

## Úloha IV.P ... V-1 ve vesmíru

10 bodů; průměr 7,35; řešilo 20 studentů

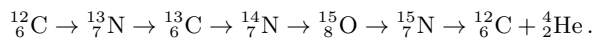
*Mezihvězdný prostor není prázdný, nýbrž obsahuje nepatrné množství hmoty. Uvažujte jen vodík, potřebnou hustotu si vyhledejte. Mohla by existovat kosmická loď, jež by „nasávala“ vodík před sebou a využívala energii z něj? Jak rychlá/velká by musela být, aby udržela termojadernou fúzi jen z přijatého vodíku? Jaké jiné překážky realizace je rozumné uvažovat?*

*Kryptofašismus → Červený trpaslík → pohon → nápor → V-1 a hezky se to uzavírá.*

Dosažení termojaderné fúze se lidstvu již daří, bohužel se však zatím nedaří ji realizovat kontrolovaně tak, aby vyprodukovala více energie, než kolik se spotřebuje na ohřev plazmatu. Proto je důležité umět tuto reakci nastartovat tak, aby naše loď neskončila rozptýlena po mezihvězdném prostoru. Tato část problému ještě není pro naše účely dostatečně dobře zvládnutá, ač se předpokládá, že ITER, jehož spuštění je plánováno na rok 2025, by měl vytvořit více energie, než kolik spotřebuje na svůj provoz.

Problém je, že v ITERu používají reakci deuteria a tritia, kdežto v mezihvězdném prostoru se vyskytuje téměř jen lehký vodík. To je nemilé, protože slučování dvou protonů na jádro deuteria je sice exotermická reakce, ale protože je zprostředkována slabou interakcí<sup>1</sup>, probíhá (dokonce i ve hvězdách) jen velice pomalu a při srážkách dominuje krátkodobé spojení na diproton, který se téměř okamžitě rozpadá zpět na dva protony. Toto se v pozemských podmínkách nedaří překonat a proto se o lehkém vodíku jako o palivu pro termojadernou fúzi zatím ani neuvažuje.

Pokud chceme urychlit chemické reakce, jedna z obvyklých metod je přidání katalyzátoru. To je látka, která se v reakci nespotřebovává, ale vstupuje do ní a tím usnadňuje (a tedy i urychluje) její průběh. V některých jaderných reakcích lze dosáhnout podobného efektu přidáním nějakého specifického izotopu. Například pro slučování protonů na jádro helia existuje CNO cyklus, kde v nejjednodušší variantě<sup>2</sup> probíhají postupné přeměny mezi těmito jádry (nepíšeme přidávané protony, odcházející pozitrony z  $\beta^+$  rozpadu a fotony):



Výhoda tohoto postupu je, že slučování protonů na jádro deuteria nahrazujeme  $\beta^+$  rozpadem, který není vázaný na počet srážek v plazmatu. Nevýhodou však je, že kvůli většímu náboji zúčastněných jader musíme překonat vyšší coulombickou bariéru a tedy proces probíhá až při vyšších teplotách.<sup>3</sup>

Termojaderná fúze je sice exotermická reakce, ale k jejímu nastartování musíme překonat energetickou bariéru, která činí řádově 0,1 MeV. K tomu je třeba dosáhnout teploty přes  $100 \cdot 10^6$  °C. V klasických tokamacích se plazma ohřívá několika způsoby. Jednak pomocí urychleného svazku částic, přičemž urychlení probíhá podobně jako na klasickém urychlovači částic. Dále se ohřívá indukci vířivých proudů, podobně jako na indukční varné desce. V naší loďi bychom místo toho mohli energetickou bariéru překonávat kinetickou energií dopadajících protonů. K tomu je třeba, aby energie dopadajících protonů byla zhruba 0,1 MeV. Což, pokud kinetickou energii protonů přepočítáme na rychlost<sup>4</sup>, odpovídá zhruba 1,5 %c, tedy cca  $4400 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Naše loď by musela letět minimálně touto rychlostí, pokud jsou protony v prostoru „téměř nehybné“.

<sup>1</sup>Jak je nutné vždy, když se v reakci přeměňuje proton na neutron nebo naopak.

<sup>2</sup>Existují i jiné varianty probíhající při ještě vyšších teplotách. Více se dá zjistit kupříkladu na [en.wikipedia.org/wiki/CNO\\_cycle](http://en.wikipedia.org/wiki/CNO_cycle)

<sup>3</sup>Ve Slunci představuje asi 1,7 % výroby  ${}^4\text{He}$ , dominuje až u hvězd 1,3 krát hmotnějších, než Slunce.

