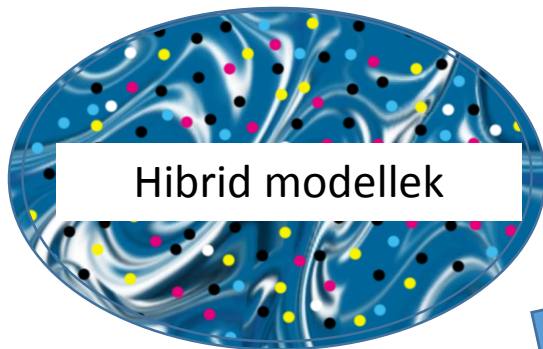


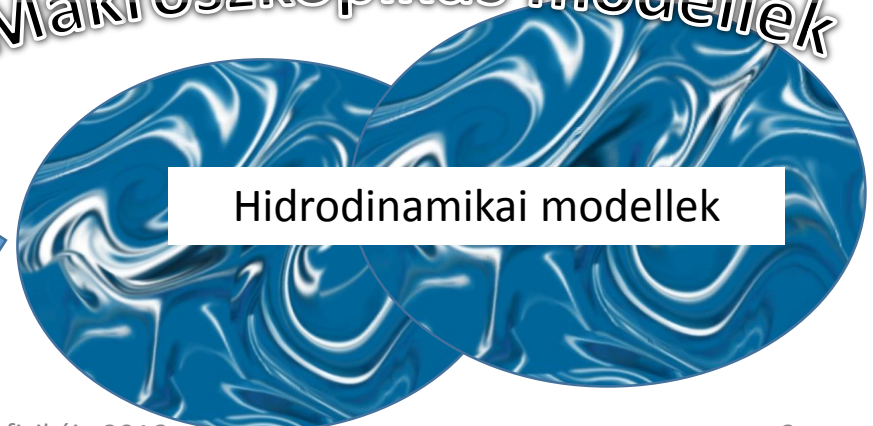
3. Plazma leírási módszerek, Hullámok

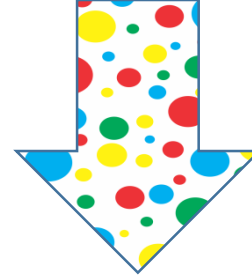
Dósa Melinda

Mikroszkopikus modellek



Makroszkopikus modellek





Tesztrészecske modell

(Független részecske modell, particle orbit theory)

(Valójában nem is plazmamodell, hiszen:)

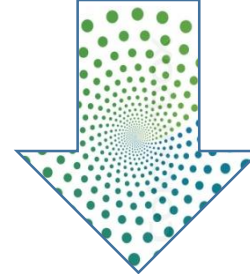
- Minden egyes részecske útját követi, elektromos és mágneses tér adott.
- Független részecskék, *nem veszi figyelembe a köztük lévő kollektív hatásokat.*

Egyenletei: mozgásegyenlet (10^{20} db!?) + Maxwell egyenletek

Leírja: mikroszkopikus skálán működik: ciklotronmozgás, driftek, adiabatikus invariánsok

Használata: Ütközésmentes plazma

Előnye	Hátránya
fizikai folyamatokról részletes képet ad (pl hullám-részecske kh)	idealizált eset, elhanyagolja a a részecskék hatását az EM terekre
	ismernünk kell az EM tér konfigurációját



Kinetikus modell

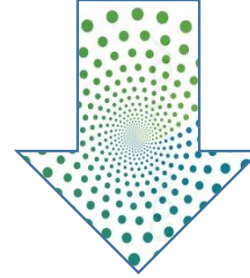
Nem foglalkozik a részecskékkal külön-külön, a sokaságot figyeli. Statisztikus (mikroszkopikus) modell. Az *eloszlásfüggvényeket és azok időbeli fejlődését vizsgálja*. Kollektív hatásokat figyelembe veszi.

Egyenletei: Statisztikus mechanika eszközeit használja: Fázistér, eloszlásfüggvények Boltzmann/Vlasov egyenlet + Maxwell egyenletek (+ töltéssűrűség, áramsűrűség)

Leírja: mikroszkopikus skálán működik: árnyékolás (Debye-hossz), plazmarezgés (Langmuir-rezgés, 1929), különböző eloszlások, Landau csillapodás

Használata: ütközésmentes plazma, különleges eloszlások esetén

Előnye	Hátránya
legösszetettebb, legalaposabb, legpontosabb fizikai képet adja	nagyon bonyolult



Kinetikus modell

Minden részecskefajtára meghatározzuk annak 6D fázisterét: (\mathbf{r}, \mathbf{v})

Eloszlásfüggvény: $f(\mathbf{r}, \mathbf{v}, t)$

megadja annak a valószínűségét, hogy egy részecske t pillanatban a fázistér (\mathbf{r}, \mathbf{v}) pontjában van.

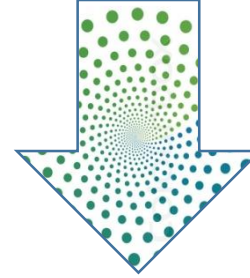
$$\int f(\mathbf{r}, \mathbf{v}, t) d^3\mathbf{r} = 1$$

$$\iint f(\mathbf{r}, \mathbf{v}, t) d^3\mathbf{r} d^3\mathbf{v} = N$$

Úrplazmákra jellemző sebességeloszlás-függvények:

/feltételezve, hogy a plazma homogén és időben állandó/

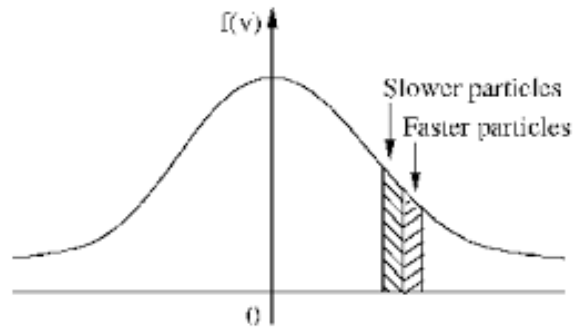
- Maxwell eloszlás
- Bi-Maxwell eloszlás
- Veszteségi kúp eloszlás (Loss-cone distribution)



