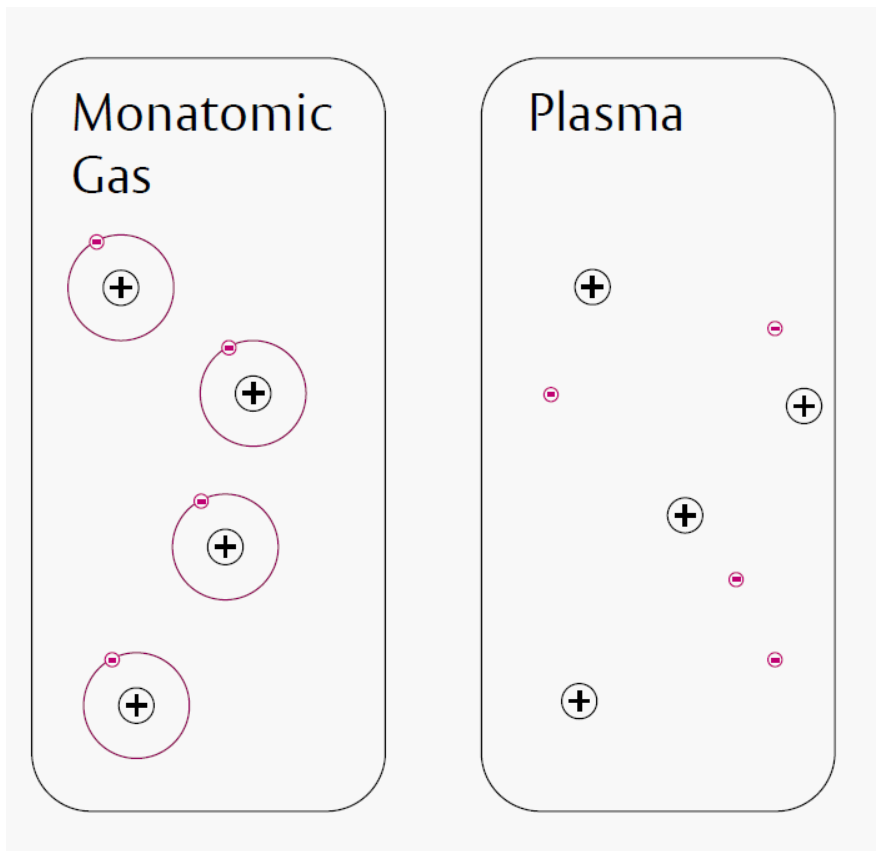


# 2.

# Plazmafizikai alapfogalmak

Dósa Melinda

# Mi a plazma?



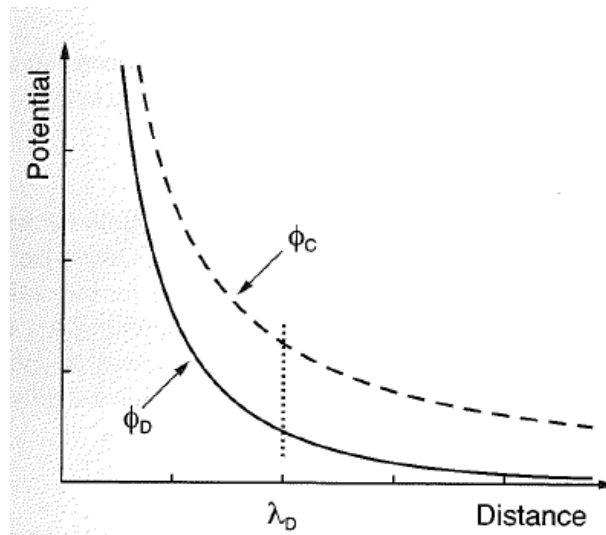
Ionizált gáz, melyre igaz:

- kívülről semleges (=kvázineutrális)
- kollektív tulajdonsággal rendelkezik (árnyékolás működik)

