





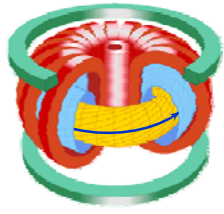
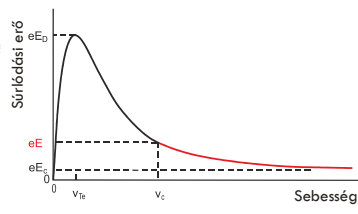
ELFUTÓ ELEKTRONOK ÉS ELEKTROMÁGNESES HULLÁMOK KÖLCSÖNHATÁSA TOKAMAK PLAZMÁKBAN

Kómár Anna

2013. április 26.

Témavezetők: Dr. Fülöp Tünde
Dr. Pokol Gergő

Elfutó elektronok tokamakokban

□ Csavart térszerkezet: **toroidális áram**

□ Diszrupciókban és fűrészfog-összeomlásokor (közel kritikus tér)

Kómár A. - Elfutó elektronok és elektromágneses hullámok kölcsönhatása 2013. április 26.

Elfutó elektronok keletkezése

3/18

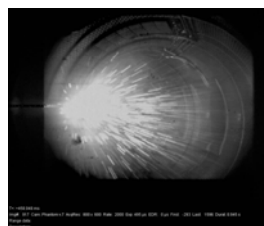
- Elsődleges keletkezés:
 - **Dreicer keletkezés:** az elektronok **sebességtérbeli diffúzió** által a kritikus sebesség fölé gyorsulnak
 - **Gamma-keletkezés:** **Compton-szórás során** az elektron átlépi a kritikus sebességet
- Másodlagos keletkezés:
 - **Lavina-keletkezés:** a már jelenlévő **elfutó elektronok** **termikus elektronokkal ütköznek**

Kómár A. - Elfutó elektronok és elektromágneses hullámok kölcsönhatása 2013. április 26.

Elfutó elektronok hatása

4/18

- Energiájuk akár 100 MeV is lehet
- Akár 10 MA áramot is képviselhetnek




Kómár A. - Elfutó elektronok és elektromágneses hullámok kölcsönhatása 2013. április 26.

Elfutóelektron-hullám kölcsönhatás

5/18

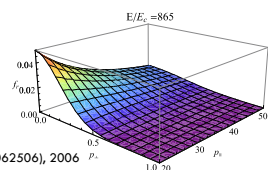
Perturbálatlan diszperzió: $F(\varepsilon_{11}, \varepsilon_{22}, \varepsilon_{33}, \varepsilon_{12}) = 0$

Perturbált diszperzió: $F(\varepsilon_{11}, \varepsilon_{22}, \varepsilon_{33}, \varepsilon_{12}) = G(\underline{\varepsilon}^{th}, \chi_{runaway})$

↓

A hullám frekvenciája megváltozik: $\omega_0 \rightarrow \omega_0 + \delta\omega \Rightarrow \gamma_i = \text{Im}(\delta\omega)$

Elfutóelektron-suszceptibilitás:
Eloszlásfüggvényből



T. Fülöp, PoP 13(062506), 2006

Kómár A. - Elfutó elektronok és elektromágneses hullámok kölcsönhatása 2013. április 26.

A vizsgált esetek

6/18

Nagy elektromos tér

Eloszlásfüggvény: G. Pokol, PhD dolgozat, BME TTK, 2009

Közel kritikus tér

Eloszlásfüggvény: P. Sandquist, PoP 13(072108), 2006

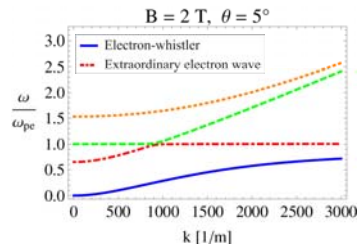
Magnetoszonikus-
fűtülő hullám

Elektron-fűtülő,
EXEL hullám

Kómár A. - Elfutó elektronok és elektromágneses hullámok kölcsönhatása 2013. április 26.

