

Kapitola 1

Úvod

1.1 Základní vlastnosti plazmatu

1.1.1 Definice plazmatu

plazma - makroskopicky neutrální, mnoho interagujících nabitých částic vykazujících kolektivní chování (Coulombovské síly). Ne vždy plazma pokud látka obsahuje nabité částice \Rightarrow kritéria existence plazmatu!

Pojem *plazma* (v angl. *plasma*) zavedl J. E. Purkyně pro čistou tekutinu zbývající po odstranění všech pevných částíček z krve. Termín vychází z řečtiny, *dávající tvar* nebo *dávající formu*.

I. Langmuir v roce 1922 použil vnitřní oblasti zářícího ionizovaného plynu v el. výbojové trubici. V češtině rozlišujeme *ta plazma* = krevní plazma a *to plazma* = fyzikální plazma.

1.1.2 Plazma jako čtvrté skupenství hmoty

čtyři skupenství: pevné, kapalně, plynné a plazma.

pevné \times kapalně \times plynné skupenství = rozdíl v síle vazeb, skupenství je dáno vnitřní kinetickou energií (tepelnou energií) částic látky, tj. její teplotou. Zahříváním pevné nebo kapalně látky \Rightarrow fázový přechod při konstantní teplotě.

Dodání energie molekulárnímu plynu \Rightarrow disociace, pak ionizace. Nejde o termodynamický fázový přechod, děje se postupně.

1.1.3 Vytváření plazmatu

- dostatečné zvýšení teploty plynu, v termodynamické rovnováze jsou elektronová teplota a stupeň ionizace přímo svázány (Sahova rovnice).
- ionizační procesy zvyšující mnohonásobně stupeň ionizace: fotoionizace a elektrický výboj v plynech. Pokud vypneme ionizující zdroj, ionizace klesá díky rekombinaci \Rightarrow rovnovážná hodnota příslušná teplotě.

1.1.4 Interakce částic a kolektivní jevy

Charakteristický rys plazmatu - kolektivní jevy. Dynamika částic je dána vnitřními poli (výsledek existence a pohybu částic) a externě aplikovanými poli. Základní typy interakcí = elmag charakter.

Rozlišujeme

- interakci dvou nabitých částic
- interakci mezi nabitou částic a neutrálem

Plazma dělíme dle vzájemných interakcí na slabě a silně ionizované.

1.2 Kritéria pro definici plazmatu

1.2.1 Kvazineutralita

Pokud nejsou přítomny nějaké vnější poruchy je plazma makroskopicky neutrální, tzv. kvazineutrální. V opačném případě vznik velkých Coulombovských sil obnovujících kvazineutralitu. Musely by být vyvažovány enormně velkou kinetickou (tepelnou) energií částic.

Odchylky od kvazineutrality jen na vzdálenostech, na kterých je možné elstat. potenciální energii vyvážit tepelnou energií částic \approx charakteristická délková míra v plazmatu, tzv. Debyeovská délka.

1.2.2 Debyeovské stínění

Debyeovská délka je důležitý fyzikální parametr popisující plazma: míra vzdálenosti, na kterou nabitá částice "pocítí" vliv jiné nabitě částice nebo plochy s nenulovým potenciálem. Odstínění je důsledkem kolektivního chování částic.

$$\lambda_D = \left(\frac{\varepsilon_0 k T}{n_e e^2} \right)^{1/2}. \quad (1.1)$$

Pokud je v plazmatu nějaká stěna, jím vytvořená perturbace se může šířit do vzdálenosti řádově λ_D od tohoto povrchu. Oblast v blízkosti stěny, která se nedá považovat za kvazineutrální se nazývá stěnová vrstva (angl. sheath). λ_D je velmi malé

- výboje v plynech $T = 10^4$ K a $n_e = 10^{16}$ m⁻³ $\Rightarrow \lambda_D = 10^{-4}$ m
- ionosféra $T = 10^3$ K a $n_e = 10^{12}$ m⁻³ $\Rightarrow \lambda_D = 10^{-3}$ m.
- mezihvězdné plazma \Rightarrow Debyeovská délka až několik metrů

Definujeme Debyeovu kouli: koule uvnitř plazmatu o poloměru λ_D . Elstat. pole mimo tuto kouli je odstíněno \Rightarrow každý náboj v plazmatu interaguje kolektivně pouze s nabitými částicemi v Debyeově kouli.

Počet elektronů v Debyeově kouli je roven

$$N_D = \frac{4}{3} \pi \lambda_D^3 n_e = \frac{4}{3} \pi \left(\frac{\varepsilon_0 k T}{n_e^{1/3} e^2} \right)^{3/2}. \quad (1.2)$$

Debyeovské stínění je charakteristické pro všechny typy plazmatu \Rightarrow první tři kritéria pro definici plazmatu:

1. V médium musí být dostatek prostoru pro kolektivní stínící efekt

$$L \gg \lambda_D, \quad (1.3)$$

kde L jsou fyzikální rozměry plazmatu.

2. dostatečně velký počet částic uvnitř Debyeovy koule

$$n_e \lambda_D^3 \gg 1. \quad (1.4)$$

Definujeme plazmový parametr

$$g = \frac{1}{n_e \lambda_D^3} \quad (1.5)$$

a podmínka $g \ll 1$ je tzv. *plazmová aproximace*.

3. Ačkoliv vztah (1.3) již vyjadřuje podmínku kvazineutality často se tato podmínka zdůrazňuje nezávisle:

$$n_e = \sum_i n_i. \quad (1.6)$$

1.2.3 Plazmová frekvence

Důležitou vlastností plazmatu je stabilita jeho kvazineutality. Pokud je plazma vychýleno z rovnovážných podmínek, kolektivních pohybů částic kvůli obnově nábojové neutrality \Rightarrow . charakteri-

zováno přirozenou frekvencí, tzv. *plazmová frekvence*. Perioda oscilací = přirozené časové měřítko pro srovnání s disipativními mechanismy potlačujícími kolektivní pohyby elektronů.

Elektronová plazmová frekvence

$$\omega_{pe} = \left(\frac{n_e e^2}{m_e \epsilon_0} \right)^{1/2}. \quad (1.7)$$

Čtvrtá podmínka pro existenci plazmatu:

Srážky mezi elektrony a neutrály tlumí oscilace, ty nesmí být potlačovány příliš

$$\nu_{pe} > \nu_{en}, \quad (1.8)$$

kde ν_{en} je srážková frekvence elektronů s neutrály, $\nu_{pe} = \omega_{pe}/2\pi$. Alternativně

$$\omega_{pe} \tau > 1, \quad (1.9)$$

kde $\tau = 1/\nu_{en}$ vyjadřuje průměrnou dobu, kterou elektron putuje mezi dvěma srážkami s neutrály. Čtvrtá podmínka pro existenci plazmatu také vyjadřuje, že průměrná doba mezi srážkami elektron-neutrál musí být velká ve srovnání s charakteristickou dobou, během níž se mění fyzikální parametry plazmatu.