# Mi a plazma?

Debye-féle árnyékolási távolság  
= a potenciál hatótávolsága plazmában

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



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

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

# Mi a plazma?

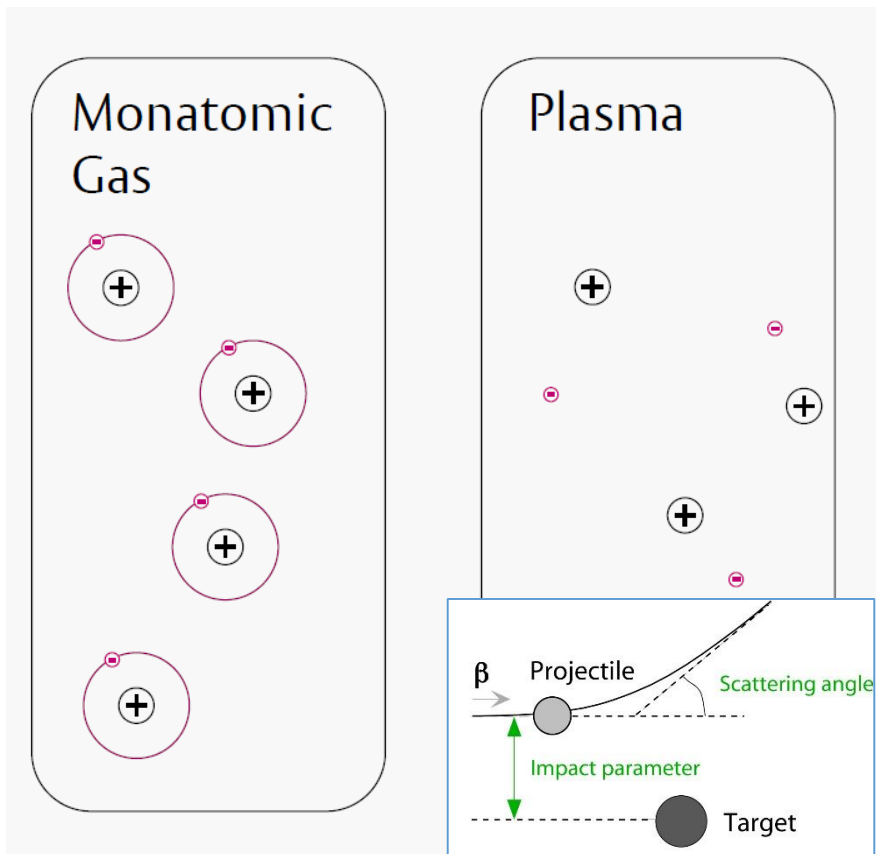
Debye-féle árnyékolási távolság  
= a potenciál hatótávolsága plazmában

- adott plazmára jellemző karakterisztikus hossz
- *Debye-hosszon túl* már nem érezhető a próbatöltés hatása, semleges a plazma
- *Debye-hosszon belül* nincs semlegesség
- 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 hőmérséklettől!

# Mi a plazma?



## GÁZ:

- rövid hatótávolságú erők érvényesülnek

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

## PLAZMA:

- elektromágneses terek révén hosszú hatótávolságú erők (minden részecske egyszerre többel hat kölcsön)

- kollektív tulajdonság: árnyékolás érvényesül

*Ütközések: Coulomb ütközés*

# Mi a plazma?

## Plazmafrekvencia

= töltött részecskék rezgése egy elméleti semleges állapot körül

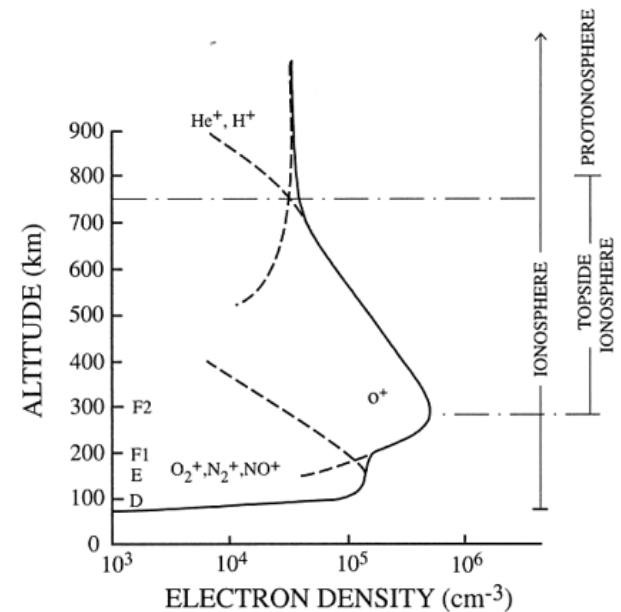
- adott plazmára jellemző karakterisztikus időskála

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

A képlet származtatása....

Jelentősége:

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



# 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  $\Lambda$  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.  $\omega_{pe} \tau_n \gg 1$

ahol  $\tau_n$  az átlagos idő két elektron-semleges részecske ütközés között

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

# Mi a plazma?

## A plazma hőmérséklete?

### klasszikus hőmérséklet (termikus / kinetikus)

- ideális gáztörvény + kinetikus gáztv: sebességből (négyzetes középérték) származtatható
- Maxwell-Boltzmann sebességeloszlás érvényes
- skaláris mennyiség

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

### plazma hőmérséklete ?

- 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.



# Mi a plazma?

Hogyan keletkezhet plazma?

