



Výfučení: Plazma a fúze

Ve škole jste možná slyšeli, že kromě tří „klasických“ skupenství (pevné, kapalné a plynné), existuje i čtvrté: plazma. Co přesně se za tímto pojmem skrývá, co je, nebo není plazma, a co je to vlastně jaderná fúze, se dozvíte v tomto Výfučení.

Co je to to plazma?

Zahříváme plyn

Na začátek je důležité zmínit, že plazma v českém jazyce popisuje dvě různé věci – *ta* plazma tvoří složku krve a *to* plazma je ionizovaný plyn (splňující další kritéria).

Obyčejný plyn (např. vzduch za atmosférického tlaku) se skládá z neutrálních molekul, které na sebe působí téměř výhradně v okamžiku srážek. Co by se stalo, kdybychom začali plyn zahřívát? Postupně by rostla rychlost molekul (i četnost jejich srážek) a zvyšovala by se celková (vnitřní) energie plynu, což se makroskopicky projeví na narůstající teplotě plynu. Takto zjednodušeně lze chápat vztah energie a teploty termodynamických systémů (tedy toho, co v termice zkoumáme), což číselně vyjadřuje Boltzmannova konstanta $k_B \doteq 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$. Z ní také vyplývá převodní vztah často využívaný ve fyzice plazmatu

$$1 \text{ eV} \doteq 11\,600 \text{ K}.$$

Jednotka energie elektronvolt ($1 \text{ eV} \doteq 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ J}$) se zde vyskytuje proto, že lépe popisuje energie elektronů, atomů a molekul oproti mnohem většímu joulu.

Při vysokých teplotách překročí tepelná energie $k_B T$ ionizační energii atomu E_i , tzn. minimální energii nutnou k odtržení valenčního elektronu od atomu a tedy k jeho *ionizaci*. Pro různé prvky se ionizační energie pohybuje řádově v nižších desítkách eV, což podle uvedeného převodu zhruba odpovídá teplotám nad 116 000 K. Při takových teplotách se v plynu začínají vedle neutrálních částic samostatně objevovat i nabitě částice – elektrony a kationty (atomy s jedním či více odtrženými valenčními elektrony, tj. kladně nabitě ionty). Počet neutrálních (či nabitých částic) v jednotce objemu popisuje veličina koncentrace $[n] = \text{m}^{-3}$. Rozlišujeme koncentraci elektronů n_e , koncentraci iontů n_i a koncentraci neutrálních částic n_0 . Plazma si zachovává důležitou vlastnost, že se navenek jeví jako nenabitá tekutina (kapalina či plyn), ačkoliv sestává z nabitých částic (počet kladně a záporně nabitých částic je přibližně stejný, $n_e \approx n_i$) – říkáme, že je *kvazineutrální*.

Druhou definiční vlastností plazmatu je *kolektivní chování*. Zatímco neutrální částice interagují prostřednictvím srážek, nabitě částice na sebe působí hlavně dalekodosahovými, elektrostatickými silami popsány Coulombovým zákonem. Částice plazmatu tak vytvářejí elektrická a magnetická pole a zároveň na vnější elektrická a magnetická pole jako celek reagují. Plazma je tedy například schopné vnější elektrická pole odstínit tím, že samo přeuspořádá svůj náboj (změní se poloha elektronů a iontů).

Plazma se vyskytuje za rozličných podmínek v mnoha, často velmi odlišných podobách. Meziplanetární a mezihvězdný prostor i hvězdy jsou tvořeny ionizovaným plynem. Na Zemi jej

¹V termice se pro vyjadřování teplot upřednostňuje *termodynamická stupnice* před Celsiovou, protože je nezávislá na teplotě látky a lépe vystihuje fyzikální souvislost teploty a energie systému. Její jednotkou je kelvin (K) a z teploty t udané ve stupních Celsia lze tzv. *termodynamickou* teplotu získat převodním vztahem $T = (\{t\} + 273,15) \text{ K}$.

najdeme v horních vrstvách atmosféry (kde způsobuje polární záře), vzniká při elektrických výbojích v plynech – přírodních (např. blesk, Eliášův oheň) i uměle vyvolaných (toho se využívá ve výbojkách a zářivkách) – a setkáme se s ním také v různých odvětvích průmyslu a specializovaných laboratořích. Ovšem ne každou směs neutrálních a nabitých částic lze označit za plazma – k tomu, abychom rozhodli, co je a není plazma, nám poslouží následující plazmatické veličiny.

Plazmatické veličiny

Plazma charakterizují veličiny Debyeova stínící délka λ_D , plazmatická frekvence f_p a plazmatický parametr N_D – všechny v podstatě kvantitativně popisují výše uvedené vlastnosti plazmatu: kolektivní chování a kvazineutralitu. Jejich určením vyvodíme nutné podmínky, jež musí plazma splňovat.

