

Diagnostika ubíhajících elektronů na tokamaku COMPASS pomocí EC emise

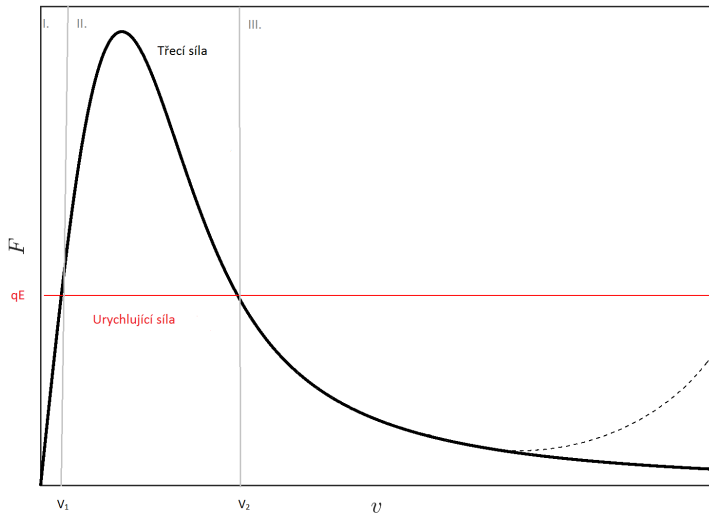
Michal Farník

SVK FTTF
Mariánská 2017

10. ledna 2017

- 1 Úvod
- 2 Cíle práce
- 3 Teoretická část
 - Runaway elektrony
 - Elektronová cyklotronová emise z RE
- 4 Diagnostika V-ECE
 - Předchozí experimenty
 - Experiment na tokamaku COMPASS
- 5 Analýza dat
 - Signály z RE campaign
 - Záření netermálních částic
- 6 Závěr
- 7 Další možnosti
- 8 Reference

- Seznámit se s fyzikou ubíhajících elektronů v tokamaku.
- Modifikovat experimentální uspořádání pro měření netermální emise.
- Použít simulace pro výpočet šíření EC vln generované RE.
- Srovnat naměřená data s výsledky simulace.
- Navrhnout další možný postup.



Obrázek: Ilustrační obrázek pro demonstraci vzniku RE.

Appleton-Hartreeho formule

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

Mimořádná vlna (X-wave)

$$\omega_R = \left(\frac{\omega_c^2}{4} + \omega_{pe}^2 \right)^{1/2} + \frac{\omega_c}{2}$$

$$\omega_L = \left(\frac{\omega_c^2}{4} + \omega_{pe}^2 \right)^{1/2} - \frac{\omega_c}{2}$$

$X = (\omega_p/\omega)^2$ a $Y = \omega_c/\omega$

ω_{pe} - plazmová frekvence

ω_c - cyklotronní frekvence

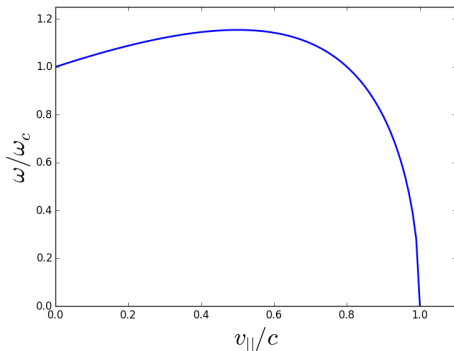
ω - frekvence vlny v plazmatu

N - optický index

θ - úhel mezi \mathbf{k} a \mathbf{B}_0

Rezonanční frekvence

$$\omega = n\omega_c(v) + k_{\parallel}v_{\parallel}, \quad \omega_c(v) = \frac{eB_0}{m_e(v)} = \frac{eB_0}{m_e} \sqrt{1 - \left(\frac{v_{\parallel}}{c}\right)^2}$$



Obrázek: Závislost rezonanční frekvence na podélné rychlosti.