**FŰTÉS** → (ált) termikus plazma

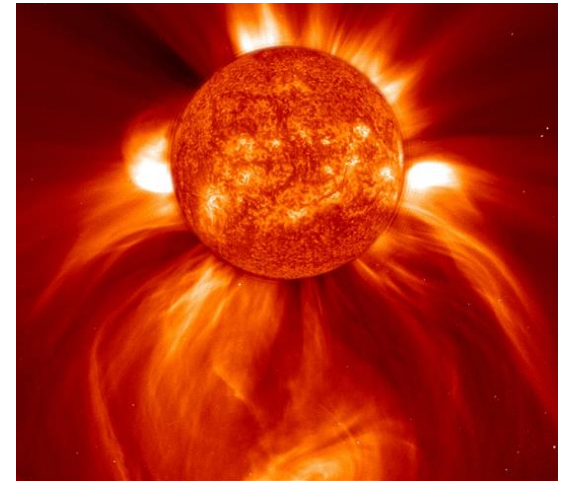
- termodinamikai egyensúly feltételezhető
- az egyes részecsketípusokra Maxwell-Boltzmann alakú sebességeloszlást feltételezünk, azaz jellemezhetjük őket (termikus) hőmérséklettel

**IONIZÁCIÓ**

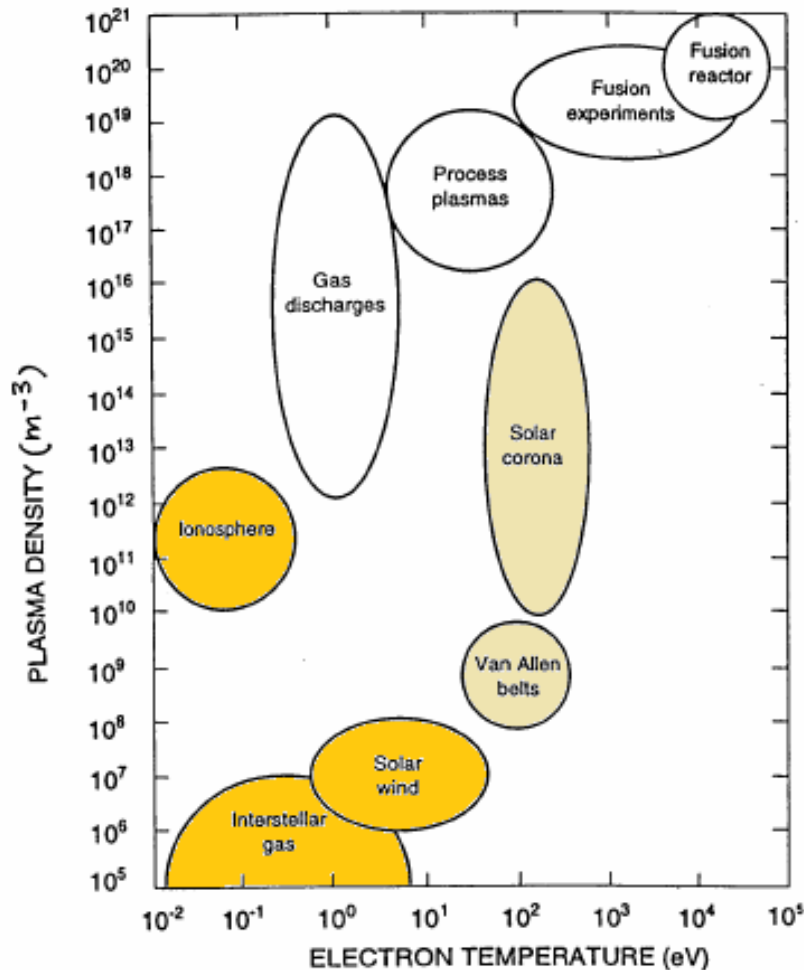
(EM sugárzás (EUV) / elektronnyaláb)

→ (ált) nem termikus plazma

- termodinamikai egyensúly nem áll fenn, nincs hőm.  
*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)*

