



Měření parametrů plazmatu na tokamaku GOLEM pomocí elektrických sond

Autoři: Andrej Macek, Robin Beer

Odborní garanti: Bc. Václav Sedmidubský, Ing. Petr Mácha

Týden vědy na Jaderce 2025

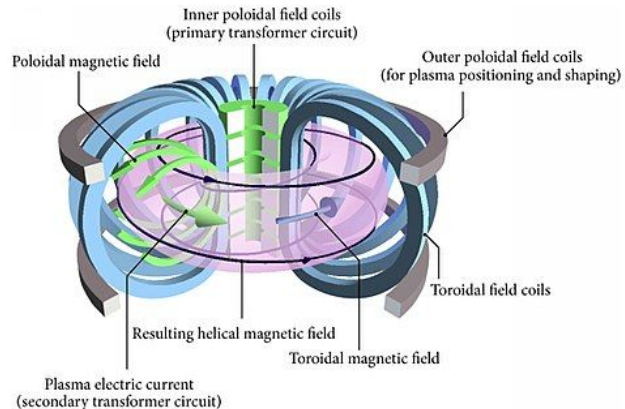
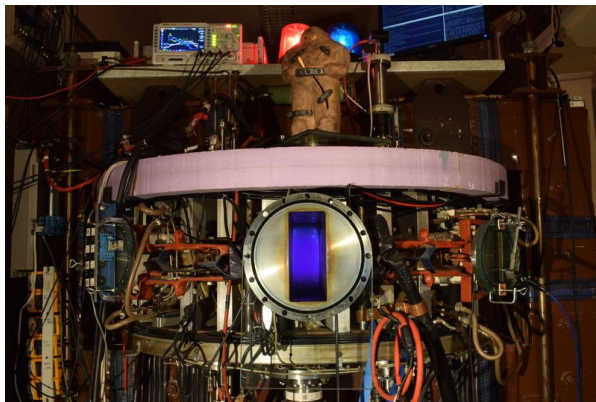
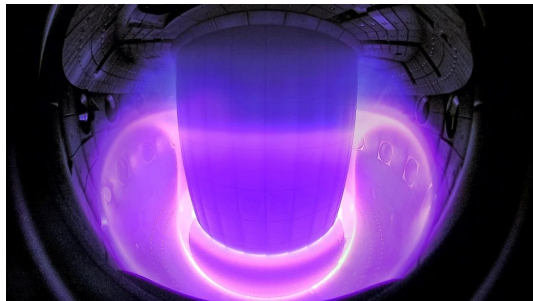
Obsah prezentace

- I. Tokamak
- II. Elektrické sondy
- III. Cíle měření
- IV. Prezentování měření a výsledků
- V. Závěr



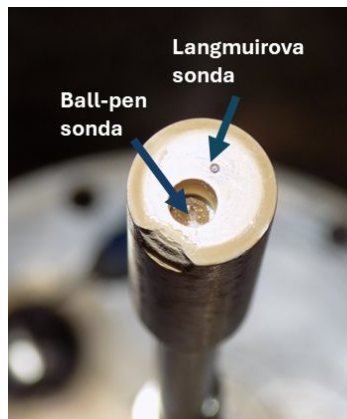
Tokamak

- Zařízení pro vytvoření kontrolovaného plazmatu na Zemi
- Komora má pro účely uzavření magnetických siločar tvar torusu
- Plazma se vytváří v takzvané magnetické nádobě, s nízkou hustotou, ale o velmi vysoké teplotě

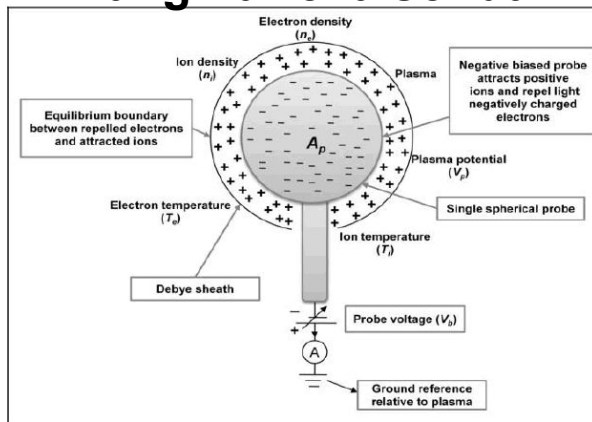


Sondy

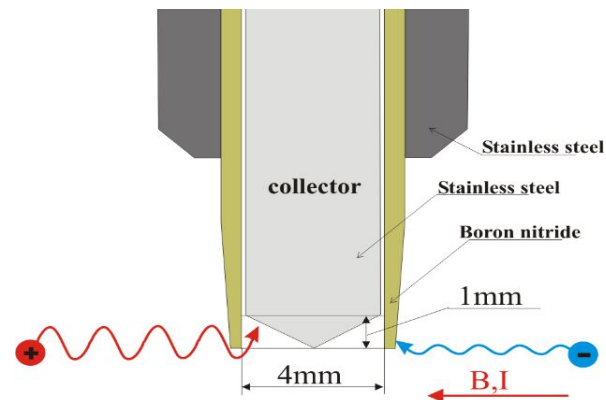
- Máme k dispozici 2 sondy na kombinované hlavici
- Langmuirova sonda je drátek vložený do plazmatu
- Kolektor Ball-pen sondy je vložen do dielektrické trubice, která limituje proud elektronů



