

Studium okrajového plazmatu v tokamacích pomocí pokročilých elektrických sond

PETR MÁCHA

Vedoucí práce: ING. VOJTĚCH SVOBODA, CSc.

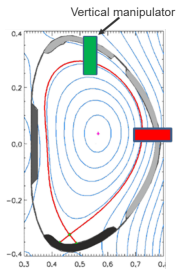
Konzultanti: RNDr. JAN STÖCKEL, CSc.

DR. JAMES P. GUNN CEA Cadarache France

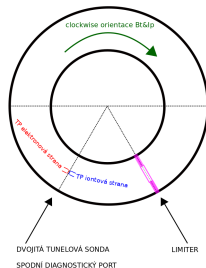
Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská

- Seznámení se se 4 typy pokročilých elektrických sond:
 - Langmuirova sonda
 - Ball-pen sonda
 - Tunelová sonda
 - Machova sonda
- Seznámení se z PIC modelováním v magnetizovaném plazmatu.
- Provedení experimentu a PIC simulací pro vybrané parametry okrajového plazmatu.
- Proměření vybraných parametrů okrajového plazmatu na tokamaku GOLEM pomocí pokročilých sond v různých výbojových režimech.
- Analyzovat existující data z pokročilých sond změřených na tokamaku COMPASS a srovnání s výsledky na tokamaku GOLEM.

Kombinované sondové hlavice



COMPASS



GOLEM

Kombinovaná Ball-Pen a Langmuirova sonda

- **Ball-Pen sonda** - kolektor nabitých částic vnořen do izolantu.
- Dochází k fyzickému odstínění elektronů.
- Měří potenciál plazmatu Φ .
- **Langmuirova sonda** - měří plovoucí potenciál U_{fl} .
- Elektronová teplota z: $T_e = \frac{\Phi - U_{fl}}{\alpha}$.
- α určeno experimentálně:
 - GOLEM vodík: $\alpha = (2.5 \pm 0.7)$.
 - COMPASS deuterium: $\alpha = (2.2 \pm 0.4)$.

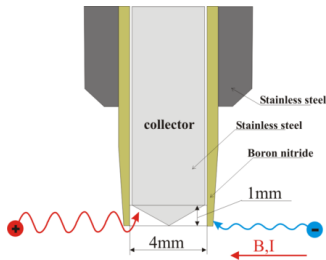
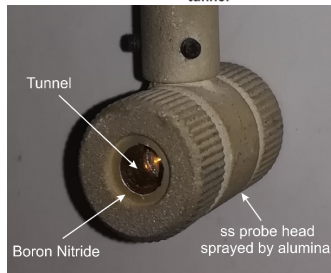
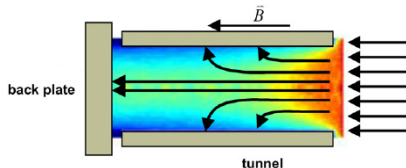


Schéma BPP.

Tunelová sonda

- Konkávní elektrická sonda pro měření v magnetizovaném plazmatu.
- Skládá se z tunelu a zadní desky (backplate).
- Elektrody je možno nabíjet na dané napětí.
- Absence expanze stěnové vrstvy.



Měření parametry plazmatu

1. Ball-pen a Langmuirova sonda:

- Plovoucí potenciál U_{fl} (plovoucí LP), potenciál plazmatu Φ (plovoucí BPP), hustota iontového proudu J_{sat} (LP v režimu iontového proudu), hustota plazmatu n_e (LP v režimu iontového proudu).

2. Tunelová sonda:

Hustota iontového proudu J_{sat} vs. poměr proudů na elektrody R .

$$J_{sat} = en_e \sqrt{\frac{k_b T_e}{m_i}} = \frac{I_{sat}^{BP} + I_{sat}^{TN}}{S} \quad R = \frac{I_{sat}^{TN}}{I_{sat}^{TN} + I_{sat}^{BP}}$$

- Veličiny měřené pro sondu nabitou na vysoké záporné napětí.
- Všechny elektrony odstíněny - sbírány pouze ionty.

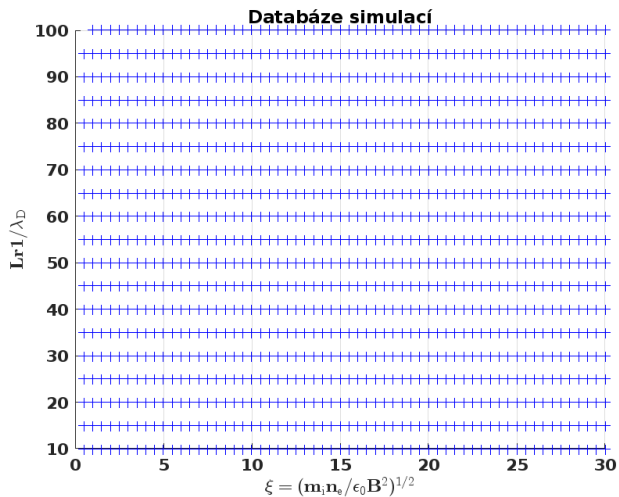
Numerické simulace tunelové sondy – PICCYL