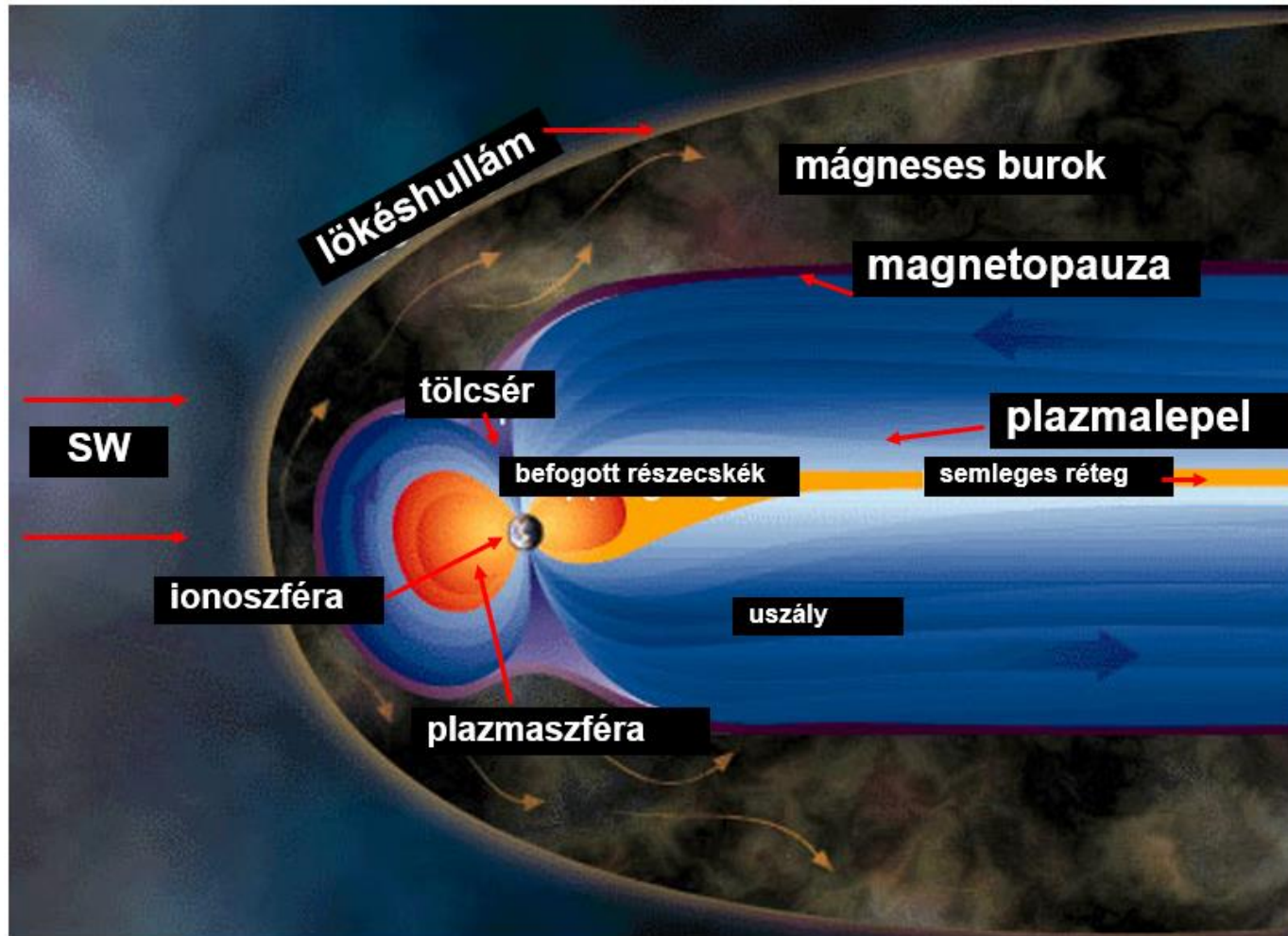
# Plazmajellemzők

- plazmasűrűség / ionizáltság mértéke (0.1% - 1% - 100%)
- kinetikus vs termikus hőmérséklet
- Debye-hossz
- plazmaparaméter
- plazmafrekvencia (elektron - ion)
- Coulomb ütközési frekvencia, elektron szabad úthossza
- **vezetőképesség**
- hangsebesség, Mach-szám

## *Mágneses plazmáknál:*

- kinetikus hőmérséklet irányonként is változó lehet
- **vezetőképességek !**
- plazma- $\beta$  (kinetikus nyomás / mágneses nyomás)
- Alfvén-sebesség
- mágneses Reynolds-szám
- mágneses diffúzió

# Űrplazmák jellemzői



Saját mágneses térrel ÉS légkörrel bíró bolygó plazmakörnyezete

# Űrplazmák jellemzői

	Hőmérséklet (K)	Sűrűség (1/m <sup>3</sup> )	$\lambda_D$ (m)
Ionosféra	$10^3$	$10^{12}$	0.002
Magnetosféra	$10^4$	$10^6$	7
	$10^7$	$10^6$	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 $\mu$ s ( $f_{pe} \sim 10$ MHz)	órák

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

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

HA CSAK elektromos tér van:

- gyorsítás E-vel párhuzamos, de ionokat és elektronokat ellentétes irányban
- 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:

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

átrendezve:

$$\frac{v_{\perp}}{r} = \frac{q}{m} B$$

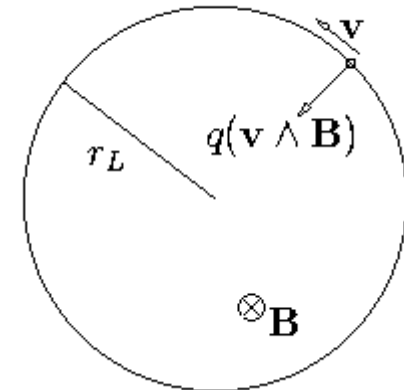
[1/s]  $\omega_c$ ... ciklotronfrekvencia

