

Elektronové cyklotronové vlny v tokamacích

Školitel: Ing. Jakub Urban, Ph.D.
Email: urban@ipp.cas.cz
Telefon: 26605 3564
WWW: www.ipp.cas.cz,  [Linkedin](#)

Úvod

Jedním z nejdůležitějších témat v termonukleární fúzi a fyzice plazmatu vůbec je teorie a aplikace elektromagnetických vln [1, 2]. V tokamacích se jich používá například pro ohřev a generaci proudu nebo pro různé typy diagnostik. Šíření a interakce elektromagnetických vln s magneticky drženým plazmatem je velice bohaté téma, zejména díky existenci charakteristických plazmových a cyklotronových frekvencí.

V Ústavu fyziky plazmatu se dlouhodobě věnujeme výzkumu elektronových cyklotronových (EC) vln a zejména tzv. elektronových Bernsteinových módů (EBW – electron Bernstein wave) [3-6]. Zejména se jedná o vývoj a aplikaci numerických simulací pro studium EBW. Náš simulační kód byl použit např. pro sférické tokamaky MAST a NSTX, kde EBW hrají významnou roli. Na tokamaku COMPASS je také instalována diagnostika (radiometr) pro měření emise EC a EBW vln, tzv. ECE (Electron Cyclotron Emission).

Nabízená témata

- Měření a interpretace elektronové cyklotronové emise na tokamaku COMPASS. Měření bude probíhat s instalovaným radiometrem. Pro interpretaci budou sloužit simulace pomocí numerických kódů.
- Vývoj 1D full-wave kódu s metodou konečných prvků pro teplé plazma, který řeší korektně např. vícenásobné UHR a lze použít pro počáteční podmínky pro ray-tracing. [3, 7]
- Vývoj 2D kódu ve studeném a/nebo teplém plazmatu, který korektně popisuje 2D závislost O-X-EBW konverze. Bude použita metoda konečných prvků, kterou je třeba optimalizovat (adaptivní prvky) a najít vhodné okrajové podmínky.[8]

Průběh studia

Studium bude probíhat především na Ústavu fyziky plazmatu, kde je provozován tokamak COMPASS. V rámci bakalářské práce se student seznámí se základní teorií elektromagnetických vln v plazmatu. Zároveň se bude snažit tyto poznatky využít v praxi pro simulace a případné měření na tokamaku COMPASS. Téma je možné dále rozvíjet až do diplomové práce. Spolupracujeme se zahraničními ústavu, především v rámci EURATOM, součástí studia by tak měly být zahraniční stáže. Student by se měl rovněž zúčastnit některé z evropských letních škol fyziky plazmatu.

Základní vlastnosti EC vln v plazmatu

EC vlny [9-11] mají frekvence řádově rovné elektronové cyklotronové frekvenci

$$\Omega_e \equiv eB / m_e c \cong 1.76 \times 10^{11} B_0 [\text{T}] \text{ rad/s} . \quad (1)$$

kde B_0 je vnější magnetické pole. Elektronové Bernsteinovy vlny [12-14] jsou kvazi-elektrostatické EC módy, které se mohou šířit v plazmatu s vysokou hustotou, tj. když

$$\omega_{pe} \gg \Omega_e \quad (2)$$

kde

$$\omega_{pe} \equiv \sqrt{\frac{4\pi e^2 n_e}{m_e}} \cong 56.4 \sqrt{n_e [\text{m}^{-3}]} \text{ rad/s} \quad (3)$$

je elektronová plazmová frekvence a n_e je elektronová hustota. Pokud totiž platí (2), nemůže se šířit řádná ani mimořádná transversální vlna a EBW je tak jediná možná EC vlna, která se může v takovém plazmatu šířit. Pokud je naopak plazma řídké, EBW se šířit nemůže. Přesněji, aby se mohla EBW šířit, musí platit

$$\omega^2 < \omega_{UHR}^2 \equiv \omega_{pe}^2 + \Omega_e^2 \quad (4)$$

kde ω_{UHR} se nazývá horní hybridní frekvence (UHR – upper hybrid resonance). EBW se proto musí excitovat konverzí řádné či mimořádné vlny na okraji plazmatu, jelikož (4) ve vakuu ani řídkém plazmatu neplatí. Konverze může probíhat i opačným směrem, tj. EBW excitovaná uvnitř hustého plazmatu (typicky elektronovou cyklotronovou emisí) se může v oblasti horní hybridní rezonance konvertovat na vlnu řádnou nebo mimořádnou.

