

Měření základních parametrů okrajového plazmatu pomocí kombinované ball-pen a Langmuirovy sondy na tokamaku GOLEM

PETR MÁCHA

VEDOUCÍ PRÁCE: ING. VOJTĚCH SVOBODA, CSC.

KONZULTANT: RNDR. JAN STÖCKEL, CSC.

2017/2018



Obsah

- Osnova a cíle práce
- Motivace
- Struktura práce
- Stručný teoretický úvod
- Postup měření
- Výsledky práce
- Závěr
- Hlubší analýza dat

Osnova a cíle práce

- Seznámení se s problematikou termojaderné fúze, vysokoteplotního plazmatu, tokamaku GOLEM a sondových měření s důrazem na ball-pen sondy.
- Seznámení se SW Python
- Okalibrování charakteristik ball-pen sondy v režimech různých magnetických polí a pro dva pracovní plyny: vodík a helium.
- Provedení měření parametrů plazmatu pomocí kombinované Langmuirovy a ball-pen sondy a jejich srovnání pro vybrané režimy tokamakového výboje
- Změření radiálního profilu elektronové teploty, potenciálu plazmatu a plovoucího potenciálu v obou pracovních plynech.
- Vyhodnocení a diskuse výsledků experimentu.

Motivace

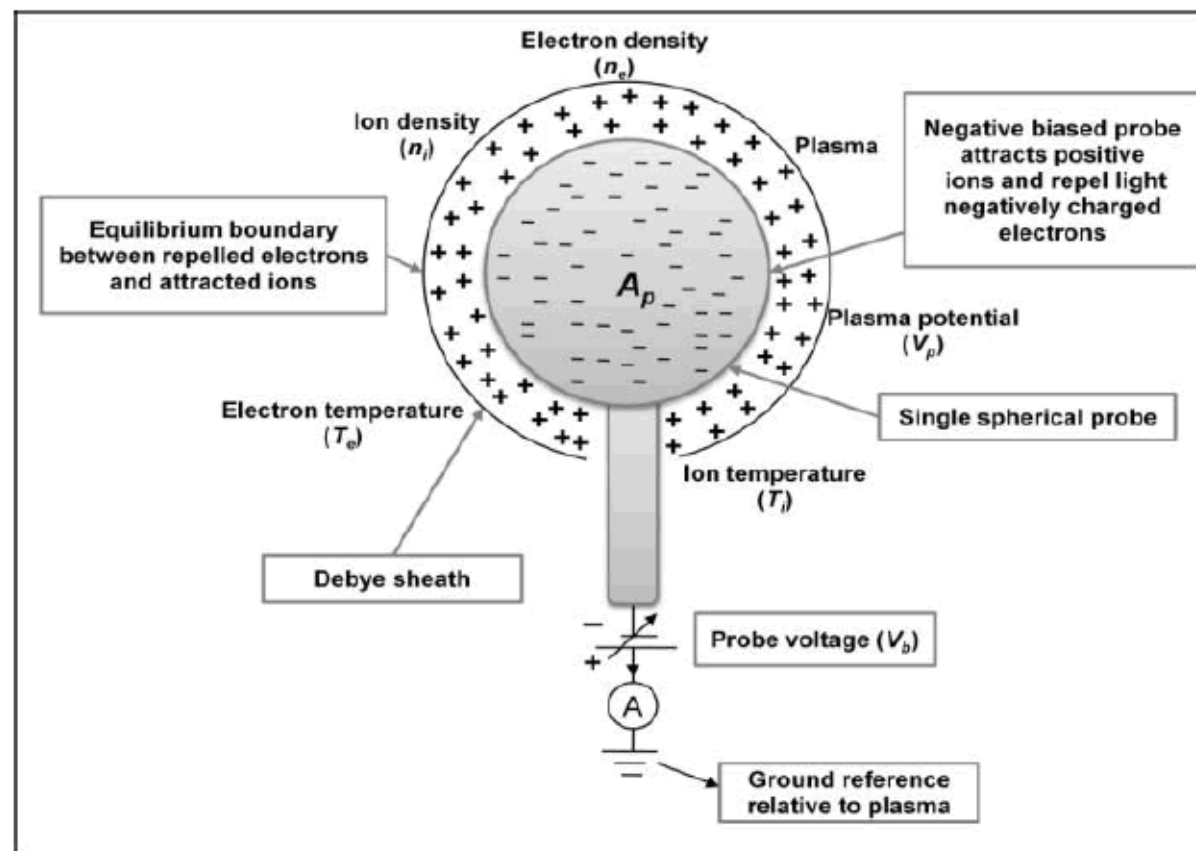
- V budoucnu velký význam termojaderné fúze pro výrobu elektrické energie – k tomu nutný výzkum.
- Speciálně je třeba věnovat pozornost studiu okrajového plazmatu tokamaku.
- Tokamak GOLEM umožňuje unikátní provoz v heliovém plazmatu.
- Hodnota kalibrační konstanty nebyla doposud pro případ heliového plazmatu spočtena - výsledky jsou tak první svého druhu.
- Ball-pen sonda byla vynalezena v Ústavu fyziky plazmatu AV ČR – důležité další studium jejího principu.