$$r = \frac{mv_{\perp}}{qB}$$

$r_L$ ...ciklotronsugár /  
Larmor-sugár

Tehát:  $r \sim \text{Energia}$

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



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

Többféle erőtér egyidejűleg: DRIFTEK megjelenése

Elektromos drift:  $E \perp B$

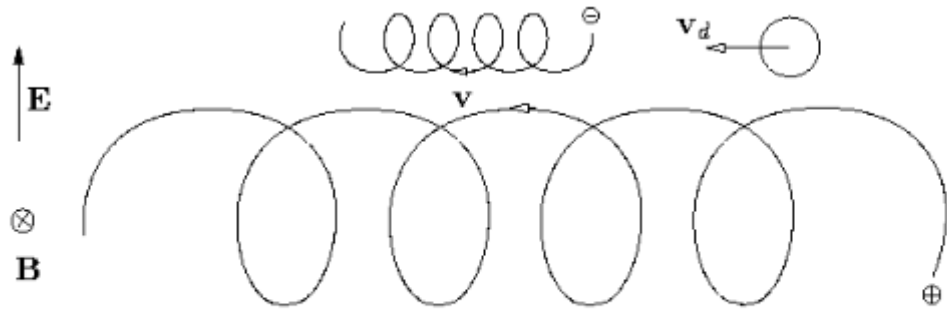


Figure 2.3:  $\mathbf{E} \wedge \mathbf{B}$  drift orbit

$v_d$ ...driftsebesség: a ciklotronmozgás középpontja, mint vezetőcentrum mozog egyenletes sebességgel. Töltésfüggetlen!

Nincs elektromos áram!

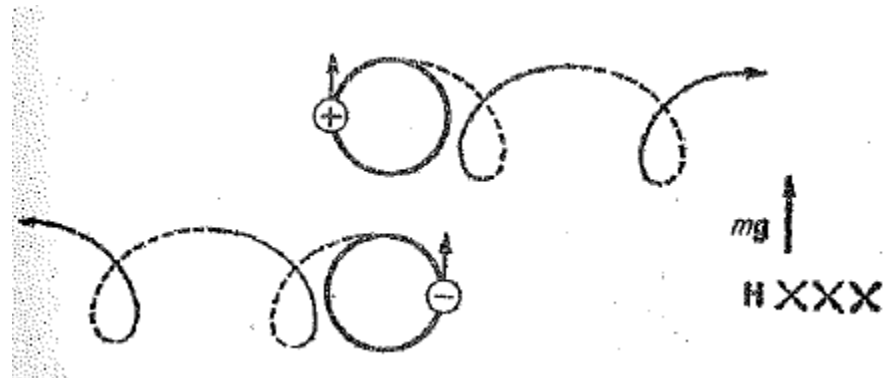
$$v_d = \frac{\vec{E} \times \vec{B}}{B^2}$$



# 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!  
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:  $\text{grad } B \perp B$

