

KARAKTERISTIČNI PARAMETRI PLAZME

OPISI PLAZMENIH SUSTAVA

Ovisno o stanju u kojem se neki plazmeni sustav nalazi (gustoća, temperatura, stupanj ionizacije, magnetsko polje, dimenzije sustava...) te ovisno o stupnju aproksimacije koji zahtijeva razjašnjenje neke pojave, koriste se različiti pristupi.

1. Osnovni je tzv. **JEDNOČESTIČNI PRISTUP**, u kojem se prati gibanje jedne čestice u zadanom električnom i magnetskom polju i na temelju toga se zaključuje o svojstvima i ponašanju cijelog sustava.

Takav opis nas zadovoljava kad imamo plazmu niske gustoće ($n < 10^{14} \text{ m}^{-3}$) i kad se može zanemariti doprinos električnog i magnetskog polja koji potječe od nabijenih čestica ukupnom vanjskom električnom i magnetskom polju.

Ovaj pristup se može primijeniti za kvalitativni opis solarnog vjetrova, driftnih gibanja nabijenih čestica u magnetkom i gravitacijskom polju Zemlje, elektronskih snopova u Sunčevoj atmosferi...

2. Osnova za jednočestični pristup je zahtjev da se električno i magnetsko polje određuje vanjskim izvorom te da gibanje nabijenih čestica ne utječe na vanjska polja.

U stvarnosti je to moguće kod plazme niske gustoće, a u većini stvarnih slučajeva ipak prisustvo čestica utječe značajno na električna i magnetska polja.

Kad su dimenzije plazmenog sustava mnogo veće od srednje udaljenosti čestica (srednjeg slobodnog puta), a vlastito vrijeme procesa mnogo duže od vremena koje protekne između dva sudara, plazma se može razmatrati kao fluid pa primjenjujemo **HIDRODINAMIČKI PRISTUP**.

Metoda se naslanja na mehaniku fluida i ne promatra se ponašanje jedne čestice već se prati ponašanje elemenata fluida koji sadrže mnogo čestica.

S obzirom da se radi o plazmi, bitna razlika od „običnog“ fluida je u tome što je plazma kao fluid koji sadrži naboje.

Najjednostavniji je tzv. **MAGNETOHIDRODINAMIČKI (MHD) OPIS**: plazma se smatra jednokomponentnim fluidom određene temperature, gustoće, tlaka i brzine, smatra se fluidom kojim mogu teći električne struje.

Ako nema promjene svih tih veličina u vremenu, kažemo da je sustav stacionaran.

Slučajevi, kad plazma miruje, opisuju se u **magnetohidrostatskoj aproksimaciji**, pri čemu su gibanja elektrona moguća, tj. postoje električne struje.

MHD pristup omogućuje opis razvoja makroskopskih plazmenih sustava i njihove stabilnosti, Alfvenovih valova, nekih vrsta nestabilnosti (npr. Rayleigh-Taylor nestabilnosti)...

MHD aproksimacija dobro opisuje globalna svojstva većine pojava vezanih za aktivnost Sunca.

U slučajevima vrlo velike vodljivosti, kad se uzima da je rezistivnost (otpornost) $= 0$, kažemo da se radi o **idealnim MHD procesima**.

U slučajevima kad je rezistivnost različita od 0, kažemo da se radi o **rezistivnim MHD procesima**.

3. U mnogim slučajevima plazmu možemo opisati u hidrodinamičkoj aproksimaciji, ali je potrebno voditi brigu o različitom ponašanju različitih vrsta čestica.

To se može raditi s tzv dvokomponentnim ili višekomponentnim MHD modelima, a najjednostavniji je **SCHLÜTEROV 2-KOMPONENTNI OPIS**.

Dobar je za opisivanje pojava poput Hallovo efekta (ako se na elektrone koji se gibaju pod utjecajem električnog polja primijeni magnetsko polje okomito na smjer njihovog gibanja, dolazi do njihovog nagomilavanja („razdvajanja“) što dovodi do pojave dodatnog pada napona u smjeru koji je okomit i na električno i na magnetsko polje), različitih vrsta valova, plazmenih nestabilnosti...

4. **KINETIČKA (GIROKINETIČKA) TEORIJA** daje najdetaljniji uvid u stanje plazme.

