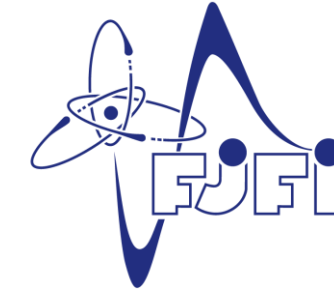


SONDOVÉ MĚŘENÍ PARAMETRŮ OKRAJOVÉHO PLAZMATU NA TOKAMAKU GOLEM S POMOCÍ MOTORIZOVANÉHO MANIPULÁTORU

Matyáš Pokorný (konzultant práce: Ing. Petr Mácha)

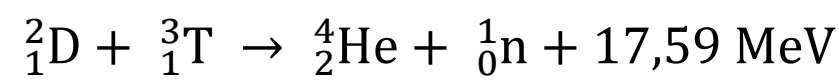
Gymnázium Jana Nerudy; Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská ČVUT

Praha 2022



TEORETICKÝ ÚVOD

- K dosažení termojaderné fúze, při které jsou slučovány jádra lehkých prvků na těžší za uvolnění velkého množství energie, je potřeba zahřát pracovní plyn na vysoké teploty, při kterých dochází k přechodu do plazmatického skupenství.
- Tokamak (viz Obr. 1) je zařízení pro udržení vysokoteplotního plazmatu pomocí silného a komplexního magnetického pole.
- Do budoucna je plánováno využití reakce mezi deuteriem a tritiem (pro tuto práci byl využit pouze vodík):



- Veškerá experimentální měření byla provedena na tokamaku GOLEM, který náleží Fakultě jaderné a fyzikálně inženýrské ČVUT a je veden Ing. Vojtěchem Svobodou, CSc. [1]
- V rámci práce byl nejprve zprovozněn motorizovaný manipulátor elektrických sond, dále byl změřen vůbec první úhlový profil iontového saturovaného proudu na tokamaku GOLEM a nakonec byly porovnány dvě metody výpočtu Machova čísla pro popis pohybu plazmatu.

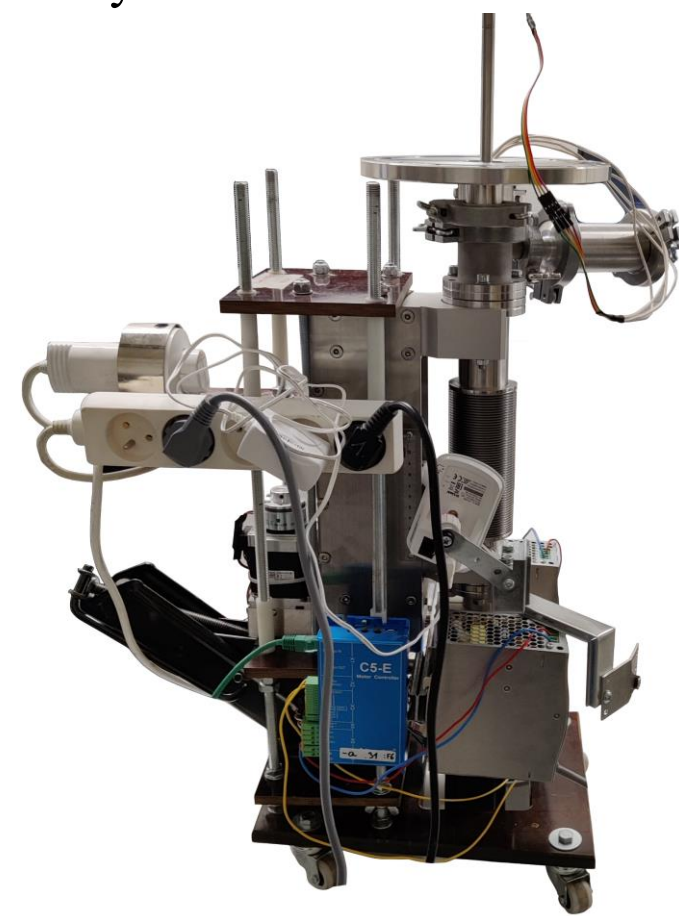
1. MOTORIZOVANÝ MANIPULÁTOR

- Byl zprovozněn a implementován do tokamaku GOLEM již zkonstruovaný dálkově ovládaný motorizovaný manipulátor elektrických sond.

