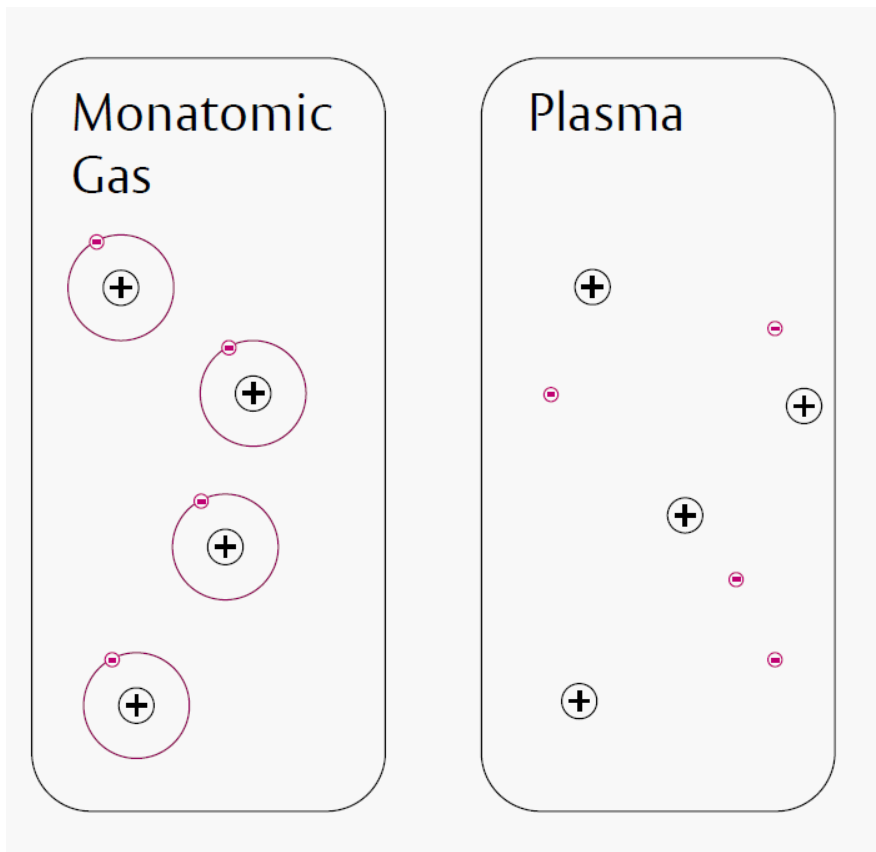


2.

Plazmafizikai alapfogalmak

Dósa Melinda

Mi a plazma?



PLAZMA:

Ionizált gáz, melyre igaz:

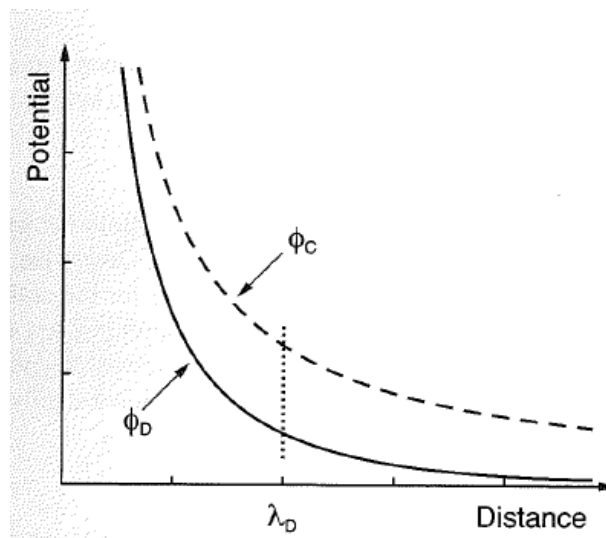
- kívülről semleges (=kvázineutrális)
- kollektív tulajdonsággal rendelkezik (egy részecske egyszerre több részecskével hat kölcsön, árnyékolás működik)

Mi a plazma?

Debye-féle árnyékolási távolság

= a potenciál hatótávolsága plazmában (e-ad részére csökken)

1. Pontszerű próbatöltést plazmába helyezünk - töltésátrendeződés megindul.
2. A próbatöltés tere az átrendeződés miatt jóval kisebb távolságban érezhető, mint egyébként.



$$\Phi_c(r) = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r}$$

$$\Phi_D(r) = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r} \exp\left(-\frac{r}{\lambda_D}\right)$$

árnyékolt Coulomb potenciál
= Yukawa-potenciál

Mi a plazma?

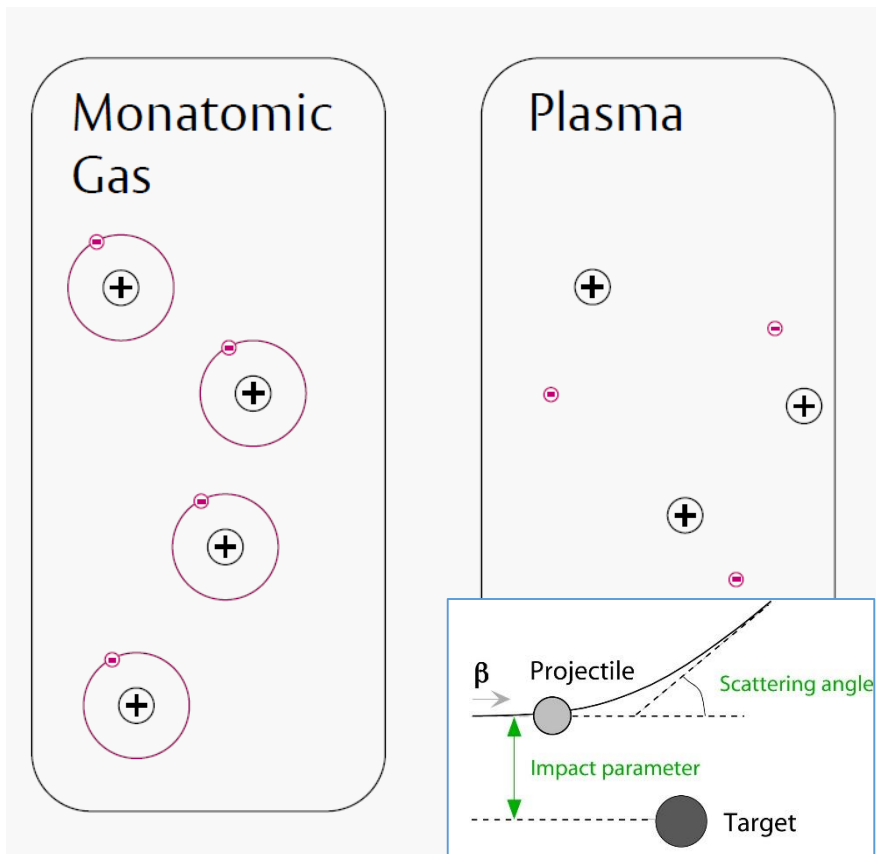
Debye-féle árnyékolási távolság
= a potenciál hatótávolsága plazmában