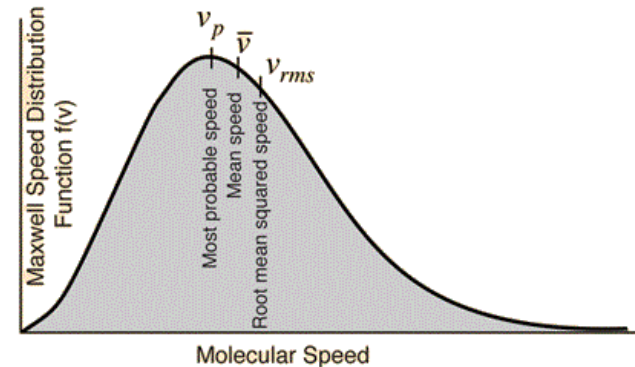
Kinetikus modell

Maxwell eloszlás:

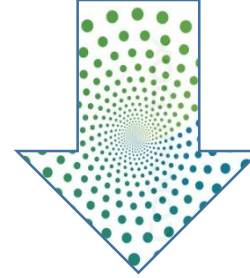
- azonos, de megkülönböztethető részecskék rendszere, termikus egyensúlyban. A rendszer minden (r,v) állapota egyforma valószínűséggel rendelkezik. (v random oszlik el az átlagsebesség körül)
- ütközéses plazmánál a Maxwelli egyensúlyra áll be a rendszer. Ütközésmentes plazmánál nem jellemző a Maxwell eloszlás, de azzal közelítünk.



$$f(v_z) = \sqrt{\frac{m}{2\pi kT}} e^{-\frac{mv_z^2}{2kT}}$$

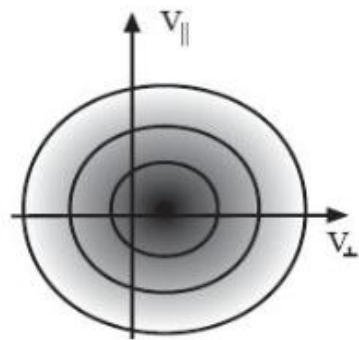


$$f(v) = 4\pi \left[\frac{m}{2\pi kT} \right]^{3/2} v^2 e^{-mv^2/2kT}$$

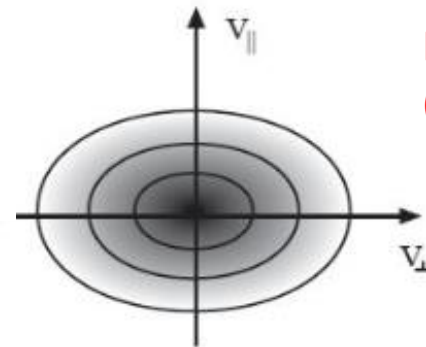


Kinetikus modell

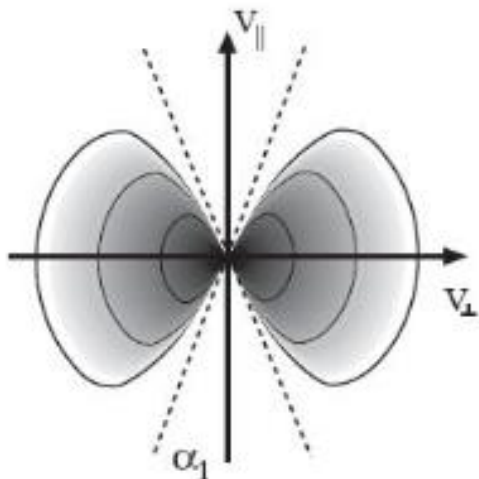
Anizotróp eloszlások



Driftelő Maxwell eloszlás

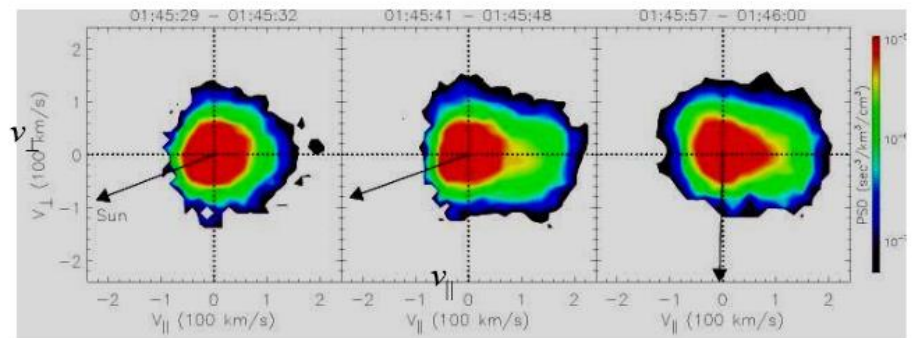


Bi-maxwell eloszlás
(palacsinta v. szivar)