Jednočestični i hidrodinamički opis su dobri za većinu poznatih procesa u plazmenim sustavima.

No postoje pojave koje se ne mogu opisati ovako jednostavnim pristupom jer su posljedica promjena u **raspodjeli čestica po brzinama**.

U hidrodinamičkoj teoriji promjenjive veličine ovise samo o prostornim koordinatama i vremenu i to je uz pretpostavku da je u svakom elementu fluida **raspodjela svih vrsta čestica maxwellovska** – opis se jednoznačno radi pomoću temperature.

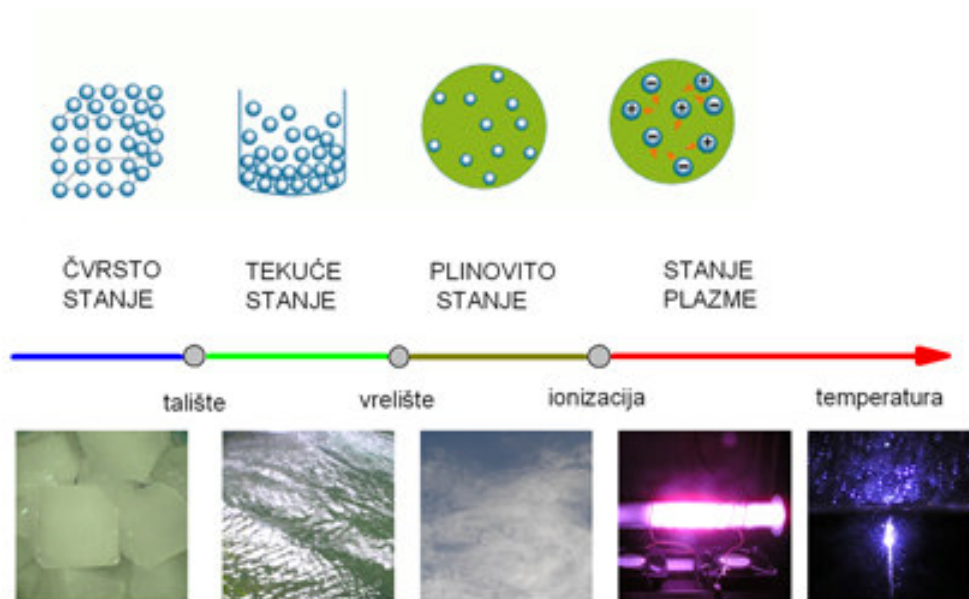
U plazmenim sustavima odstupanja od termodinamičke ravnoteže mogu potrajati relativno dugo jer su sudari među česticama rijetki.

Jedna nemaxwellova raspodjela se pretvara u drugu i to hidrodinamička teorija ne može razlučiti pa se uvodi nova **teorija temeljena na metodama statističke fizike**.

Plazma nije neutralan plin i značajan je utjecaj magnetskog polja što znači da se u ovom opisu ne prate promjene položaja i brzine svake čestice posebno već **promjene raspodjele brzina i položaja svih čestica** – zanima nas samo koliko je čestica u danom trenutku karakterizirano određenom brzinom i položajem – prate se **vremenske promjene funkcije raspodjele u faznom prostoru**.

Ova teorija se koristi za opis raznih vrsta valova i njihovih međudjelovanja, za opis međudjelovanja s nabijenim česticama, plazmenih mikronestabilnosti i mikroturbulencija, snopova čestica, Landauova prigušenja (proces u kojem val predaje energiju značajnom broju elektrona što dovodi do njegovog prigušenja) i kolektivnih procesa zračenja.

PROCESI IONIZACIJE I REKOMBINACIJE



Pri ionizaciji atoma potrebno je elektronu predati energiju dovoljnu za prijelaz iz vezanog stanja u slobodno stanje.

Elektron može primiti tu energiju na više načina:

- u neelastičnom sudaru dvaju atoma $A + A \rightarrow A^+ + e^- + A$
- u neelastičnom sudaru atoma i slobodnog elektrona $A + e^- \rightarrow A^+ + e^- + e^-$
- apsorpcijom fotona $A + h\nu \rightarrow A^+ + e^-$

Svi ti procesi su reverzibilni što znači da mogu ići i u suprotnom smjeru:

- $A^+ + e^- + A \rightarrow A + A$
- $A^+ + e^- + e^- \rightarrow A + e^-$
- $A^+ + e^- \rightarrow A + h\nu$

Prva skupina procesa su **proces i ionizacije**, a druga skupina **proces i rekombinacije**.