- adott plazmára jellemző karakterisztikus hossz
- néhány *Debye-hosszon túl* már nem érezhető a próbatöltés hatása, semleges a plazma
- *Debye-hosszon belül* nincs semlegesség, itt zajlik az átrendeződés és árnyékolás
- az a hossz, ahol egyensúly van a polarizáció és a termikus mozgás hatásai között.
termikus mozgás: a semlegességet megzavarja
elektrosztatikus potenciál: a semlegességet helyreállítani igyekszik

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{\epsilon_0 k_B T}{ne^2}}$$

-függ a sűrűségtől és a hőmérséklettől!

Mi a plazma?



GÁZ:

- rövid hatótávolságú erők
érvényesülnek

*Ütközések: csak 2 részecske között,
Newtoni, ún. "head-on" ütközés*

PLAZMA:

Ionizált gáz, melyre igaz:

- kívülről semleges (=kvázineutrális)
- elektromágneses terek révén hosszú hatótávolságú erők (minden részecske egyszerre többel hat kölcsön)
- kollektív tulajdonság: árnyékolás érvényesül

Ütközések: Coulomb ütközés

Mi a plazma?

Plazmafrekvencia (Langmuir-frekvencia)

= töltött részecskék rezgése egy elméleti semleges állapot körül

Egyensúlyi sűrűség (ion- és elektronsűrűség): n_0

Próbatöltést behelyezünk, a könnyű, mozgékony elektronok elmozdulnak:

$$n(x, t) = n_0 + n'(x, t)$$

Elektronok mozgásegyenlete:

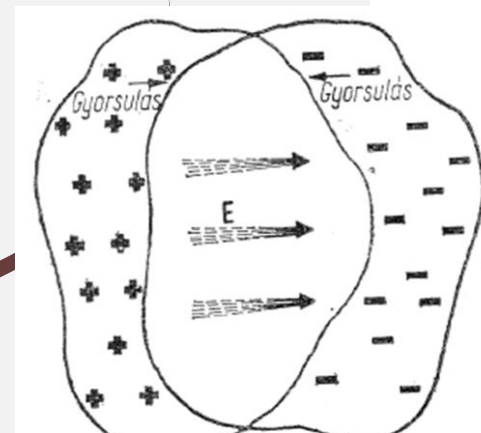
$$m \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} = -q * \bar{E}$$

Maxwell-egyenlet / Gauss-törvény:

$$\text{div } \bar{E} = \frac{q}{\epsilon_0} (-n'(x, t))$$

Kontinuitási egyenlet:

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \text{div}(n * \bar{v}) = 0$$



Mi a plazma?

Plazmafrekvencia (Langmuir-frekvencia)

= töltött részecskék rezgése egy elméleti semleges állapot körül

Kontinuitási egyenlet:

$$\frac{\partial n'}{\partial t} + n_0 * \text{div}(\vec{v}) = 0$$

Felírjuk:

$$\frac{\partial}{\partial t} \text{Kont},$$

Mozgásegyenlet,

Gauss tv



$$\frac{\partial^2 n'}{\partial t^2} + \frac{n_0 q^2}{m \epsilon_0} n' = 0$$

Rezgést leíró egyenlet, ahol:

$$\omega = \sqrt{\frac{n_0 q^2}{m \epsilon_0}}$$

Elektron-plazmafrekvencia

Mi a plazma?

Plazmafrekvencia (Langmuir-frekvencia)

= töltött részecskék rezgése egy elméleti semleges állapot körül

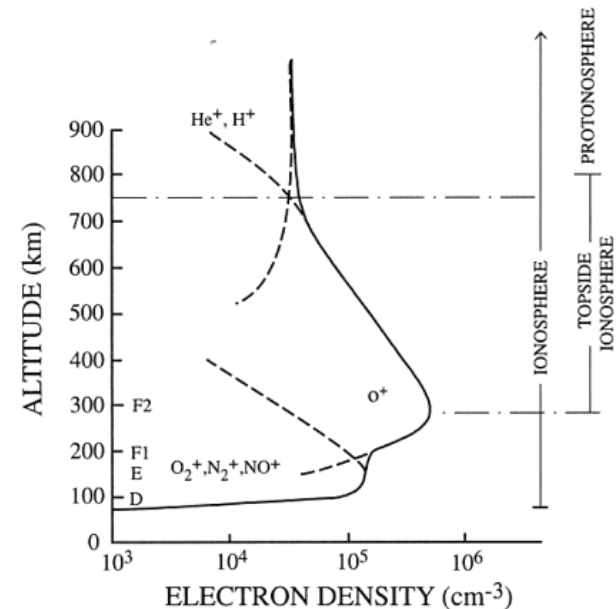
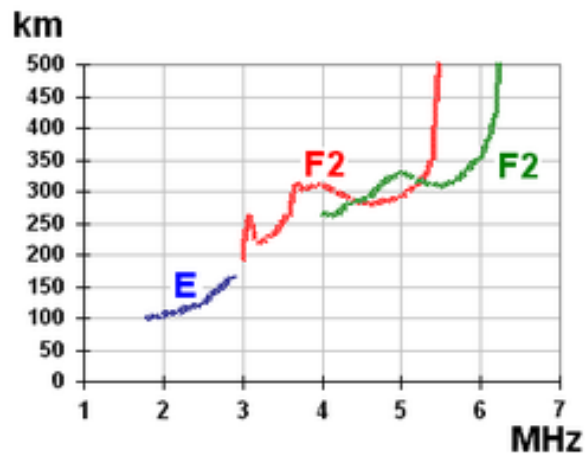
- adott plazmára jellemző karakterisztikus időskála

$$\omega_{pe} = \sqrt{\frac{n_e e^2}{m_e \epsilon_0}}$$

Jelentősége:

$$\omega_{pe} \sim \sqrt{n_0}$$

Felhasználás:
ionoszonda, ionogram



Mi a plazma?