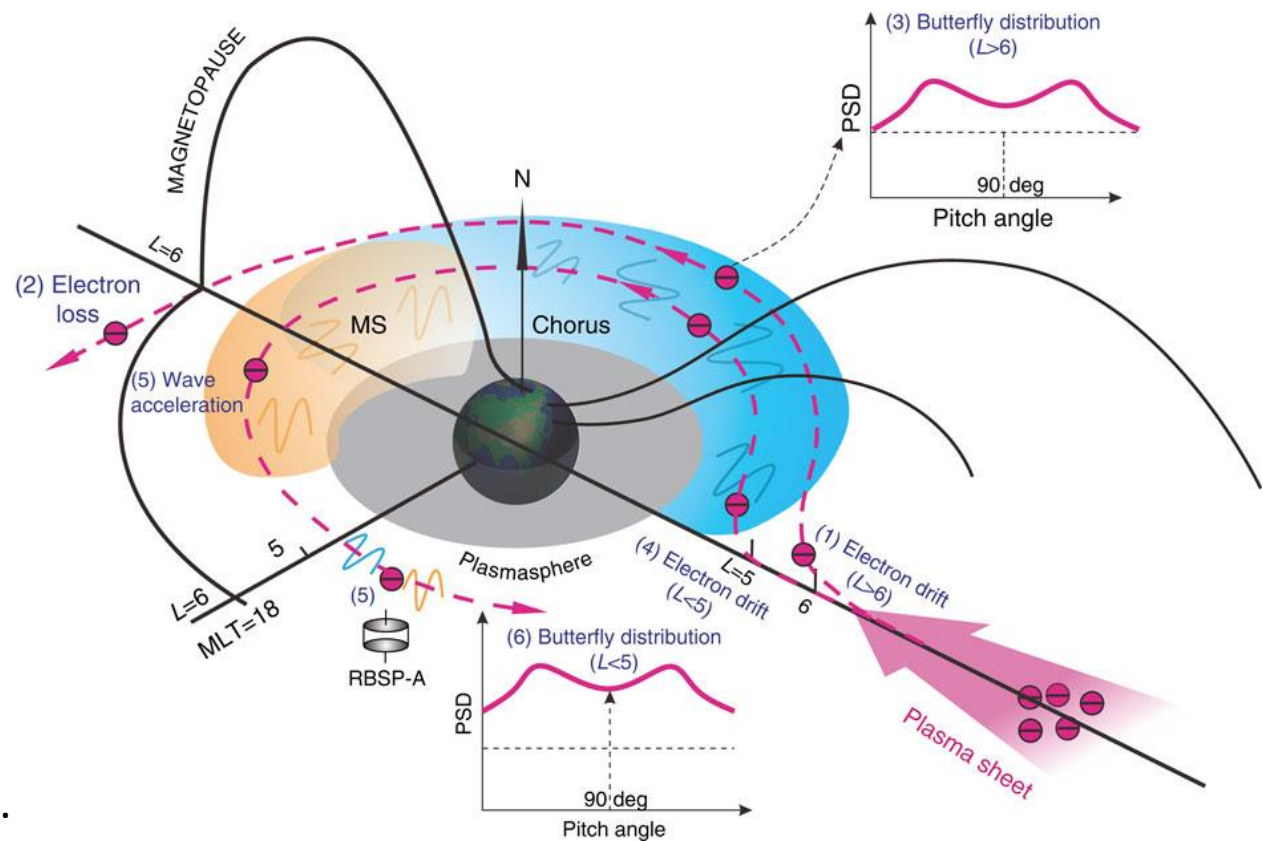
Veszteségi-kúp eloszlás
(loss-cone distribution)

Konkrét mérés: mágneses erővonal menti "beam"
/pl. sarki fény okozója/

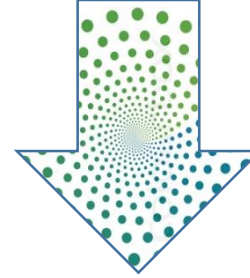


Kinetikus modell

Anizotróp eloszlások



Xiao et al, Nature 2015.



Kinetikus modell

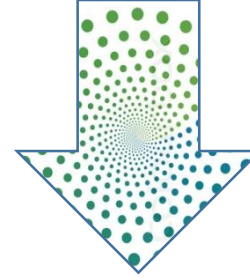
Mire jó az eloszlásfüggvény?

1. Időbeli fejlődését vizsgáljuk a Boltzmann-Vlasov egyenlet segítségével
2. Makroszkopikus mennyiségeket lehet belőlük meghatározni

A Boltzmann-Vlasov egyenlet (BVE) származtatása

N megmaradása miatt:

$$\frac{dN}{dt} = \frac{d}{dt} \iint f(\bar{r}, \bar{v}, t) d^3\bar{r} d^3\bar{v} = 0$$



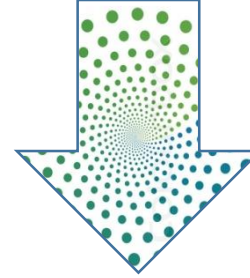
Kinetikus modell

$$\frac{dN}{dt} = \frac{d}{dt} \iint f(\bar{r}, \bar{v}, t) d^3\bar{r} d^3\bar{v} = 0$$

$$\frac{dN}{dt} = \iint \frac{d}{dt} f(\bar{r}, \bar{v}, t) d^3\bar{r} d^3\bar{v} = 0$$

$$\frac{dN}{dt} = \iint \left[\frac{\partial f}{\partial t} + \frac{\partial f}{\partial \bar{r}} \frac{\partial \bar{r}}{\partial t} + \frac{\partial f}{\partial \bar{v}} \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} \right] d^3\bar{r} d^3\bar{v} = 0$$

$$\bar{v} \qquad \bar{a} = \frac{\bar{F}}{m}$$



Kinetikus modell

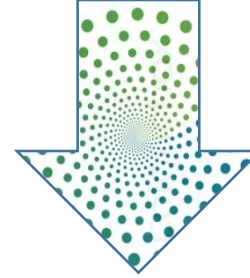
$$\frac{\partial f}{\partial t} + \bar{v} \frac{\partial f}{\partial \bar{r}} + \frac{\bar{F}}{m} \frac{\partial f}{\partial \bar{v}} = 0$$

Vlasov egyenlet

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \bar{v} \frac{\partial f}{\partial \bar{r}} + \frac{\bar{F}}{m} \frac{\partial f}{\partial \bar{v}} = \left(\frac{\partial f}{\partial t} \right)_{\ddot{u}}$$

Boltzmann egyenlet

$$\iint \left(\frac{\partial f}{\partial t} \right)_{\ddot{u}} d^3 \bar{r} d^3 \bar{v} = 0$$



Kinetikus modell

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \bar{v} \frac{\partial f}{\partial \bar{r}} + \frac{\bar{F}}{m} \frac{\partial f}{\partial \bar{v}} = 0$$

Vlasov egyenlet

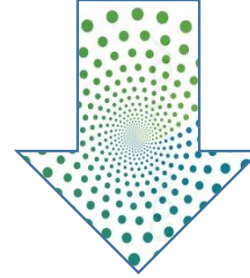
$$\frac{\partial f}{\partial t} + \bar{v} \frac{\partial f}{\partial \bar{r}} +$$

$$\iint \left(\frac{\partial f}{\partial t} \right)_{\ddot{u}}$$

A BVE megoldásával
leírható:

- plazmafrekvencia
- hullámterjedés
- Langmuir hullámok
- Landau csillapodás

Boltzmann egyenlet



Kinetikus modell

Mire jó az eloszlásfüggvény?