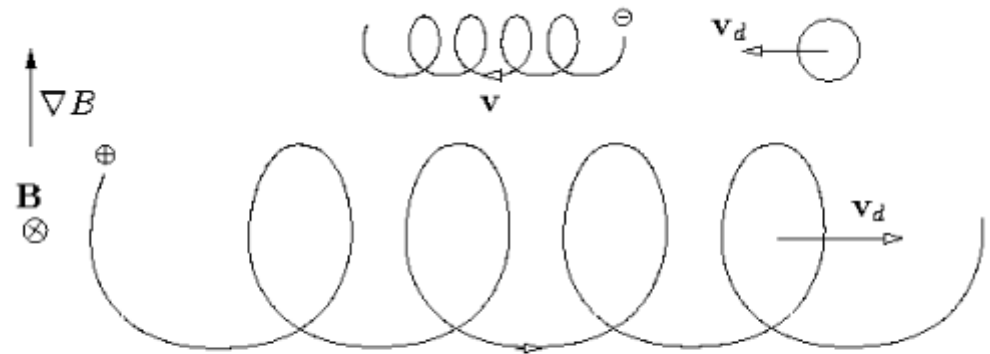


Figure 2.4:  $\nabla B$  drift orbit

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

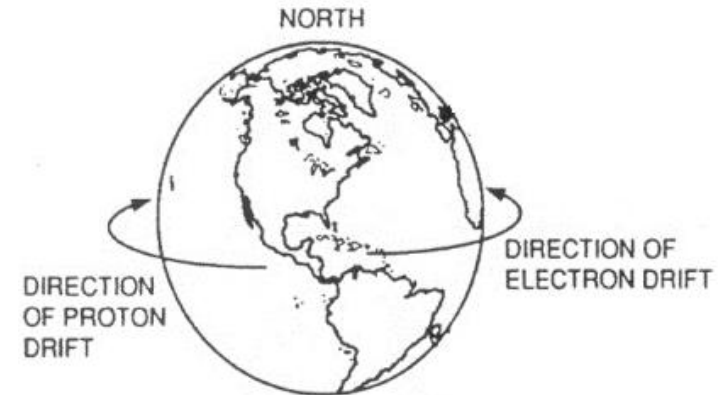
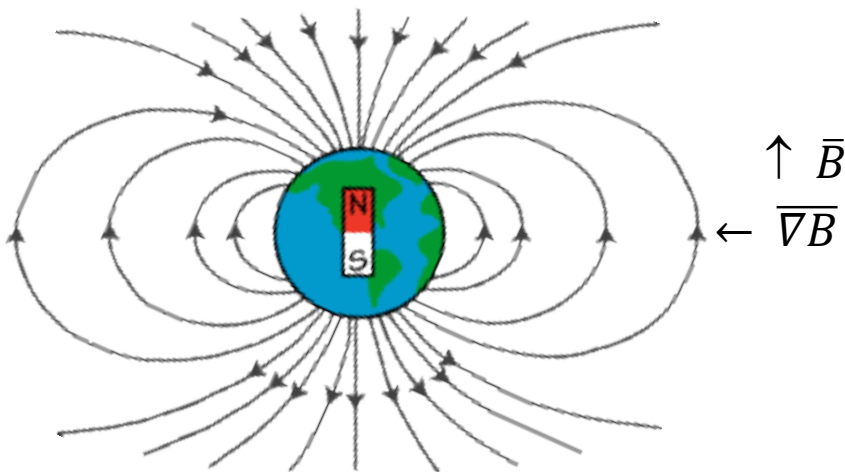
$$v_d = \frac{1}{q} \frac{mv_{\perp}^2}{2B} \frac{\vec{B} \times \nabla B}{B^2}$$

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

Többféle erőtér egyidejűleg: DRIFTEK megjelenése

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

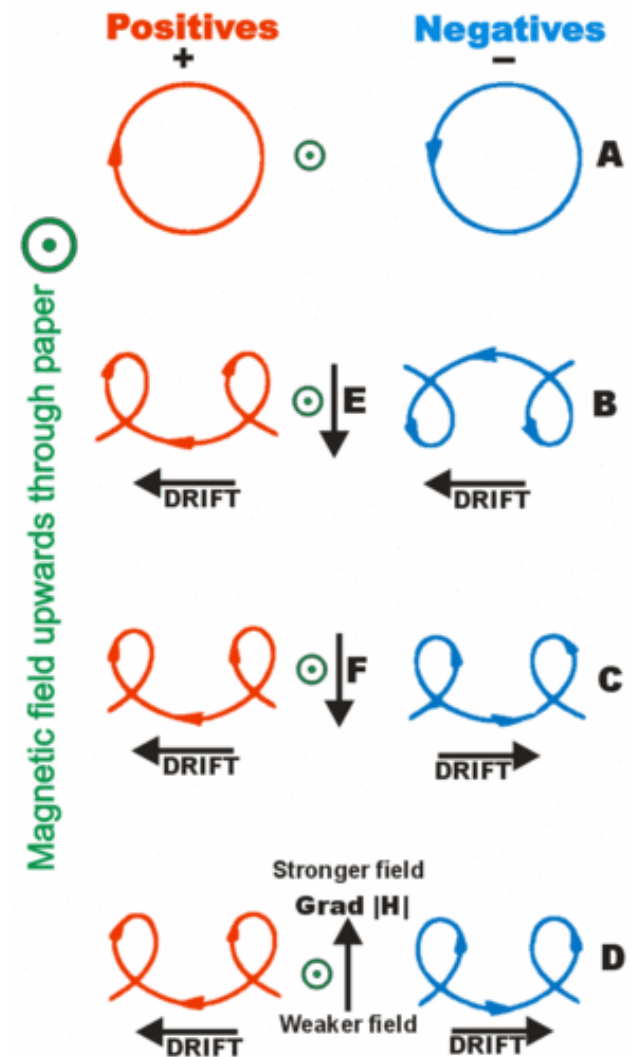
$v_d$ .... Keresztirányban driftel, nem mozdul el sem a sűrűbb, sem a ritkább B tér felé.  
A töltés előjelétől függ! → Töltésszétválasztó hatás!



**GYŰRŰÁRAM**

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

Többféle erőtér egyidejűleg: DRIFTEK megjelenése



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

## ADIABATIKUS INVARIÁNSOK

$\approx$  körülbelüli megmaradási törvény

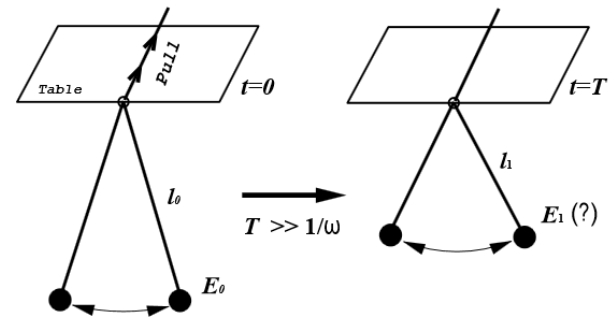


Minden olyan dinamikai rendszer, mely

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 (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  $\mu$  mágneses nyomatékkal rendelkezik.