Három Kritérium:

1. $\lambda_D \ll L$

Legyen elég nagy tér, hogy az árnyékolás érvényesülhessen.

2. $\Lambda \stackrel{\text{def}}{=} n_e \lambda_D^3 \gg 1$

ahol Λ a plazmaparaméter, a Debye-gömbön belüli részecskék száma: $N_D = \frac{4\pi}{3} n_e \lambda_D^3$

Legyen elegendő részecske, hogy legyen, ami árnyékolni tud.

3. $\omega_{pe} \gg \frac{1}{\tau_n}$

ahol τ_n az átlagos idő két elektron-semleges részecske ütközés között

Tudjon rezegni a plazma, ne akadályozza ebben a sok ütközés.

Plazma keletkezése

GÁZ FŰTÉSE

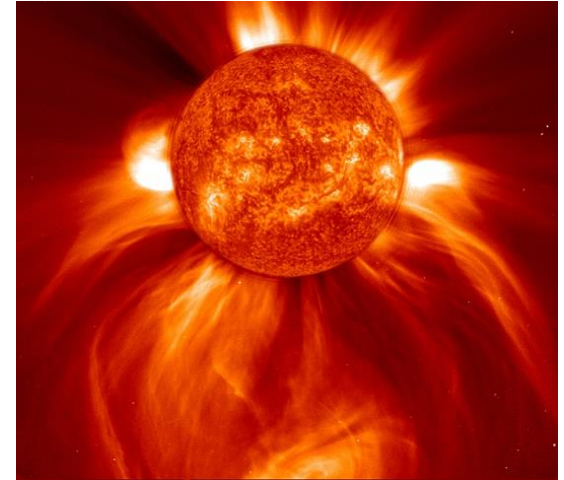
- termikus fűtés / összenyomás
- termodinamikai egyensúly feltételezhető
- az egyes részecsketípusokra Maxwell-Boltzmann alakú sebességeloszlást feltételezünk, azaz jellemezhetjük őket (termikus) hőmérséklettel

IONIZÁCIÓ

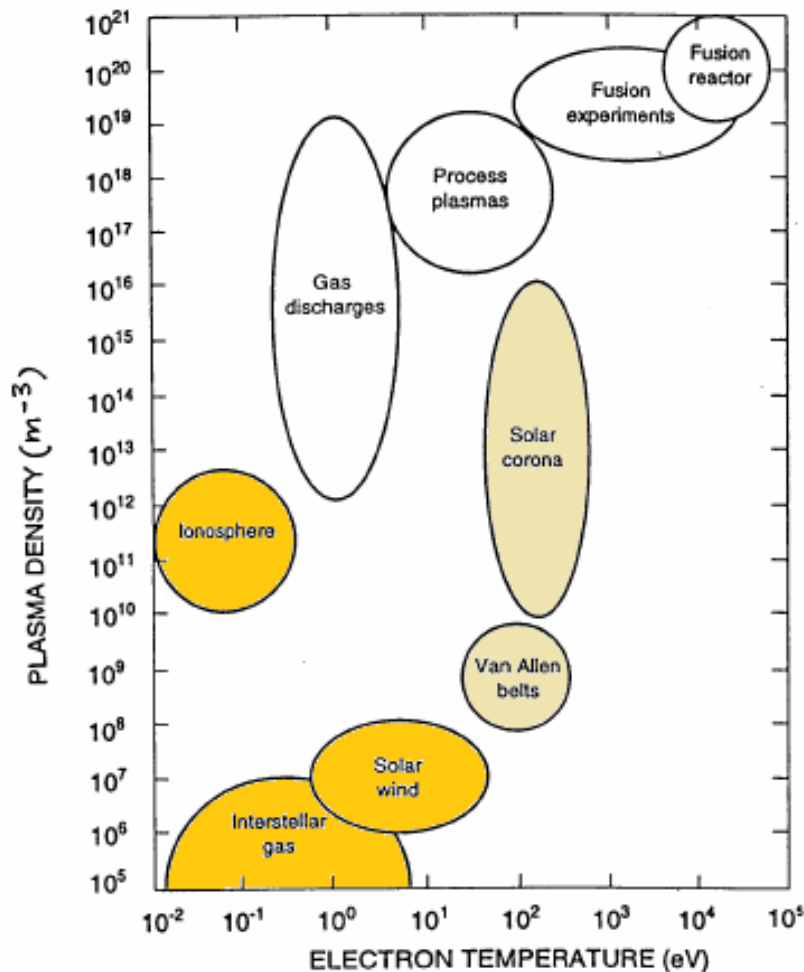
(EM sugárzás (EUV) / elektronnyaláb)

→ nem termikus plazma

- termodinamikai egyensúly nem áll fenn, nincs egyértelmű hőmérséklet
- *vagy*: különböző részecskéket jellemző hőm. erősen eltérő lehet



Plazmák a természetben



hideg, meleg, sűrű, ritka...

→ ütközéses vagy ütközés nélküli ?

Az űrplazmák lehetnek:

-hideg, ritka, ütközésmentes plazmák:

napszél

-hideg, sűrű, ütközéses v. mentes:

ionoszféra

-forró, ritka, ütközésmentes: *napkorona*,
sugárzási öv

fentiek meghatározzák, hogy milyen fizikai leírással vizsgáljuk az adott plazmát (ld. köv. ea)

Plazmajellemzők

- plazmasűrűség / ionizáltság mértéke (0.1% - 1% - 100%)
- kinetikus vs termikus hőmérséklet
- Debye-hossz, plazmaparaméter
- plazmafrekvencia (elektron - ion)
- Coulomb ütközési frekvencia / szabad úthossz
- vezetőképesség
- hangsebesség, Mach-szám
- diszperziós reláció ($\omega^2 = \omega_p^2 + k^2 c^2$)
- stb.

Mágneses plazmák:

B_0 kitüntetett irány

„T” irányonként is változó lehet

ÖSSZETEVŐNKÉNT!

vezetőképességek !