Elektronhullámok

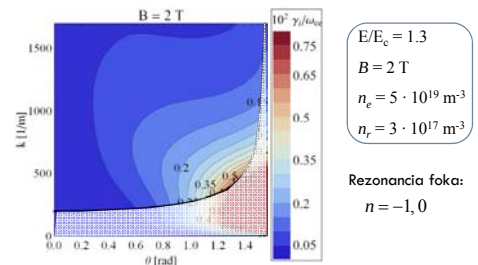
7/18

Nagyfrekvenciás közelítés: $\omega \gg \omega_{ce} \sqrt{m_e/m_i} \gg \omega_{ci}$ 

Kómár A. - Elfutó elektronok és elektromágneses hullámok kölcsönhatása 2013. április 26.

Fütyülő hullám növekedési rátája

8/18

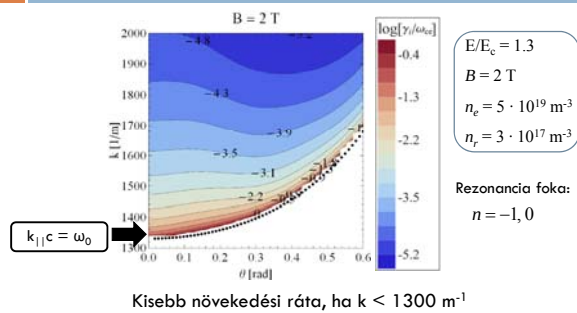


Maximum az érvényességi tartományon kívül

Kómár A. - Elfutó elektronok és elektromágneses hullámok kölcsönhatása 2013. április 26.

Az EXEL hullám növekedési rátája

9/18

Kisebbs növekedési ráta, ha $k < 1300 \text{ m}^{-1}$

Kómár A. - Elfutó elektronok és elektromágneses hullámok kölcsönhatása 2013. április 26.

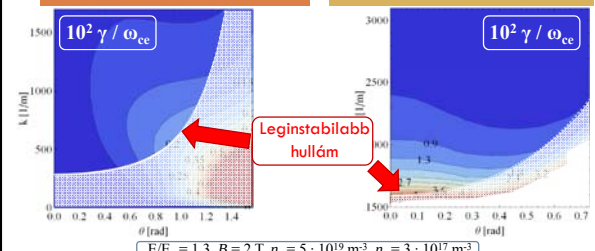
Leginstabilabb hullám

10/18

Közel-kritikus tér → max. energia (2.6 MeV, $p = 5$)

Elektron-fütyülő hullám

Extraordinárius elektron hullám



Kómár A. - Elfutó elektronok és elektromágneses hullámok kölcsönhatása 2013. április 26.

Csillapítási ráták, stabilitás

11/18

□ Ütközéses csillapítás:

M. Brambilla, PoP 2(1094), 1995

$$\gamma_d = 1.5 \frac{n_i Z^2 e^4 \ln \Lambda}{3\pi^{3/2} m_{e0}^2 v_{Te}^3 \epsilon_0^2}$$

□ Konvektív csillapítás:

□ Az elfutóelektron-nyaláb véges sugara: L_r

$$\gamma_v = \frac{\partial \omega / \partial k_{\perp}}{4L_r}$$

G. Pokol, PPCF 50(045003), 2008

Kómár A. - Elfutó elektronok és elektromágneses hullámok kölcsönhatása 2013. április 26.

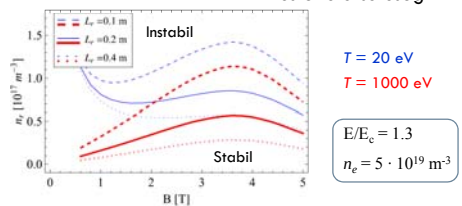
Kritikus sűrűség (Fütyülő hullám)

12/18

□ Stabilitásvizsgálat:

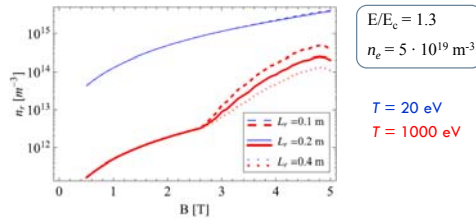
(Növekedési ráta – Csillapítási ráták) = 0
(a leginstabilabb hullámra)

Kritikus elfutó-sűrűség



Kómár A. - Elfutó elektronok és elektromágneses hullámok kölcsönhatása 2013. április 26.