Debyeova stínící délka λ_D stanovuje minimální velikost plazmatu. Pokud do plazmatu vložíme cizí nabitý objekt (a budeme jeho náboj nějakým vnějším zdrojem udržovat), vytvoří kolem něj částice s opačným nábojem okrajovou vrstvu, která cizí elektrické pole stíní. Její tloušťka závisí na intenzitě („síle“) cizího pole a na teplotě a hustotě nabitých částic plazmatu. Debyeova délka pak vyjadřuje míru schopnosti plazmatu odstínit cizí náboj – je definována jako vzdálenost, v níž elektrické pole zeslábně na $1/e$ (zhruba 37%) své původní hodnoty.

Je dána vztahem

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{\varepsilon_0 k_B T}{e^2 n_e}} \approx 69 \sqrt{\frac{\{T\}}{\{n_e\}}} \text{ m},$$

kde $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$ je permitivita vakua a $e = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ elementární náboj elektronu.

Plazmatická frekvence f_p charakterizuje plazma z časového hlediska. Na změny elektrického pole reagují v plazmatu nejvýrazněji elektrony, zatímco těžší, méně pohyblivé ionty tvoří celkově kladné pozadí. Když se elektrony ve vnějším poli vychýlí a poté se pole vypne, důsledkem setrvačnosti začnou elektrony kolem iontů kmitat s frekvencí f_p . Pokud do plazmatu pošleme elektromagnetické záření o frekvenci $f < f_p$, dojde k jeho odražení, protože mají elektrony dostatek času na dané frekvenci kmitat. Plazmatickou frekvenci lze vypočítat jako

$$f_p = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{e^2}{\varepsilon_0 m_e} n_e} \approx 9 \sqrt{\{n_e\}} \text{ Hz}.$$

Nakonec potřebujeme dostatek nabitých částic, které budou kolektivní chování vynucovat. Počet částic ve sféře o poloměru Debyeovy délky je plazmatický parametr

$$N_D = \frac{4}{3} \pi \lambda_D^3 n_e \approx \lambda_D^3 n_e.$$

Připomeňme, že do vzorců dosazujeme veličiny v jednotkách SI, tzn. $[T] = \text{K}$, $[n_e] = \text{m}^{-3}$ a $[\lambda_D] = \text{m}$.

Kritéria plazmatu

Pomocí tří zmíněných veličin můžeme určit podmínky, za kterých má zkoumaný plyn vlastnosti plazmatu

$$\begin{aligned} \lambda_D &\ll L, \\ f_p &\gg f_n, \\ N_D &\gg 1. \end{aligned}$$

První podmínka říká, že průměr plazmatu L musí být řádově větší² než Debyeova stínící délka λ_D . Druhou podmínkou je, že plazmatická frekvence f_p musí být výrazně větší než frekvence srážek probíhajících v plazmatu (příliš časté srážky neutrálních částic s nabitými snižují vliv coulombických sil na pohyb částic, takže se vytrácí kolektivní chování). Poslední podmínka zaručuje dostatek částic s nábojem.

Posudme plamen ohně podle zmíněných kritérií. Teplota plamene může být řádově 1 000 K a koncentrace elektronů $n_e = 10^{16} \text{ m}^{-3}$. Dosazením získáme plazmatické veličiny

$$\begin{aligned}\lambda_D &\approx 22 \mu\text{m}, \\ f_p &\approx 0,9 \text{ GHz}, \\ N_D &\approx 100.\end{aligned}$$

Rozměr plamene L můžeme odhadnout na několik centimetrů, tudíž 1. podmínka je splněna. 2. podmínka je zřejmě také splněna. Srážková frekvence elektronů s neutrálními částicemi je řádově $f_n = 10 \text{ GHz}$, což je více než plazmatická frekvence, 3. podmínka proto není splněna. Plamen tudíž není plazma (byť se jako příklad plazmatu často nesprávně uvádí), ale ionizovaný plyn, který obsahuje příliš mnoho neutrálních částic oproti těm nabitým.

Fúze a tokamaky

Nejčastěji zmiňovaným zástupcem plazmatu je Slunce. O tom, jaké procesy v něm probíhají a jak se je snažíme replikovat na Zemi, si řekneme v této části Výfučení o jaderné fúzi.

Účinný průřez

V prostředí určeném pro termojadernou fúzi dochází k obrovskému množství srážek mezi nabitými částicemi. Většina těchto srážek ovšem vůbec nevede k jaderné reakci, ale jenom k elektromagnetické reakci, tzv. Coulombické interakci. Fúzní reakce jsou v porovnání s tím velmi vzácné, protože mohou nastat jenom tehdy, když se dvě kladně nabitá jádra přiblíží na opravdu krátkou vzdálenost, kde začne působit silná jaderná interakce.