Alfvén sebesség

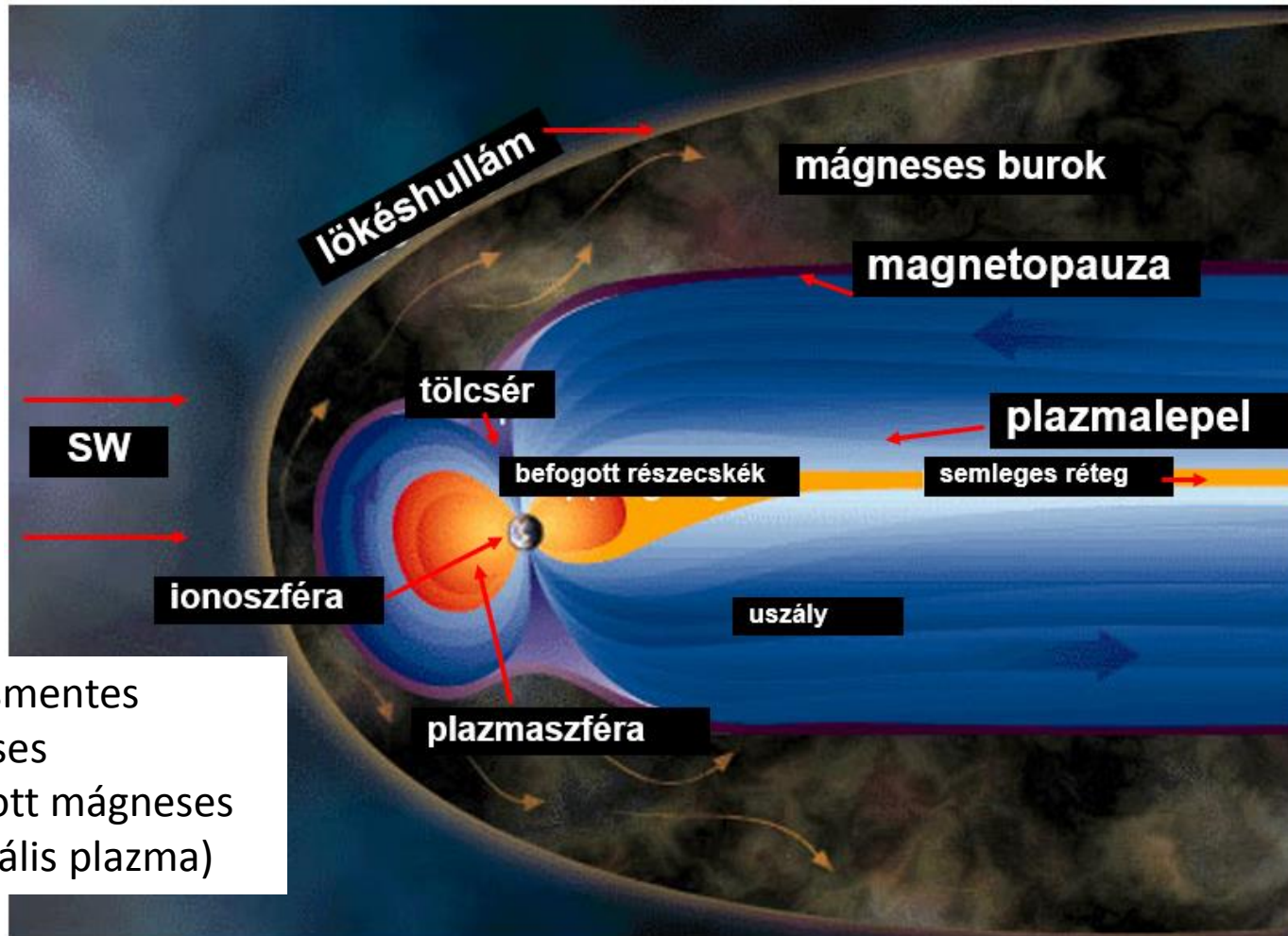
többféle hullám (pl. magnetoszonikus)

+ plazma- β

+ mágneses Reynolds-szám

+ mágneses diffúzió

Űrplazmák jellemzői



- ütközésmentes
- mágneses
- befagyott mágneses tér (ideális plazma)

Saját mágneses térrel ÉS légkörrel bíró bolygó plazmakörnyezete

Űrplazmák jellemzői

	Hőmérséklet (K)	Sűrűség (1/m ³)	λ_D (m)
Ionosféra	10^3	10^{12}	0.002
Magnetosféra	10^4 - 10^7	10^6	7-200
Napszél	10^5	$5 \cdot 10^6$	10
Napkorona	10^6	10^{15}	0.002

	Skála	Legkisebb	Skálaméret
Napszél	hossz	10 m	1AU $\sim 1.5 \cdot 10^{10}$ m
	idő	0.01 ms ($f_{pe} \sim 10$ kHz)	napok
Magnetosféra	hossz	10-100 m	$6 \cdot 10^8$ m
	idő	0.1 ms ($f_{pe} \sim 1$ kHz)	órák/ napok
Ionosféra	hossz	0.002 m	10^2 m
	idő	0.1 μ s ($f_{pe} \sim 10$ MHz)	órák

Plazma mozgása \vec{E} és \vec{B} térben

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) + m\vec{g} + \dots$$

HA CSAK elektromos tér van:

- gyorsítás E-vel párhuzamos, de ionra és elektronra ellentétes irányban hat
- elektronok tömege kisebb - jobban gyorsulnak
- E irányában áram alakul ki.

HA CSAK mágneses tér van:

- ha $v \parallel B \rightarrow v \times B = 0$.
- B irányában nincs elmozdulás, nincs munkavégzés.
- ha $v \perp B \rightarrow v \times B = \text{MAX}$
- A sebességvektor elfordul! **GIRÁCIÓ**
- ha $v \nparallel B \rightarrow$ **HELIKÁLIS PÁLYA**

Plazma mozgása \vec{E} és \vec{B} térben

A GIRÁCIÓ / HELIKÁLIS PÁLYA MEGJELENÉSE

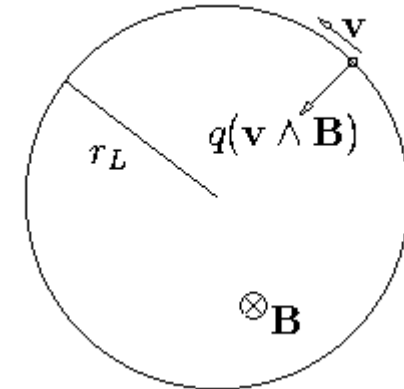
Körpályára felírjuk a mozgási egyenletet:

$$m \frac{v_{\perp}^2}{r} = qBv_{\perp}$$

rendezve:

$$\frac{v_{\perp}}{r} = \frac{q}{m} B = \omega_c \dots \text{ciklotronfrekvencia [1/s]}$$

$$r = \frac{mv_{\perp}}{qB} \quad r_L \dots \text{ciklotron / girosugár}$$



Tehát:

$$r \sim \text{Impulzus}$$

Larmor-sugár

→ Milyen pályán mozog egy részecske, ha sebessége szöget zár be a mágneses térrel? És, ha még egy, a B-vel párhuzamos E tér is jelen van?