Impulzusnyomaték:

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

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

A mágneses nyomaték:

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

*Következmény:* Konvergáló erővonalaknál tükörponti mozgás

# Adiabatikus invariánsok

**Első adiabatikus invariáns:** A ciklotronmozgást végző részecske mágneses térben állandó  $\mu$  mágneses nyomatékkal rendelkezik.

Következmény: Konvergáló erővonalaknál tükörponti mozgás

- a mozgási energia állandó
- a mágneses nyomaték állandó

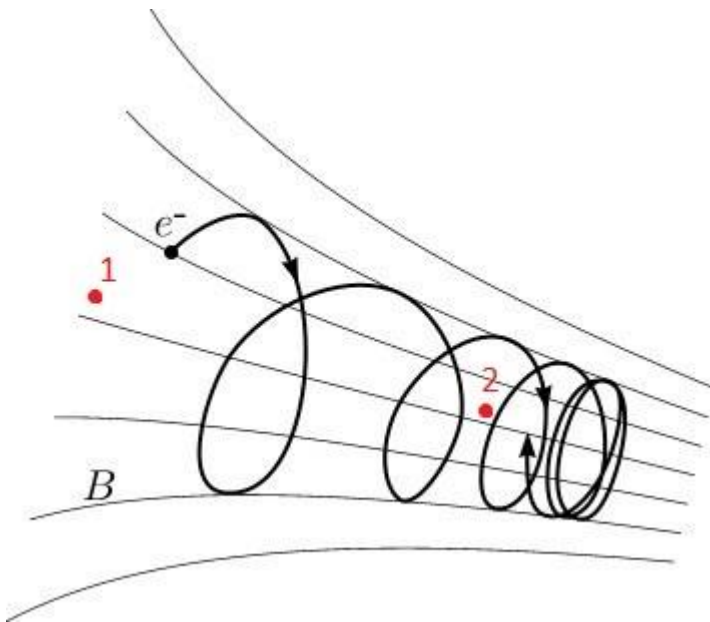
$$\frac{v_{1\perp}^2}{H_1} = \frac{v_{2\perp}^2}{H_2}$$

Mivel  $H_1 < H_2 \rightarrow v_{1\perp} < v_{2\perp}$ . ( $\perp$ -en gyorsul)

De mivel az összenergia állandó  $\rightarrow$

$v_{\parallel}$  csökkenni fog!

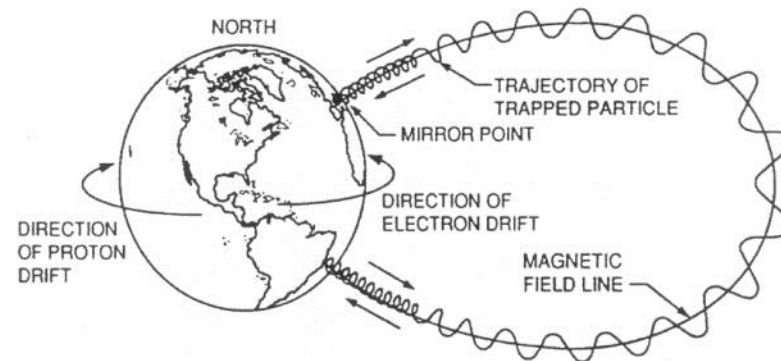
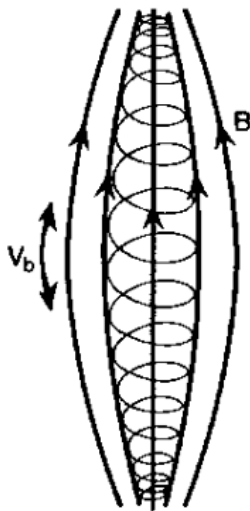
tükörpont: ahol a mágneses irány szög  $90^\circ$   
v elfordul, a részecske megáll.



# Adiabatikus invariánsok

**Első adiabatikus invariáns:** A ciklotronmozgást végző részecske mágneses térben állandó  $\mu$  mágneses nyomatékkal rendelkezik.