Struktura bakalářské práce

- Úvod – pojednání o významu termojaderné fúze.
- Teoretická část
 - Základy fyziky plazmatu pro účely popisu elektrických sond.
 - Princip a popis tokamaků se zaměřením na tokamak GOLEM.
 - Teorie a princip elektrických sond (Langmuirovy a ball-pen sondy).
- Experimentální část
 - Vodíkové plazma
 - Kalibrační konstanta α
 - Radiální profily.
 - Heliové plazma
 - Kalibrační konstanta α
 - Radiální profily
- Diskuze a závěr

Elektrické sondy – Langmuirova sonda

- Vodič vnořený do plazmatu.
- Dopadají na něj elektrony a ionty.
- Na sondu je přiloženo napětí vůči referenční elektrodě (komora tokamaku).
- V závislosti na napětí se odpuzují a přitahují nabitě částice.
- Měření sondového proudu.
- Závislost sondového proudu na sondovém napětí nazveme volt-ampérová charakteristika.

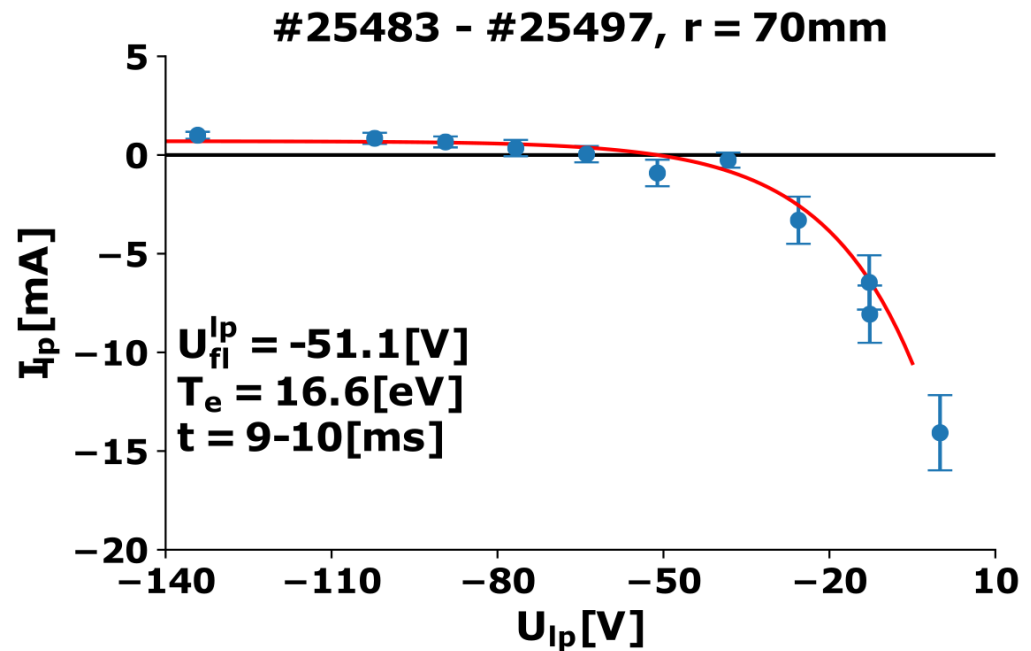


Elektrické sondy – volt-ampérové charakteristiky