Plazma mozgása \vec{E} és \vec{B} térben

Többféle erőtér egyidejűleg: DRIFTEK megjelenése

Elektromos drift: $E \perp B$

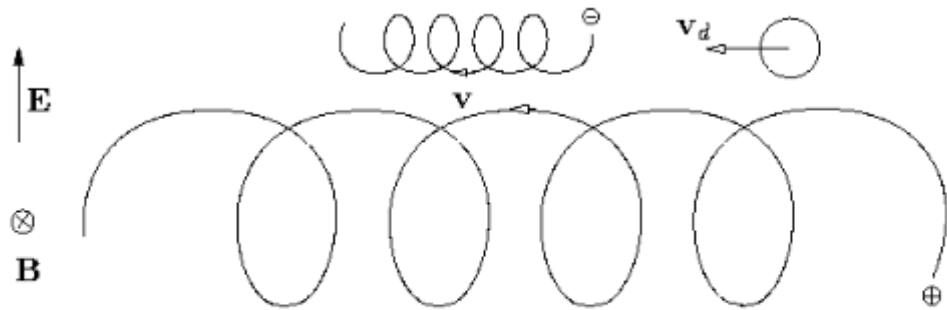
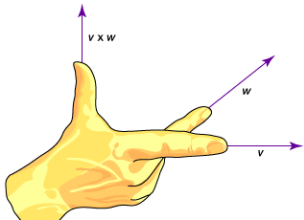


Figure 2.3: $E \wedge B$ drift orbit



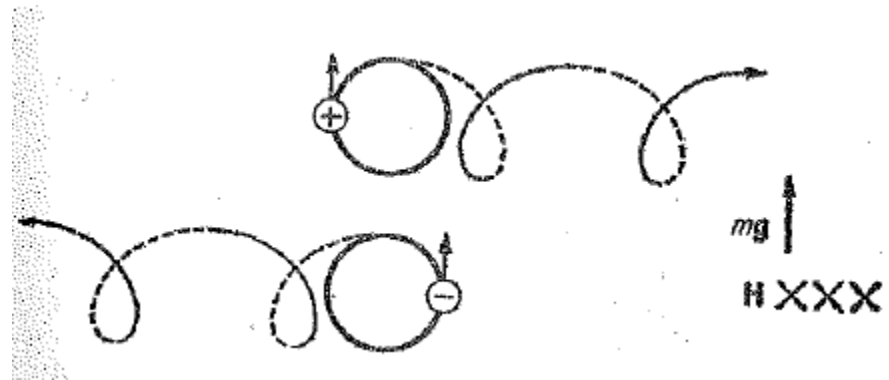
v_d ...driftsebesség: a ciklotronmozgás középpontja, mint vezetőcentrum mozog egyenletes sebességgel. Töltésfüggetlen!
Nincs elektromos áram!

$$v_d = \frac{\vec{E} \times \vec{B}}{B^2}$$

Plazma mozgása \vec{E} és \vec{B} térben

Többféle erőter egyidejűleg: DRIFTEK megjelenése

Mechanikai/gravitációs drift: $G \perp B$



v_d ...driftsebesség a töltés előjelétől függ! → Töltésszétválasztó hatás! (polarizáció)
Áram megjelenik!

$$v_d = \frac{1}{q} \frac{\vec{G} \times \vec{B}}{B^2}$$

Plazma mozgása \vec{E} és \vec{B} térben

Többféle erőtér egyidejűleg: DRIFTEK megjelenése

Inhomogenitási drift: $\text{grad } B \perp B$

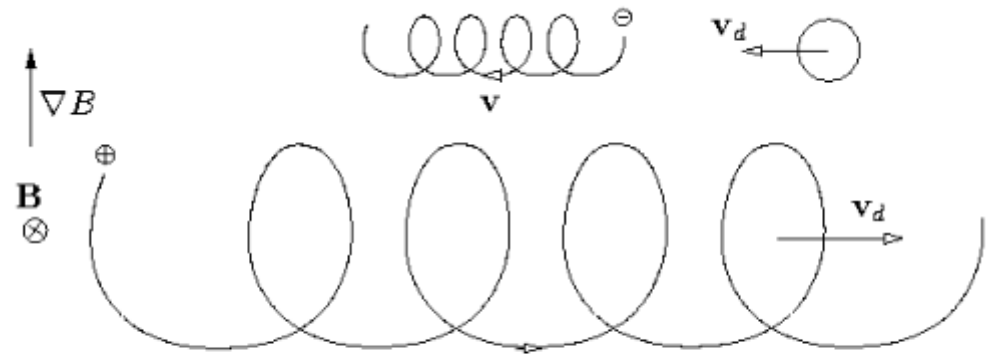


Figure 2.4: ∇B drift orbit

v_d Keresztirányban driftel, nem mozdul el sem a sűrűbb, sem a ritkább B tér felé.
A töltés előjelétől függ! → Töltésszétválasztó hatás!