Pravděpodobnost, že při srážce částic dojde ke konkrétní reakci, je popsána pomocí tzv. účinného průřezu σ . Účinný průřez můžeme zjednodušeně chápat jako „účinnou plochu“, kterou částice musí prolétnout, aby reakce proběhla. Coulombické interakce mají účinný průřez σ_C velmi vysoký, a proto k nim dochází velmi často. Protože účinný průřez fúzních reakcí σ_F je naopak velmi malý, tak na jednu fúzní reakci připadá obrovské množství běžných coulombických srážek.

Účinný průřez fúzní reakce závisí na energii částic. Při nízkých energiích skoro neexistuje, protože částice nejsou schopny překonat Coulombovu bariéru.³ S rostoucí energií roste i pravděpodobnost kvantového tunelování⁴ a tím i účinný průřez. Největší přínos k fúzním reakcím mají částice s energiemi v tzv. Gamowově okně, což je interval energií, ve kterém se vhodně kombinuje počet částic a pravděpodobnost tunelování.

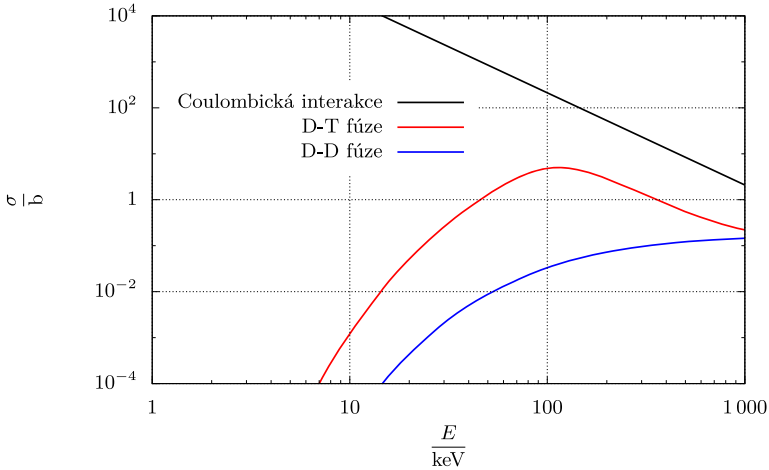
Jelikož plocha účinného průřezu reakcí bývá velmi malá, zavádí se speciální jednotka barn $1 \text{ b} = 10^{-28} \text{ m}^2$. Velikosti účinných průřezů coulombické a fúzní interakce jsou uvedeny na obr. 1. Je

²Symbol \gg v tomto kontextu značí, že se porovnané veličiny musí lišit alespoň stokrát.

³Coulombova bariéra je energetická bariéra, kterou musí dvě jádra překonat, aby se dostala dostatečně blízko k sobě a mohla proběhnout jaderná reakce.

⁴Kvantové tunelování je jev, při kterém částice překoná energetickou bariéru, i když je její kinetická energie nižší než energie bariéry.

zřejmé, že velikost σ_C je zhruba stokrát vyšší než σ_F , tudíž musí nastat asi 100 coulombických srážek na jednu fúzní reakci.

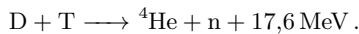


Obrázek 1: Reakce

Fúzní reakce

Ve hvězdách, například ve Slunci, probíhá fúze jiným způsobem. Hlavním zdrojem energie je proton–protonový cyklus (p–p cyklus), při kterém se čtyři protony postupně přemění na jádro helia. První část tohoto cyklu má velmi nízkou pravděpodobnost, protože probíhá pomocí slabé interakce. Účinný průřez těchto reakcí je extrémně malý, a právě proto Slunce uvolňuje energii tak pomalu a stabilně po miliardy let.

Pro fúzní reaktory na Zemi je průběh p–p cyklu až moc složitý, jelikož dochází k několika postupným reakcím. Jednodušší je využít pouze jednu danou reakci, kterou je z obr. 1 D–T reakce



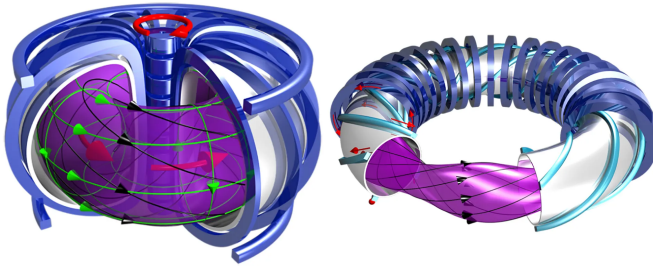
Při této reakci dojde k fúzi dvou izotopů vodíku – deuteria, které má kromě protonu i jeden neutron, a tritia, které má neutrony dokonce dva. Fúzí se uvolní velké množství energie. Vzniklá alfa částice (jádro helia ${}^4\text{He}$) zůstává v reakční oblasti a přispívá ohřevu prostředí, zatímco neutron n uniká a nese většinu uvolněné energie.