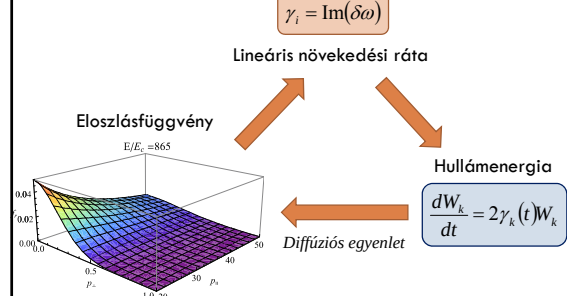
Kritikus sűrűség (EXEL)



- Nagyságrendekkel alacsonyabb kritikus sűrűség
- Várakozás: nagyobb elektromos térre is

Kómár A. - Elfutó elektronok és elektromágneses hullámok kölcsönhatása 2013. április 26.

Elfutóelektron-hullám kölcsönhatás



Kómár A. - Elfutó elektronok és elektromágneses hullámok kölcsönhatása 2013. április 26.

Diffúziós egyenlet

- Ultrarelativistikus közelítésben: $\gamma \approx p_{\parallel}$

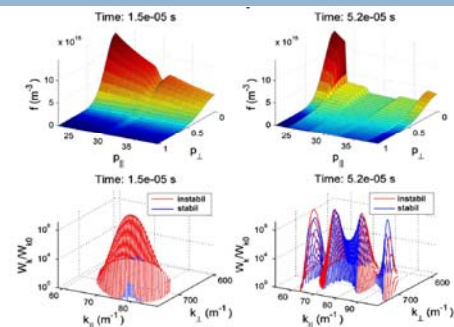
$$\frac{\partial f}{\partial \tau} = \frac{1}{p_{\perp}} \frac{\partial}{\partial p_{\perp}} p_{\perp} \frac{\partial f}{\partial p_{\perp}} \quad \text{Merőleges sebességtérbeli diffúzió}$$

$$\text{ahol: } \tau(p_{\parallel}, t) = \int_0^t dt' D(p_{\parallel}, t')$$

$$D(p_{\parallel}, t) = C_1(p_{\parallel}) \iint d^3k W_k(t) \mathcal{E}_2(k, p_{\parallel})$$

Kómár A. - Elfutó elektronok és elektromágneses hullámok kölcsönhatása 2013. április 26.

Megoldás a fűtülő hullámmal



Kómár A. - Elfutó elektronok és elektromágneses hullámok kölcsönhatása 2013. április 26.

Tervek

- Eloszlásfüggvény evolúciója az EXEL hullámmal (jóval alacsonyabb kritikus sűrűség!)
- Modell-eloszlásfüggvény helyett: **LUKE** (J. Decker, Y. Peysson)

$$\frac{\partial f}{\partial t} = C(f) + Q(f) + E(f) + T(f) + S(f)$$

Ütközések Fűtés Dreicer keletkezés Radiális transzport Egyéb források

Kómár A. - Elfutó elektronok és elektromágneses hullámok kölcsönhatása 2013. április 26.

Összefoglalás

- Elfutó elektronok által keltett instabilitás
- EXEL hullám: nagyon alacsony kritikus sűrűség
- Kvázilineáris számolás:
 - Eloszlásfüggvény → Növekedési ráta → Hullámenergia → Eloszlásfüggvény ...
 - EXEL hullámmal
 - Egyelőre fél-analitikusan (készül)
 - Összekapcsolni a LUKE-kal

Kómár A. - Elfutó elektronok és elektromágneses hullámok kölcsönhatása 2013. április 26.