<sup>4</sup>Vzťah pro relativistickou kinetickou energii je  $E_k = m_0 c^2 \left( \frac{1}{\sqrt{1-v^2/c^2}} - 1 \right)$

Uvažujme, kolik energie by vlastně taková kosmická loď vyžadovala. Ačkoliv vesmírná tělesa létají ohromnou rychlostí, musíme si uvědomit, že kosmické prostředí klade tělesům zanedbatelný odpor, takže je třeba raketě dodávat jen energii na zrychlování, zpomalování a změnu směru letu. Z čehož lze usoudit, že většina energie se spotřebuje při startu a pak je víceméně potřeba energie jen na provoz samotné lodi. Mezinárodní vesmírná stanice (ISS) spotřebuje na svůj provoz něco pod 100 kW příkonu, což použijeme jako řádový odhad spotřeby. Když uvážíme, že ze čtyř protonů získáme maximálně přibližně 25 MeV energie,<sup>5</sup> lze spočítat, že ISS by za sekundu spotřebovala přibližně  $10^{17}$  protonů při ideální účinnosti fúzního reaktoru. To by znamenalo, že při typických hustotách částic v naší galaxii<sup>6</sup>  $\rho = 2 \cdot 10^5 \text{ m}^{-3}$  a sběrnou plochou někde kolem<sup>7</sup>  $S = 1 \cdot 100 \text{ m}^2$  bychom se museli při neuvážení speciální teorie relativity pohybovat rychlostí řádově<sup>8</sup>  $10^9 \cdot 10^{11} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , takže po započítání relativistické kontrakce dostaneme rychlost téměř rovnou rychlosti světla. Z toho můžeme usoudit, že posbírat dost vodíku na rozumný provoz lodi je obtížné až nemožné, minimálně s technologií blízké budoucnosti.

Nakonec odhadněme, kolik vodíku by se ve výsledku na lodi spotřebovalo. Hodnota  $10^{17}$  částic se sice zdá jako hodně velké číslo, ale po přepočtení na gramy zjistíme, že na jednu sekundu provozu spotřebujeme zhruba 170 ng vodíku. To znamená, že 1 kg vodíku by při ideální účinnosti stačilo na 200 let provozu. Proto se zdá rozumnější vzít si palivo s sebou. To by nám navíc umožnilo použít deuterio-tritiovou reakci,<sup>9</sup> která se zdá být daleko snadněji realizovatelnou. Navíc bychom nemuseli řešit zbytečné technické problémy se zachytáváním vodíku.

Pokud bychom přeci jen chtěli k pohonu využít „něco, co posbíráme cestou“, nabízí se jedna velice zajímavá možnost, a to použít miony z kosmického záření. Mion je elementární částice podobná elektronu, která ale má  $200 \times$  vyšší hmotnost. Pokud nahradíme v molekule vodíku elektrony miony, kvůli větší hmotnosti budou blíže jádru a proto se zásadně zmenší délka vazby v molekule  $\text{H}_2$ . Díky tomu se jádra dokáží dostat velmi blízko a splynout při relativně nízké teplotě – pro deuterium a tritium k fúzi dochází již za pokojové teploty! V pozemských podmínkách toto bohužel není použitelné, protože na vytvoření jednoho mionu spotřebujeme o mnoho řádů víc energie, než kolik se pak uvolní fúzí. Pokud bychom ale měli miony „zadarmo“ z kosmického záření,<sup>10</sup> byli bychom ve výkonu reaktoru limitováni jen jejich počtem. Bohužel kvalifikovaný odhad množství získaných mionů a tedy i výkonu sahá za rámec tohoto textu.<sup>11</sup>

**Mikuláš Matoušek**  
mikulas@fykos.cz

Fyzikální korespondenční seminář je organizován studenty MFF UK. Je zastřešen Oddělením propagace a mediální komunikace MFF UK a podporován Ústavem teoretické fyziky MFF UK, jeho zaměstnanci a Jednotou českých matematiků a fyziků.

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

<sup>5</sup> Celková energie reakce je 26,73 MeV, ale část energie odchází ve formě kinetické energie neutrin, které s látkou téměř neinteragují.

<sup>6</sup> Hustota je silně variabilní, obecně klesá směrem od středu galaxie, toto je rozumná hodnota ve velké části galaxie podle [en.wikipedia.org/wiki/Interstellar\\_medium](http://en.wikipedia.org/wiki/Interstellar_medium). Slunce se ale nachází v cca 300 ly velké bublině, vzniklé po dávném výbuchu supernovy, kde je hustota cca desetkrát menší.

<sup>7</sup> Jedná se jen o řádový odhad toho, co je rozumné zkonstruovatelné.

<sup>8</sup> Používáme vztah  $N = Sgv$ , s relativisticou kontrakcí by tento vztah byl správně  $N = Sgv \frac{1}{\sqrt{1-v^2/c^2}}$

<sup>9</sup> Samozřejmě bychom museli řešit to, že tritium se průběžně rozpadá s poločasem přibližně 12 let.

<sup>10</sup> Miony se sice v kosmickém záření nevyskytují, protože mají poločas rozpadu v řádu mikrosekund, ale vznikají nárazem jiných energetických částic do hustého prostředí.

<sup>11</sup> Zájemcům o hlubší pochopení pro začátek doporučujeme k prostudování [en.wikipedia.org/wiki/Muon-catalyzed\\_fusion](http://en.wikipedia.org/wiki/Muon-catalyzed_fusion)