

# Studium okrajového plazmatu v tokamacích pomocí pokročilých elektrických sond

**PETR MÁCHA**

Vedoucí: VOJTĚCH SVOBODA

Konzultant: JAN STÖCKEL, ALEŠ PODOLNÍK,  
JAMIE GUNN CEA Cadarache France

Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská

22.1.2020

# Obsah

- Cíle práce
- Ball-Pen a Langmuirova sonda
- Tunelová sonda
- Motivace pro simulace
- Výsledky z výzkumného úkolu
- Porovnání nový x starý kód
- PICCYL
- Výsledky
- Závěr

- Měření parametrů plazmatu pomocí pokročilých sond:
  - Langmuirova sonda
  - Ball-Pen sonda
  - Tunelová sonda
- Statistické zpracování ze všech měření.
- Seznámení se a zprovoznění PIC kódu.
- Provedení simulací Tunelové sondy.
- Vytvoření databáze pro požadované hodnoty magnetického pole.
- Porovnání experimentu se simulacemi.

# Kombinovaná Ball-Pen a Langmuirova sonda

- **Ball-Pen sonda** - kolektor nabitých částic vnořen do izolantu.
- Dochází k fyzickému odstínění elektronů.
- Měří potenciál plazmatu  $\Phi$ .
- **Langmuirova sonda** - měří plovoucí potenciál  $U_{fl}$ .
- Elektronová teplota z:  $T_e = \frac{\Phi - U_{fl}}{\alpha}$ .
- $\alpha$  určeno experimentálně  $\alpha = 2.5$  [3].

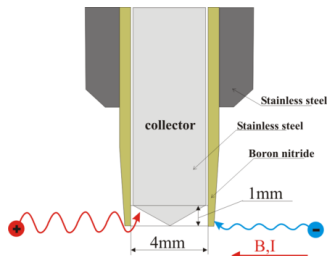
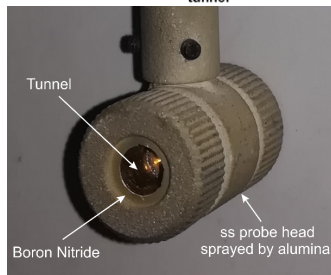
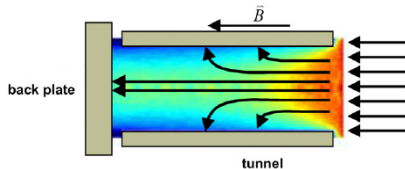


Schéma BPP [3].

# Tunelová sonda

- Elektrická sonda pro měření v okrajovém plazmatu.
- Skládá se z tunelu a backplatu.
- Elektrody je možno nabíjet na dané napětí.
- Dva režimy:
  - 1) Napětí měníme - (IV char.)
  - 2) Vysoké záporné napětí - (iontový proud).
- Absence sheath expansion.



# Měřené veličiny

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

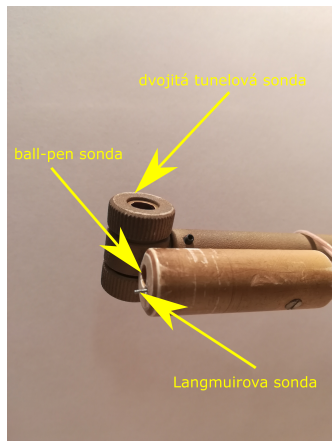
$$J_{\text{sat}} = en_e \sqrt{\frac{k_b T_e}{m_i}} = \frac{I_{\text{sat}}^{\text{BP}} + I_{\text{sat}}^{\text{TN}}}{S}$$

$$R = \frac{I_{\text{sat}}^{\text{TN}}}{I_{\text{sat}}^{\text{TN}} + I_{\text{sat}}^{\text{BP}}}$$

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

# Kombinovaná sondová hlavice

- Ball-Pen a Langmuirova sonda k měření elektronové teploty  $T_e = \frac{\Phi - U_{fl}}{\alpha}$ .
- Tunelová sonda ve dvou režimech:
  - Měníme napětí - IV char. -  $T_e, U_{fl}$ .
  - Vysoké záporné napětí -  $J_{sat}, R$ .
- Sondová hlavice pohyblivá v radiálním směru.
- Měření radiálních profilů parametrů plazmatu.