1. Időbeli fejlődését vizsgáljuk a Boltzmann-Vlasov egyenlet segítségével
2. Makroszkopikus mennyiségeket lehet belőlük meghatározni

Makroszkopikus mennyiségek származtatása - A folyadékmodellek felé

- valószínűségeloszláshoz kapcsolódó fizikai mennyiséget az eloszlás valamelyik sebességmomentuma adja

0. momentum: $\int f(\mathbf{r}, \mathbf{v}, t) d^3\mathbf{v} = n(\mathbf{r}, t)$ részecskesűrűség

1. momentum: $\int \mathbf{v} f(\mathbf{r}, \mathbf{v}, t) d^3\mathbf{v}$

2. momentum: $\int \mathbf{v} \mathbf{v} f(\mathbf{r}, \mathbf{v}, t) d^3\mathbf{v}$

Kinetikus modell

Makroszkopikus mennyiségek származtatása

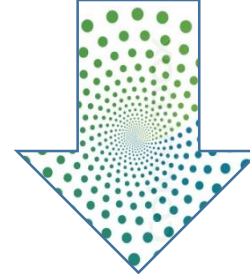
$\langle Q(\bar{v}) \rangle$ fizikai átlagmennyiségeket keresünk, mely az egész plazmát jellemzi

$Q * BVE:$

$$\iiint Q(\bar{v}) \left[\frac{\partial f}{\partial t} + \bar{v} \frac{\partial f}{\partial \bar{r}} + \frac{\bar{F}}{m} \frac{\partial f}{\partial t} \right] d^3 \bar{v} = \iiint Q(v) \left(\frac{\partial f}{\partial t} \right)_{\ddot{u}} d^3 \bar{v}$$

Leírja a Q mennyiség forgalmát/transzportját. Változását, amit a részecskék mozgása okoz.

kibontva...



Kinetikus modell

Makroszkopikus mennyiségek származtatása

Q forgalma:

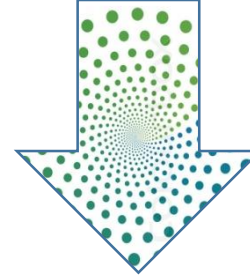
$$\frac{\partial}{\partial t} (n \langle Q \rangle) + \frac{\partial}{\partial \vec{r}} (n \langle Q \vec{v} \rangle) - n \left\langle \frac{\partial}{\partial v} \left(\frac{F}{m} Q \right) \right\rangle = [Q]_{\dot{u}}$$

időbeli
változás

divergencia

erőhatás (E+vxB)

Helyettesítsünk be konkrét fizikai paramétereket, és nézzük meg, hogyan változnak!



Kinetikus modell

Makroszkopikus mennyiségek származtatása

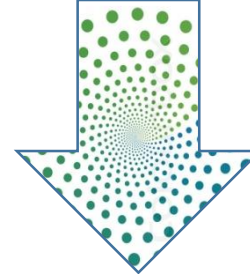
$$\frac{\partial}{\partial t} (n \langle Q \rangle) + \frac{\partial}{\partial \vec{r}} (n \langle Q \vec{v} \rangle) - n \left\langle \frac{\partial}{\partial v} \left(\frac{F}{m} Q \right) \right\rangle = [Q]_{\text{ü}}$$

$Q = 1$ (részecskeszám)

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial \vec{r}} (n \bar{u}) = 0$$

Kontinuitási egyenlet

n Sűrűség



Kinetikus modell

Makroszkopikus mennyiségek származtatása

$$\frac{\partial}{\partial t} (n \langle Q \rangle) + \frac{\partial}{\partial \vec{r}} (n \langle Q \vec{v} \rangle) - n \left\langle \frac{\partial}{\partial v} \left(\frac{F}{m} Q \right) \right\rangle = [Q]_{\dot{u}}$$

$Q = q$ (töltés)

$$\frac{\partial \langle qn \rangle}{\partial t} + \text{div} (q n \bar{u}) = 0$$

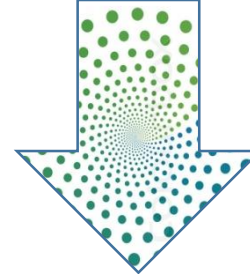
Töltésmegmaradás törvénye

$$\rightarrow \sigma = q * n$$

Töltéssűrűség

$$\rightarrow j = q * n * u$$

Áramsűrűség



Kinetikus modell

Makroszkopikus mennyiségek származtatása

$$\frac{\partial}{\partial t} (n \langle Q \rangle) + \frac{\partial}{\partial \vec{r}} (n \langle Q \vec{v} \rangle) - n \left\langle \frac{\partial}{\partial v} \left(\frac{F}{m} Q \right) \right\rangle = [Q]_{\dot{u}}$$

$Q = m$ (tömeg)

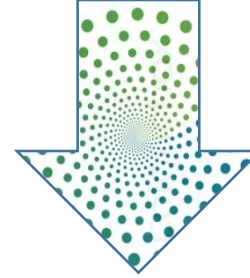
első momentum

$$\frac{\partial \langle mn \rangle}{\partial t} + \text{div}(\boxed{m n \bar{u}}) = 0$$

Tömegmegmaradás tv.

$\rightarrow \rho = m * n$

Tömegsűrűség



Kinetikus modell

Makroszkopikus mennyiségek származtatása

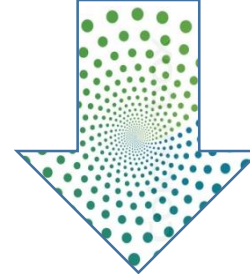
$$\frac{\partial}{\partial t} (n \langle Q \rangle) + \frac{\partial}{\partial \vec{r}} (n \langle Q \vec{v} \rangle) - n \left\langle \frac{\partial}{\partial v} \left(\frac{F}{m} Q \right) \right\rangle = [Q]_{\dot{u}}$$

$Q = m \cdot v$ (impulzus)

$$\frac{\partial \langle n m \bar{u} \rangle}{\partial t} + \text{div} (n m \bar{u} \circ \bar{u} + n m \boxed{\bar{p}}) = n \langle \bar{F} \rangle$$

Feszültségtenzor

Impulzus transzportja



Kinetikus modell

Makroszkopikus mennyiségek származtatása

$$\frac{\partial}{\partial t} (n \langle Q \rangle) + \frac{\partial}{\partial \vec{r}} (n \langle Q \vec{v} \rangle) - n \left\langle \frac{\partial}{\partial \vec{v}} \left(\frac{F}{m} Q \right) \right\rangle = [Q]_{\text{ü}}$$

0. momentum: $\int f(\mathbf{r}, \mathbf{v}, t) d^3\mathbf{v} = n(\mathbf{r}, t)$ részecskesűrűség

1. momentum: $\int \mathbf{v} f(\mathbf{r}, \mathbf{v}, t) d^3\mathbf{v} \rightarrow$ részecskefluxus
átlagos sebesség
áramsűrűség
töltéssűrűség

2. momentum: $\int \mathbf{v} \mathbf{v} f(\mathbf{r}, \mathbf{v}, t) d^3\mathbf{v} \rightarrow$ nyomástenzor
kinetikus hőmérséklet



Kétfolyadék modell

Elektron és ion összetevőket vizsgálja.

