



Výfučtení: Jaderná energie a jaderné reakce

Úvod

Když se řekne jaderná energie, lidem se vybaví různé věci. Ať už je to jaderná elektrárna, palivo, jeho znovuzpracování nebo třeba jaderné katastrofy a jaderné bomby. V tomto Výfučtení se budeme zabývat samotným principem funkce reaktoru jaderné elektrárny a jadernými reakcemi, které v něm probíhají. Na konci se ale zmíníme i o opačném procesu, jaderné fúzi.

Pokud nejste seznámeni s tím, co je to atom a jeho jádro, doporučujeme přečíst si nejdříve Výfučtení o atomech.¹ Pro seznámení se s nestabilními jádry a radioaktivitou doporučujeme také Výfučtení o radioaktivitě.²

Jak reaktor vyrábí energii?

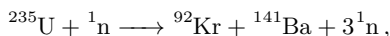
Nejprve se zaměříme na jadernou elektrárnu a na význam reaktoru v ní. Jaderná elektrárna spadá do kategorie tepelných elektráren – vyrábí teplo, které ohřívá vodu. Ta po vypaření roztáčí turbínu. Turbína je zapojena do elektrického generátoru, který kinetickou energii páry převádí na elektrickou. Voda pak zpětně kondenzuje a celý proces se opakuje. Účinnost přenosu energie od ohřevu vody z reaktoru až do elektrické sítě dosahuje nejvýše 50 %.

Reaktor v jaderné elektrárně má obecně vzato dvě části: část, která umožňuje průběh samotné reakce, a část umožňující její regulaci. My se zaměříme na samotnou reakci a podíváme se na to, co se děje v centru dění jaderného reaktoru.

Jadernou reakci umožňují uranové tyče v reaktoru. Ty pro naše účely můžeme aproximovat na tyče oxidu uraničitého (UO_2), které obsahují směs izotopů³ ^{235}U a ^{238}U . Konkrétní zastoupení izotopů se liší v závislosti na druhu reaktoru.

Jak dochází k samotné jaderné reakci? Uranová jádra v tyčích jsou ostřelována neutrony. Neutrony jsou nenabitě částice, které spolu s protony tvoří atomová jádra. Tyto částice jsou do reaktoru buď dodány z vnějšího zdroje nebo vznikají během štěpné reakce. Neutrony reagují s uranovými jádry, u kterých dochází ke štěpení.

Štěpné reakce lze přehledně zapsat matematicky. Na jednu stranu píšeme prvky, které jsou pro reakci potřeba, na druhé straně máme prvky, které reakcí vzniknou. Příklad jedné takové reakce můžeme vidět zde:



kde n značí neutron, Kr Krypton a Ba Baryum.

Z rovnice vidíme, že vznikají dva lehčí prvky a tři neutrony. Všimněme si však, že počet nukleonů (protonů a neutronů) je na obou stranách rovnice stejný. Rozpad těžkého uranu na lehčí prvky v tomto případě způsobí, že se během reakce uvolní teplo, tedy tepelná energie – to jsme do rovnice nezahrnuli. Vzniklé neutrony mohou způsobovat další jaderné reakce. Aby se počet neutronů v reaktoru nevyvymkl kontrole (při každé reakci jich vzniká více než na počátku), je nutné do reaktoru nainstalovat regulační prvky, které množství neutronů sníží. Typickým

¹4. ročník, 6. série, https://vyfuk.mff.cuni.cz/_media/ulohy/r4/vyfucteni/vyfucteni_6.pdf

²2. ročník, 6. série, https://vyfuk.mff.cuni.cz/_media/ulohy/r2/vyfucteni/vyfucteni_6.pdf

³Zápis ^{235}U znamená, že se jedná o prvek se značkou U (uran), který má 235 nukleonů. Nukleon může být buď proton, nebo neutron. Počet protonů v atomu určuje, o jaký prvek se jedná.

příkladem regulačního prvku jsou regulační tyče tvořící tzv. moderátor. Moderátorem může být i voda.

Malá odbočka k elektronvoltům

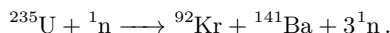
Když fyzici pracují s jadernými reakcemi a teplem, které při nich vzniká, nepoužívají klasickou jednotku energie joule. Ta je totiž pro tyto účely příliš velká. Místo ní se využívá speciální jednotka elektronvolt, která má značku eV. Pro přepočet mezi elektronvolty a jouly platí:

$$1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}.$$

Tento vztah vychází z definice, že elektronvolt je množství energie, kterou získá elektron při urychlení napětím jednoho voltu. Běžně se poté setkáváme s násobky této jednotky: keV, MeV apod.

Jak zjistíme, kolik energie z reakce získáme?

