

6.3.7 Jaderné reakce

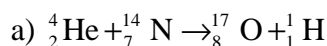
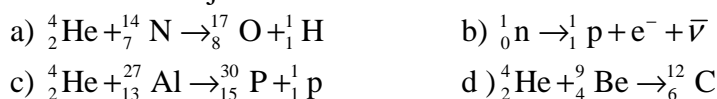
Předpoklady: 060306

Jaderné reakce jsou jaderné přeměny vyvolané vzájemnými srážkami jader nebo srážkami jádra s jinými částicemi.

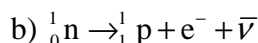
Platí zákony zachování:

- zákon zachování náboje,
- zákon zachování počtu nukleonů,
- zákon zachování energie,
- zákon zachování hmotnosti,
- zákon zachování momentu hybnosti.

Př. 1: Které z následujících reakcí se mohou uskutečnit?



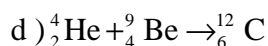
Reakce proběhnout může, jde o první uměle vyvolanou jadernou reakci (E. Rutherford 1919).



Pokud částice $\bar{\nu}$ není nukleon a má nulový náboj, reakce proběhnout může (jde o samovolný rozpad neutronu s poločasem přeměny 15 minut).



Reakce proběhnout nemůže, nezachovává se elektrický náboj.



Reakce proběhnout nemůže, nezachovává se počet nukleonů.

Př. 2: Jadernými reakcemi je možné měnit jeden prvek v druhý, například olovo ve zlato. Přesto se tento postup k výrobě zlata nepoužívá. Proč?

Jádra jsou kladně nabitá, na malých vzdálenostech nabývá elektrická odpuzivá síla mezi kladnými jádry obrovských hodnot \Rightarrow jádra proti sobě musí letět obrovskou rychlostí, aby elektrické odpuzování překonala a mohla spolu zreagovat \Rightarrow jaderné reakce vyžadují velké množství energie (extrémní teploty, tlaky, ...).

Př. 3: Existuje skupina jaderných reakcí, ke kterým může docházet i za běžných podmínek. Jaký bude jejich společný rys.

Jadernou reakci musí vyvolat setkání částic, které se neodpuzují \Rightarrow jednou z částic musí být neutrální neutron.

Rychlost (pravděpodobnost průběhu) reakce vyjadřujeme pomocí **účinného srážkového průřezu** (odpovídá ploše, kterou musí jedna částice trefit na druhé částici, aby k reakci došlo), čím je účinný průřez menší, tím méně pravděpodobné je, že k reakci dojde.

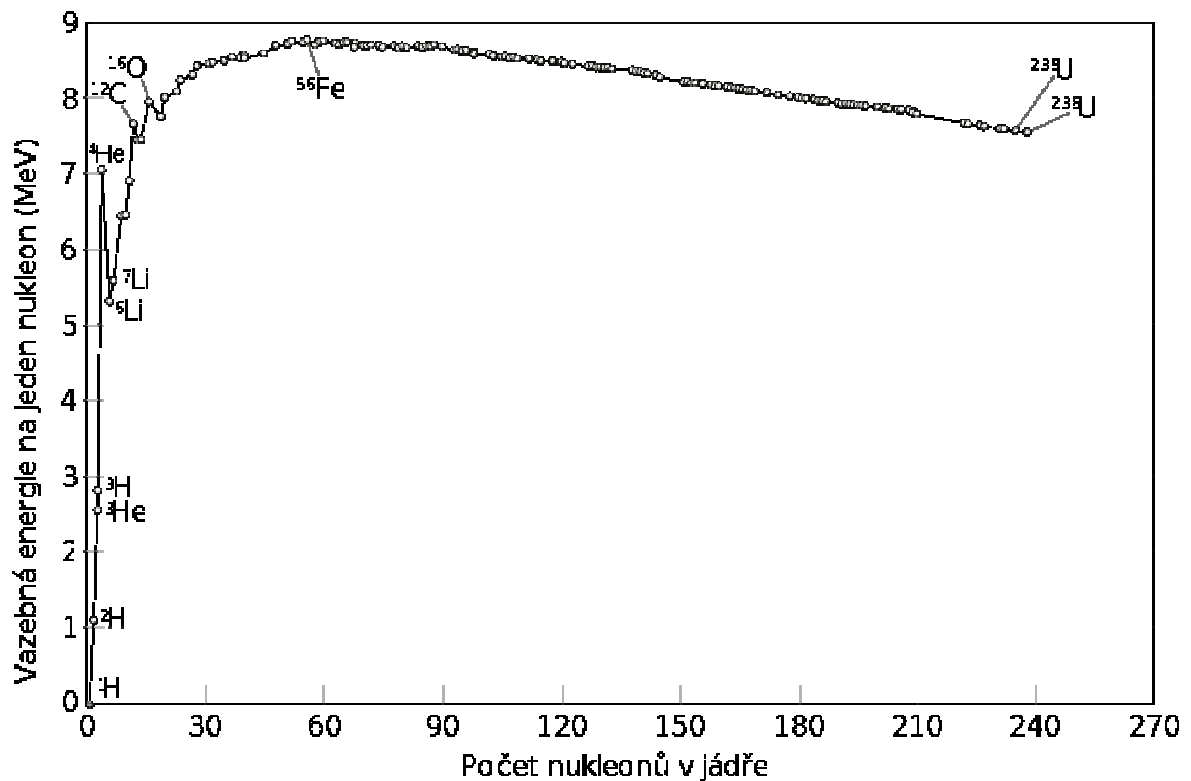
Účinný průřez reakce závisí na energii částic, ale závislost není jednoznačná:

- v reakci ${}^2_1\text{H} + {}^2_1\text{H} \rightarrow {}^3_2\text{He} + {}^1_0\text{n}$ s energií jader deuteria účinný průřez roste (pravděpodobnost reakce se zvyšuje),
- v reakci ${}^1_0\text{n} + {}^{238}_{92}\text{U} \rightarrow {}^{144}_{56}\text{Ba} + {}^{89}_{36}\text{Kr} + 3{}^1_0\text{n}$ naopak s energií neutronu klesá (pravděpodobnost reakce je u rychlejších neutronů nižší).

Dva druhy využitelných jaderných reakcí:

- výroba radionuklidů,
- výroba energie.

Př. 4: Prohlédni si graf závislosti vazebné energie na počtu nukleonů v jádře. Které reakce je možné využít k výrobě energie?



Dvě základní možnosti, jak získávat energii z jaderných reakcí:

- slučování lehkých jader (jaderná fúze),
- rozbíjení těžkých jader (jaderné štěpení).

Proton-protonový cyklus ve Slunci

- ${}^1_1\text{H} + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^2_1\text{H} + e^+ + \nu$ ($Q = 0,42 \text{ MeV}$) srážka dvou vodíkových jader, velmi malý účinný průřez reakce, jen při jedné z 10^{26} srážek reakce proběhne (jde o úzké hrdlo)
- $e^+ + e^- \rightarrow \gamma + \gamma$ ($Q = 1,02 \text{ MeV}$)

reakce, kdyby reakce probíhala s větší pravděpodobností, Slunce by vybuchlo a nehořelo by miliardy let), kromě jádra deuteria vzniká i pozitron (antičástice elektronu), který ihned reaguje s volným elektronem a anihiluje (zanikne a přemění veškerou hmotnost obou částic na EM záření)

- ${}^2_1\text{H} + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^3_2\text{He} + \gamma \quad (Q = 5,49 \text{ MeV})$
- ${}^3_2\text{He} + {}^3_2\text{He} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^1_1\text{H} + {}^1_1\text{H} \quad (Q = 12,86 \text{ MeV})$

Př. 5: Vytvoř celkový přehled o p-p cyklu ve Slunci (které částice vstupují, které vystupují, kolik energie se celkově uvolní). Kolik energie v Joulech by se uvolnilo z 1 kg vodíku ${}^1_1\text{H}$?

- Vstup 6 atomů vodíku, výstup jádro hélia a dva vodíky.
- Energie $26,72 \text{ MeV} = 4,28 \cdot 10^{-12} \text{ J}$.

⇒ Ze čtyř jader vodíku ${}^1_1\text{H}$ se uvolní $26,72 \text{ MeV} = 4,28 \cdot 10^{-12} \text{ J}$.

$$\begin{array}{rcccc} & & 4 \text{ atomy } {}^1_1\text{H} & \dots & 4,28 \cdot 10^{-12} \text{ J} \\ 1 \text{ kg } H_2 & \dots & 6,02 \cdot 10^{26} \text{ atomů } {}^1_1\text{H} & \dots & x \text{ J} \\ \frac{x}{2 \cdot 6,02 \cdot 10^{26}} & = & \frac{4,28 \cdot 10^{-12}}{4} & \Rightarrow & x = \frac{4,28 \cdot 10^{-12}}{4} \cdot 6,02 \cdot 10^{26} = 6,4 \cdot 10^{14} \text{ J} \end{array}$$

Př. 6: Roční výroba energie v ČR přesahuje 80 mil MWh. Kolik kg vodíku by bylo třeba zpracovat v p-p cyklu, aby byla vyrobena všechna potřebná energie? Předpokládej účinnost 30%.