Langmuirova sonda



Ball-pen sonda



Cíle měření



**FACULTY OF
NUCLEAR SCIENCES
AND PHYSICAL
ENGINEERING
CTU IN PRAGUE**

- I. Teplota elektronů ze základní diagnostiky
- II. Teplota elektronů z VA charakteristiky
- III. Rychlé měření teploty elektronů z plovoucích potenciálů
- IV. Měření hustoty iontů

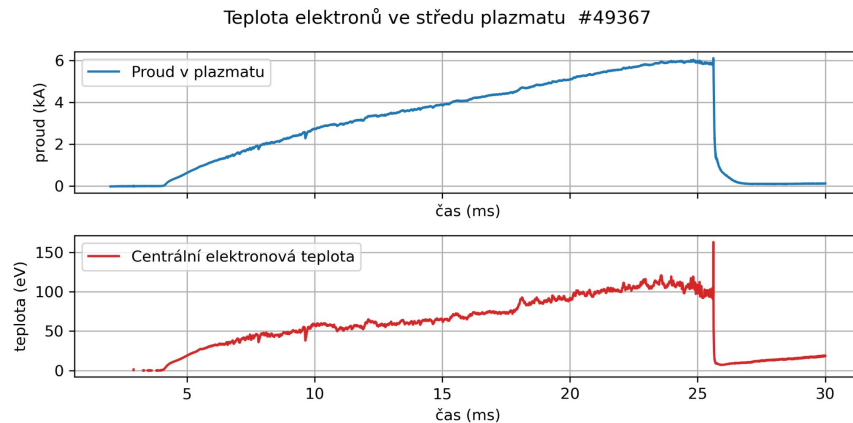
Teplota ze základní diagnostiky



FACULTY OF
NUCLEAR SCIENCES
AND PHYSICAL
ENGINEERING
CTU IN PRAGUE

- Počítáme z Spitzerovy rovnice
- Určuje teplotu ve středu plazmatu
- Vstupní data jsou proud měřený Rogowského cívkou a napětí na závit
- Dokáže měřit bezkontaktně a ve středu plazmatu
- Nelze měřit teplotu lokálně

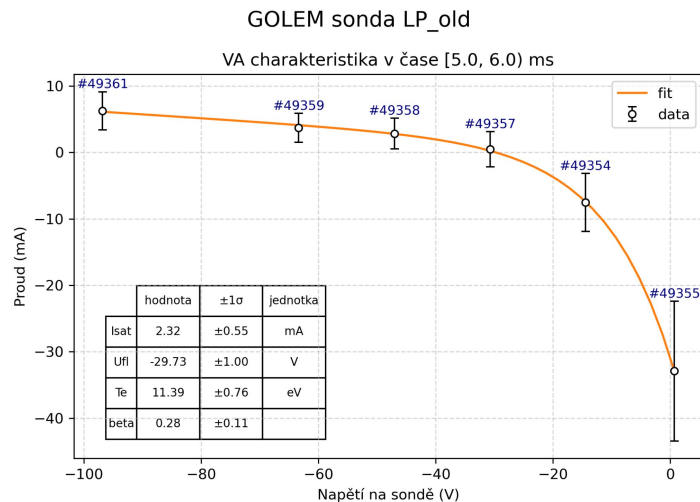
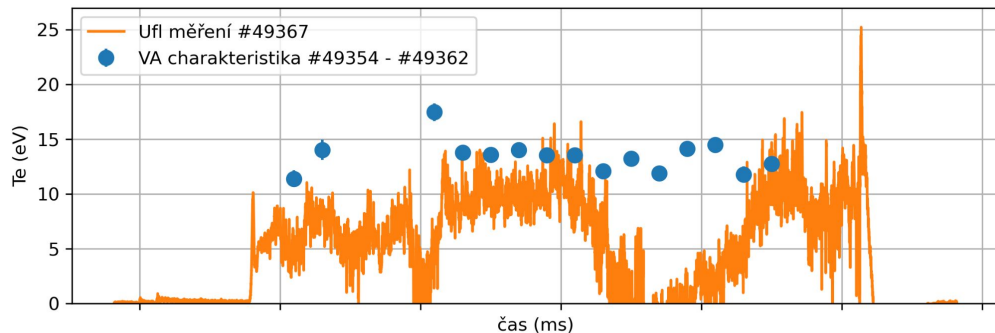
$$T_e(0, t) = 0.9 \cdot \left(\frac{I_p(t)}{U_l(t)} \right)^{2/3}, [eV; A, V]$$





Teplota z VA charakteristiky

- Na Langmuirovu sondu přivedeme napětí a měříme, jaký ní prochází proud
- VA charakteristiku fitujeme rovnicí $I = I_{sat}^+ \cdot \left[1 - \beta \left(\frac{U - U_{fl}}{T_e} \right) - \exp \left(\frac{U - U_{fl}}{T_e} \right) \right]$
 - 4 parametry → popisují vlastnosti plazmatu
- Je nutné provést více výbojů při kterých měníme napětí na sondě