Amennyiben elegendően sűrűek az ütközések, a BVE nyomatékegyenleteiből makroszkopikus változókat lehet meghatározni. 10 változóval jellemzi a plazmát:

$n(e,i)$, $\mathbf{u}(e,i)$, $T(e,i)$

Mindez a kinetikus modell hossz- és időskáláin.

Egyenletei: BVE nyomatékegyenletei

Leírja: mikroszkopikus skálán működik: árnyékolás (Debye-hossz), plazmarezgés, girofrekvencia... **Általánosított Ohm-törvény (Impulzustranszport egyenletek különbségéből):**

$$\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B} = \eta \mathbf{J} + \frac{1}{ne} \mathbf{J} \times \mathbf{B} - \frac{1}{ne} \nabla P + \frac{m_e}{ne^2} \frac{\partial \mathbf{J}}{\partial t}$$

Használata: ütközéses plazma, mikroszkopikus skálájú folyamatai



MHD leírás

Plazma = egyetlen vezető folyadék, mely mozgása közben E és B teret kelt. Egyensúly. Hossz- és időskálák jóval nagyobbak, mint a girorádusz és a girofrekvencia. Erős mágneses tér megjelenik, mivel minél erősebb a mágneses tér, annál könnyebben teljesülnek ezek a feltételek.

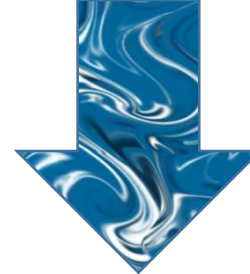
Egyenletei: MHD egyenletek (folyadékdinamika + Maxwell)

Leírja: Makroszkopikus jelenségek

Használata: 3D, makroszkopikus skálák

Előny	Hátrány
gyors, egyszerű	jóval kevesebb hullámjelenséget ír le
Kevés paraméter: ρ , u , p , E , B , j	tfh: u és skalár nyomás jellemzi a plazmát beam és anizotrópia nem írható le
az elemek (r,t) függvényei, 3D-ben gyors és egyszerű algoritmusok	nem különbözteti meg az eltérő sebességű részecskéket, rezonanciajelenségeket nem látja

MHD leírás



MHD egyenletek

2 hidrodinamikai egyenlet:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0,$$
$$\rho \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \rho (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} = -\nabla p + \mathbf{j} \times \mathbf{B} + \rho \mathbf{g}$$

4 Maxwell egyenlet:

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

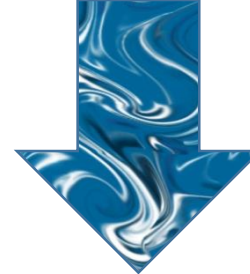
$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \cancel{\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}}$$

1 anyagi egyenlet:

$$\frac{d}{dt} (p \rho^{-\kappa}) = 0$$

Áramsűrűség:

$$\bar{\mathbf{J}} = \sigma (\bar{\mathbf{E}} + \bar{\mathbf{v}} \times \bar{\mathbf{B}})$$



MHD leírás

A mágneses indukció egyenlete

$$\frac{1}{\mu} \bar{\nabla} \times \bar{B} = \bar{j} = \sigma (\bar{E} + \bar{v} \times \bar{B})$$

$$\bar{\nabla} \times \bar{B} = \mu \sigma (\bar{E} + \bar{v} \times \bar{B})$$

/ rot

$$\bar{\nabla} \times \bar{\nabla} \times \bar{B} = \mu \sigma (\bar{\nabla} \times \bar{E} + \bar{\nabla} \times (\bar{v} \times \bar{B}))$$

azonosság!

rot rot = grad div - div grad

$$-\Delta \bar{B} = \mu \sigma \left[-\frac{\partial \bar{B}}{\partial t} + \nabla \times (\bar{v} \times \bar{B}) \right]$$

átrendezve...



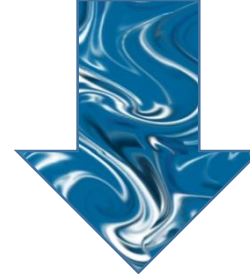
MHD leírás

A mágneses indukció egyenlete

$$\frac{\partial \bar{B}}{\partial t} = \bar{\nabla} \times (\bar{v} \times \bar{B}) + \frac{1}{\mu\sigma} \Delta \bar{B}$$

indukciós tag

diffúziós tag



MHD leírás

Befagyási tétel

$$\frac{\partial \bar{B}}{\partial t} = \bar{\nabla} \times (\bar{v} \times \bar{B}) + \frac{1}{\mu\sigma} \Delta \bar{B}$$

Elektromágneses hullámok

- I. $\bar{\nabla} \times \bar{H} = \varepsilon_0 \frac{\partial \bar{E}}{\partial t}$
- II. $\bar{\nabla} \times \bar{E} = -\mu_0 \frac{\partial \bar{H}}{\partial t}$
- III. $\bar{\nabla} \cdot \bar{H} = 0$
- IV. $\bar{\nabla} \cdot \bar{E} = 0$

$$\bar{\nabla} \times (\bar{\nabla} \times \bar{H}) = \underbrace{\bar{\nabla}(\bar{\nabla} \cdot \bar{H})}_{=0} - \nabla^2 \bar{H} \equiv \varepsilon_0 \bar{\nabla} \times \frac{\partial \bar{E}}{\partial t}.$$

$\partial/\partial t$ és $\bar{\nabla}$ felcserélhető a változók függetlensége miatt.

$$-\nabla^2 \bar{H} \equiv -\Delta \bar{H} = \varepsilon_0 \frac{\partial}{\partial t} (\bar{\nabla} \times \bar{E})$$