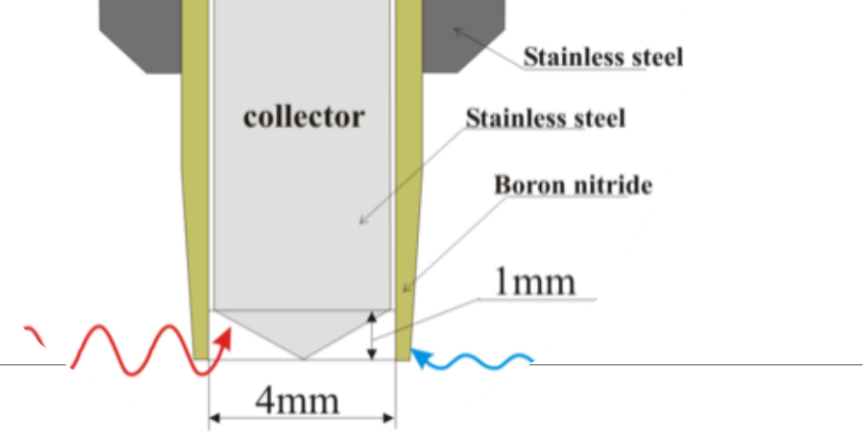
- Příklad volt-ampérové charakteristiky Langmuirovi sondy.
- Obsahuje větev iontového nasyceného proudu.
- Aproximováno analytickou funkcí:

$$I_{lp} = I_{sat}^+ \left(1 - \exp \frac{U_{lp} - U_{fl}^{lp}}{T_e} \right)$$

- Pro správnou aproximaci:
 - Dosažení iontového nasycení.
 - Body v okolí plovoucího potenciálu.
 - Pro fit body do max. 5x násobku iontového nasyceného proudu.



Elektrické sondy – ball-pen



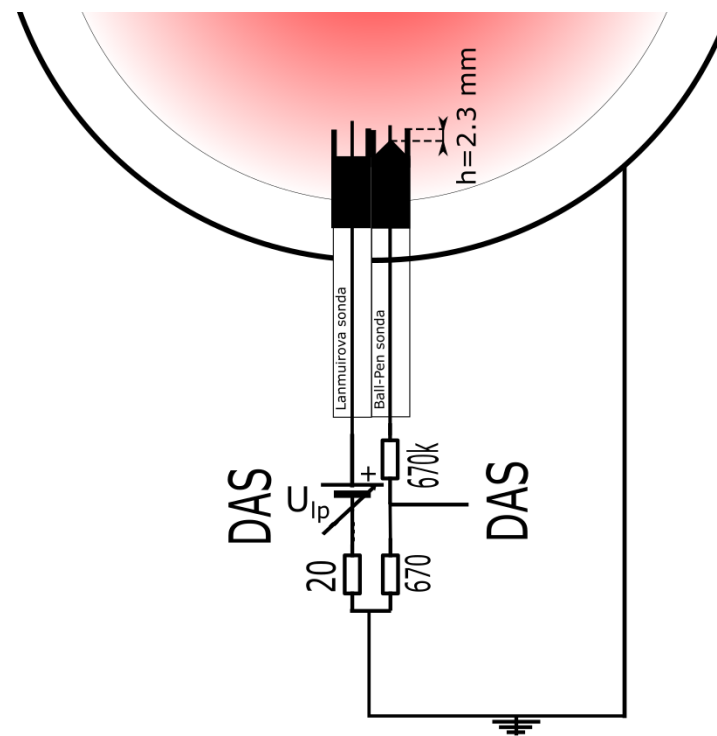
Převzato z: https://en.wikipedia.org/wiki/Ball-pen_probe

- Modifikovaná Langmuirova sonda.
- Kolektor nabitých částic je vnořen do pohyblivého izolantu.
- Sonda byla vyvinuta za účelem přímého měření potenciálu plazmatu.
- Trubice slouží k fyzickému odstínění elektronů.
- Elektrony obíhají kolem magnetických siločar s menším Larmorovým poloměrem – nepřekonají izolant.