Proces u kojem zbog sudara nastupa ionizacija zovemo **sudarnom ionizacijom** (to su prva dva procesa).

Proces u kojem do ionizacije dolazi apsorpcijom fotona zovemo **fotoionizacijom** (to je treći proces).

Ovisno o učestalosti procesa ionizacije i procesa rekombinacije mijenja se stupanj ionizacije plazme dok se ne postigne ravnoteža.

Govorili smo o termodinamičkoj ravnoteži i teškom postizanju tog stanja.

Za plazmu smo rekli da je u **termodinamičkoj ravnoteži** ako sve vrste čestica (uključivši i fotone) imaju istu temperaturu te ne postoje temperaturni gradijenti i gradijenti gustoće. Stoga su detalji procesa ionizacije i rekombinacije vrlo složeni.

Stupanj ionizacije je omjer broja ioniziranih atoma i broja neutralnih atoma.

Plazma je: - **slabo ionizirana** ako je stupanj ionizacije $\leq 10^{-4}$, odnosno
 - **jako ionizirana** ako je stupanj ionizacije $\geq 0,1$.

Pri visokim temperaturama i gustoćama plazme atomi mogu biti i višestruko ionizirani.

Svaki novi stupanj ionizacije zahtijeva sve veću energiju za oslobađanje elektrona jer je naboj iona sve veći.

Npr. u jezgrama zvijezda vladaju vrlo visoke temperature (npr. u središtu Sunca 13 milijuna K) pa su atomi praktički potpuno ionizirani i često se koristi izraz „oljušteni atomi“.

Podsjetimo se **ionizacije vodikova atoma**.

Elektroni ne mogu kružiti oko jezgre po bilo kojim već samo po točno određenim kvantiziranim stazama koje nazovemo **dopuštenim ili stacionarnim stazama**.

Gibajući se po njima elektron se nalazi u stacionarnom stanju što znači da ne gubi energiju zračeći elektromagnetske valove.

Emisija svjetlosti se događa samo pri skoku elektrona s jedne stacionarne staze na drugu.

Pod dopuštenim stazama smatramo samo one na kojima je orbitalni moment količine gibanja cjelobrojni višekratnik reducirane Planckove konstante $\hbar = h/2\pi$, tj.

$$L = r_n m_e v_n = n\hbar \quad (*)$$

Prirodni broj $n = 1, 2, 3, \dots$ se naziva **glavni kvantni broj**.

Da bismo izračunali koliki je polumjer kvantne staze elektrona i energija elektrona na n -toj stazi, uzmemo u obzir da kulonska sila između protona i elektrona uzrokuje centripetalnu silu i primijenimo uvjet (*):

$$\frac{m_e v_n^2}{r_n} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r_n^2}$$

$$r_n = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 m_e v_n^2}$$

$$2\pi r_n m_e v_n = nh$$

$$r_n = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 m_e} \frac{4\pi^2 r_n^2 m_e^2}{n^2 h^2} \quad / : r_n$$

$$\epsilon_0 n^2 h^2 = e^2 \pi r_n m_e$$

$$r_n = n^2 \frac{\epsilon_0 h^2}{\pi m_e e^2} \quad n = 1, 2, \dots$$

Ovo je polumjer kvantne staze elektrona.

Ukupna energija elektrona sastoji se od potencijalne i kinetičke energije pa slijedi izračun jedne, odnosno druge:

$$E = E_k + E_p$$

$$E_k = \frac{1}{2} m_e v_n^2$$

$$r_n = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 m_e v_n^2}$$

$$E_k = \frac{1}{2} m_e \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 m_e r_n}$$

$$r_n = n^2 \frac{\epsilon_0 h^2}{\pi m_e e^2}$$

$$E_k = \frac{m_e e^4}{8\epsilon_0^2 n^2 h^2}$$

$$E_p = \int_r^\infty F dr = \int_r^\infty \left(-\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} dr \right) = -\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r}$$

$$E_p = -\frac{m_e e^4}{4\epsilon_0^2 n^2 h^2}$$

$$E = E_k + E_p$$

$$E_n = -\frac{1}{n^2} \frac{m_e e^4}{8\epsilon_0^2 h^2} \quad n = 1, 2, \dots$$

$$E_1 = -2.173 \cdot 10^{-18} \text{ J} = -13.6 \text{ eV}$$

$$E_2 = -3.4 \text{ eV}$$

$$E_3 = -1.5 \text{ eV}$$

⋮

Vidimo da je ukupna energija elektrona na n -toj kvantnoj stazi vezana uz glavni kvantni broj n .

