

2. Definice plazmatu, základní charakteristiky plazmatu

Definice plazmatu

Plazma bývá obvykle označováno za čtvrté skupenství hmoty. Pokud zahříváme pevnou látku, dojde k jejímu roztavení, při dalším zahřívání se kapalina změní na plyn. Když budeme plyn dále zahřívát, dostaneme skupenství s velmi zajímavými vlastnostmi. Plyn se stane vodivým, přestože navenek bude vykazovat elektricky neutrální chování. Použitelná (a hodně zjednodušená) definice plazmatu tedy může znít:

Plazma je kvazineutrální plyn nabitých a neutrálních částic, který vykazuje kolektivní chování.

Kvazineutralitou (předpona *kvazi-* znamená téměř, skoro) se rozumí fakt, že se plazma chová navenek elektricky neutrálně, přestože obsahuje elektricky nabitě částice. Pojem *kolektivní chování* zase poukazuje na skutečnost, že pohyby v plazmatu nezávisí pouze na lokálních podmínkách, ale taky na stavu plazmatu ve vzdálených oblastech. Plazma není v přírodě žádný ojedinělý jev, odhaduje se, že až 99% celkové vesmírné hmoty se nachází právě v tomto skupenství. Jedná se hlavně o hvězdy, ale i různé mlhoviny a galaxie. Na zemi se pak s plazmatem setkáme méně často, jelikož má jeho životnost velké energetické nároky (vysoká teplota, tlak, záření apod.), nevydrží v přirozeném prostředí dlouhou dobu, jsou to např. blesky a jiné výboje. Kritéria která musí ionizovaný plyn splňovat aby mohl být označen za plazma jsou obsáhlejší a budou specifikována dále v textu. Mezi nabitě částice nepatří jenom protony a elektrony, směs částic které dohromady tvoří plazma je velmi různorodá:

- Elektrony
- Kationty
- Anionty (omezené množství)
- Radikály
- Neionizované molekuly a atomy
- Excitované molekuly a atomy
- Kvanta elektromagnetického záření (fotony) různých vlnových délek, ...

Ionty a radikály vznikají díky vzájemným srážkám částic plazmatu. V plynu v tepelné rovnováze se vyskytují částice všech rychlostí, jejich distribuci popisuje tzv. Maxwellovo rozdělení. Střední kinetická energie částic E_{st} (v jednorozměrném systému) je popisována vztahem:

$$E_{st} = \int m \cdot v \cdot dv = m \int v \cdot dv = \frac{1}{2} m \bar{v}^2 = \frac{1}{2} kT \quad (2.1)$$

Tento projekt je spolufinancován Evropským sociálním fondem
a státním rozpočtem České republiky



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

V třírozměrném systému platí:

$$E_{st} = \frac{3}{2} kT \quad (2.2)$$

kde m je hmotnost částice, v^2 střední kvadratická rychlost částice, k Boltzmannova konstanta ($1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$) a T termodynamická teplota. U pojmu teplota se můžeme na chvíli pozastavit. Teplota bývá definována jako míra kinetické energie (proto je možné psát rovnost mezi vztahem obsahujícím rychlost a teplotu, viz. rovnice 2.1). Teplotu tedy lze vyjádřit v jednotkách energie. Z důvodu nezávislosti na počtu dimenzí se teplota neuvádí jak E_{st} ale jako energie připadající na 1 kT . Např. pro $kT = 1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ odvodíme:

$$T = \frac{1,6 \cdot 10^{-19}}{1,38 \cdot 10^{-23}} = 11600 \text{ K}$$

Platí pak převodní faktor:

$$1 \text{ eV} \equiv 11600 \text{ K} \quad (2.3)$$

Např. údaj 3 eV plasma tedy znamená že $kT = 3 \text{ eV}$, tj. v třírozměrném systému bude $E_{st} = 9/2 \text{ eV}$ a této energii odpovídá teplota $3 \times 11600 \text{ K} = 34800 \text{ K}$.