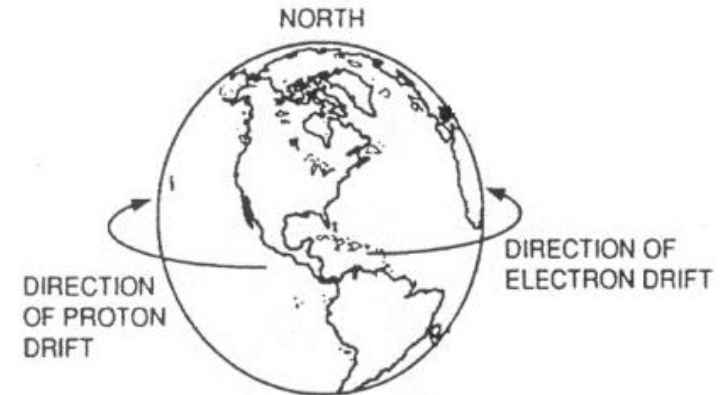
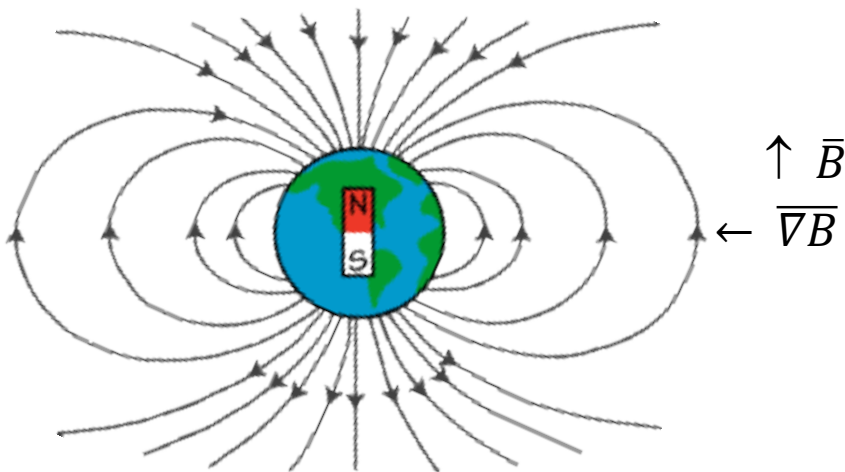
$$v_d = \frac{1}{q} \frac{mv_{\perp}^2}{2B} \frac{\vec{B} \times \nabla B}{B^2}$$

Plazma mozgása \vec{E} és \vec{B} térben

Többféle erőtér egyidejűleg: DRIFTEK megjelenése

Inhomogenitási drift: $\text{grad } B \perp B$

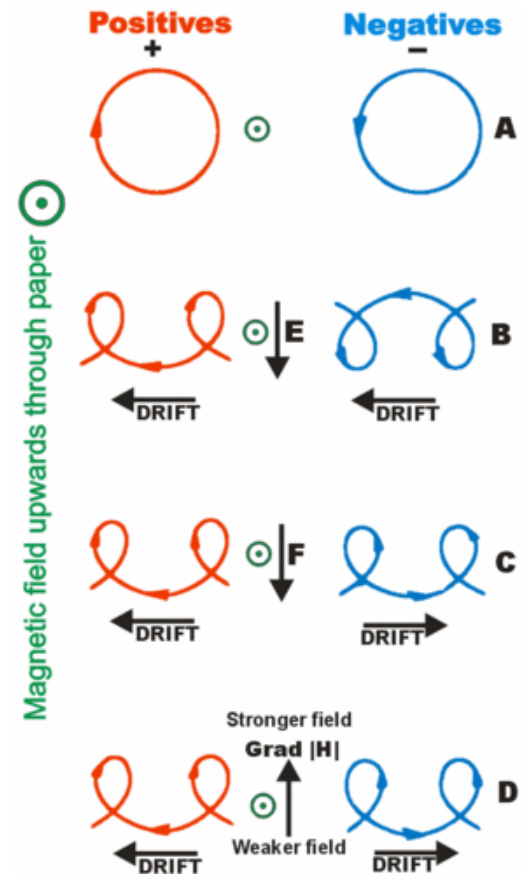
v_d Keresztirányban driftel, nem mozdul el sem a sűrűbb, sem a ritkább B tér felé.
A töltés előjelétől függ! → Töltésszétválasztó hatás!



GYŰRŰÁRAM

Plazma mozgása \vec{E} és \vec{B} térben

Többféle erőter egyidejűleg: DRIFTEK megjelenése



Plazma mozgása \vec{E} és \vec{B} térben

ADIABATIKUS INVARIÁNSOK

\approx körülbelüli megmaradási törvény

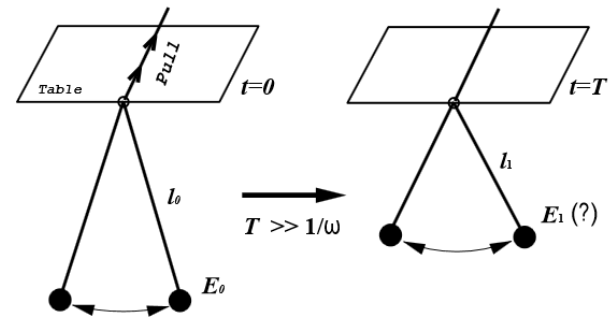


Minden olyan dinamikai rendszer, mely

1. leírható a Hamilton függvényekkel (azaz olyan konzervatív dinamikai rendszer, melynek összenergiája állandó. Pld: az inga mozgása során kinetikus energia alakul potenciális energiává, és vissza.)
2. periodikus mozgás van benne

valamely paraméterében bekövetkező lassú változás során (τ , ahol a lassú a periódushoz képest értendő)

felmutat egy nagyjából állandó fizikai mennyiséget / arányszámot.



Adiabatikus invariánsok

Első adiabatikus invariáns: A ciklotronmozgást végző részecske mágneses térben állandó μ mágneses nyomatékkal rendelkezik, lassú változások esetén.

Impulzusnyomaték:

$$N = r_c m v_{\perp} = \frac{v_{\perp}^2 m^2}{qB} = \text{const}$$

$$\frac{v_{\perp}^2}{B} = \text{const.}$$

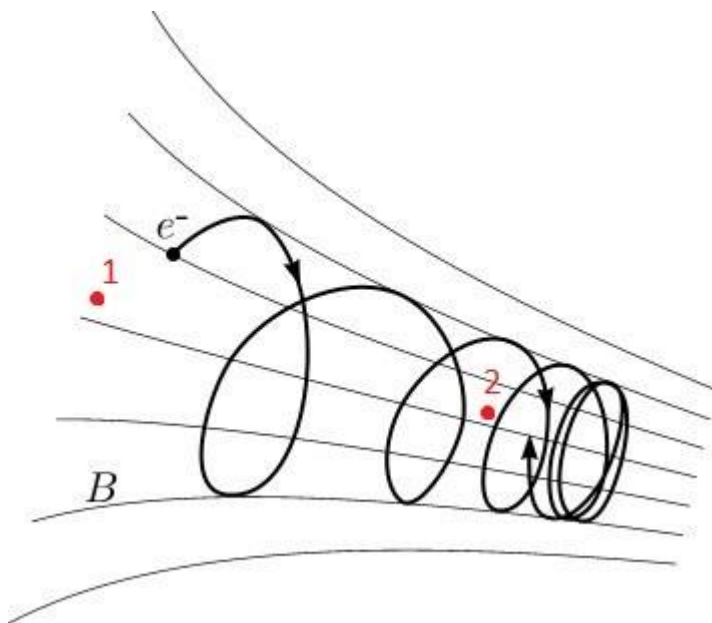
A mágneses nyomaték:

$$\mu = \frac{E_{\perp}}{B} = \frac{\frac{1}{2} m v_{\perp}^2}{B} = \frac{\frac{1}{2} m v^2 \sin^2 \alpha}{B} = \text{const.}$$

Adiabatikus invariánsok

Első adiabatikus invariáns: A ciklotronmozgást végző részecske mágneses térben állandó μ mágneses nyomatékkal rendelkezik.