- Byl vytvořen skript v programovacím jazyku Python pro komunikaci s manipulátorem. Manipulátor byl nadále kalibrován, testován a byl implementován systém pro snímání polohy sondy.

- Pomocí dvou krokových motorů manipulátor umožňuje se sondou pohybovat směrem od a ke středu komory tokamaku (radiální souřadnice) a otáčet s ní okolo její osy (axiální nebo úhlová souřadnice).

- Manipulátor na tokamaku GOLEM nyní zvyšuje efektivitu měření radiálních profilů a nově umožňuje měřit úhlové profily, kterými se zabývá provedené experimentální měření.



Obr. 2: Motorizovaný manipulátor před instalací do tokamaku.

2. ÚHLOVÝ PROFIL I_{sat}^+

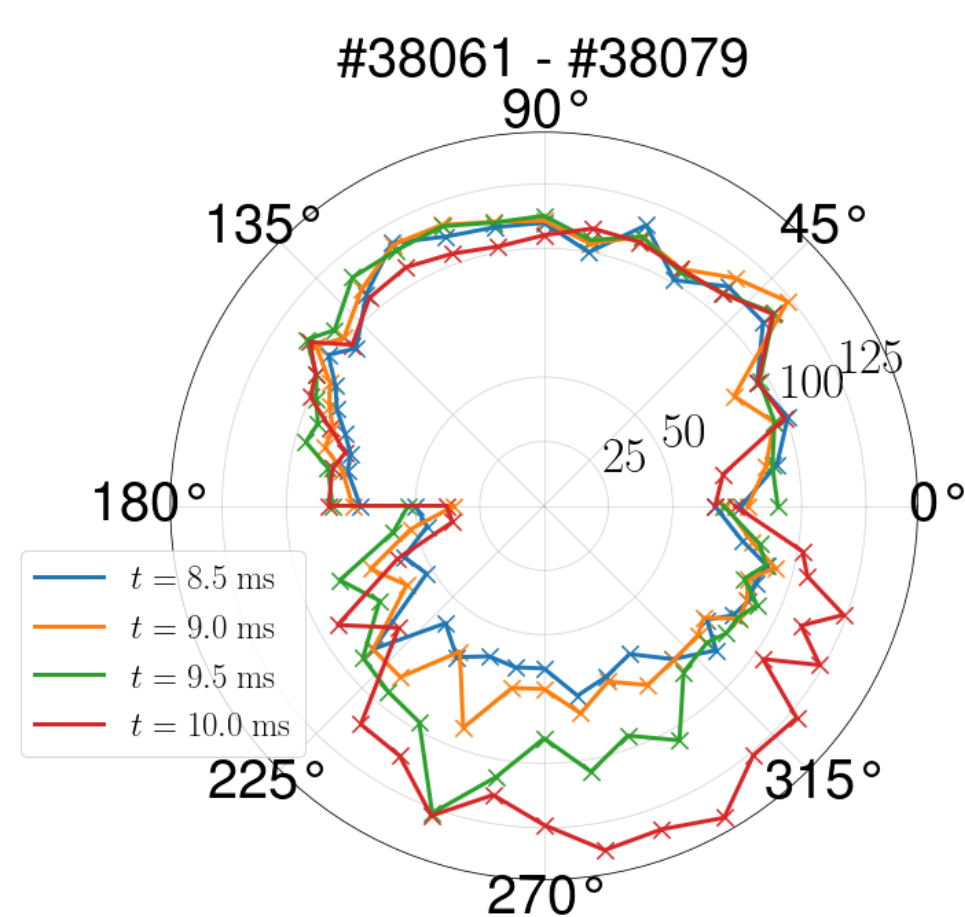
- Byl změřen první úhlový profil iontového saturovaného proudu na tokamaku GOLEM: $f(\alpha_p) = I_{sat}^+$, kde α_p je úhel sondy vůči magnetickému poli.

- Ionový saturovaný proud I_{sat}^+ je proud částic dopadající na elektrickou sondu v případě, kdy je nabita na dostatečně nízké napětí ($U = -105 \text{ V}$) a na sondu dopadají pouze ionty.