$\curvearrowright -\mu_0 \frac{\partial \bar{H}}{\partial t}$

$$-\nabla^2 \bar{E} \equiv -\Delta \bar{E} = -\mu_0 \frac{\partial}{\partial t} (\bar{\nabla} \times \bar{H})$$

$\curvearrowright \varepsilon_0 \frac{\partial \bar{E}}{\partial t}$

$$\nabla^2 \bar{H} = \varepsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \bar{H}}{\partial t^2}, \quad \nabla^2 \bar{E} = \varepsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \bar{E}}{\partial t^2}$$

Elektromágneses hullámok

$$\nabla^2 \bar{H} = \varepsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \bar{H}}{\partial t^2}, \quad \nabla^2 \bar{E} = \varepsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \bar{E}}{\partial t^2}$$

EM hullámok vákuumban:

- Transzverzális hullámok
- Diszperziós reláció $\omega = k \cdot c$ lineáris, ekkor $v_f = v_{cs}$, azaz NINCS diszperzió.
- Fázissebesség: $v_f = \omega/k = c$, $v_{cs} = \delta \omega / \delta k = c$
- áram nincs

EM hullámok plazmában?

A plazma tulajdonságaitól függ a terjedés (terjed / elnyelődik / visszaverődik) → a plazma vizsgálatára használjuk a hullámokat

Módszer: a diszperziós relációt (vagy dielektromos tenzort) keressük. Ezt a teret kitöltő anyag (=a töltött részecskék eloszlásfüggvénye) határozza meg.

NB: Nem csak EM hullámok lehetnek!

Hullámok (hideg) plazmában – - nézőpont kérdése!

Kinetikus hullámok

mikroszkopikus skálán meg tudja különböztetni az elektronok és ionok rezgését →

Nagyobb frekvenciákon látja az elektronok ÉS az ionok hullámait.

Hullámjelenség függ:

- Van-e B tér?
- Longit. vagy transzverzális hullám
- terjedés a B térrel párh. vagy merőleges
- Polarizáció jobbra v balra cirk/ellipt polarizált lehet

MHD hullámok

Vezető folyadékban 3 féle hullám terjedhet, akár egyszerre.

Nagyon alacsony frekvenciákon érvényes. ($\omega < \omega_{gi}, \omega_{pi}$)

Hullámjelenség függ:

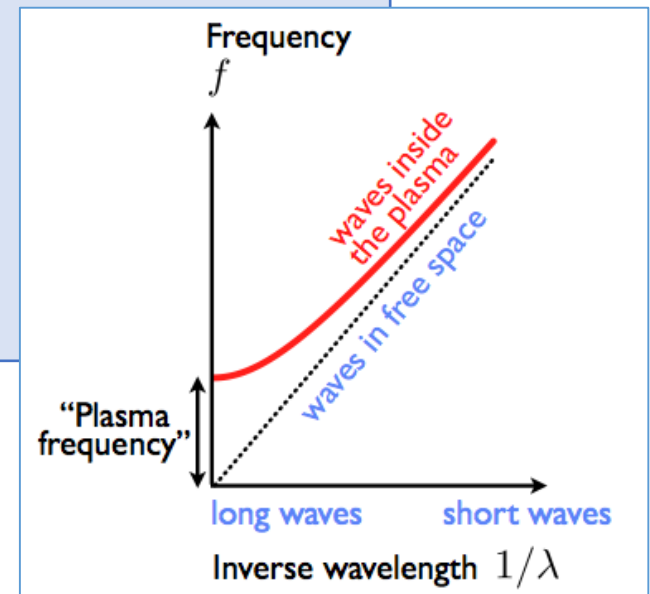
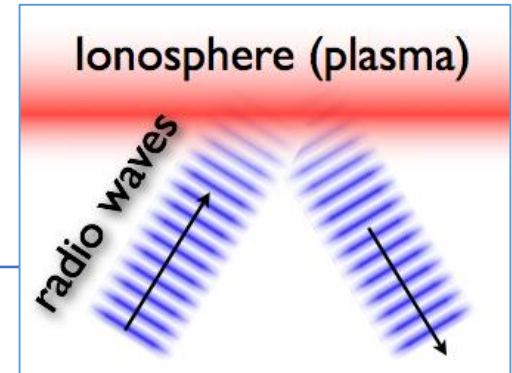
- B tér iránya
- Longitudinális v transzverzális

Kinetikus hullámok

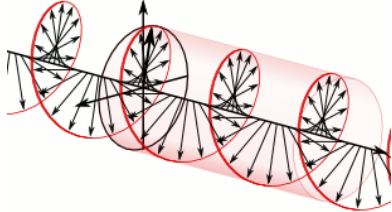
I. Elemi plazmahullámok B tér nélkül

$B = 0$, pl: ionoszféra

<p>Longitudinális (elektrosztatikus / kompressziós) $E \parallel k$</p>	<p>$\omega^2 = \omega_p^2$ Plazmafrekvencia (elektron+ion) (statikus plazmarezgés, adott frekvenciával. NEM terjed)</p>
<p>Transzverzális hullám E merőleges k</p>	<p>$\omega^2 = \omega_p^2 + k^2 c^2$ Plazmafrekvencia alatt NINCS terjedés! Az ionoszféráról visszaverődik (rádiózás < 10MHz) Elektron- és ion hullámok</p>



Kinetikus hullámok – B_0 tér mellett

	$B_0 \parallel k$ párh. terjedés	B_0 merőleges k
Longitudinális $E \parallel k$	Plazmafrekvencia (u.az a megoldás, NEM alakul ki hullám.)	
Transzverzális hullám E merőleges k /nagyfrekvencián, Csak az elektronok mozognak/	R és L polarizált módusok 	O módus: (polarizáció: $E \parallel B_0$) X módus: (polarizáció: E merőleges B_0)
Transzverzális hullám E merőleges k /alacsony frekvencián, Ionok mozognak/	R és L módusok alja: whistlerek	Z módus MHD-ban leírt Alfvén hullámok ide kapcsolhatók (a legalacsonyabb frekvenciákhoz)

Hibrid hullámok!