Energija osnovnog stanja ($n = 1$) je E_1 – to je **energija vezanja** elektrona u atomu vodika ili energija koju je potrebno uložiti da bi se elektron oslobodio iz atoma i da bi se atom vodika ionizirao.

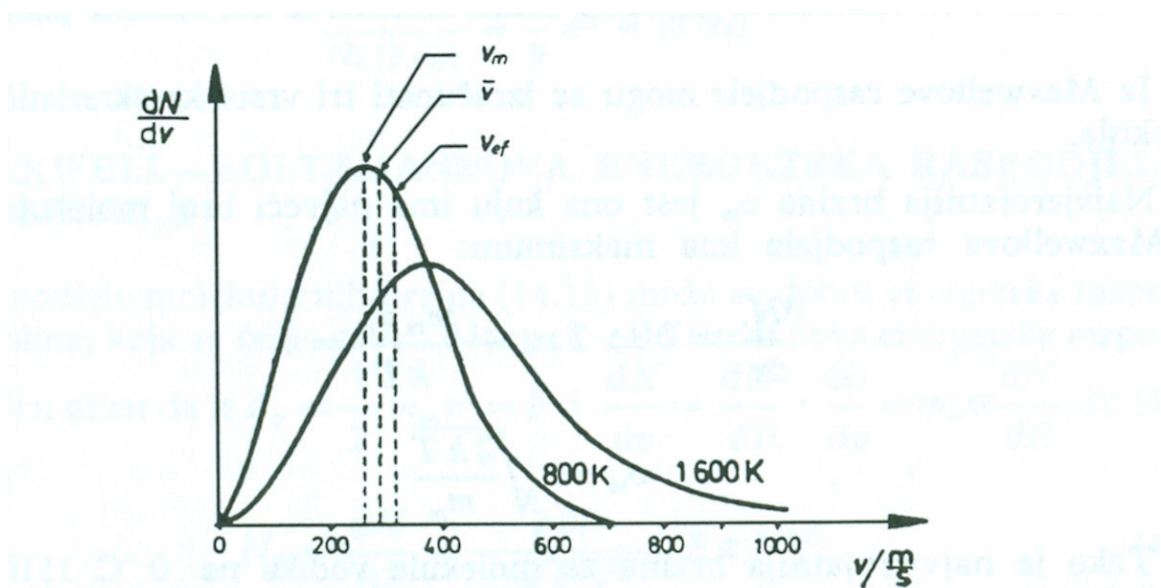
Zato se ona često zove **energijom ionizacije**.

Ako foton ionizira atom vodika u osnovnom stanju, znači da mora imati frekvenciju $\nu \geq E_1 / h = 3,3 \cdot 10^{15} \text{ Hz}$, odnosno valnu duljinu $\lambda \leq 90 \text{ nm}$, tj. mora pripadati visokoenergijskom dijelu spektra.

S druge strane, u sudarnim procesima, u neelastičnom sudaru atom može biti ioniziran samo ako je kinetička energija veća od energije ionizacije, što znači približno $kT \geq h\nu = E_1$, odakle je $T \approx 10^5 \text{ K}$.

Sudarna ionizacija će se događati i na nižim temperaturama jer u repu Maxwelllove raspodjele uvijek postoje čestice s brzinama mnogo većim od termičke brzine.

Primjer Maxwelllove raspodjele po brzinama.