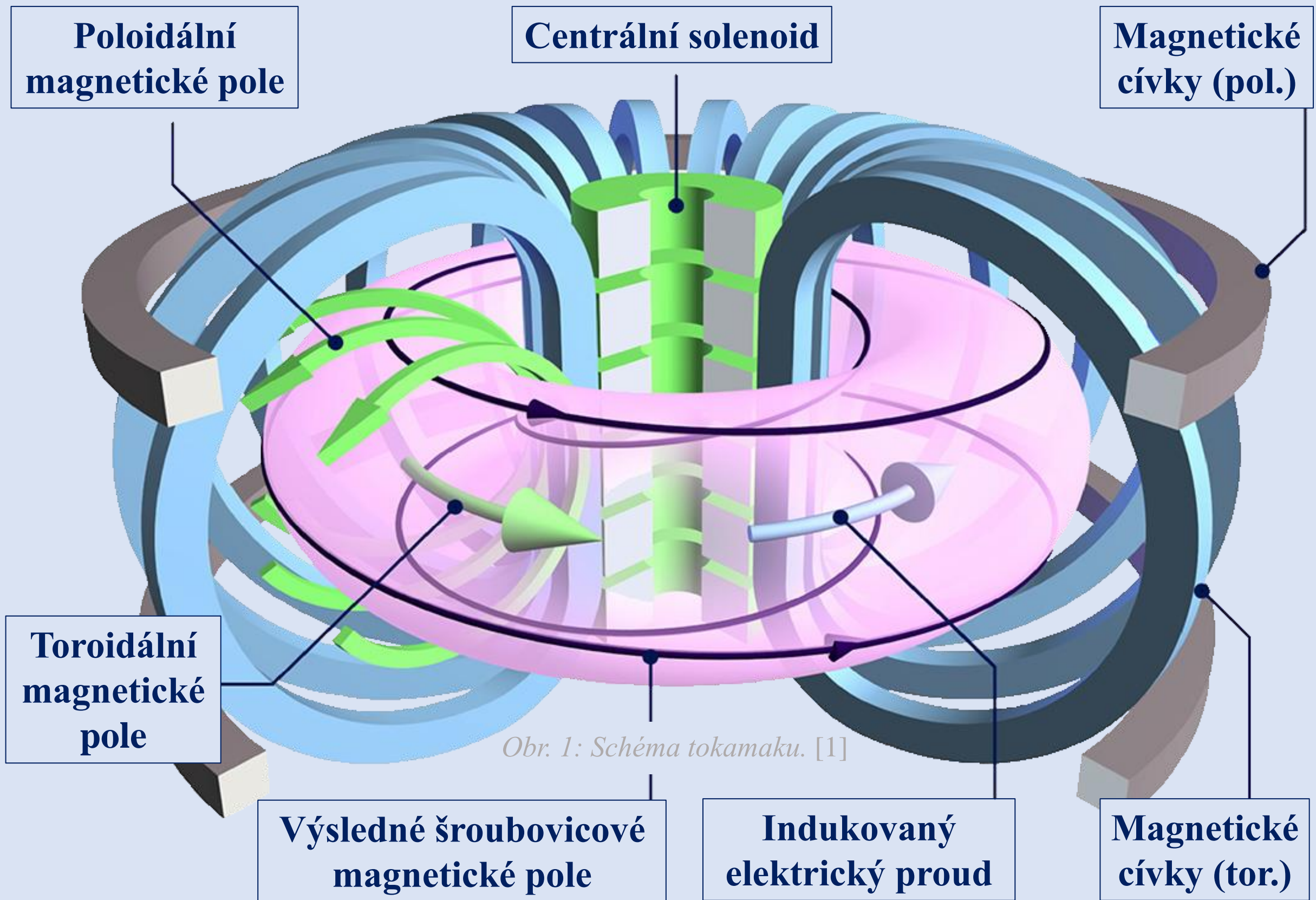
- Byly provedeny dvě výbojové série, při kterých jsme využili tzv. dvojité tunelové sondy.

- Ověřili jsme, že I_{sat}^+ je maximální při orientaci sondy rovnoběžné s magnetickými indukčními čarami na elektrodě orientované proti směru rotace plazmatu, a že při kolmé orientaci sondy na magnetické pole I_{sat}^+ není nulový, což koresponduje s výsledky na jiných tokamacích (COMPASS, TCV...). [3]

- Díky srovnání s jinými tokamací můžeme tvrdit, že je na tokamaku GOLEM zajištěna vysoká vypovídající hodnota měření úhlových profilů a experimentů s nimi spojenými.



Obr. 3: Úhlový profil I_{sat}^+ [mA] druhé výbojové série.