- Cylindrický PIC kód (PIC code in CYLindrical geometry).
- 2 normalizované parametry:

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{\epsilon_0 T_e}{en_e}} \quad \xi = \frac{\omega_{pi}}{\omega_{ci}} = \sqrt{\frac{m_i n_e}{\epsilon_0 B^2}}$$

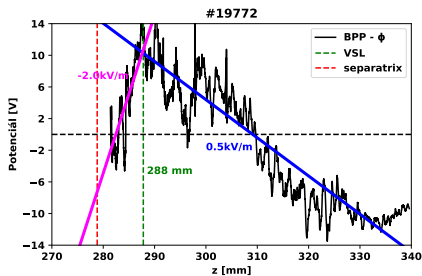
- 6 parametrů plazmatu: J_{sat} , T_e , B , m_i , V_{bias} a r_{TP} .
- Databáze mnoha simulací – pokrytí širokého spektra parametrů plazmatu:
 - $\xi \in \langle 0.5, 30 \rangle$ s krokem $d\xi = 0.5$.
 - $Lr1 \in \langle 5, 100 \rangle$ s krokem $dLr1 = 5$.
 - 5-10 napětí $U_{\text{bias}} \in \langle -200, 0 \rangle$

Databáze simulací

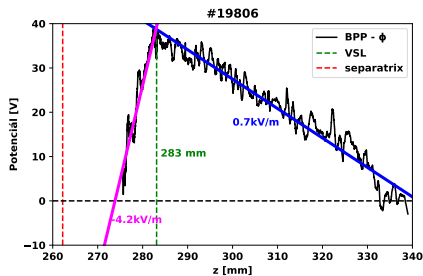


Výsledky COMPASS: rychlostní stříhová vrstva

- Oblast v plazmatu, kde dochází ke změně polarity poloidální rychlosti $v_{\text{pol}} = \frac{E_r}{B_t}$, $E_r = -\frac{d}{dr}\Phi$. Aproximace derivace lineární funkcí.
- Klíčová role při anomálním transportu – zamezení radiálních ztrát.
- Destrukce turbulentních struktur vlivem střížných toků.



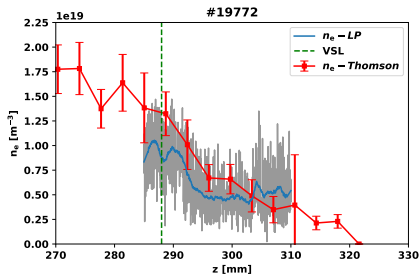
L-mód



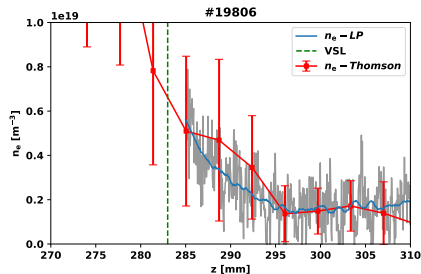
H-mód

Hustota plazmatu

- Hustota měřena LP a pomocí Thomsonova rozptylu.
- Dobrý souhlas mezi oběma metodami.



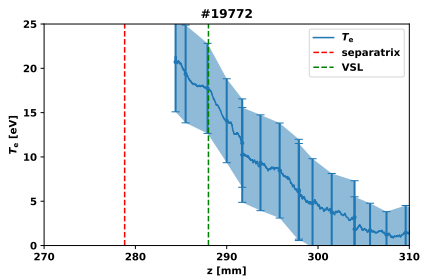
L-mód



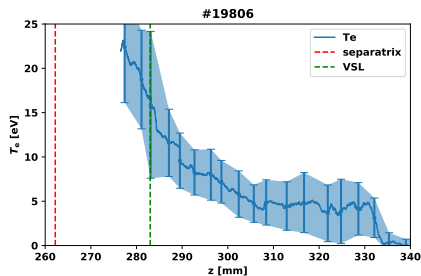
H-mód

Elektronová teplota z LP a BPP

- Elektronová teplota spočtená z $T_e = \frac{\Phi - U_{fl}}{\alpha}$, kde $\alpha = (2.2 \pm 0.4)$.