Kinetikus hullámok – B_0 tér mellett

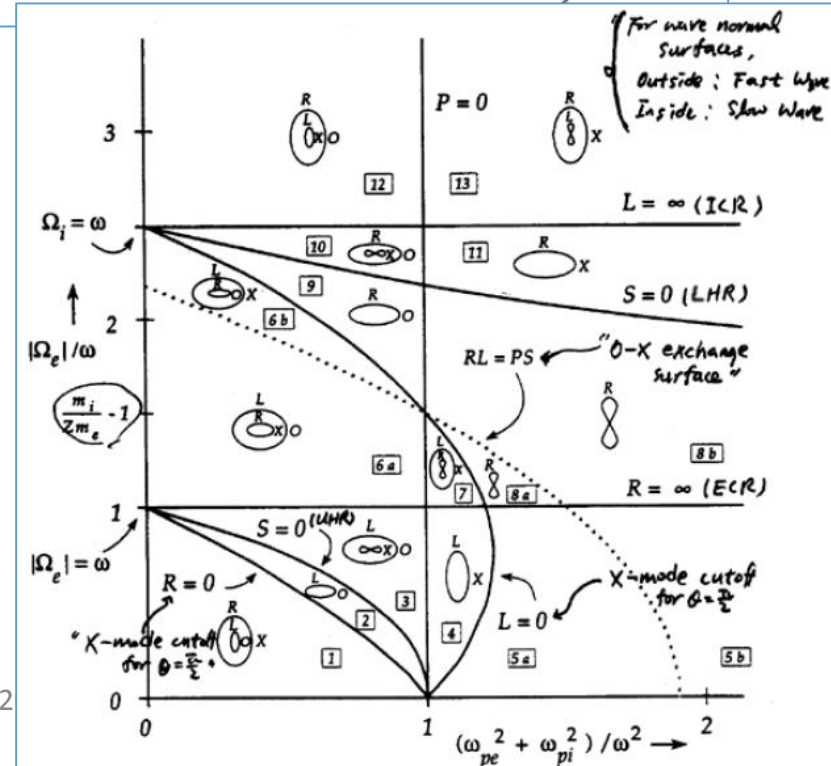
	Ferde terjedés
	R,L és O,X módusok összekapcsolódnak Rezonanciafrekvenciák k és B szögétől függenek

$$n^2 = 1 - \frac{X}{1 - iZ - \frac{\frac{1}{2}Y^2 \sin^2 \theta}{1 - X - iZ} \pm \frac{1}{1 - X - iZ} \left(\frac{1}{4}Y^4 \sin^4 \theta + Y^2 \cos^2 \theta (1 - X - iZ)^2 \right)^{1/2}}$$

$$X = \frac{\omega_0^2}{\omega^2}$$

$$Y = \frac{\omega_H}{\omega}$$

$$Z = \frac{\nu}{\omega}$$

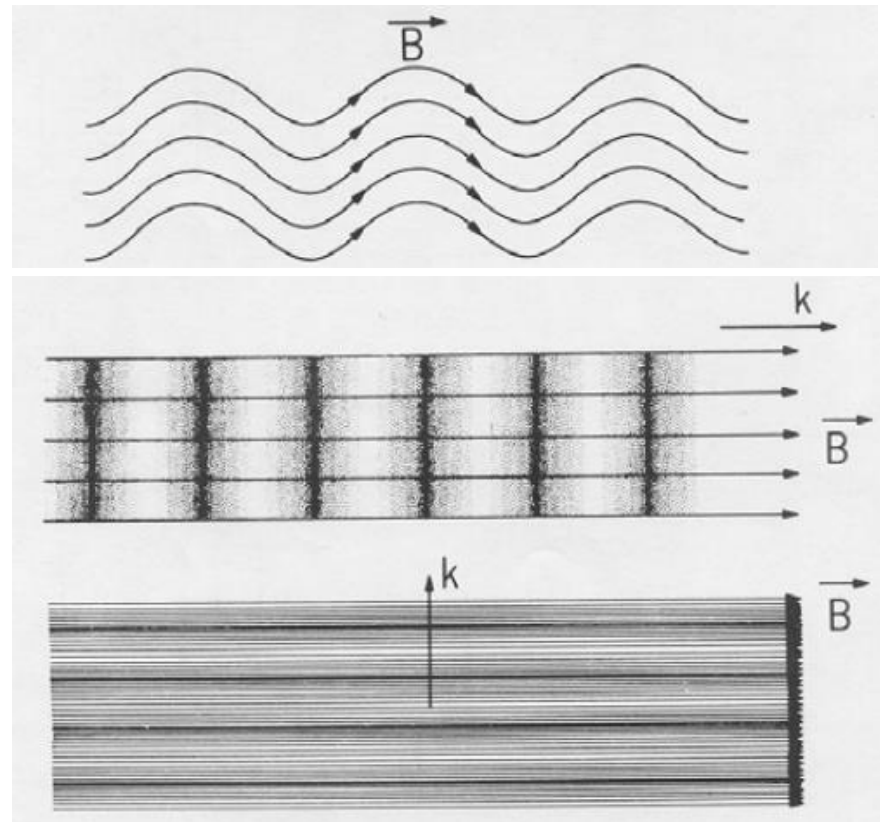


MHD hullámok

MHD egyenletekből. Kis perturbáció (p, ρ, H, v), majd linearizálás. Hullám formában keressük a megoldást. Diszperziós relációnak 3 megoldása lehet \rightarrow 3 féle hullám, terjedési sebességük $k \perp B$ -től függ.

Alfvén-hullám: transzverz EM hullám, erővonalak saját-rezgése. Nem diszperzív. B -vel párhuzamosan és ferdén tud terjedni

Gyors és Lassú magnetoszonikus hullám: kompressziós hullámok, vannak sűrűségváltozások. Ha k merőleges B -re: az erővonalak sűrűsödése, ritkulása.