Obr. 1: Schéma tokamaku. [1]

3. MACHOVO ČÍSLO

- Machovo číslo využíváme pro popis lokální rychlosti plazmatu a vyjadřujeme jej jako poměr rychlosti zvuku v plazmatu (tzv. iontozvuková rychlost) vůči lokální rychlosti rotace plazmatu:

$$M = \frac{v_{\text{iontozvuková}}}{v_{\text{plazmatu}}}$$

- Standardně jej dělíme na složku rovnoběžnou s magnetickou indukcí M_{\parallel} a kolmou na magnetickou indukcí M_{\perp} .

- V této práci jsme porovnali dvě metody výpočtu Machova čísla podle článku [2].

- V případě první metody využíváme předpokladu, že M_{\parallel} zůstává konstantní v rámci úhlového profilu (viz Obr. 4) a obecně rovnice:

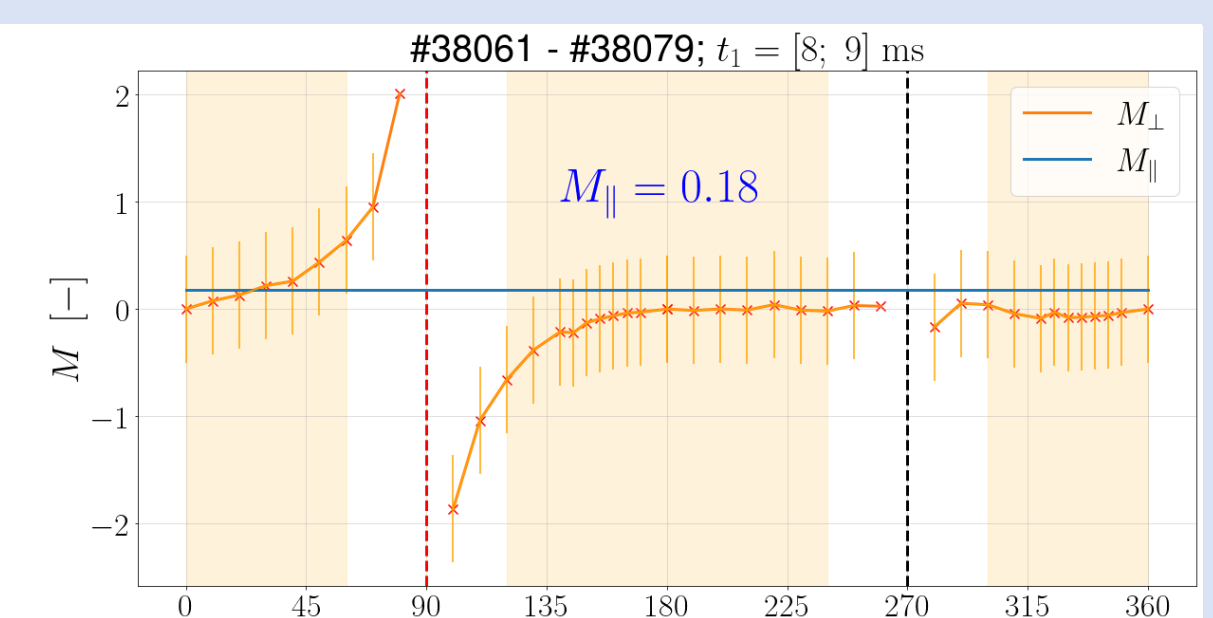
$$M_{\parallel} = K * \ln(R_{\alpha_p}) + M_{\perp} \cotan(\alpha_p)$$

