžky bývají velké, $\sigma \approx 10^{-28} - 10^{-25} \text{ m}^2$

3. Reakce jader o $Z < 10$ 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
- reakce se prakticky využívají:

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

4. 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)**