Slika 14.4. Maxwellova raspodjela molekula živinih para po brzinama

$$N_v = \frac{dN}{dv} = \frac{4N}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{m_m}{2kT} \right)^{3/2} v^2 e^{-m_m v^2 / 2kT}$$

Stupanj ionizacije u termodinamičkoj ravnoteži za **slabo neidealnu plazmu** (plazma se ponaša gotovo **kao idealni plin** - u termodinamičkoj ravnoteži je, a u Debyejevoj sferi se nalazi vrlo veliki broj čestica) određen je **Saha-inom jednačinom**, koja u približnom obliku glasi:

$$\frac{n_i}{n_n} \approx 2,4 \cdot 10^{21} \frac{T^{3/2}}{n_i} \exp\left(-\frac{U_i}{kT}\right)$$

Ovdje su:

n_i - gustoća broja ioniziranih atoma (kod vodikove plazme jednaka je gustoći broja elektrona n_e),

n_n - gustoća broja neutralnih atoma,

U_i - energija ionizacije,

T - temperatura plina.

Eksponencijalni član predstavlja **doprinos sudarne ionizacije** – pri niskim temperaturama vrlo je malo atoma s brzinama dovoljno velikim da bi mogli uzrokovati ionizaciju sudarom – zato je stupanj ionizacije zanemariv.

Član $1/n_i$ je **rekombinacijski utjecaj** koji uravnotežuje proces ionizacije – učestalost procesa rekombinacije je proporcionalna gustoći elektrona što znači i n_i , a stupanj ionizacije je manji što je veća vjerojatnost rekombinacije.

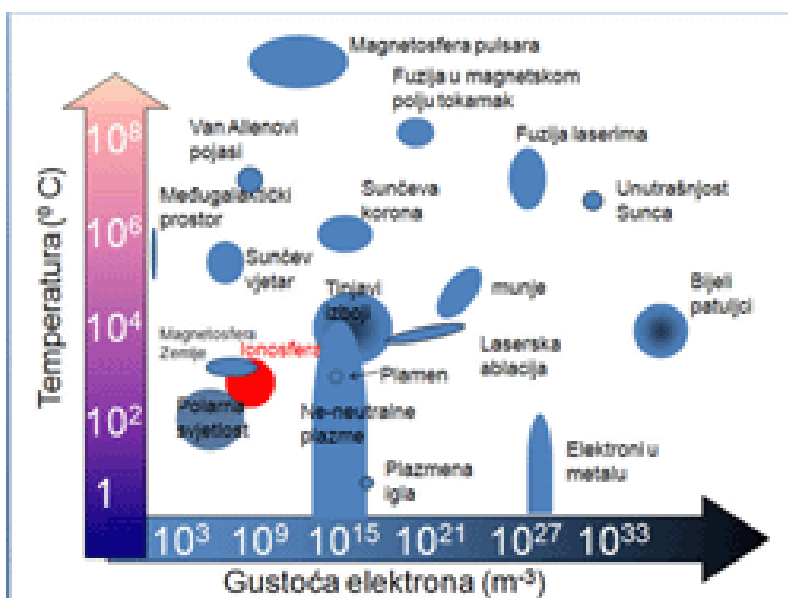
OSNOVNI PARAMETRI PLAZMENIH SUSTAVA

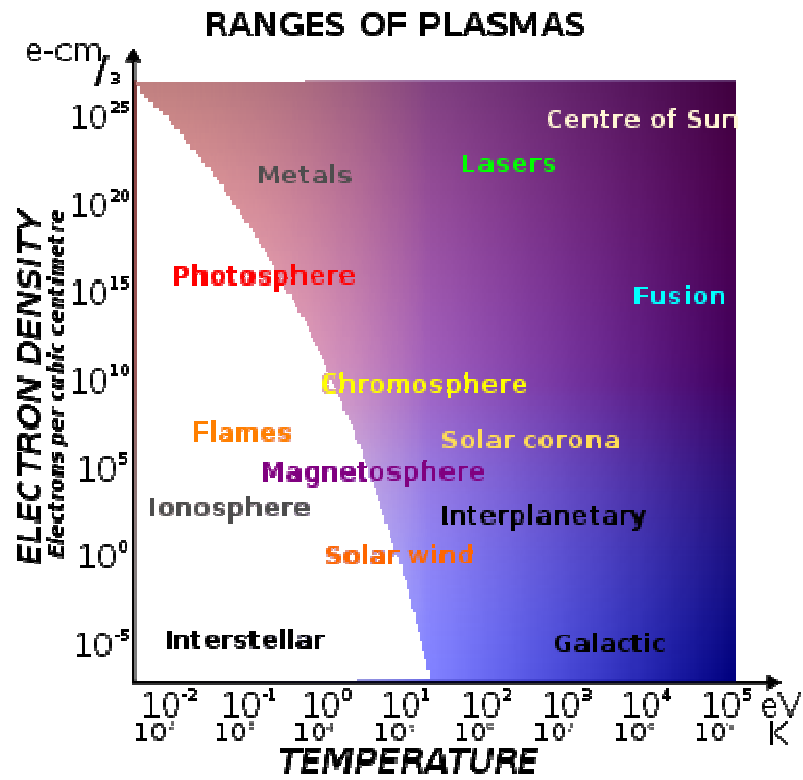
Stanje plazme može biti vrlo različito. Veličine kao što su gustoća, temperatura, magnetsko polje, stupanj ionizacije... pokazuju široki raspon vrijednosti.