Teorie EC vln je poměrně dobře rozvinutá, velké množství problémů lze ale řešit pouze numericky. Pro simulaci šíření vln se často používá ray-tracing, kde záření se rozdělí na několik paprsků s počáteční polohou a vlnovým vektorem a poté se řeší rovnice vycházející z WKB přiblížení (také se můžeme setkat s termínem geometrická optika). Touto technikou můžeme efektivně řešit šíření EC/EB vln, které mají vysokou frekvenci a krátkou vlnovou délku. Vlnovou rovnici je možné řešit i přímo (full-wave řešení), pro EC/EB vlny by ale bylo řešení v obecné 3D případě a v komplikované geometrii fúzních zařízení značně komplikované. Full-wave se tedy spíše používá pro lokální řešení ve zjednodušené geometrii. V našem případě je to 1D řešení problému konverze O/X módů na EBW pomocí metody konečných prvků.

V ÚFP je vyvíjen kód AMR (Antenna, Mode-conversion, Ray-tracing) [3, 15], který je používán na simulace EBW v tokamacích a stellarátorech. Tento kód obsahuje několik jednoduchých modelů antén, 1D full-wave modul pro řešení konverze O/X módů na EBW (model studeného plazmatu s umělými srážkami) a elektrostatický ray-tracing pro simulaci šíření EBW v plazmatu.

Literatura

1. Stix, T.H., *Waves in plasmas*. 1992, New York: American Institute of Physics. 566.
2. Swanson, D.G., *Plasma waves*. 2nd ed. 2003, Bristol - Philadelphia: Institute of Physics Publishing. 456.
3. Urban, J., *Electron Bernstein Wave Emission Simulations for Spherical Tokamaks*, in *Department of Physical Electronics*. 2008, Czech Technical University in Prague, Faculty of Nuclear Sciences and Physical Engineering: Prague. p. 122.
4. Urban, J., et al., *A survey of electron Bernstein wave heating and current drive potential for spherical tokamaks*. Nuclear Fusion, 2011. **51**(8): p. 083050.
5. Zajac, J., et al., *Electron cyclotron-electron Bernstein wave emission diagnostics for the COMPASS tokamak*. Review of Scientific Instruments, 2010. **81**(10): p. 10D911.
6. Diem, S.J., et al., *Investigation of electron Bernstein wave (EBW) coupling and its critical dependence on EBW collisional loss in high- β H-mode ST plasmas*. Nuclear Fusion, 2009. **49**(9): p. 095027.
7. Ram, A.K., A. Bers, and C.N. Lashmore-Davies, *Emission of electron Bernstein waves in plasmas*. Physics of Plasmas, 2002. **9**(2): p. 409-418.
8. Irzak, M.A. and A.Y. Popov, *2D Modeling of the O-X conversion in toroidal plasmas*. Plasma Physics and Controlled Fusion, 2008. **50**(2): p. 025003.
9. Bornatici, M., et al., *Electron-Cyclotron Emission and Absorption in Fusion Plasmas*. Nuclear Fusion, 1983. **23**(9): p. 1153-1257.
10. Erckmann, V. and U. Gasparino, *Electron Cyclotron Resonance Heating and Current Drive in Toroidal Fusion Plasmas*. Plasma Physics and Controlled Fusion, 1994. **36**(12): p. 1869-1962.
11. Poli, E., *Recent developments in the theory of electron cyclotron waves*. Fusion Science and Technology, 2008. **53**(1): p. 1-11.
12. Bernstein, I.B., *Waves in a Plasma in a Magnetic Field*. Physical Review, 1958. **109**: p. 10-21.

13. Preinhaelter, J. and V. Kopecký, *Penetration of High Frequency Waves into a Weakly Inhomogeneous Magnetized Plasma at Oblique Incidence and Their Transformation to Bernstein Modes*. Journal of Plasma Physics, 1973. **10**(Aug): p. 1-12.
14. Laqua, H.P., *Electron Bernstein wave heating and diagnostic*. Plasma Physics and Controlled Fusion, 2007. **49**(4): p. R1-R42.
15. Urban, J., et al., *EBW Simulations in an experimental context*. Journal of Plasma and Fusion Research SERIES, 2009. **8**: p. 1153-1157.