Z předchozího příkladu víme: 1 kg vodíku ... $6,4 \cdot 10^{14} \text{ J}$ uvolněného tepla.

Při účinnosti 30 %: $6,4 \cdot 10^{14} \cdot 0,3 \text{ J} = 1,9 \cdot 10^{14} \text{ J}$ elektrické energie.

$$80 \cdot 10^6 \cdot 10^6 \text{ Wh} = 80 \cdot 10^6 \cdot 10^6 \cdot 3600 \text{ J} = 2,9 \cdot 10^{17} \text{ J}$$

$$1 \text{ kg vodíku} \quad \dots \quad 1,9 \cdot 10^{14} \text{ J}$$

$$x \text{ kg} \quad \dots \quad 2,9 \cdot 10^{17} \text{ J}$$

$$\frac{x}{1} = \frac{2,9 \cdot 10^{17}}{1,9 \cdot 10^{14}} \Rightarrow x = \frac{2,9 \cdot 10^{17}}{1,9 \cdot 10^{14}} \text{ kg} = 1500 \text{ kg}$$

Při účinnosti 30% by bylo možné pokrýt výrobu elektrické energie spálením 1500 kg vodíku.

Kvůli malé pravděpodobnosti reakce ${}^1_1\text{H} + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^2_1\text{H} + e^+ + \nu \quad (Q = 0,42 \text{ MeV})$ se nepočítá s využitím čistého p-p cyklu pro výrobu energie.

Reakce s větším účinným průřezem:

- ${}^2_1\text{H} + {}^3_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^1_0\text{n} \quad (Q = 17,6 \text{ MeV})$ (vyžaduje tritium, kterého je málo a je radioaktivní \Rightarrow muselo by se vyrábět z lithia)
- ${}^2_1\text{H} + {}^2_1\text{H} \rightarrow {}^3_2\text{He} + {}^1_0\text{n} \quad (Q = 3,25 \text{ MeV})$
- ${}^2_1\text{H} + {}^2_1\text{H} \rightarrow {}^3_1\text{H} + {}^1_1\text{H} \quad (Q = 4,03 \text{ MeV})$

Podíl deuteria ${}^2_1\text{H}$ ve vodíku je pouze 1:6700, ale máme k dispozici jeho prakticky neomezené zásoby v mořské vodě.

Př. 7: K úspěšnému rozběhnutí termojaderného reaktoru musí být splněny tři podmínky. Zkus odhadnout které.

Musíme dosáhnout:

- dostatečné hustoty částic (abychom zajistili dostatečný počet srážek),
- dostatečně vysokou teplotu (aby částice při srážkách měly dostatečnou energii k překonání elektrického odpuzování),
- dostatečně dlouhou dobu (aby proběhlo dostatečné množství úspěšných srážek).

Největší problém: Potřebná teplota je řádově 10^8 K (100 miliónů stupňů celsia) \Rightarrow neexistuje žádný materiál, který by takovou teplotu vydržel \Rightarrow dvě možná řešení:

- magnetické udržování (**tokamak**): nádoba tvaru pneumatiky, rozžhavené plazma je udržováno magnetickým polem uvnitř tak, aby se nedotýkalo stěn, projekt ITER,
- inerciální udržování: pevná tableta s palivem je ze všech stran ozařována velmi výkonnými lasery \Rightarrow tlakem záření a tlakem odpařeného materiálu dojde ke stlačení vnitřku tablety a zažehnutí termojaderné reakce.

V současnosti není ani jedna z obou technologií zvládnuta tak, aby uvolňovala více energie, než je nutné do ní vložit.

Už padesát let se předpokládá, že do padesáti let bude termojaderná fúze zvládnuta a energetický problém lidstva vyřešen.

Studená fúze

Snaha donutit deuterium ke slučování pomocí katalyzátorů (inspirace v chemii) za běžné teploty. Dosud všechny pokusy se ukázaly jako omyl nebo podvod.

Principiální problém této „metody“: Kde se vezme těch potřebných řádově 100 N, které překonají elektrické odpuzování pomalých jader a donutí je přiblížit se tak, aby se začaly přitahovat jadernou silou?

Shrnutí: Slučování vodíkových jader vyrábí Slunce svou energii.