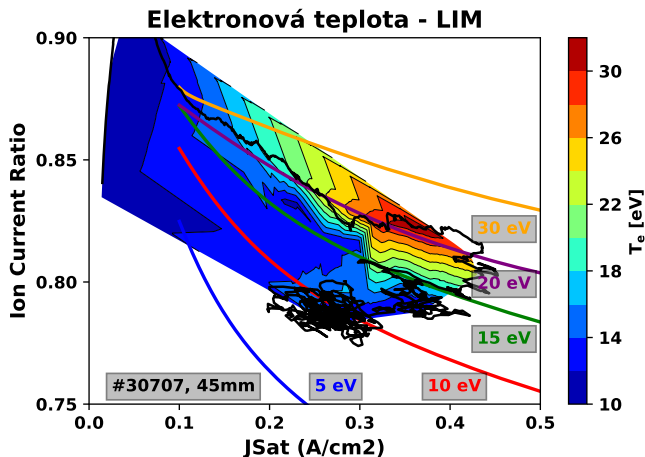
Sondová hlavice [4].

# Motivace pro simulace I

- Interpretovat experimentální data pomocí numerických simulací na tokamaku **GOLEM** a **COMPASS**.
- Cílem je stanovení elektronové teploty s vysokým časovým rozlišením.
- Poměr proudů  $R = \frac{I_{\text{sat}}^{\text{TN}}}{I_{\text{sat}}^{\text{TN}} + I_{\text{sat}}^{\text{BP}}}$  závisí na  $T_e$ ,  $V_{\text{BIAS}}$  a  $J_{\text{sat}}$ .
- Simulace pro různé  $J_{\text{sat}}$  ( $n_e$ ) a  $T_e$  - určení poměru proudů  $R$ .
- Výsledky simulací - kalibrační křivky - závislost  $R$  na  $J_{\text{sat}}$  a  $T_e$ .
- Měřením  $R$  a  $J_{\text{sat}}$  rychle určíme elektronovou teplotu  $T_e$ .



# Motivace pro simulace II



Kalibrační křivky pro CASTOR ( $B = 1$  T, vodík) BPP + LP [4].  
Experimentální data GOLEM.

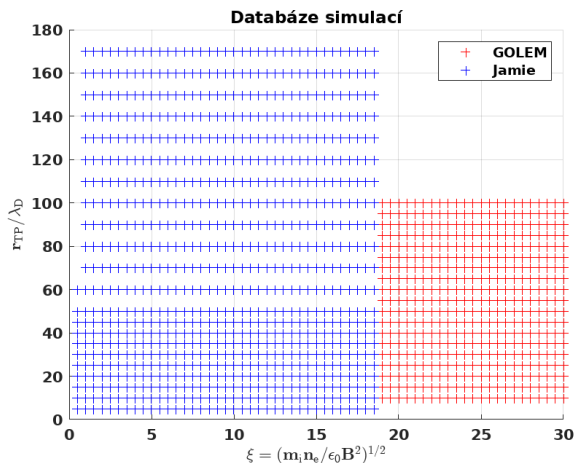
# Numerické simulace - PICCYL

- Cylindrický PIC kód (PIC code in CYLindrical geometry [1]).
- 2 normalizované parametry:

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

- 6 parametrů plazmatu:  $J_{\text{sat}}$ ,  $T_e$ ,  $B$ ,  $m_i$ ,  $V_{\text{bias}}$  a  $r_{\text{TP}}$ .
- 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  $U_{\text{bias}} \in \langle -200, 0 \rangle$