MHD hullámok

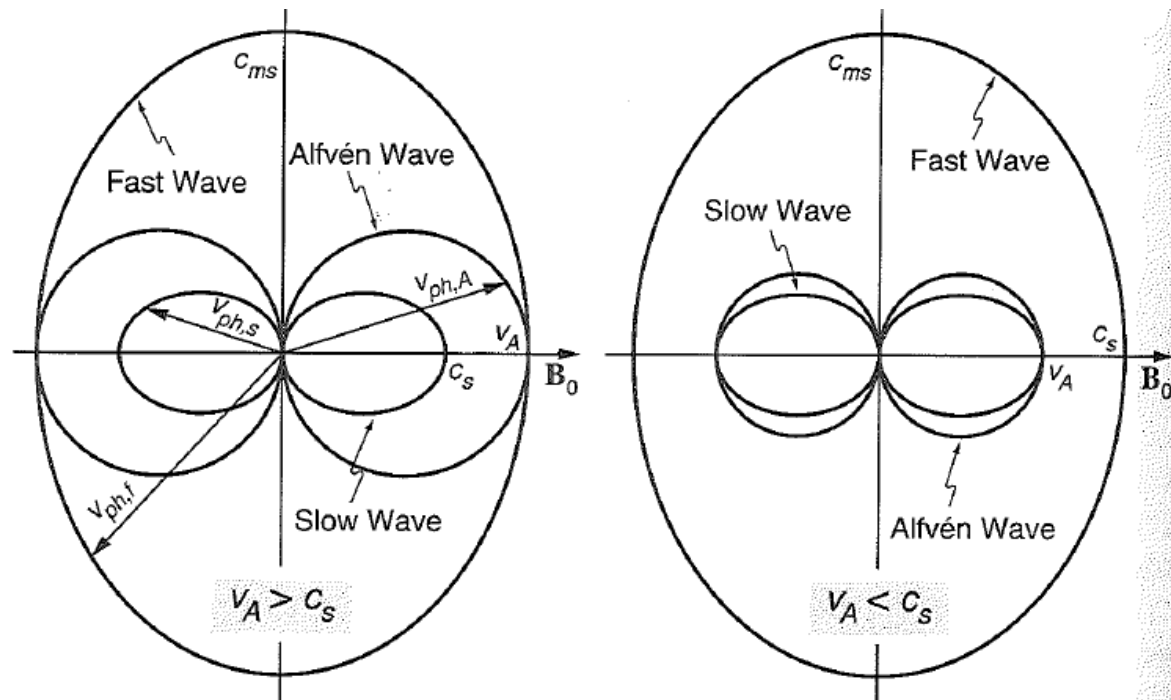
MHD egyenletekből. Kis perturbáció (p, ρ, H, v), majd linearizálás. Hullám formában keressük a megoldást. Diszperziós relációnak 3 megoldása lehet \rightarrow 3 féle hullám, terjedési sebességük $k \perp B$ -től függ.

Alfvén-hullám: transzverz EM hullám, erővonalak saját-rezgése. Nem diszperzív.

$$\omega_A = k_{\parallel} v_A$$

$$v_A = \sqrt{\frac{B}{4\pi\rho}}$$

Gyors és Lassú magnetoszonikus hullám: kompressziós hullámok, vannak sűrűségváltozások. Ha k merőleges B -re: az erővonalak sűrűsödése, ritkulása.



MHD hullámok

MHD egyenletekből. Kis perturbáció (p, ρ, H, v), majd linearizálás. Hullám formában keressük a megoldást. Diszperziós relációnak 3 megoldása lehet \rightarrow 3 féle hullám, terjedési sebességük $k \perp B$ -től függ.

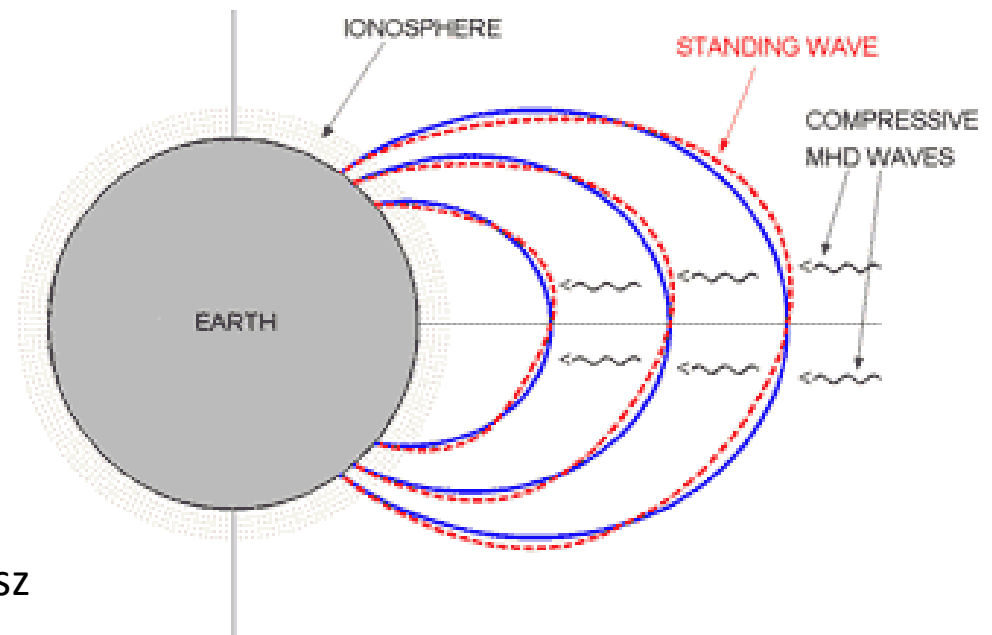
Alfvén-hullám: transzverz EM hullám, erővonalak saját-rezgése. Nem diszperzív.

$$\omega_A = k_{\parallel} v_A$$

$$v_A = \sqrt{\frac{B}{4\pi\rho}}$$

FLR: field line resonance

A mágneses tér Pc5-ös pulzációit okozza, 1-7mHz (ULF).
Erővonal hossza legyen a hullámhossz
Felének egész számú többszöröse.



Ellenőrző kérdések

1. Miben több a kinetikus modell a tesztrészecske modellnél, és mivel kevesebb egy hidrodinamikai modellnél?
2. Mi az eloszlásfüggvény, és mire használható?
3. Mit fejez ki a Boltzmann-Vlasov egyenlet, és hogyan származtatható?
4. Vezesd le a mágneses indukció egyenletét, és nevezd meg a tagokat!
5. Mit jelent a diszperzió, és mit mutat meg a diszperziós reláció?
6. Miért verődnek vissza a rádióhullámok az ionoszféráról?
7. Mit jelent a befagyás, és hogyan származtatható a befagyás tétele?
8. Milyen hullám az Alfvén hullám, és hol látunk rá példát?

A különböző plazmahullámok szemléltetése:

https://sites.google.com/site/andrisvaivads/Andris_Vaivads/Plasma_waves

(De figyelem! Hibás elnevezés szerepel a lapon, kompressziós Alfvénhullám nincs!)