$$R_{\alpha_p} = \frac{I_{sat}^+ \alpha_p}{I_{sat}^+ \alpha_p + 180^\circ}$$

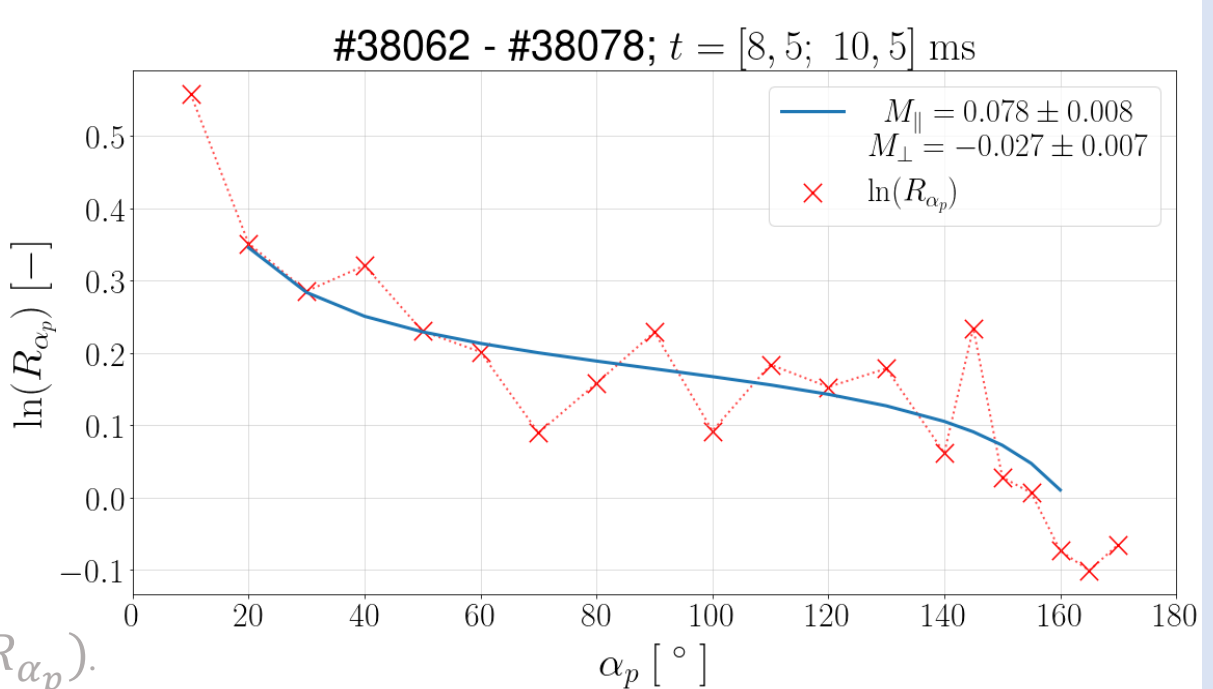
- V případě druhé metody aproximujeme jednu část rovnice obsahující M_{\parallel} a M_{\perp} podle úhlového profilu $\ln(R_{\alpha_p})$ ve druhé části rovnice (viz Obr. 5).

- V tabulce níže jsou zobrazeny výsledky měření získané ze dvou výbojových sérií, které budou nadále na tokamaku GOLEM zjednodušovat zkoumání pohybu plazmatu pomocí M .

Obr. 5: Aproximace podle $\ln(R_{\alpha_p})$.



Obr. 4: Úhlový profil M_{\perp} a M_{\parallel} pro max. a min. hodnotu M_{\parallel} .



ZÁVĚR

- Práce se uskutečnila na tokamaku GOLEM FJFI ČVUT pod vedením konzultanta Ing. Petra Máchy a bude představena v rámci tradiční prezentace tokamaku GOLEM na EPS konferenci v roce 2022.

- Byl zprovozněn motorizovaný manipulátor sond, díky němuž byl změřen na tokamaku GOLEM první úhlový profil (konkrétně I_{sat}^+) a byly porovnány dvě metody výpočtu Machova čísla podle článku [2].

- Hlavními přínosy práce je možnost efektivního měření prostorových profilů za pomoci motorizovaného manipulátoru, dále ověření správnosti úhlových závislostí na tokamaku GOLEM na základě srovnání s experimenty na jiných zařízeních a ověření možnosti jejich dalších měření. A nakonec vůbec první změřené složky M_{\perp} popisující pohyb plazmatu napříč magnetickým polem.

- Práce přinesla nečekané výsledky spojené s variací směru rychlosti plazmatu v průběhu výboje či s minimálním vlivem objektů v plazmatu na délku výboje, což jsou zajímavé náměty pro budoucí zkoumání.

REFERENCE

- [1] „Tokamak GOLEM wiki,” *The GOLEM team*. Přístup dne 20.3.2022 [Online]. Dostupné na <http://golem.fjfi.cvut.cz/wiki/FrontPage>
- [2] Sangwan, D., Jha, R., and Tanna, R., *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 63, apr 2007.
- [3] Stockel, J., Adamek, J., and Balan, P., *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 63, apr 2007.

Rozlišení úhlového profilu I_{sat}^+	Nízké	Průměrné až vyšší	Primární výhoda metody výpočtu Machova čísla
1. metoda	X		Vždy zaručuje vypovídající hodnotu výsledků.
2. metoda		X	Poskytuje lepší přesnost výsledků.