Ponašanje različitih plazmenih sustava, od laboratorijskih do svemirskih, može biti vrlo slično bez obzira na vrlo velike razlike u vrijednostima parametara kojima su opisani.

Najčešće je ponašanje nekog plazmenog sustava određeno vrijednostima različitih bezdimenzijskih parametara.

Pogledat ćemo neke fizikalne veličine i neke bezdimenzijske parametre koji karakteriziraju plazmu.





Tipična područja parametara plazme		
Karakteristike	Plazme na Zemlji	Svemirske plazme
Veličina u metrima	10^{-6} m (<u>laboratorijske plazme</u>) do 10^2 m (<u>munje</u>)	10^{-6} m (<u>toplinska zaštita</u>) do 10^{25} m (<u>maglica</u>)
Trajanje u sekundama	10^{-12} s (<u>laserska plazma</u>) do 10^7 s (<u>fluorescentne svjetiljke</u>)	10^1 s (<u>Sunčeve baklje</u>) do 10^{17} s (<u>međugalaktička plazma</u>)
Gustoća čestice po kubičnom metru	10^7 m ⁻³ do 10^{32} m ⁻³ (<u>unutarnja ograničena plazma</u>)	1 m ⁻³ (<u>međugalaktička plazma</u>) do 10^{30} m ⁻³ (<u>jezgre zvijezda</u>)
Temperatura u <u>Kelvinima</u>	~ 0 K (<u>kristalna plazma</u>) do 10^8 K (<u>magnetska fuzijska plazma</u>)	10^2 K (<u>polarna svjetlost</u>) do 10^7 K (<u>Sunčeva jezgra</u>)
Magnetska polja u <u>Tesla</u>	10^{-4} T (<u>laboratorijske plazme</u>) do 10^3 T (<u>impulsne plazme</u>)	10^{-12} T (<u>međugalaktičkaplasma</u>) do 10^{11} T (<u>neutronske zvijezde</u>)

GUSTOĆA ČESTICA I TEMPERATURA ČESTICA. MAGNETSKO POLJE

U običnim materijalima se najčešće koriste 3 parametra da bi se odredilo stanje materijala: tlak, gustoća i temperatura. Bilo koja dva parametra mogu biti odabrana kao neovisne varijable. Plazma gotovo uvijek za svoj opis traži značajno više parametara.

Gustoća čestica:

Za plazmu koja se sastoji od elektrona i različitih tipova iona, potrebno je definirati gustoću svake vrste čestica.

S obzirom da elektroni i ioni drugačije reagiraju na elektromagnetske sile, njihove gustoće se moraju razmatrati kao neovisne varijable. To znači da plazma ne može biti okarakterizirana samo jednom gustoćom.

Gustoća se mjeri u broju čestica po m^3 .

Spomenimo npr. da je gustoća neutronske zvijezde za pedesetak redova veličina veća od gustoće međuzvjezdane plazme.

Temperatura:

Temperatura jedne vrste čestica je proporcionalna njihovoj srednjoj kinetičkoj energiji.

U termalnoj ravnoteži raspodjela čestica jedne vrste po brzinama je dana Maxwelllovom raspodjelom (prije smo već spomenuli), a vezano za to je srednja kinetička energija dana kao $\frac{3}{2}kT$ (proporcionalnost srednje kinetičke energije i temperature).