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





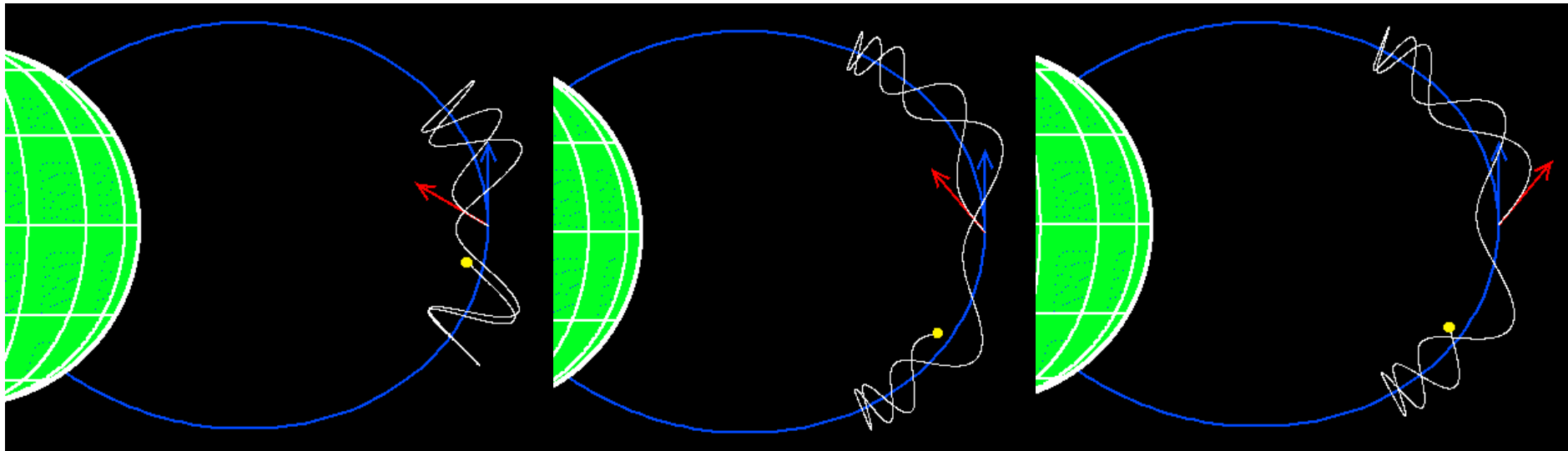
# Adiabatikus invariánsok

**Első adiabatikus invariáns:** A ciklotronmozgást végző részecske mágneses térben állandó  $\mu$  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.



# Adiabatikus invariánsok

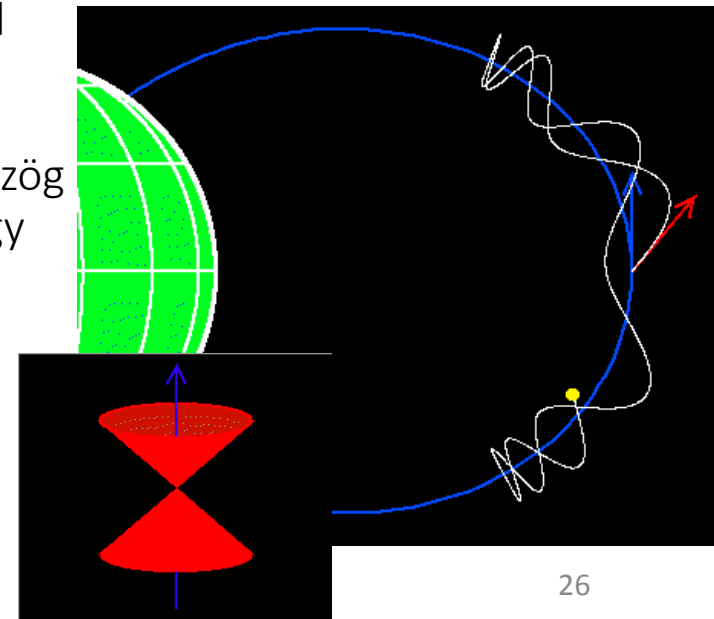
**Első adiabatikus invariáns:** A ciklotronmozgást végző részecske mágneses térben állandó  $\mu$  mágneses nyomatékkal rendelkezik.

*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

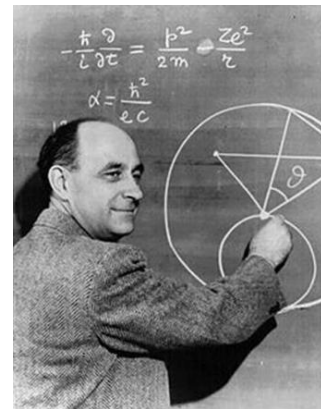
**Második adiabatikus/ longitudinális invariáns:** A két tükörpont között pattogó mozgást végző részecske, mint dinamikus rendszer esetén a következő mennyiség állandó:

$$J = \oint_{M_1}^{M_2} m v_{\parallel} ds$$

Feltéve, hogy 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, hogy a magnetoszféra mágneses tere nyugodt, vagy csak nagyon lassan változik. A keringés periódusa MeV energiájú elektronoknál és protonoknál órás 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 ( $\mu$ )	$\tau \gg \tau_L$	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 töltésszétválasztó?
5. Merre irányulnak a töltésszétválasztó 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?