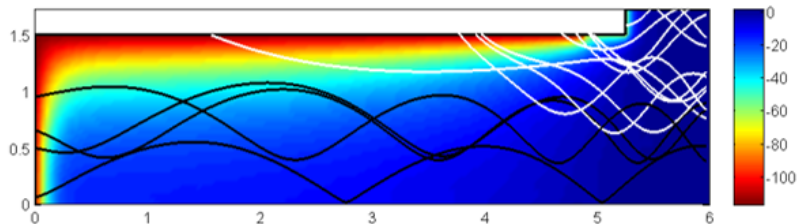
# PICCYL - databáze



Databáze simulací pro široké spektrum parametrů plazmatu.

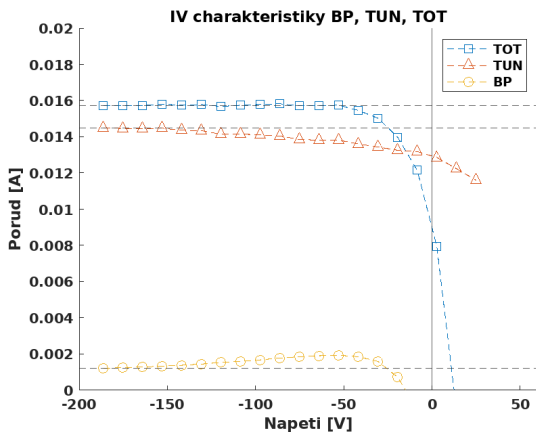
## PICCYL - výstupy

- Hlavním výstupem proudu na backplate a tunel.
- Distribuce závisí na elektrickém poli uvnitř sondy a magnetizaci.



Příklad výstupu simulace s trasováním iontů.

# PICCYL - IV charakteristika



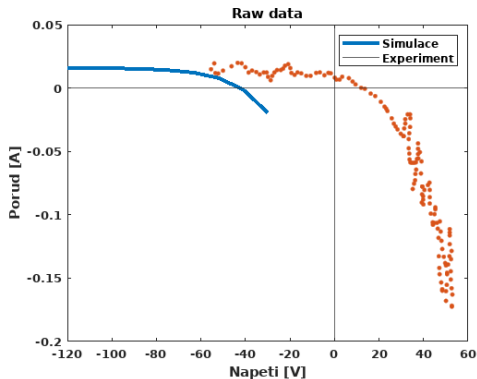
IV charakteristika pro tunel, backplate a celkový proud.  $T_e = 15 \text{ eV}$ ,  
 $J_{\text{sat}} = 1 \text{ Acm}^{-2}$ .

## PICCYL - výpočet $R$

- 1) Zadání veličin  $T_e$ ,  $J_{\text{sat}}$ ,  $rTUN$ ,  $B$ ,  $A$ ,  $\tau$ ,  $U$ .
- 2) Ze zadaných veličin spočteno  $\xi$  a  $Lr1$ .
- 3) Nalezení nejbližších simulací z databáze k spočteným  $\xi$  a  $Lr1$ .
- 4) Každá simulace v databázi minimálně pro 5x různých  $U_{\text{bias}}$ .
- 5) Spočteny proudy na tunel a backplate pro každé napětí  $U_{\text{bias}}$ .
- 6) Proložení proudů splinem.
- 7) Interpolace proudu pro napětí  $U$  zadaného v bodě 1).
- 8) Spočtení poměru proudů  $R$ .

