





ELFUTÓ ELEKTRONOK ÉS FÜTYÜLŐ HULLÁMOK KÖLCSÖNHATÁSA TOKAMAK PLAZMÁKBAN

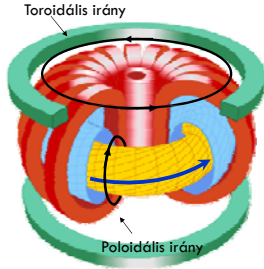
Kómár Anna¹, Dr. Pokol Gergő¹, Dr. Fülöp Tünde²

1) BME Nukleáris Technikai Intézet, Budapest
2) Chalmers University of Technology, Göteborg, Svédország

2011. december 1-2. X. Nukleáris Technikai Szimpózium, Budapest

Fúziós bevezető, tokamak

2/13



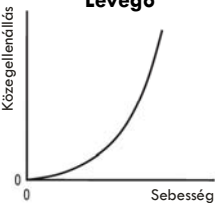
- Legigéretesebb reakció:
 ${}^2\text{H} + {}^3\text{H} = {}^4\text{He} + n$
- Plazma állapot
- Mágneses összetartás
- Toroidális plazmaáram

Elfutó elektronok és fűtülő hullámok kölcsönhatása tokamak plazmákban 2011. december 2.

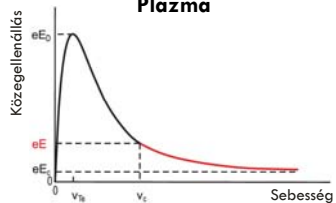
Elfutó elektronok

3/13

Levegő



Plazma



□ A kritikus elektromos tér fölött a nagy energiájú elektronokra a gyorsító erő meghaladja a sűrűlási erőt → **elfutó elektronok**

Elfutó elektronok és fűtülő hullámok kölcsönhatása tokamak plazmákban 2011. december 2.

Elfutó elektronok keletkezése

4/13

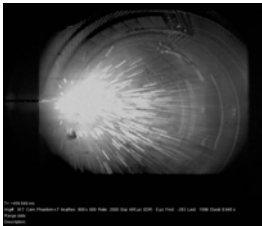
- Elsődleges keletkezés:
 - **Dreicer keletkezés:** az elektronok **sebességtérbeli diffúzió** által a kritikus sebesség fölé gyorsulnak
 - **Gamma-keletkezés:** **Compton-szórás** során az elektron átlépi a kritikus sebességet
- Másodlagos keletkezés:
 - **Lavina-keletkezés:** a már jelenlévő **elfutó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

Elfutó elektronok és fűtülő hullámok kölcsönhatása tokamak plazmákban 2011. december 2.

Elfutó elektronok hatása

5/13

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




Elfutó elektronok és fűtülő hullámok kölcsönhatása tokamak plazmákban 2011. december 2.

Csillapítási folyamatok

6/13

- Gázbefecskendezés, pelletbelövés:
ütközések során lassulnak az elektronok
- Rezonáns mágneses perturbáció:
megnö a radiális transzport
- Kölcsönhatás plazmahullámmal:
a keltett plazmahullám **izotropizálja az elfutó elektron eloszlásfüggvényt**

Elfutó elektronok és fűtülő hullámok kölcsönhatása tokamak plazmákban 2011. december 2.

A vizsgált plazmahullámok

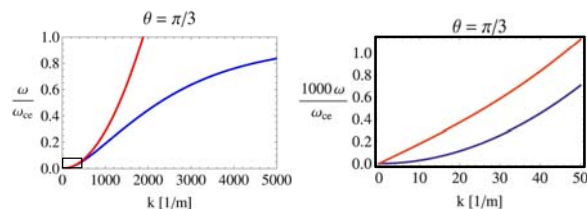
7/13

□ Elektron-fűtülő hullám

A. Kómár, BSc Szakdolgozat, BME TTK, 2011

□ Magnetoszonikus-fűtülő hullám

T. Fülöp et al., PoP 13(062506), 2006



Elfutó elektronok és fűtülő hullámok kölcsönhatása tokamak plazmákban 2011. december 2.