Měření kalibrační konstanty α

- Kalibrace Langmuirovy sondy pomocí volt-ampérových charakteristik.
- Langmuirova sonda pod napětím, ball-pen sonda v plovoucím režimu.
- Fitováním IV charakteristik vhodnou analytickou funkcí, odvozena elektronová teplota a plovoucí potenciál.
- Z ball-pen sondy potenciál plazmatu.
- Ze vztahu $\alpha = \frac{\Phi - U_{fl}^{lp}}{T_e}$ spočtena hodnota kalibrační konstanty α .

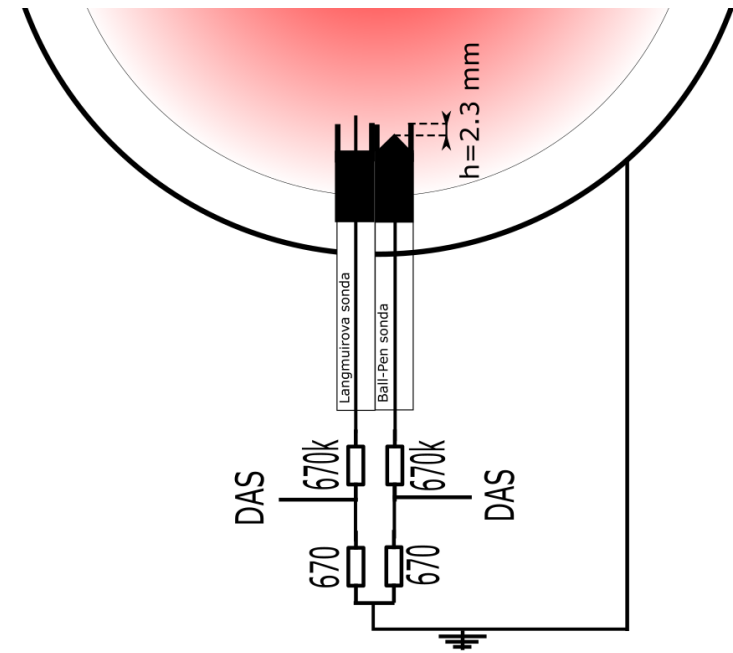


Měření základních parametrů

- Obě sondy v plovoucím režimu.
- Kombinovaná sondová hlavice posuvná v radiálním směru.
- Měření plovoucího potenciálu a potenciálu plazmatu.

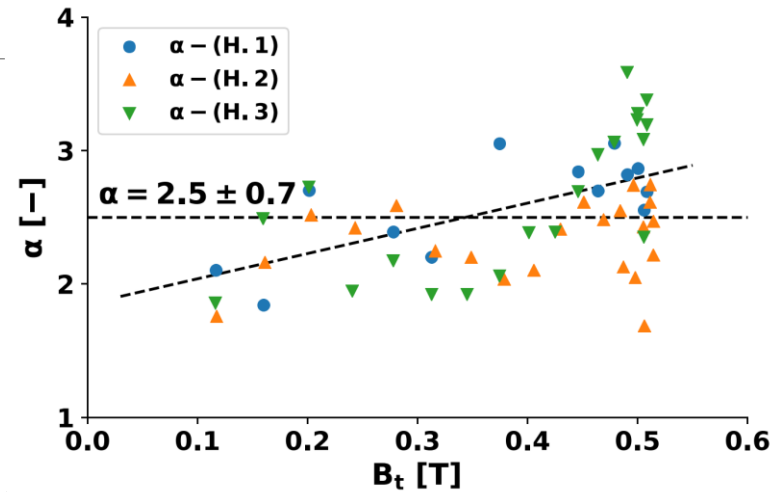
- Ze vztahu $T_e = \frac{U_{fl}^{bpp} - U_{fl}^{lp}}{\alpha}$ vypočtena elektronová teplota.