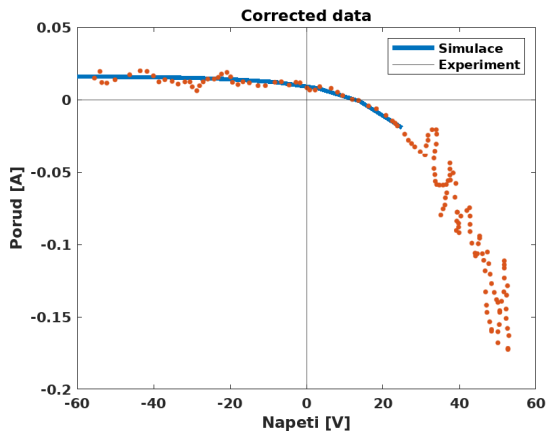
# PICCYL - plovoucí potenciál

- Plovoucí potenciál  $U_{fl} = -3T_e$  a potenciál plazmatu  $\Phi = 0$  v simulaci nastaven fixně.
- Nutnost sjednocení s experimentem.
- Posun výsledků simulace o vhodnou konstantu  $U_p$ .



IV charakteristika bez úprav.  $T_e = 15$  eV,  
 $J_{sat} = 1$  Acm<sup>-2</sup>.

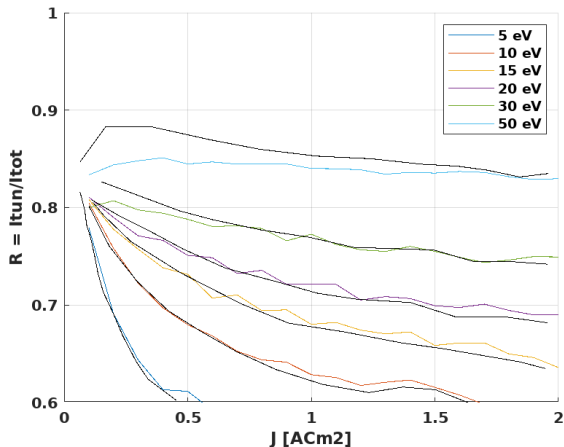
# PICCYL - korekce plovoucího potenciálu



IV charakteristika upravená na plovoucí potenciál.  $T_e = 15 \text{ eV}$ ,  $J_{\text{sat}} = 1 \text{ Acm}^{-2}$ .

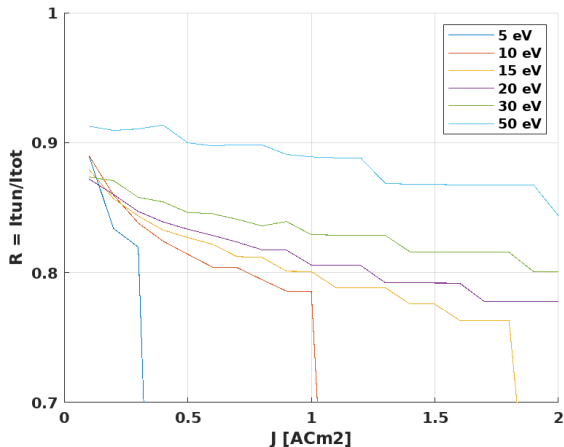


# Výsledky - CASTOR



Výsledné kalibrační křivky pro tokamak CASTOR.

# Výsledky - GOLEM



Výsledné kalibrační křivky pro tokamak GOLEM.

- Postupné seznamování se s PICCYL kódem.
- Použití současného rozsahu databáze na konstrukci kalibračních křivek CASTORu.
- Rozšíření databáze pro simulace plazmatu tokamaku GOLEM.
- Dále: vytvoření statistiky experimentálně měřené  $T_e$  na GOLEMu - BPP+LP.
- Porovnání experimentu se simulacemi.
- Totéž provést pro tokamak COMPASS ( $B = 1.15$  T).

- [1] GUNN, J. *Vývoj, teorie a aplikace tunelové sondy*. Habilitace, 2014.
- [2] GUNN, J. *Vývoj, teorie a aplikace tunelové sondy*. Prezentace, 2014.
- [3] MÁCHA, P. *Měření základních parametrů okrajového plazmatu pomocí kombinované ball-pen a Langmuirovy sondy na tokamaku GOLEM*. Bakalářská práce, 2018.
- [4] MÁCHA, P. *Rychlé měření elektronové teploty na tokamaku GOLEM pomocí Tunelové sondy*. Výzkumný úkol, 2019.