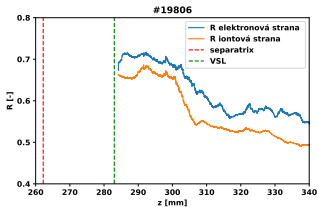
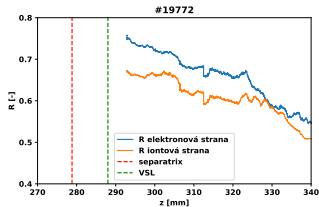
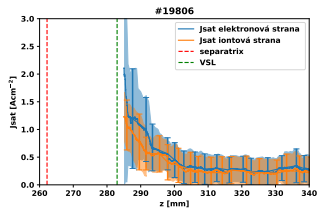
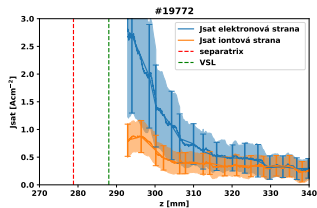


L-mód



H-mód

Hustota iontového proudu a poměr proudů

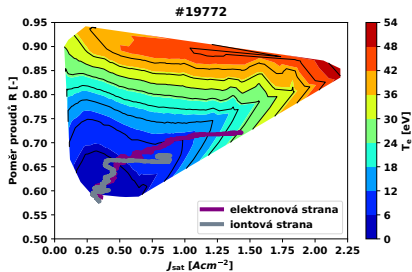


L-mód

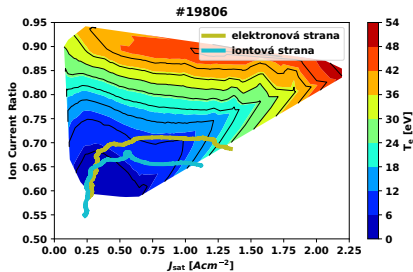
H-mód

Srovnání simulací a experimentu I

- Barevná mapa z databáze simulací.
- Barevné křivky – experimentálně měřené veličiny R a J_{sat} .

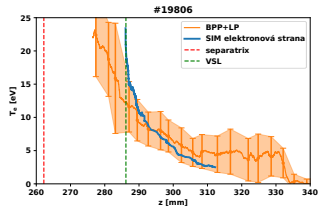
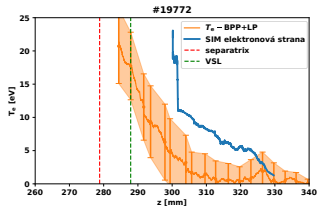
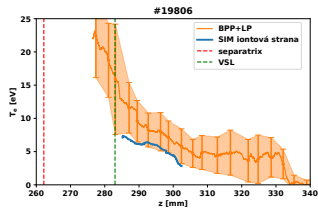
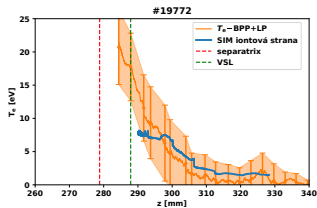


L-mód



H-mód

Srovnání simulací a experimentu II

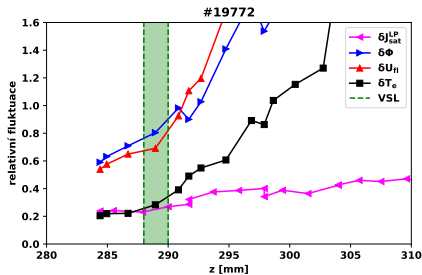


L-mód

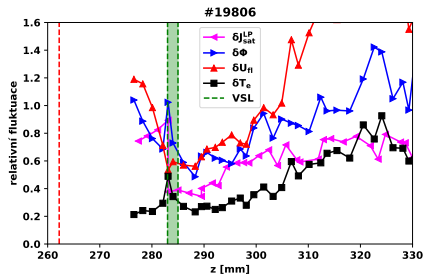
H-mód

Studium fluktuací I

- Zkoumání vlivu VSL na relativní úroveň fluktuací parametrů plazmatu.
- Pokles relativní úrovně fluktuací v těsné blízkosti VSL.



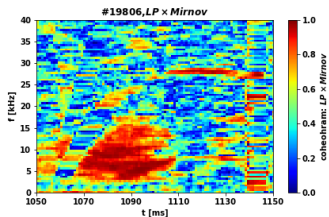
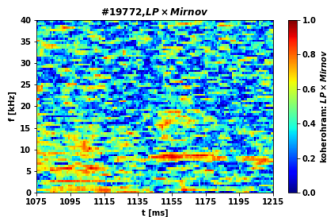
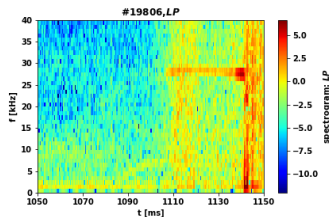
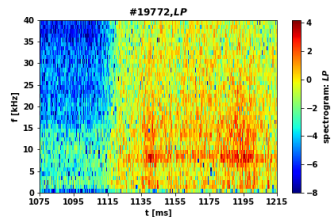
L-mód



H-mód

Studium fluktuací II - spektrogramy

- Kvazikoharentní módy s magnetickou komponentou.