Vrátíme se k naší původní reakci. O ní víme, že uvolňuje tepelnou energii. Existují však i reakce, které energii naopak spotřebovávají, ty jsou však pro výrobu energie nepoužitelné. Připomeneme si tedy rovnici naší reakce:



Každý někdy také slyšel známý Einsteinův vztah

$$E = mc^2.$$

Nyní si ukážeme, jak tento vztah interpretovat a použít k výpočtu energie. Začneme tím, že si pojmenujeme veličiny, které v něm vystupují: hmotnost částice m , energie částice E a rychlost světla c . Když odhlédneme od rychlosti světla, která je konstantní, vztah nám vlastně říká, že můžeme převádět mezi energií a hmotností. Jinými slovy, podle tohoto vztahu je hmota jen jiná forma energie.

Toto pozorování nám umožní každé ze součástí reakce přiřadit její energii. Hmotnost jader je možné dohledat v různých vědeckých tabulkách.⁴ Hmotnost je zde uváděna v jednotce u nebo umu . Jedná se o hmotnost jedné dvanáctiny uhlíkového jádra, která je rovna $u = 1,6605 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$. Přiřadíme tedy každé částici, která se reakce účastní, podle její hmotnosti její energii:

$$\begin{aligned} E_1 &= E({}^{235}\text{U}) = m({}^{235}\text{U}) c^2 \doteq, \\ &\doteq 235,043 \cdot 1,6605 \cdot 10^{-27} \cdot (2,998 \cdot 10^8)^2 \text{ J} \doteq 218\,942,55 \text{ MeV}, \\ E_2 &= E({}^1_0\text{n}) \doteq 939,57 \text{ MeV}, \\ E_3 &= E({}^{92}\text{Kr}) \doteq 85\,629,21 \text{ MeV}, \\ E_4 &= E({}^{141}\text{Ba}) \doteq 131\,261,76 \text{ MeV}, \\ E_5 &= 3 \cdot E({}^1_0\text{n}) \doteq 2\,818,71 \text{ MeV}. \end{aligned}$$

⁴např. v této <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/9783527618798.app2>

Platí samozřejmě zákon zachování energie. Ten říká, že energie, která vstupuje do reakce, musí být rovna energii, která z reakce vystupuje. Proto když porovnáme energie vstupních složek reakce ($E_1 + E_2$) a výstupních ($E_3 + E_4 + E_5$), můžeme rozhodnout, jestli reakce energii uvolňuje, nebo spotřebovává. Pokud dochází k uvolnění energie, je energie výstupních složek reakce menší než vstupních – reakce nějakou energii vydá, nejčastěji tepelnou.

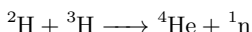
Při reakci energii spotřebovávající je tomu přesně obráceně – aby reakce mohla proběhnout, musíme naopak energii dodat, např. tím, že reaktanty zahřejeme. Energii potřebnou k proběhnutí reakce pak označujeme jako energii prahovou.

A takto je možné vypočítat energii každé možné i hypotetické jaderné reakce, tedy určit i energetické zisky z jaderného štěpení v reaktoru.

Nakonec ještě krátká odbočka k jaderné fúzi

Jaderná fúze je alternativní zdroj energie, který také využívá energii uvolňující se během jaderných reakcí. Avšak během těchto reakcí nedochází ke štěpení jader, nýbrž k opaku – jejich slučování. Ukazuje se totiž, že u slučení lehkých jader do většího jádra se energie uvolní (přibližně platí, že je energeticky výhodné slučovat prvky lehčí než železo a štěpit prvky těžší než železo). K těmto fúzním reakcím dochází ve hvězdách a vědci se o ně již od 50. let pokouší v laboratořích v zařízení zvaném tokamak. Fúzní reakci již vědci vytvořit dovedou, neumí ji však vytvořit dostatečně efektivně, aby z ní mohli čerpat energii. O využití těchto fúzních reakcí v elektrárnách se však dlouhodobě uvažuje – např. nyní běží ve Francii projekt ITER.

Pro přehled uvedeme základní fúzní reakci, která probíhá v jádru Slunce a v tokamacích.



Během této reakce se přeměňují jádra vodíku na jádro hélia a neutron. Můžete si spočítat, že se při ní skutečně energie uvolní.

Závěr

V tomto Výfučení jsme se seznámili s reakcemi, které zajišťují elektrinu v domácnostech mnohým z nás, tedy jadernými reakcemi v jaderných elektrárnách. Ukázali jsme si, jak štěpné reakce probíhají, jak je můžeme zapsat matematicky a co o těchto reakcích dokážeme s naší znalostí fyziky zjistit.

Klára Stefanová
klarka@vyfuk.org

Václav Verner
vasek@vyfuk.org

Korespondenční seminář Výfuk je organizován studenty a přáteli MFF UK. Je zastřešen Oddělením propagace a mediální komunikace MFF UK a podporován Katedrou didaktiky fyziky MFF UK, jejími zaměstnanci a Jednotou českých matematiků a fyziků. Realizace projektu byla podpořena Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy.

Toto dílo je šířeno pod licencí Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported.
Pro zobrazení kopie této licence navštivte <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>.