Intenzita záření AČT

$$I(\omega) = \frac{\omega^2 T_{rad}}{8\pi^3 c^2}$$

Transport záření

$$\frac{dI}{ds} = j(\omega) - I \cdot \alpha(\omega)$$

Optická tloušťka

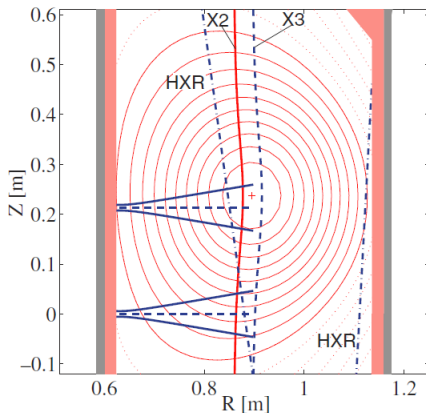
$$\tau = \int \alpha(\omega) ds$$

Opticky tlusté plazma - $\tau \gg 1 \rightarrow$ záření AČT

Opticky tenké plazma - $\tau \ll 1 \rightarrow$ v této oblasti se absorpce a emise zanedbává

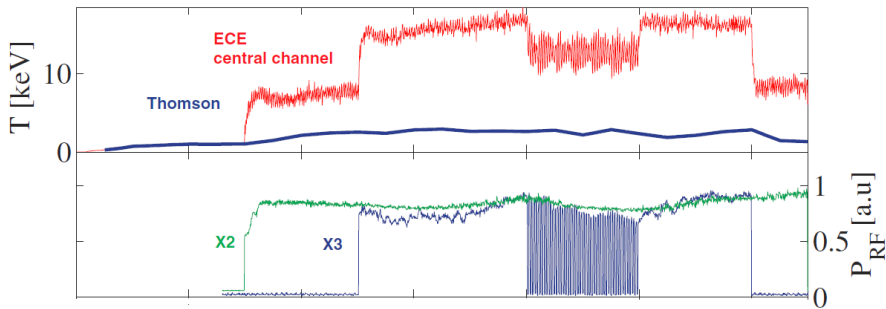
TCV

- Měření z HFS (2. harmonická)
- Skoky v signálu při použití ECH a ECCD (2. a 3. harmonická)



Obrázek: Poloidální pohled s dvěma naznačenými radiometry

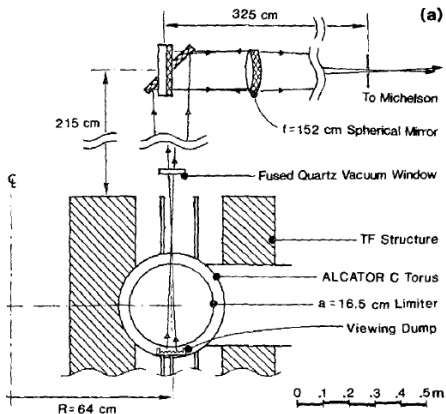
TCV



Obrázek: Výsledek měření na TCV.

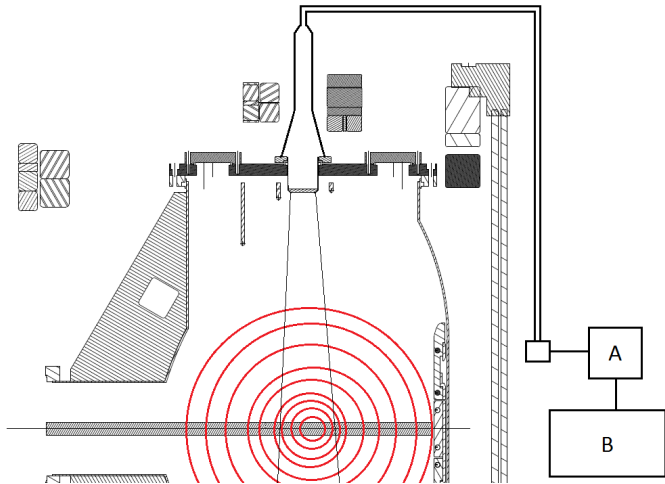
ALCATOR-C

- V-ECE
- Měření širokého spektra pomocí Martin-Puplettovi verze Michelsonova interferometru



Obrázek: Schematický náčrt V-ECE na Alcator.

COMPASS



Obrázek: Schéma radiometru při měření V-ECE na tokamaku COMPASS.

