



**FAKULTA
JADERNÁ
A FYZIKÁLNĚ
INŽENÝRSKÁ
ČVUT V PRAZE**



COMPASS
INSTITUTE OF PLASMA PHYSICS ASCR

CHARACTERISATION OF HEAT FLUXES IN EDGE PLASMA OF THE COMPASS TOKAMAK IN H-MODE DISCHARGES

**DIPLOMOVÁ PRÁCE
BC. JAN HEČKO**

**ŠKOLITEL: MGR. MICHAEL KOMM PH.D.
ODBORNÝ KONZULTANT: ING. MIROSLAV ŠOS**

29.6.-1.7. 2021 / MARIÁNSKÁ

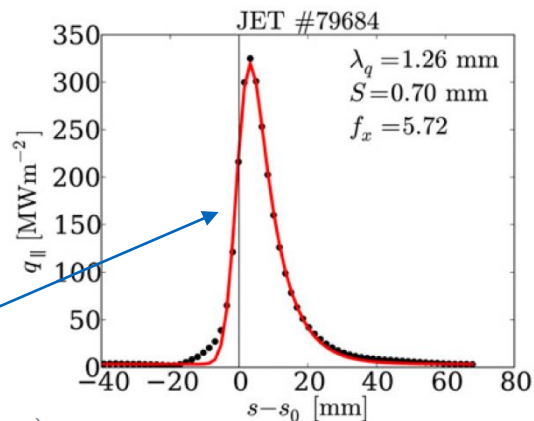


MOTIVACE: ŠKÁLOVÁNÍ ÚTLUMOVÉ DÉLKY λ_q

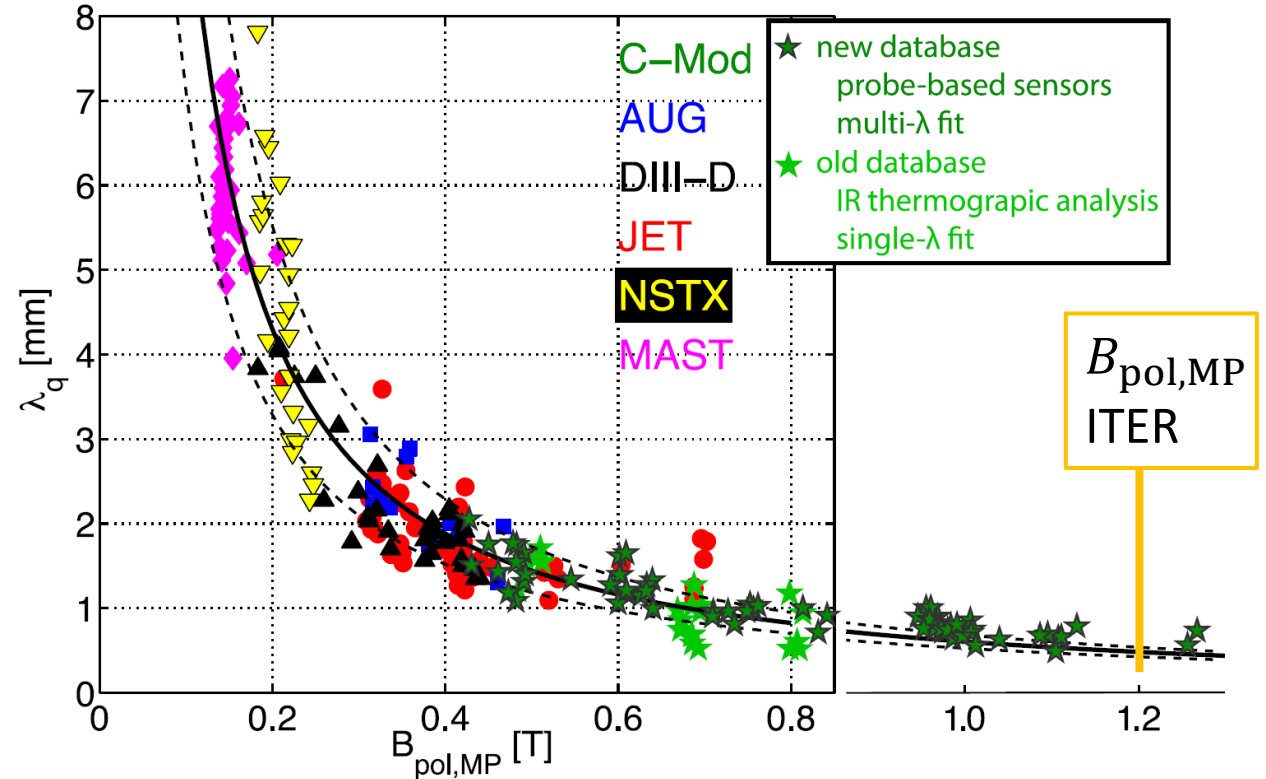
Výstupní výkon z tokamaku:

- záření z plazmatu
- tepelný tok na divertor q

λ_q – šířka profilu q na divertorové
dlaždici, šířka exp. útlumu



$$q(\bar{s}) = \frac{q_0}{2} \exp\left(\left(\frac{S}{2\lambda_q f_x}\right)^2 - \frac{\bar{s}}{\lambda_q f_x}\right) \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{S}{2\lambda_q f_x} - \frac{\bar{s}}{S}\right)$$



$$\lambda_q = 0.63 \cdot B_{\text{pol,MP}}^{-1.19}$$

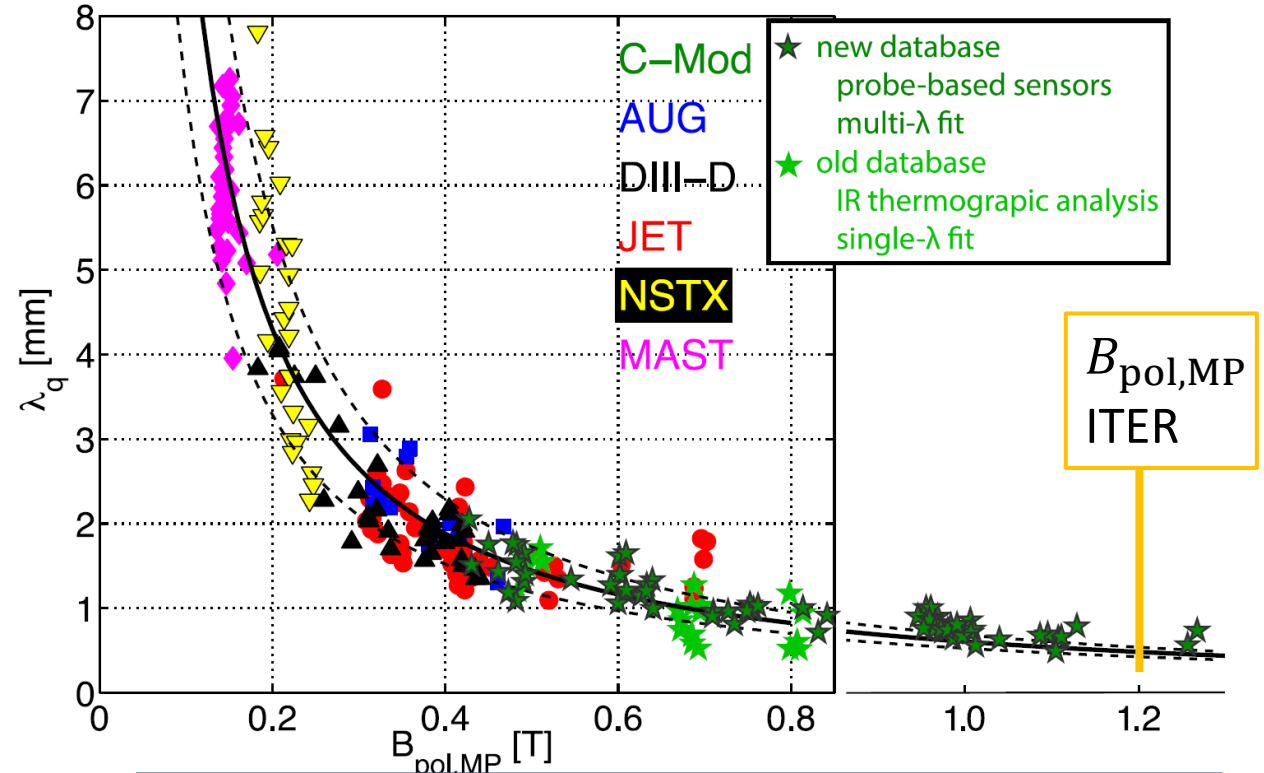
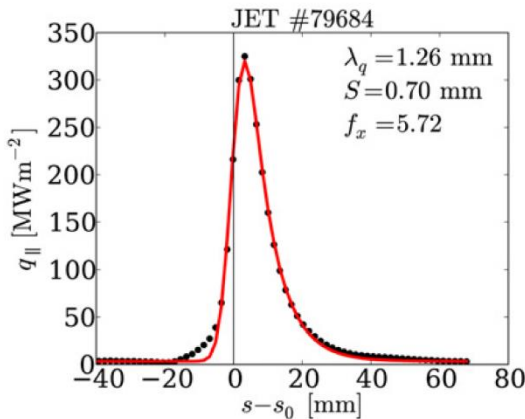


MOTIVACE: ŠKÁLOVÁNÍ ÚTLUMOVÉ DÉLKY λ_q

Výstupní výkon z tokamaku:

- záření z plazmatu
- tepelný tok na divertor q

λ_q – šířka profilu q na divertorové
dlaždici, šířka exp. útlumu



Tyto nové experimenty předpovídají pro ITER
cca 10x menší λ_q než gyrokinetické simulace.
[Gyr. simulace - C.S. Chang *et al* 2017 *Nucl. Fusion* 57 116023]



- 1. OKRAJOVÉ PLAZMA V TOKAMAKU**
- 2. MĚŘENÍ ÚTLUMOVÉ DÉLKY**
- 3. KONSTRUKCE DATABÁZE MĚŘENÍ**
- 4. VÝSLEDKY MĚŘENÍ ÚTLUMOVÉ
DÉLKY, SROVNÁNÍ S MODELY**
- 5. VÝSLEDKY MĚŘENÍ VÝKONOVÉ
ROVNOVÁHY**



1. OKRAJOVÉ PLAZMA V TOKAMAKU

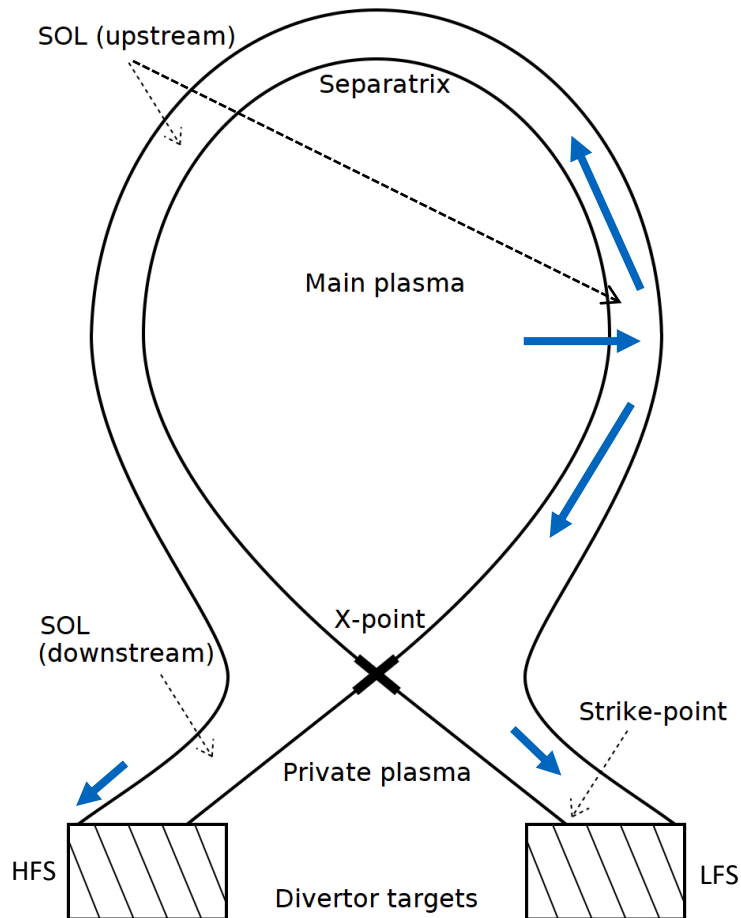


Fig.1: Regiony v tokamakovém plazmatu. Modré šipky ukazují dominantní směr toku unikajících částic.

Tokamak COMPASS

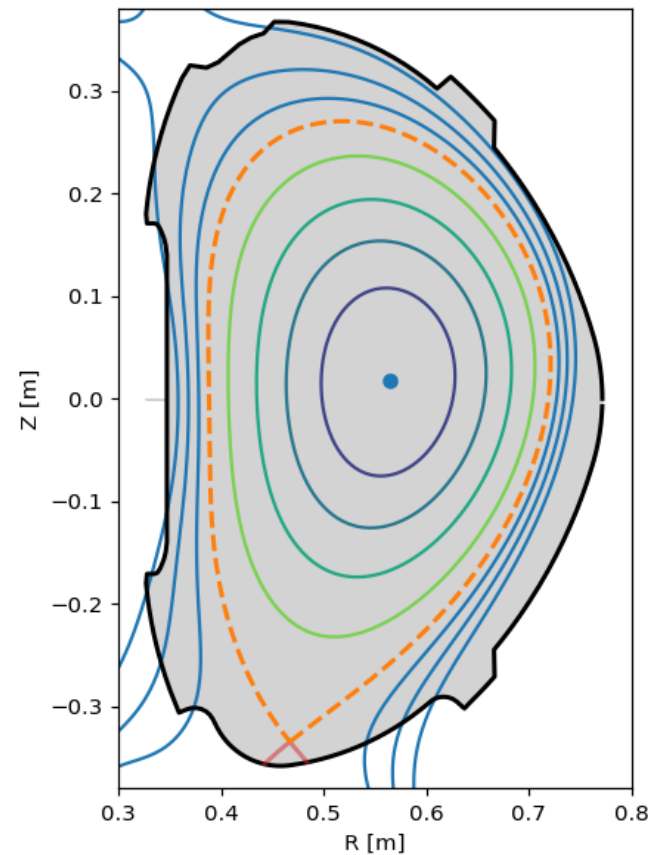
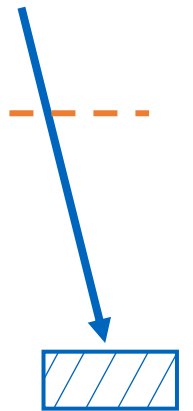


Fig.2: Rekonstrukce magnetických povrchů na tokamaku COMPASS. Přerušovaná čára je separatrix.

Částicový tepelný tok z plazmatu

1. Zachycené částice
2. Separatrix
3. Scrape-off layer (SOL)
4. Kolem X-bodu
5. Divertorové dlaždice (LFS a HFS)



LFS = strana slabého pole (vnější)
HFS = strana silného pole (vnitřní)



1. MÓD VYSOKÉHO UDRŽENÍ

Mód vysokého udržení (H-mode)

- Transportní bariéra umožní strmější profil p , T , n , čímžlepší udržení
- Typicky doprovázen ELM nestabilitou

ELM nestabilita

- Kvazi-cyklická nestabilita
- Na tok. COMPASS detekováno v H_{α} signálu
- Inter-ELM fáze: V posledních 30% cyklu jsou gradienty saturované, kvazi-stacionární – užitečné pro měření.
- Různé typy (I, II, III) podle intenzity a frekvence

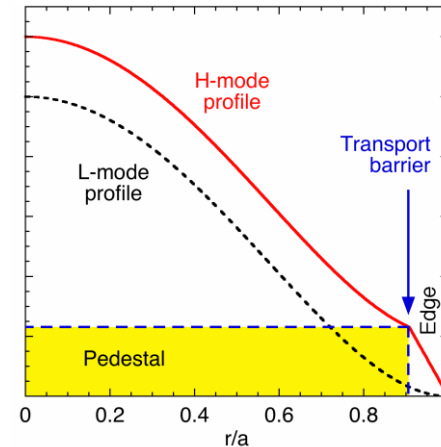


Fig. 1: Srovnání tvaru profilů plazmatu v módu s nízkým a s vysokým udržení.

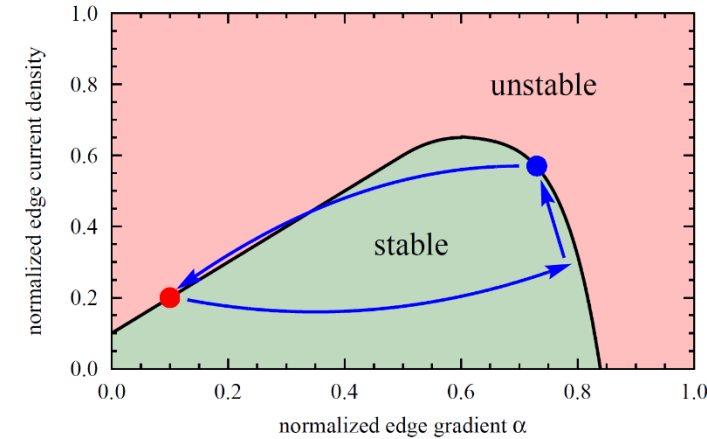


Fig. 2: Cyklus ELM nestability v módu s vysokým udržení. (Model ballooning + peeling)

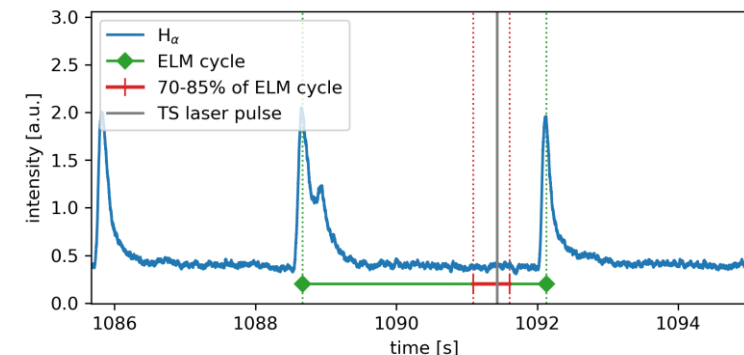
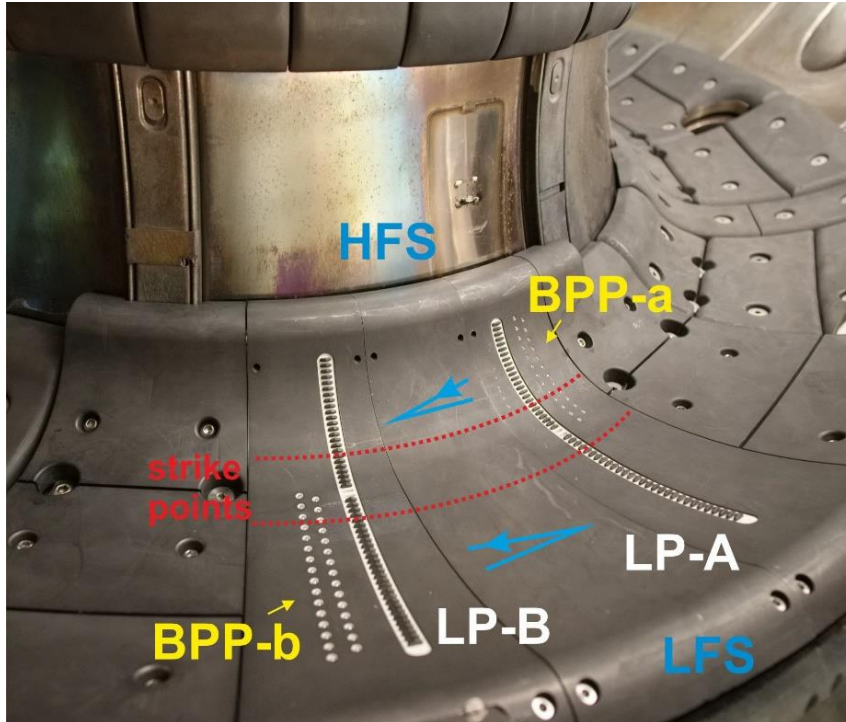


Fig. 3: Píky v signálu H_{α} záření signalizující ELM nestabilitu.



A)

Měření na
povrchu
divertoru



Divertorové pole sond, použita měření jen z LFS

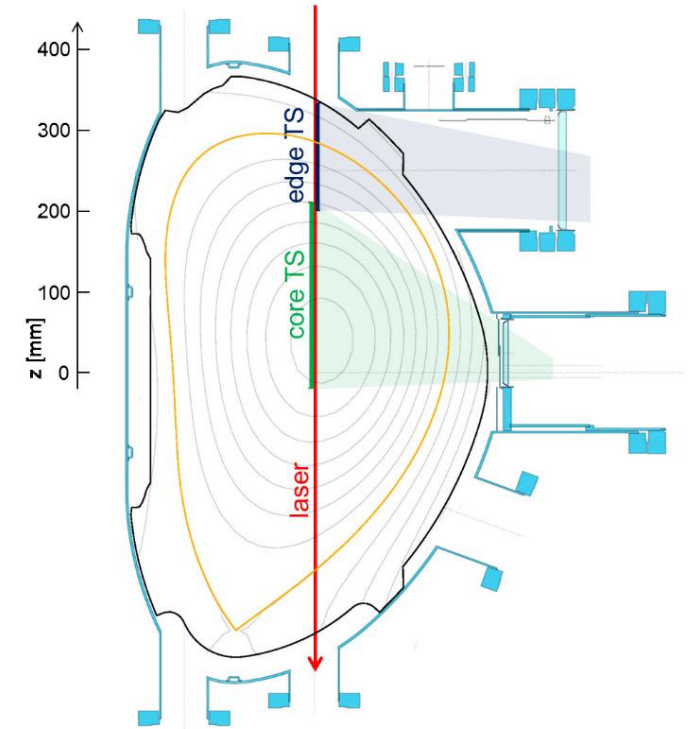
- T_e LFS: 28 BPP a 28 LP
- j_i^{sat} LFS: 28 LP na -270 V
- $\gamma \approx 11$

$$q_{\parallel}^{\text{div}} = \gamma \cdot T_e \cdot j_i^{\text{sat}}$$

2. MĚŘENÍ ÚTLUMOVÝCH DÉLEK

B)

Měření v
upstream
oblasti



Thomsonův rozptyl (TS)

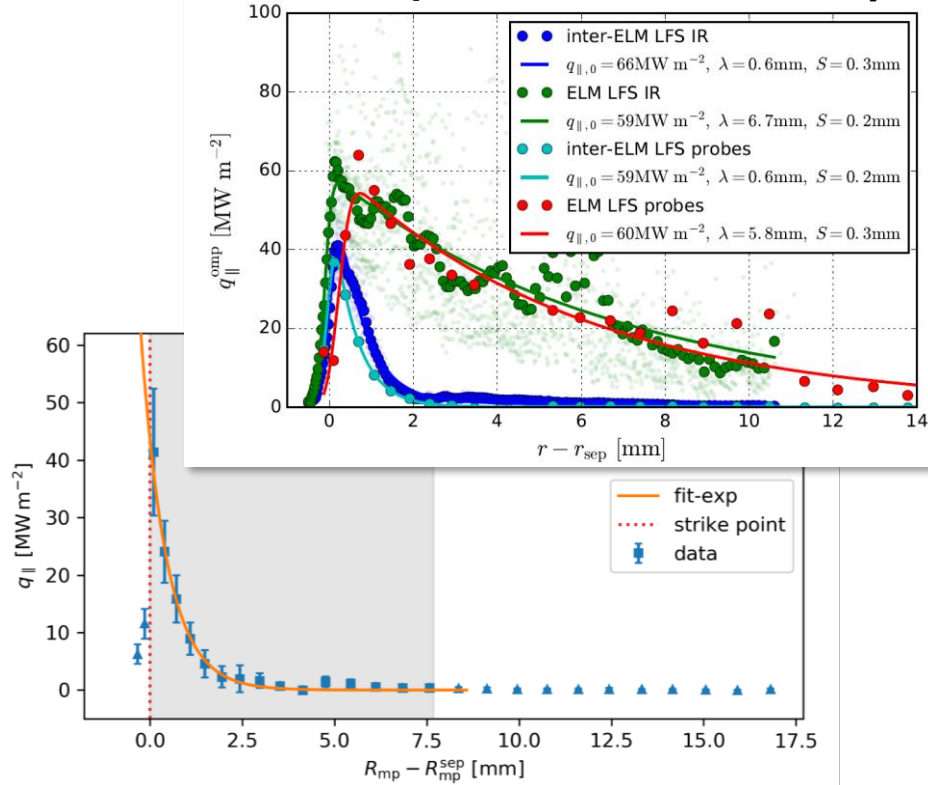
- 4 Nd:YAG lasery, celkem opakování 120 Hz
- 30 prostorových bodů v okrajové oblasti
- Profily T_e a n_e