Következmény: Konvergáló erővonalaknál tükörponti mozgás



→ a mozgási összenergia állandó
→ a mágneses nyomaték állandó

$$\frac{v_{1\perp}^2}{B_1} = \frac{v_{2\perp}^2}{B_2}$$

Mivel $B_1 < B_2 \rightarrow v_{1\perp} < v_{2\perp}$. (\perp -en gyorsul)

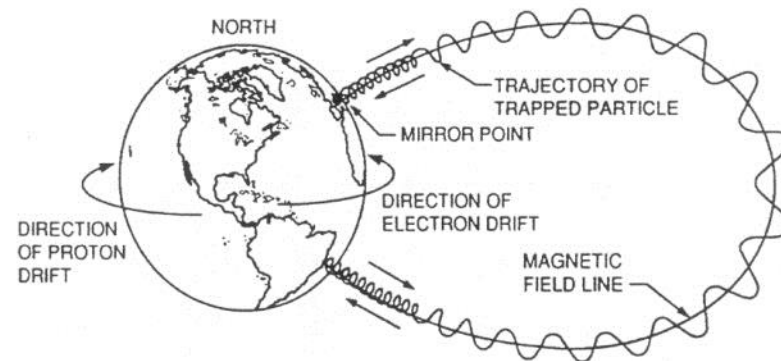
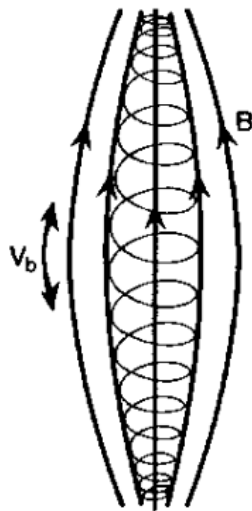
De mivel az összenergia állandó →
 v_{\parallel} csökkenni fog!

tükörpont: ahol a mágneses irányszög 90°
v elfordul, a részecske megáll.

Adiabatikus invariánsok

Első adiabatikus invariáns: A ciklotronmozgást végző részecske mágneses térben állandó μ mágneses nyomatékkal rendelkezik.

Következmény: Konvergáló erővonalaknál tükörponti mozgás.
A Föld mágneses tere esetén: mágneses palack.



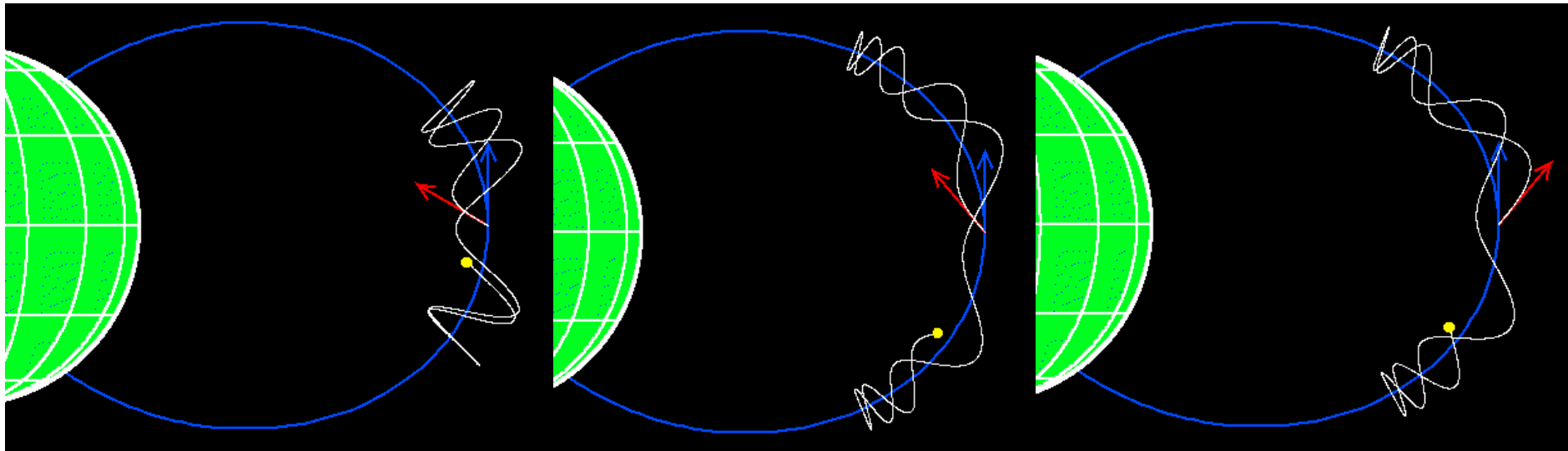
Adiabatikus invariánsok

Első adiabatikus invariáns: A ciklotronmozgást végző részecske mágneses térben állandó μ mágneses nyomatékkal rendelkezik.

Következmény: Konvergáló erővonalaknál tükörponti mozgás

→ Hol lesz a tükörpont?