V souvislosti s uváděnými vysokými teplotami plazmatu je vhodné připomenout důležitý fakt: teplota nevypovídá nic o celkovém množství tepla. Většiny laboratorně a průmyslově připravených plazmatických výbojů je dosaženo za nízkého tlaku a tedy i nízké koncentrace částic ve výboji. Proto může být (zdánlivě paradoxně) např. teplota elektronů v zářivce cca. 30000 K, celkové množství tepla ale bude dostatečné k ohřátí skleněného obalu zářivky na maximálně několik desítek stupňů Celsia. Záměrně je zde uváděn pojem *teplota elektronů*. V plazmatu jsou přítomny různé částice, viz. výše. Z rovnice 2.1 je pak zřejmé, že pokud bude do systému dodáno určité množství energie, výsledná teplota těchto částic se bude lišit v závislosti na jejich hmotnosti, a to nepřímo úměrně. Čím hmotnější částice, tím nižší teplotu bude mít.

Základní plazmatické parametry

Plazmatické parametry jsou veličiny které plazma charakterizují a umožňují jeho popis a rozdělení. Mezi základní parametry patří Debyeova délka, stupeň ionizace plazmatu, teplota, hustota nabitých částic, hustota plynu (tlak), distribuční funkce energie elektronů, plazmová frekvence, atd.

Stupeň ionizace plazmatu

Stupeň ionizace plazmatu je jeden z nejdůležitějších parametrů popisujících plazma. Jedná se o poměr počtu ionizovaných částic vůči celkovému počtu částic v daném systému. Je závislý především na teplotě a jeho přibližnou hodnotu lze určit ze Sahovy rovnice:

Tento projekt je spolufinancován Evropským sociálním fondem
a státním rozpočtem České republiky



$$\frac{n_i}{n_n} \approx 2,4 \times 10^{21} \frac{T^{3/2}}{n_i} e^{-U_i / kT} \quad (2.4)$$

kde n_i je hustota ionizovaných částic a n_n je celková hustota částic (uváděny jako počet částic v jednotce objemu), T je teplota plynu v K, k je Boltzmannova konstanta a U_i ionizační energie plynu, tj. energie která se musí jednomu atomu dodat aby došlo k odtržení valenčního (nejslaběji vázaného) elektronu, tedy k ionizaci.

Stupeň ionizace vzduchu při pokojové teplotě je velmi nízký, přibližně 10^{-122} .

Debyeova délka, Debyeova vzdálenost

Při vzájemné interakci dvou elektricky nabitých částic v plazmatu bude záviset na vzdálenosti ve které se tyto částice vůči sobě nacházejí. Pokud jsou dostatečně blízko, bude interakce probíhat podle Coulombova zákona. Protože jsou ale v plazmatu přítomny volné nosiče náboje (elektrony a ionty), budou coulombické interakce stíněny pokud by se částice nacházely ve větší vzdálenosti.

Debyeova délka udává vzdálenost do které jsou náboje v plazmatu vnímány jako nestíněné.

Debyeova délka je definována vztahem:

$$\lambda_D \equiv \left(\frac{\epsilon_0 k T_e}{n e^2} \right)^{1/2} \quad (2.5)$$

V tomto vztahu n označuje hustotu nabitých částic, e náboj elektronu a ϵ_0 permitivitu vakua. Se vzrůstající koncentrací (hustotou) nabitých částic se Debyeova délka zmenšuje a vzrůstá tím stínící schopnost plazmatu. Vyšší teplota naopak usnadňuje difúzi a Debyeovu délku zvyšuje. Ionizovaný plyn může být nazýván plazmatem jenom tehdy, pokud je hustota nábojů tak vysoká, že Debyeova délka je mnohem menší než velikost systému L .