Podmínky na hustotu

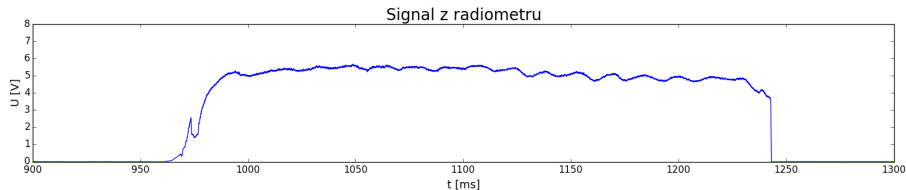
$$n_e < (\omega^2 - \omega\omega_{ce}) \frac{m_e \epsilon_0}{e^2}$$

Plyne z cutoffové podmínky X-módu.

Druhá plyne z podmínky na optickou tloušťku.

Při $\tau \approx 1$ dochází k odrazům od stěny.

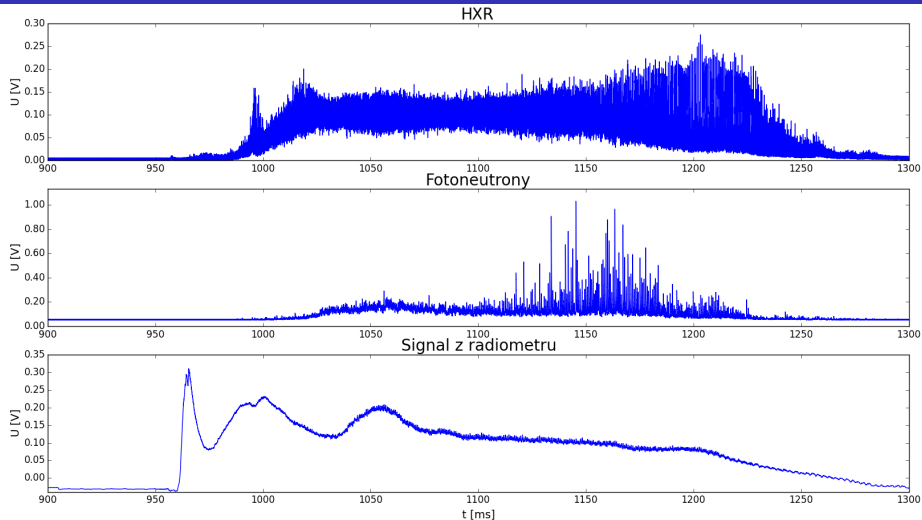
Výskyt tohoto jevu při $n_e \leq 1,5 \cdot 10^{19} \text{ m}^{-3}$, zjištěno experimentálně.



Obrázek: Saturovaný signál při nízké hustotě, shot 13091

Analýza

Prvotní výsledky



Obrázek: Data z měření diagnostik RE a ECE, shot 13065

- Je možné měřit primární generaci RE na počátku výstřelu
- Pro kompletní analýzu je potřeba využít srovnání se simulacemi
Připravovaná spolupráce s týmem z IFP "Pietro Caldiola" v Miláně (L. Figini, D. Farina) a Princeton Plasma Physics Lab (Chang Liu, Lei Shi)
- Předběžně zjištěny zásadní podmínky pro měření V-ECE
- Limituje nás měření příliš malého spektra frekvencí

Další možnosti:

- Kalibrace radiometru
- Použití simulací
- Fokusace viditelné oblasti
- Použití dalšího radiometru

- HUTCHINSON, I. H., *Principles of Plasma Diagnostics*. 2. vyd. New York: Cambridge University Press, 2002. ISBN 0521803896
- MAZZUCATO, E., *Electromagnetic Waves for Thermonuclear Fusion Research*. Singapore: World Scientific, 2014. ISBN 9789814571807
- STIX, T. H., *Waves in Plasmas*. New York: American Institute of Physics, 1992.
- SWENSON, D. G., *Plasma Wwaves*. 2. vyd. Philadelphia: IOP, 2003. ISBN 075030927X
- BORNATICI, M., et. al., Electron cyclotron emission and absorption in fusion plasmas. *Nuclear Fusion*. 1983, vyd. 23, č. 9, s. 1153. Dostupný také z WWW: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/0029-5515/23/9/005/pdf>
- JASPERS, R. J. E., *Relativistic Electrons in Runaway Plasma*. 3. vyd. Haag: CIP-DATA, 1995