A mágneses irányszögtől függ. A mágneses irányszög a részecske sebességvektorának a mágneses érintővel bezárt szöge. (pitch angle)



Adiabatikus invariánsok

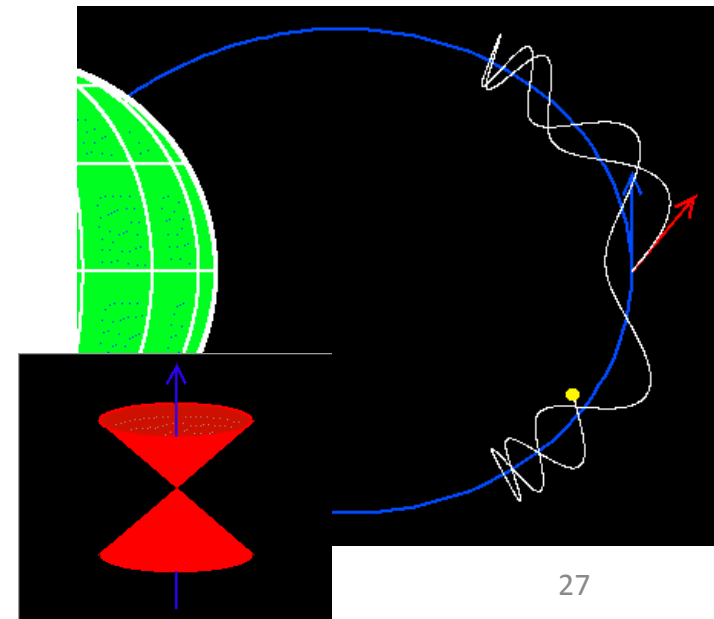
Első adiabatikus invariáns: A ciklotronmozgást végző részecske mágneses térben állandó μ mágneses nyomatékkal rendelkezik.

Következmény: Konvergáló erővonalaknál tükörponti mozgás

→ Hol lesz a tükörpont?

A mágneses irányszögtől függ. A mágneses irányszög a részecske sebességvektorának a mágneses érintővel bezárt szöge. (pitch angle)

veszteségi kúp: egy bizonyos kritikus mágneses irányszög esetén a részecske tükörpontja a Föld belsejében (vagy 100 km körüli magasságban) van. Ekkor a részecske kiszóródik a sűrű ionoszférában, nem tér vissza a mágneses erővonalra.



Adiabatikus invariánsok

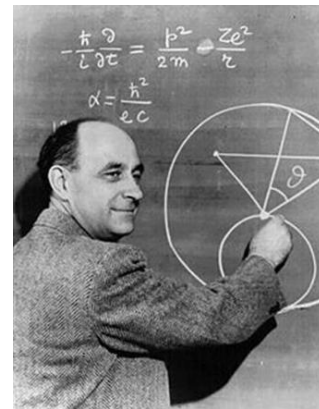
Második adiabatikus/ longitudinális invariáns: A két tükörpont között pattogó mozgást végző részecske, mint dinamikus rendszer esetén a következő mennyiség állandó:

$$J = \oint_M m v_{\parallel} ds$$

Feltéve: a magnetoszféra mágneses tere állandó, vagy csak nagyon lassan változik. A pattogás periódusa MeV energiájú elektronoknál és protonoknál néhány másodperc, ennél lassabb változás esetén J invariáns.

1. *Következmény:* Amennyiben a két tükörpontot közelítjük egymáshoz, a részecske gyorsul (Fermi-gyorsítás)

2. *Következmény:* A Föld mágneses tere nem szimmetrikus, az erővonalak nem egyforma hosszúak, a tükörpontok közti távolságok sem ugyanazok. Mégis, a Föld körül egy kört megtéve, a részecske ugyanarra az erővonalra ér vissza, ahonnan indult. Nem sodródik radiálisan ki vagy be.



Adiabatikus invariánsok

Harmadik/Fluxus adiabatikus invariáns: A Föld körül körbedriftelő részecske, mint dinamikus rendszer esetén egy keringés során körbeölelt mágneses fluxus állandó:

$$K = q \Phi$$

Feltéve: a magnetoszféra mágneses tere nyugodt, vagy csak nagyon lassan változik. A keringés periódusa MeV energiájú elektronoknál és protonoknál órák nagyságrendű, keV energiájúaknál néhány napos. Ennél lassabb változás esetén K invariáns.

Következmény a Föld körüli térségben: Ha a napszél lassan nyomja össze a magnetoszférát, a töltött részecske radiálisan befelé fog sodródni, hogy megőrizze a körbeölelt fluxust. Ilyenkor közelebb kerül a gyűrűáram a Földhöz.

Adiabatikus invariánsok

ÖSSZEFOGLALÁS

Periodikus mozgás, amin alapszik	Az invariáns	Feltétel	Következménye a Földnél
giráció (Larmor)	mágneses momentum (μ)	$\tau \gg \tau_L$	tükörponti pattogás
pattogás (bouncing)	longitudinális invariáns (J)	$\tau \gg \tau_b \gg \tau_L$	a részecske megőrzi a drift-pályáját
driftelés	fluxus invariáns (K)	$\tau \gg \tau_D \gg \tau_b \gg \tau_L$	lassú változáskor a részecske radiálisan ki/be sodródik (erővonallal együtt)

Ellenőrző kérdések

1. Mi a különbség a gáz és a plazma halmazállapot között?
2. Mi a Debye-hossz, mi a plazmafrekvencia?
3. Milyen pályán mozog egy részecske, ha sebessége szöget zár be a mágneses térrel, és a B-vel párhuzamos E tér is jelen van?
4. Hogyan működik az elektromos/mechanikai/inhomogenitási drift? Melyik töltésszérválasztó?
5. Merre irányulnak a töltésszérválasztó driftek proton és elektron esetén? Rajzold le!
6. Mely drift(ek) hatása elhanyagolható a hideg (=lassú) elektronokra, és miért?
7. Hogyan alakul ki a gyűrűáram a Föld körül?
8. Mi az első/második/harmadik adiabatikus invariáns, és mi a következménye?
9. Hány adiabatikus invariáns érvényesül a napszélben, és miért?
10. Hogyan mozog egy töltött részecske a Föld mágneses környezetében és miért?

Mi a plazma?

A plazma hőmérséklete

Emlékeztető: klasszikus hőmérséklet (termikus / kinetikus)

- sebesség bármelyik momentumából származtatható
- hőmérsékleti egyensúlyban lévő gáz részecskéinek sebességeloszlása Maxwell-i.
- Maxwell-Boltzmann eloszlásnál mindegyik momentum ugyanazt a hőmérsékletet adja, tehát általában a következő definíciót használjuk:
- ideális gáztörvény + kinetikus gáztv: sebességből (négyzetes középérték) származtatható
- skaláris mennyiség

$$\left[\frac{1}{2} m v^2 \right] = \frac{3}{2} k T$$

És a plazma?

- nem ideális gáz
- ált. nem egyensúlyi rendszer

plazma (termikus) hőmérséklete: egyensúlyt feltételeztünk, Maxwelli eloszlással.

Komponensenként és irányonként eltérő lehet.

plazma kinetikus hőmérséklete: bármilyen eloszlásfgv-ből levezethető, nem szükséges a termodinamikai egyensúly. Komponensenként és irányonként eltérő lehet.