Plazmatický parametr

Mechanismus Debyeova stínění platí za předpokladu je stínících nabitých částic dostatečné množství. Jsou-li v oblasti stínící vrstvy přítomny např. jenom dvě nabitě částice, není pojem Debyeovo stínění statisticky platný. Počet částic v Debyeově sféře (koule o poloměru λ_D) je dán vzorcem:

$$N_D = n \frac{4}{3} \pi \lambda_D^3 = 1,38 \times 10^6 \frac{T^{3/2}}{n^{1/2}} \quad (2.6)$$

Ionizovaný plyn může být nazýván plazmatem jenom tehdy, pokud počet částic v Debyeově sféře je mnohem větší než jedna.

Tento projekt je spolufinancován Evropským sociálním fondem
a státním rozpočtem České republiky



Plazmová frekvence

Jednotlivé částice v plazmatu oscilují přirozeným způsobem na tzv. plazmové frekvenci. Nejtypičtější je plazmová frekvence elektronů, která často bývá v rozsah radiových nebo optických frekvencí. Tato frekvence taky souvisí s definicí plazmatu. Např. slabě ionizovaný plyn proudící z tryskových motorů nemůžeme označit jako plazma, protože nabitě částice se s neutrálními atomy srážejí tak často, že jejich pohyb je řízen spíše silami hydrodynamickými než elektromagnetickými. Je-li ω frekvence přirozených oscilací plazmatu a τ střední doba mezi srážkami s neutrálními atomy, pak musí být $\omega\tau$ větší než jedna, aby se plyn choval spíše jako plazma než jako neutrální plyn.

Kritéria pro plazma

Na základě uvedených parametrů a definice plazmatu ze začátku kapitoly lze shrnout požadavky, při jejichž splnění může být ionizovaný plyn pokládán za plazma, tj. že vykazuje tzv. kolektivní chování:

1. Ionizovaný plyn může být nazýván plazmatem jenom tehdy, pokud je hustota nábojů tak vysoká, že Debyeova délka je mnohem menší než velikost systému L .
2. Počet částic v Debyeově sféře musí být mnohem větší než jedna
3. Součin ω a τ musí být větší než jedna.

1. $\lambda_D \ll L$

2. $N_D \gg 1$

3. $\omega\tau > 1$

Tento projekt je spolufinancován Evropským sociálním fondem
a státním rozpočtem České republiky



Test:

2|1|3|PS

Plasma s hodnotou $kT_i = 2 \text{ eV}$ má teplotu:

- a) 5000 K
- b) 10000 K
- c) 23200 K

[$1 \text{ eV} = 11600 \text{ K}$, $2 \text{ eV} = 2 \times 11600 \text{ K} = 23200 \text{ K}$]

2|2|2|PS

Správná definice plazmatu zní:

- a) ionizovaný plyn o vysoké teplotě
- b) kvazineutrální plyn nabitých a neutrálních částic, vykazující kolektivní chování
- c) kvazineutrální plyn nabitých a neutrálních částic

2|3|2|PS

Při dodání určitého množství energie do systému získá nejvyšší teplotu:

- a) proton
- b) elektron
- c) kladný iont

2|4|1|PS

Plyn v běžné zářivce může mít teplotu až 30000 K, přesto je možné na takové zářivce udržet ruku aniž bychom riskovali popálení. Proč?

- a) celkové množství tepla obsaženého v zářivce je nízké
- b) sklo má výborné tepelně-izolační vlastnosti a „udrží“ teplo uvnitř výbojky
- c) teplo je odváděno probíhajícím elektrickým proudem do rozvodné elektrické sítě

2|5|3|PS

Stupeň ionizace plazmatu je:

- a) vzdálenost do které je elektrické pole v plazmatu stíněno nabitými částicemi
- b) frekvence oscilací elektronů v plazmatu
- c) poměr hustoty nabitých částic k celkové hustotě částic v plazmatu

Tento projekt je spolufinancován Evropským sociálním fondem
a státním rozpočtem České republiky



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně