



## Seriál: Úvod do fyziky plazmatu a termojaderné fúze

Plazma jakožto čtvrté skupenství hmoty reprezentuje 99 % hmoty ve vesmíru a přestože se s ním na Zemi setkáváme jen výjimečně, hraje důležitou roli v řadě technologických procesů, které slouží k výrobě předmětů denní potřeby. V neposlední řadě je klíčem k ovládnutí řízené termojaderné fúze. V tomto seriálu se budeme nejprve zabývat základními pojmy z fyziky plazmatu a následně rozebereme problematiku udržení plazmatu pro potřeby jaderné fúze, zvláště v zařízení zvaném TOKAMAK.

### Co je to plazma

Dle definice je plazma *kvazineutrální plyn nabitých a neutrálních částic, který vykazuje kolektivní chování*. Ač se tato definice může zdát velmi obecná, obsahuje všechny klíčové vlastnosti, které odlišují plazma od jiných skupenství hmoty.

1. Plazma je směs neutrálních a nabitých částic. K určení stupně ionizace (poměru koncentrace nabitých a neutrálních částic) můžeme použít Sahovu rovnici

$$\frac{n_i}{n_n} \approx 2,4 \cdot 10^{21} \cdot \frac{T^{3/2}}{n_i} e^{-\frac{U_i}{kT}},$$

kde  $n_i$  je koncentrace nabitých částic,  $n_n$  koncentrace neutrální,  $T$  teplota plynu a  $U_i$  ionizační potenciál atomů plynu. Je zřejmé, že aby byl stupeň ionizace nezanedbatelný, je třeba plyn ohřát na teplotu, při které budou mít jeho částice energie blízké ionizačnímu potenciálu  $U_i$ . Ten je pro elektrony na nejvyšších atomárních hladinách typicky v řádu elektronvoltů, což odpovídá teplotám větším než 10 000 K. S takovými teplotami se v přírodě okolo nás často nesetkáváme, a tak je naše bezprostřední zkušenost s plazmatem obvykle omezena na pozorování blesků či polární záře. Z umělých plazmatických zdrojů jsou ale běžně rozšířené zářivky a neonové osvětlení. Ve vesmíru je ovšem plazma prakticky všudypřítomné, nalézá se ve hvězdách, v mezihvězdných mlhovinách i např. ve slunečním větru.

2. Plazma se globálně jeví jako *kvazineutrální*, tj. jsou v něm shodně zastoupeny částice s kladným i záporným nábojem. Tím se liší např. od svazku částic v urychlovači. Tato vlastnost neplatí lokálně, kde může docházet k separaci náboje (např. při kontaktu plazmatu s pevným předmětem).
3. Plazma vykazuje *kolektivní chování*. Tato vlastnost zaručuje, že hlavní interakcí mezi částicemi plazmatu jsou Coulombovské síly, tj. síly dlouhého dosahu. V praxi to znamená, že událost v jedné části plazmatického oblaku (např. lokální separace náboje) může vytvořit elektrické pole, které ovlivní zbytek plazmatu. Tím se plazma odlišuje od plynu, kde jsou hlavní interakcí elastické srážky, které mají lokální charakter.

*Debyovské stínění*

Základní vlastnosti plazmatu se názorně projeví, pokud je necháme interagovat s pevným předmětem. Jako příklad takového objektu si můžeme představit mřížku, kterou nabijeme na určitý potenciál a vložíme do plazmatického oblaku. Při výpočtu profilu elektrického potenciálu v okolí mřížky vyjdeme z jedné z Maxwellových rovnic

$$\nabla^2 \varphi = \frac{\rho}{\varepsilon_0} = -\frac{e(n_i - n_e)}{\varepsilon_0}, \quad (1)$$

kde je náboj  $\rho$  tvořený rozdílem koncentrace iontů  $n_i$  a elektronů  $n_e$  (neuvažujeme vícenásobně nabitě ionty). Budeme uvažovat nekonečně hmotné nepohyblivé ionty, které tvoří pozadí k Boltzmannovským elektronům, které reagují na elektrický potenciál

$$\begin{aligned} n_i &= n_\infty, \\ n_e &= n_\infty e^{\frac{e\varphi}{kT_e}}. \end{aligned}$$

Převedeme-li rovnici (1) na jednorozměrný problém a dosadíme-li za hustoty, získáme diferenciální rovnici

$$\frac{d^2 \varphi}{dx^2} = \frac{en_\infty}{\varepsilon_0} \left( e^{\frac{e\varphi}{kT_e}} - 1 \right),$$

kteřá se nedá jednoduše vyřešit. Exponenciální člen můžeme rozvést do Taylorovy řady

$$e^{\frac{e\varphi}{kT_e}} = 1 + \frac{e\varphi}{kT_e} + \frac{1}{2} \left( \frac{e\varphi}{kT_e} \right)^2 + \dots$$

Za předpokladu, že  $e\varphi/(kT_e) \ll 1$ , můžeme uvažovat pouze první dva členy rozvoje a rovnice se tak zjednoduší na

$$\frac{d^2 \varphi}{dx^2} = \frac{e^2 n_\infty}{\varepsilon_0 k T_e} \varphi.$$

Toto je již standardní rovnice, která má známé exponenciální řešení

$$\begin{aligned} \varphi(x) &= \varphi_0 e^{-\frac{|x|}{\lambda_D}} \\ \lambda_D &= \sqrt{\frac{\varepsilon_0 k T_e}{ne^2}} \end{aligned}$$

s parametrem  $\lambda_D$ , který se nazývá *Debyeova délka*. V praxi toto řešení znamená, že mřížka bude v závislosti na svém potenciálu přitahovat nebo odpuzovat elektrony, takže okolo ní vznikne oblak nábojové hustoty, který poruchu odstíní. Tato důležitá vlastnost – schopnost odstínit odchylky elektrického potenciálu (které mohou být způsobené např. přebytkem náboje) – je pro plazma typická. Tato schopnost vede k zachování kvazineutality, protože fluktuační nábojové hustoty mají částice tendenci odstínit.

---

Fyzikální korespondenční seminář je organizován studenty MFF UK. Je zastřešen Oddělením pro vnější vztahy a propagaci 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/>.