- Posouváním sondové hlavice proměřeny radiální profily $T_e, U_{fl}^{bpp}, U_{fl}^{lp}$.

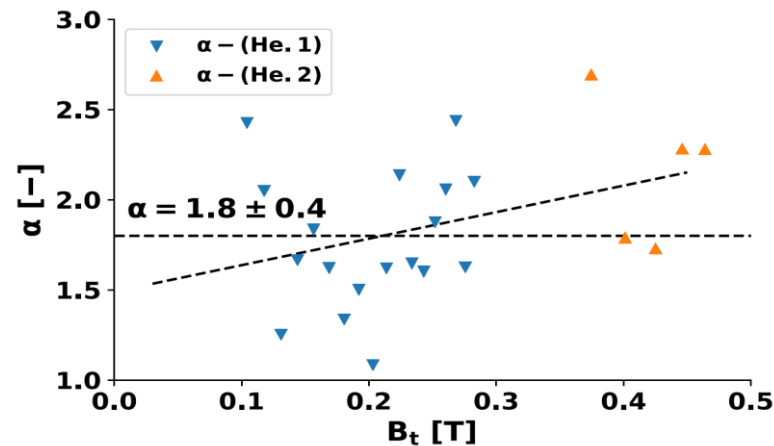


Výsledky – kalibrační konstanta

- Grafy závislosti kalibrační konstanty α na toroidálním magnetickém poli ve vodíkovém a heliovém plazmatu.
- Nabízí se dva pohledy
 - α není závislé na B_t - střední hodnota.
 - α je závislé na B_t - lineární regrese.
- Hodnota kalibrační konstanty v heliovém plazmatu má zjevně nižší hodnotu.
- Méně patrná závislost na B_t v heliovém výboji.
- Pro další výpočty uvažována **střední hodnota** nepředpokládající závislost na toroidálním magnetickém poli.



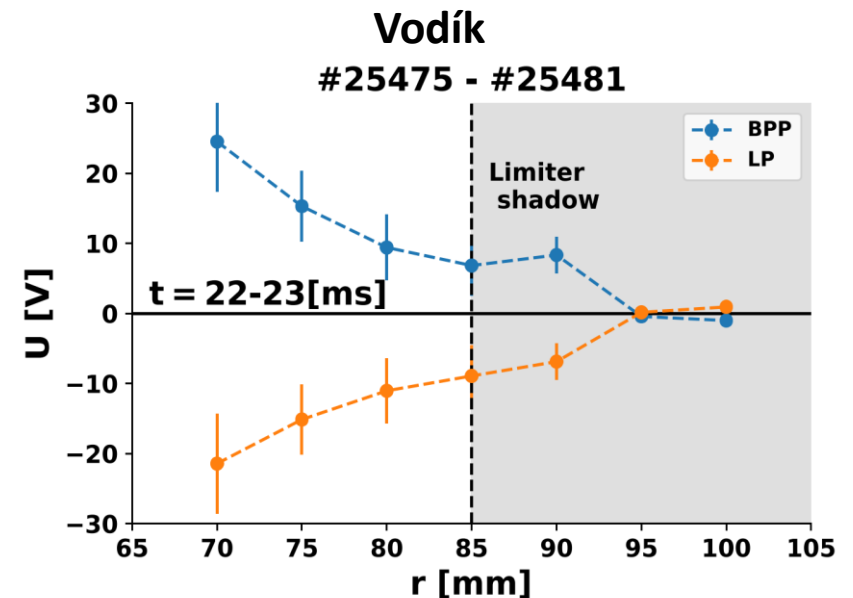
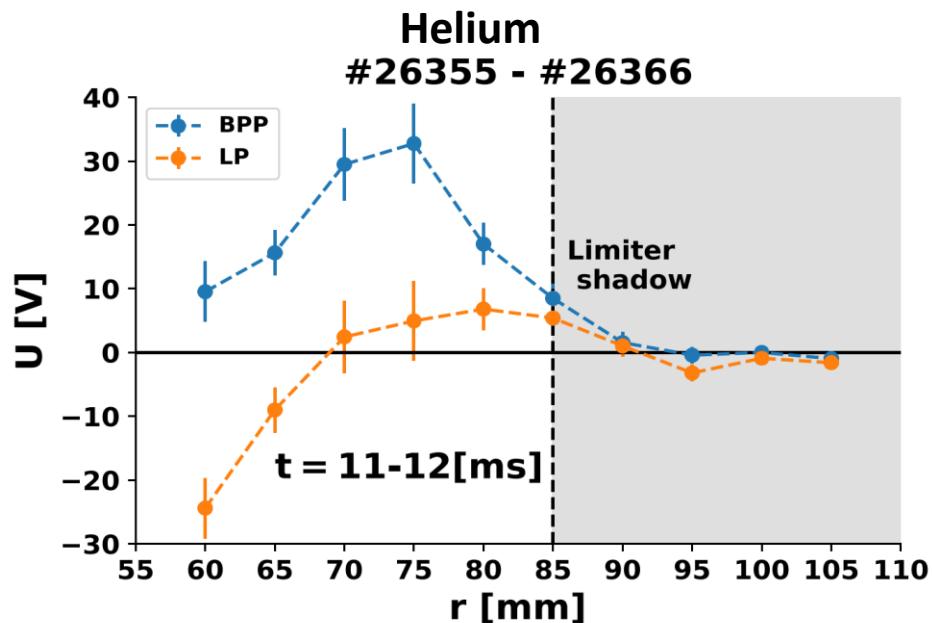
Vodík