Temperatura se mjeri u elektron voltima (1 eV odgovara 11604,5 Kelvina).

Temperatura u međuzvjezdanim oblacima plazme je u granicama vrlo niskih vrijednosti reda veličine stotinjak kelvina (100 K) pa do vrlo visokih vrijednosti od stotinjak milijuna kelvina u procesima fuzije u laboratoriju ili jezgrama masivnih zvijezda.

Magnetsko polje:

Magnetsko polje se mjeri u T (Tesla).

Magnetska polja u međuzvjezdanom prostoru su reda veličine 10^{-10} T, u pjegama na Suncu reda veličine 0,1 T, a u neutronske zvijezde reda veličine 10^8 T.). Plazma nastaje dovođenjem energije plinu što utječe na temperaturu čestica, gustoću čestica i na magnetsko polje plazme.

Tablica 1. Vrijednosti nekih veličina u raznim plazmenim sustavima				
Sustav	n_e	n_{H}	T_e	B
	m^{-3}	m^{-3}	K	T
<i>Daleki svemir</i>				
Međugalaktički prostor	≤ 10	≈ 0	$10^5 \cdot 10^6$	$\leq 10^{-12}$
Međuzvjezdani prostor	$10^3 \cdot 10^7$	$10^4 \cdot 10^{11}$	10^2	10^{-10}
Međuplanetarni prostor	$10^6 \cdot 10^{10}$	≈ 0	$10^3 \cdot 10^6$	$10^{-10} \cdot 10^{-9}$
Planetarne maglice	$10^8 \cdot 10^{11}$	≈ 0	$10^3 \cdot 10^4$	$10^{-6} \cdot 10^{-7}$
<i>Sunce</i>				
Sunčev vjetar (1 a.j.) *	$10^5 \cdot 10^8$	≈ 0	$10^3 \cdot 10^6$	$10^{-10} \cdot 10^{-8}$
Sunčeve koronine šupljine	$10^{10} \cdot 10^{11}$	≈ 0	10^6	$10^{-6} \cdot 10^{-4}$
Sunčeve koronine petlje	10^{15}	≈ 0	$10^6 \cdot 10^7$	$10^{-4} \cdot 10^{-2}$
Sunčeve prominencije	$10^{16} \cdot 10^{17}$	$10^{15} \cdot 10^{17}$	10^4	$10^{-3} \cdot 10^{-2}$
Sunčeva kromosfera	$10^{16} \cdot 10^{18}$	$10^{16} \cdot 10^{18}$	10^4	10^{-1}
Sunčeva fotosfera	10^{19}	10^{23}	$6 \cdot 10^3$	$\leq 0,4$
Sunčeva jezgra	10^{32}	≈ 0	$1,5 \cdot 10^7$	
<i>Zemlja</i>				
Vanjska magnetosfera	$10^7 \cdot 10^9$	$10^7 \cdot 10^9$	10^3	$10^{-6} \cdot 10^{-7}$
Ionosfera	$10^9 \cdot 10^{12}$	$10^{10} \cdot 10^{12}$	$2 \cdot 10^2 \cdot 1,5 \cdot 10^3$	10^{-5}
Van Allenovi pojasi	10^9		10^7	10^{-6}
munja	$/$	10^{25}	$3 \cdot 10^4$	$/$
vatra	10^{14}	10^{25}	10^3	$/$
<i>Laboratorijski pokusi</i>				
Tinjavi izboj	10^{16}	$10^{16} \cdot 10^{20}$	$2 \cdot 10^4$	10^{-2}
Fuzijski reaktor	$10^{19} \cdot 10^{23}$	$10^{19} \cdot 10^{23}$	10^8	10
* 1 a.j.=udaljenost Sunce - Zemlja				

BEZDIMENZIJSKI PARAMETRI

Plazmeni parametar:

$$\beta = 2\mu_0 p / B^2$$

Plazmeni parametar predstavlja omjer tlaka plazme p i magnetskog tlaka $B^2 / 2\mu_0$, gdje je μ_0 permeabilnost vakuuma.

Plazmeni parametar određuje odnos gustoće unutrašnje energije plazme i gustoće energije magnetskog polja, a može se prikazati i kao omjer brzine zvuka i Alfvénove brzine.