A vizsgálati módszer

8/13

Plazmahullám diszperziós relációja $\rightarrow \omega_0(k, \theta)$ explicit reláció

+ elfutó elektronok $\rightarrow +\delta\omega$ lineáris válasz

Növekedési ráta: a lineáris válasz képzetes része

$$\gamma_i = \text{Im}(\delta\omega) \begin{cases} > 0 & \text{a hullám keletkezik} \\ < 0 & \text{a hullám csillapodik} \end{cases}$$

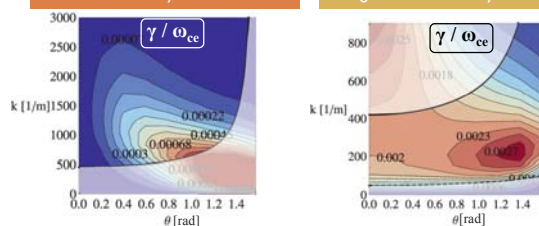
Elfutó elektronok és fűtülő hullámok kölcsönhatása tokamak plazmákban 2011. december 2.

Növekedési ráta

9/13

Elektron-fűtülő hullám

Magnetoszonikus-fűtülő hullám



A maximumhoz tartozó energián nincsenek elfutó elektronok.

$$E/E_c = 1,3; B = 2 \text{ T}, n_e = 5 \cdot 10^{19} \text{ m}^{-3}, n_r = 3 \cdot 10^{17} \text{ m}^{-3}$$

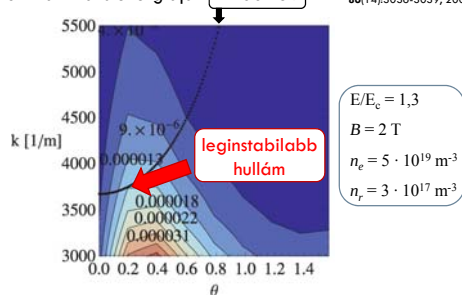
Elfutó elektronok és fűtülő hullámok kölcsönhatása tokamak plazmákban 2011. december 2.

A leginstabilabb hullám

10/13

□ Elektronok maximális energiája: $\sim 100 \text{ keV}$

P. V. Sarukhin, PRL 86(14):3036-3039, 2001



$$\begin{aligned} E/E_c &= 1,3 \\ B &= 2 \text{ T} \\ n_e &= 5 \cdot 10^{19} \text{ m}^{-3} \\ n_r &= 3 \cdot 10^{17} \text{ m}^{-3} \end{aligned}$$

Elfutó elektronok és fűtülő hullámok kölcsönhatása tokamak plazmákban 2011. december 2.

A hullám csillapítási rátái

11/13

□ Csillapítási ráták:

- **Ütközéses** csillapítás: elektron-ion ütközések miatt
- **Konvektív** csillapítás: az elfutóelektron-nyaláb véges L_r szélessége miatt

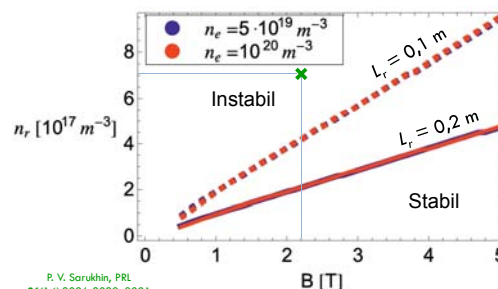
□ Nagy hőmérsékleten: ($T_e = 1 - 20 \text{ keV}$, $n_e \sim 10^{19} - 10^{20} \text{ m}^{-3}$)

- **Konvektív** csillapítás $\gg$ **ütközéses** csillapítás

Elfutó elektronok és fűtülő hullámok kölcsönhatása tokamak plazmákban 2011. december 2.

Stabilitási határ közel kritikus térben

12/13



P. V. Sarukhin, PRL 86(14):3036-3039, 2001

Elfutó elektronok és fűtülő hullámok kölcsönhatása tokamak plazmákban 2011. december 2.

Összefoglalás

13/13

- Elfutó elektronok
 - ▣ Nagy energiájú elektronok (MeV nagyságrend)
 - ▣ Rendkívül károsak
- Elfutó elektron – hullám kölcsönhatás vizsgálata
 - ▣ A **leginstabilabb hullám** közel kritikus tér esetén egy elektron-fűtyülő hullám ($k \approx 3700 \text{ m}^{-1}$, $f \approx 50 \text{ GHz}$)
 - ▣ **Stabilitás:** $n_e > 10^{17} \text{ m}^{-3}$ esetén destabilizálódik a hullám

Elfutó elektronok és fűtyülő hullámok kölcsönhatása tokamak plazmákban 2011. december 2.