Helium

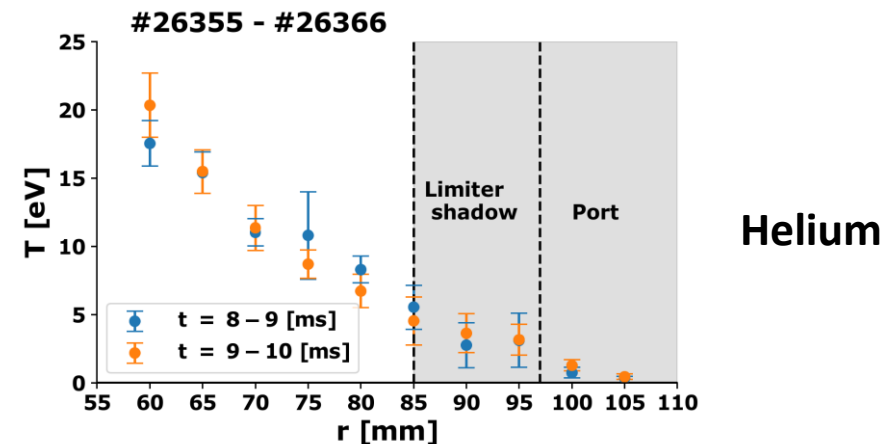
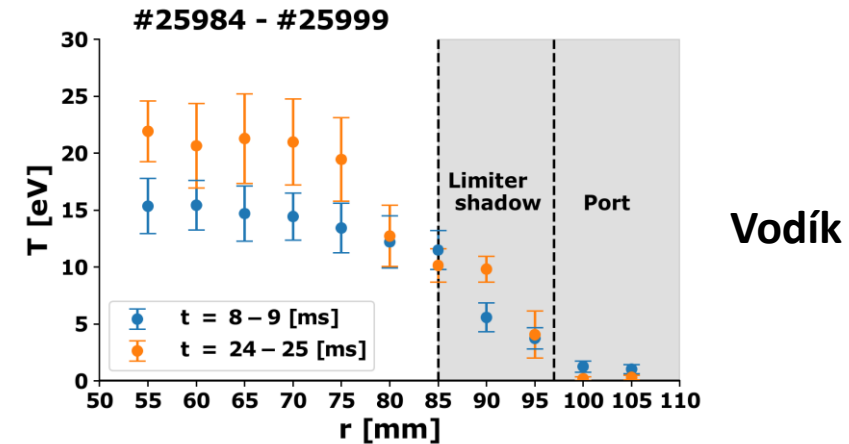
Výsledky – plovoucí potenciál a potenciál plazmatu

- Příklady radiálních profilů plovoucího potenciálu a potenciálu plazmatu ve vodíkovém a heliovém plazmatu.
- Rozdíl obou potenciálů v závislosti na vzdálenosti od středu plazmatu klesá – usuzujeme, že klesá elektronová teplota.