Typy fúzních zařízení

Tokamak, stelarátor a inerciální fúze jsou tři hlavní způsoby, jak vědci řízeně vyvolávají termojadernou fúzi. Každé vychází z jiného principu, mají ale společné to, že se snaží vyprodukovat energii z fúzních reakcí a zabránit tomu, aby horké plazma nebo palivo okamžitě uniklo.

Tokamak je zařízení pro magnetické udržení fúzního prostředí toroidálního tvaru, tedy tvaru připomínající „prsten“ nebo „donut“. Fúzní reakce probíhají při extrémně vysokých teplotách,

až 150 milionů kelvinů. Plazma, které v tokamaku vzniká, by tak lehce dokázalo zničit stěny reaktoru. Proto je plazma udržováno silným magnetickým polem (o „intenzitě“ až 10 T), které udržuje plazma stabilní a brání jeho kontaktu se stěnami. Tokamaky jsou dnes nejrozšířenějším typem zařízení pro řízenou termojadernou fúzi, protože jejich princip je dobře prozkoumaný a umožňuje relativně snadnou kontrolu nad pohybem částic. Alternativou k tokamakům jsou stellarátory, které udržují stabilní plazma pomocí speciálně tvarovaných magnetických cívek. Díky tomu jsou schopny udržovat plazma kontinuálně a ne pouze v jednotlivých pulzích, jako se děje v tokamacích. Jak vypadají můžete vidět na obrázku 2.



Obrázek 2: Tokamak (vlevo) a stellarátor (vpravo)

Úplně jiný způsob představuje inerciální fúze. Ta pomocí laserových svazků stlačí malou peletku D–T směsi tak rychle, až proběhne fúze jader. Fúzní reakce tedy probíhá velmi krátkou dobu a palivo se díky své vlastní hmotnosti (setrvačnosti) na okamžik samo udrží stlačené.

Lawsonovo kritérium a zisk energie

Základní podmínkou pro energeticky výhodnou fúzi je Lawsonovo kritérium. To totiž říká, že součin koncentrace částic n , teploty T a doby udržení τ energie musí překročit určitou mezní hodnotu. Pro D–T reakci je nejnižší práh při teplotě 14 keV a musí platit nerovnost

$$nT\tau_E \geq 3,10^{21} \text{ keV}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-3}.$$

Splnění Lawsonova kritéria je nezbytný předpoklad k tomu, aby v prostředí docházelo k dostatečně častým fúzním reakcím a aby energie uvolněná při těchto reakcích nebyla menší než energetické ztráty.

Energetický zisk fúzního zařízení se popisuje pomocí koeficientu fúzního zisku Q , který je definován jako poměr výkonu uvolněného fúzními reakcemi k výkonu dodanému na ohřev prostředí

$$Q = \frac{P_{\text{fúze}}}{P_{\text{ohřev}}}.$$

Pro $Q = 1$ nastává energetická rovnováha. Když dosáhneme $Q > 1$, tak zařízení generuje více energie, než jsme mu museli dodat.

Celkový výkon vytvořený fúzními reakcemi závisí na počtu reakcí, které v prostředí proběhnou, a na energii uvolněné jednou reakcí. Proto je faktor Q úzce spojen s Lawsonovým kritériem, protože vyšší hustota, teplota a doba udržení energie vedou k větší reakční rychlosti a tím i k vyššímu energetickému zisku.

V současnosti je nejambicióznějším fúzním projektem tokamak ITER, který je stavěn v mezinárodní spolupráci na jihu Francie. Jako první tokamak by měl dosáhnout $Q > 1$, a tedy dokázat, že fúze má ekonomický smysl jako způsob generování energie. Přepokládané datum spuštění aktuálně připadá na rok 2035.

Závěr

Doufáme, že se vám poslední Výfučtení tohoto ročníku líbilo. Nyní už pro vás snad nebude pojem plazma opředen takovým tajemstvím a budete schopni popsat tento pojem i ostatním. Zároveň doufáme, že s námi budete vyhlížet spuštění tokamaku ITER a jeho příslib čisté energie.

Patrik Kašpárek
patrik.kasperek@vyfuk.org

Alena Mouchová
alena.mouchova@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/>.