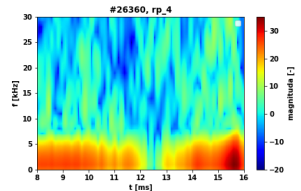
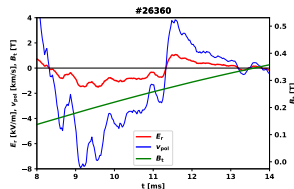
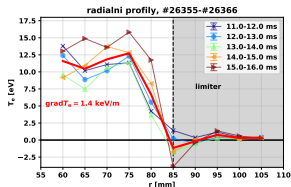
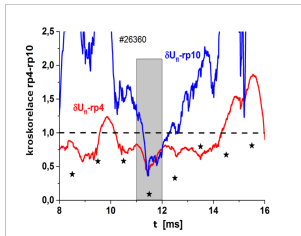
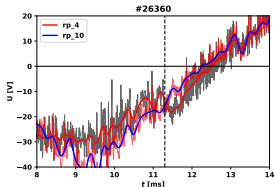
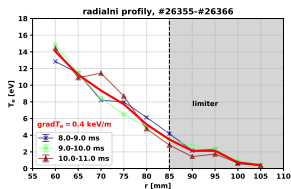


L-mód

H-mód

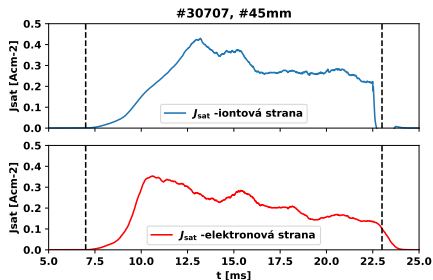
Výsledky GOLEM: rychlostní stříhová vrstva

- Pozorována časově lokalizovaná VSL (měřeno dvojitou hřebínkovou sondou).

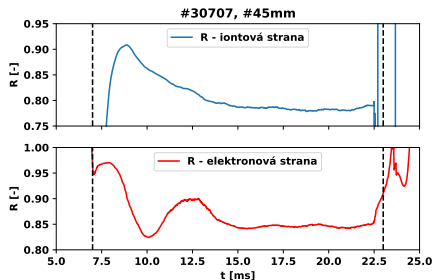


Hustota iontového proudu a poměr proudů

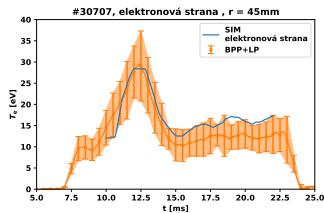
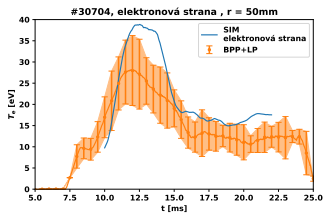
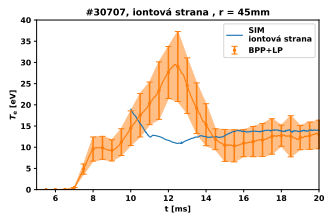
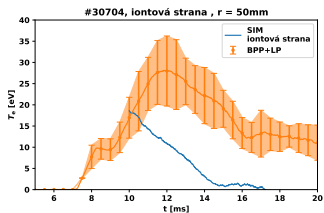
■ Hustota iontového proudu J_{sat} .



■ Poměr proudů na elektrody R .



Srovnání simulací a experimentu



- Zpracování sondových dat v L a H módu na tokamaku COMPASS.
- Určena poloha VSL a diskutován vliv na parametry plazmatu.
- Pozorován pokles relativních fluktuací v okolí VSL – kvazikoherentní módy s magnetickou komponentou.
- Zpracování sondových dat na tokamaku GOLEM.
- Rychle měření elektronové teploty dvojitou tunelovou sondou.
- Dobrá shoda na elektronové straně pro oba tokamaky \implies nová metoda pro rychlé měření teploty.
- Špatná shoda na iontové straně (vliv nadteplných elektronů, toroidální rotace plazmatu, sekundární elektronová emise).

Otázky oponenta a vedoucího práce

1.
 - Posun VSL od separatrix na tokamaku COMPASS. Může se takto poloha lišit a proč?
 - V rámci jakého širšího experimentu probíhala měření na tokamaku COMPASS?
 - Na tokamaku GOLEM je VSL lokalizována v čase. Jaké jsou možnosti lokalizace v prostoru?
2.
 - Proč nedošlo k zasunutí sondy trochu později?
 - Vliv nadteplných elektronů na tokamaku COMPASS.

Odovědi na otázky

■ Výboje z kampaně Liquid metal Divertor (síťková struktura s Lithiem).