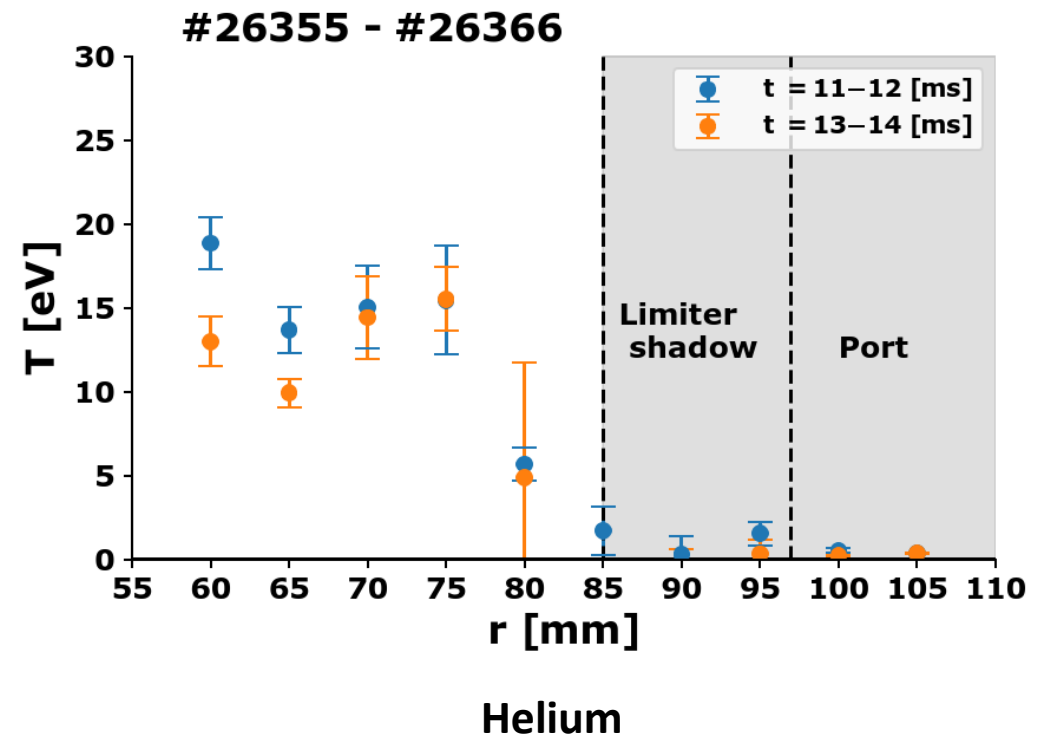
Výsledky – elektronové teploty

- Příklady radiálních profilů elektronové teploty v obou pracovních plynech.
- Ideální průběh elektronové teploty.
- V závislosti na vzdálenosti od středu elektronová teplota klesá v obou pracovních plynech.
- Při pozicích blíže ke středu by docházelo k narušování plazmatu a hrozila by destrukce sondy => omezení.
- Očekávané výsledky, vzhledem k průběhu rozdílu potenciálů z předchozího slidu.



Výsledky - shear

- Zformování strmého gradientu elektronové teploty v časech 11-12 ms, který přetrvává asi 5 ms.
- Analýza jevu pomocí double rake sondy => dochází ke vzniku jevu „shear“ - stříh.
- Větší struktury plazmatu jsou tak střiženy na více částí.
- Dochází k dekorelaci fluktuací plovoucího potenciálu mezi hroty double rake sondy.
- Prezentace tohoto jevu na SPPT 2018 – Poster.