Općenito govoreći kad je $\beta \ll 1$, gradijent tlaka plina u jednadžbi gibanja treba uzeti u obzir samo uzduž magnetskih silnica.

Takvo stanje nalazimo u većem dijelu Sunčeve atmosfere i atmosferama magnetskih zvijezda.

Obrnutu situaciju nalazimo izvan magnetskog polje (npr. meteor, munja, vatra, izboj) ili pak u plazmi velike gustoće i temperature (tokamak, jezgre zvijezda).

Reynoldsov magnetski broj:

$$R_M = lu / \eta$$

Ovdje su: l dimenzija sustava, u brzina plazme, a $\eta = 1 / \mu_0 \sigma$ je magnetska difuzivnost (σ je električna vodljivost).

Reynoldsov magnetski broj mjeri odnos konvektivnoga gibanja magnetoplazme i difuzije magnetskog polja.

Ako je $R_M \gg 1$, konvektivna gibanja dominiraju te je magnetsko polje u plazmi „zamrznuto” - plazma se ne može gibati okomito na magnetsko polje, nego jedino duž silnica.

Takvo stanje nalazimo u većini astrofizičkih situacija uglavnom zbog vrlo velikih dimenzija plazmenih sustava, a donekle i zbog vrlo velike električne vodljivosti plazme σ .

Alfvénov broj:

$$A = \mu_0 \rho u^2 / B^2$$

To je omjer dinamičkog tlaka plazme i magnetskog tlaka (omjer gustoće kinetičke energije i gustoće magnetske energije).

Ako je kinetička energija veća od magnetske, gibanje plazme „povlači” silnice za sobom.

U obrnutom slučaju magnetsko polje kontrolira gibanje plazme pa ona može „teći” samo uzduž silnica.

Omjer elektronske plazmene frekvencije i elektronske ciklotronske frekvencije:

$\omega_{pe} = (n_e e^2 / \epsilon_0 m_e)^{1/2}$ je elektronska plazmena frekvencija.

$\Omega_{Be} = eB / m_e$ je elektronska ciklotronska frekvencija.

Ovdje su: n_e elektronska gustoća, e naboj elektrona, m_e masa elektrona, a ϵ_0 dielektričnost vakuumu.

Ovaj omjer je vrlo važan u procesima širenja raznih vrsta valova, nastanku i prijenosu elektromagnetskog zračenja u radiovalnom području te plazmenim nestabilnostima.

$\omega_{pe} / \Omega_{Be} \gg 1$ vrijedi u većem dijelu Sunčeve atmosfere, dok je obrnuto u Sunčevoj fotosferi i podfotosferskim slojevima.

Tablica 2. Tipične vrijednosti nekih bezdimenzionalnih parametra u raznim plazmenim sustavima

Sustav	β	ω_{pe}/Ω_{Be}	A
<i>Daleki svemir</i>			
međuzvjezdani prostor	10^{-4} -1	10^2 - 10^4	1 - 10^4
međuplanetarni prostor	10^{-2} - 10^2	10^2 - 10^4	$\gg 10^3$
planetarne maglice	10^{-2} - 10^2	10^2 - 10^4	1 - 10^4
<i>Sunce</i>			
Sunčev vjetar (1 a.j.) [*]	≈ 1	$\approx 10^2$	≈ 1
Sunčeve koronine šupljine	10^{-3} -1	1 - 10^2	10^{-3} -1
Sunčeve koronine petlje	10^{-3} -1	1 - 10^2	10^{-6} - 10^{-3}
Sunčeve prominencije	10^{-4} - 10^{-1}	1 - 10^2	10^{-6} -1
Sunčeva kromosfera	10^{-6} - 10^{-2}	10^{-1} - 10^2	10^{-6} - 10^{-3}
Sunčeve pjeg	$>10^{-4}$	10	10^{-6}
<i>Zemlja</i>			
Vanjska magnetosfera	10^{-4} -1	10 - 10^3	10^{-6} -1
Ionosfera	10^{-3} - 10^{-2}	10^2	10^{-6}
Van Allenovi pojasi	10^{-1} -1	10	10^{-6}
Fuzijski reaktor	10^{-1}	1	-
[*] 1.a.j.=udaljenost Sunce Zemlja			