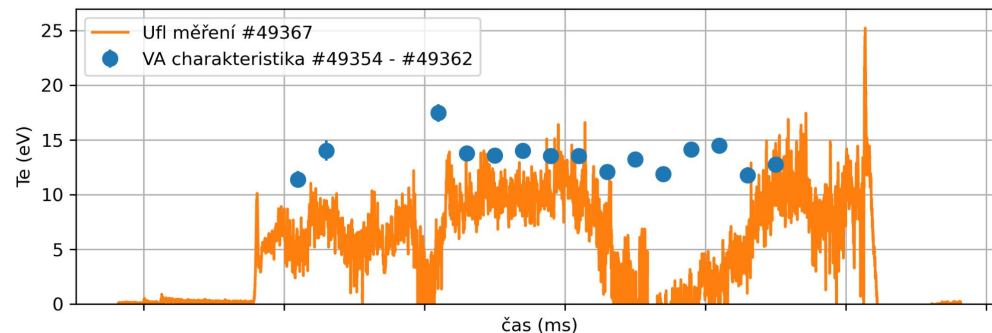


Rychlé měření teploty z plovoucích potenciálů



- Pomocí plovoucích potenciálů a kalibrační konstanty α
- Vysoké časové rozlišení
- Snadno ovlivnitelné vnějšími signály
- Musíme znát hodnotu α

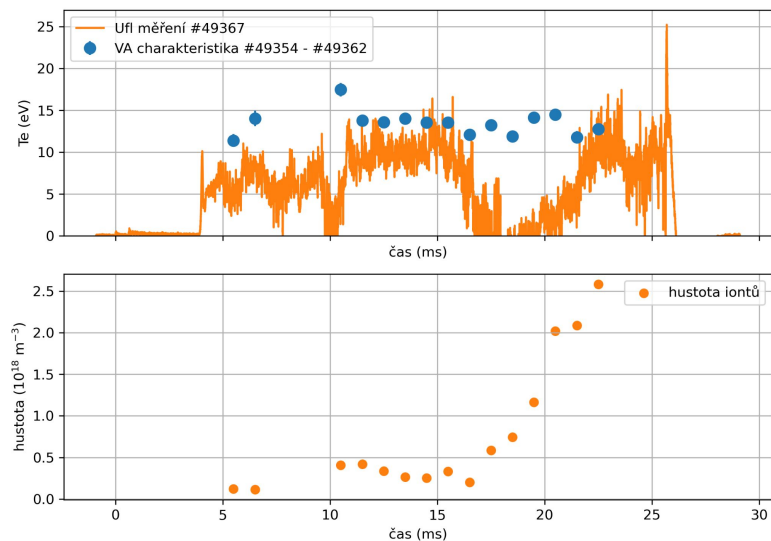
$$T_e = \frac{U_{fl}^{(BPP)} - U_{fl}^{(LP)}}{\alpha^{(LP+BPP)}}$$





Měření hustoty iontů

- Potřebuje teplotu a saturovaný proud iontů
- Předpokládáme, že teplota iontů je stejná jako teplota elektronů



$$n_i = f(T_e, I_{sat}^+) = \frac{I_{sat}^+}{e \cdot c_s^i \cdot S_{probe}}$$

$$(c_s^i)^2 = \frac{\gamma k_B T_i}{m_i} \approx \frac{2 \cdot e \cdot T_e [ev]}{m_i}$$

(assumes $T_i = T_e$)

Závěr



FACULTY OF
NUCLEAR SCIENCES
AND PHYSICAL
ENGINEERING
CTU IN PRAGUE

- Seznámili jsme se s tokamakem GOLEM
- Seznámili jsme se se sondovými měřeními
- Změřili jsme teplotu elektronů třemi různými způsoby
- Okrajová teplota plazmatu změřena sondami odpovídá svou velikostí našemu očekávání
- Z našich měření jsme vypožorovali, že teplota z měření VA charakteristiky a plovoucích potenciálů sedí pouze částečně
- Změřili jsme hustotu plazmatu pomocí sond, která odpovídá měření z interferometru

Zdroje obrázků

- <https://golem.fjfi.cvut.cz/wiki/>
- https://cs.wikipedia.org/wiki/Jadern%C3%BD_f%C3%BAzn%C3%AD_reaktor
- <https://www.roboticjournal.cz/clanky/2022-cislo-1-al-ridila-plazmu-uvnitr-fuznih-o-reaktoru>

Zdroje reference

- Svoboda, Vojtech & Pokol, G & Réfy, Dániel Imre & Stockel, J. & Vondrášek, G. Former tokamak CASTOR becomes remotely controllable GOLEM at the Czech Technical University in Prague.
- Adamek, Jiri & Ionita, C. & Schrittwieser, Roman & Stockel, J. & Tichy, Milan & Oost, G.. (2005). Direct measurements of the electron temperature by a ball-pen/langmuir probe. 3. 2214-2217.