Závěr

- Hlavní cíl práce – kalibrace Langmuirovy sondy ve vodíkovém a heliovém plazmatu.
- V případě helia se jedná o první měření svého druhu.
- Velký význam pro další měření v heliovém plazmatu.
- Změření radiálních profilů potenciálu plazmatu, plovoucího potenciálu a elektronové teploty v obou pracovních plynech.
- Objevení spontánního jevu, způsobujícího shear – stříh.
- Prezentování na konferenci SPPT 2018 formou Posteru.
- Díky výsledkům práce (kalibraci sondy v heliovém plazmatu) lze snadněji měřit parametry okrajového plazmatu.

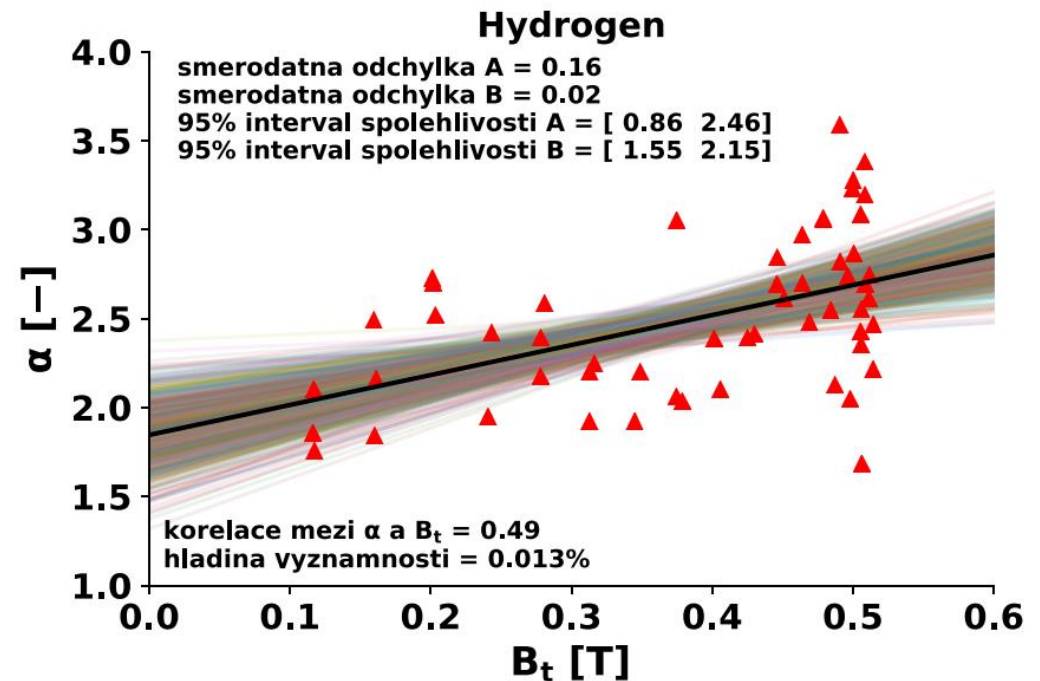
Děkuji za pozornost



Hlubší analýza výsledků - vodík

- Pro určení závislosti kalibrační konstanty α na toroidálním magnetickém poli B_t provedena hlubší analýza.
- Korelační koeficient – 0.49
- Hladina významnosti korelace – 0.0013 %
- Neurčitost regresních koeficientů lineární závislosti ve tvaru $f(x) = A \cdot x + b$
- Původní hodnoty aproximace:

$$\alpha(B_t) = (1.89 \pm 0.16) B_t + (1.85 \pm 0.02)$$



Hlubší analýza výsledků - helium

- Pro určení závislosti kalibrační konstanty α na toroidálním magnetickém poli B_t v heliovém plazmatu taktéž provedena hlubší analýza.
- Korelační koeficient – 0.38
- Hladina významnosti korelace – 7.04 %
- Neurčitost regresních koeficientů lineární závislosti ve tvaru $f(x) = A \cdot x + b$
- Původní hodnoty aproximace:

$$\alpha(B_t) = (1.47 \pm 0.67) B_t + (1.49 \pm 0.05)$$