[P. Vondracek 2019 PhD thesis]

A)

Měření na
povrchu
divertoru



Divertorové pole sond na LFS

- T_e LFS: 28 BPP a 28 LP
- j_i^{sat} LFS: 28 LP na -270 V
- $\gamma \approx 11$

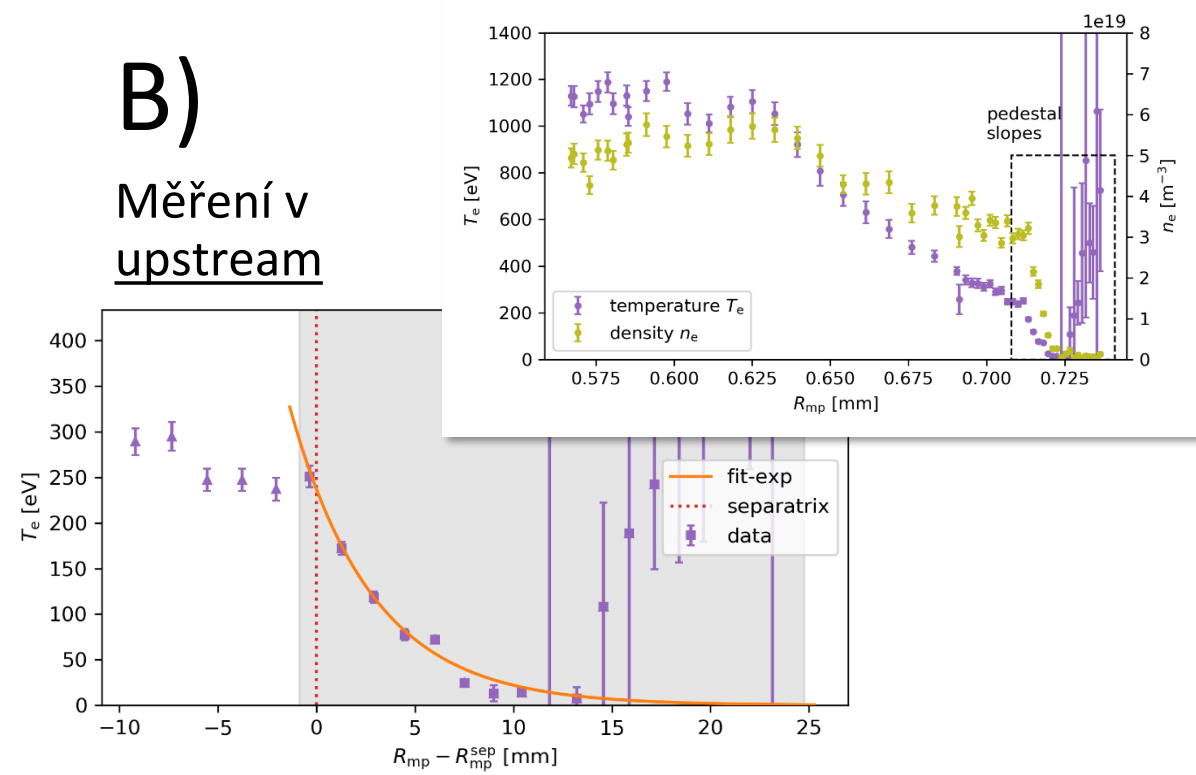
→ λ_q

$$q_{\parallel}^{div} = \gamma \cdot T_e \cdot j_i^{sat}$$

2. MĚŘENÍ ÚTLUMOVÝCH DÉLEK

B)

Měření v
upstream



Thomsonův rozptyl (TS)

→ λ_{T_e} a λ_{n_e}

- 4 Nd:YAG lasery, celkem opakování 120 Hz
- 30 prostorových bodů v okrajové oblasti
- Profily T_e a n_e



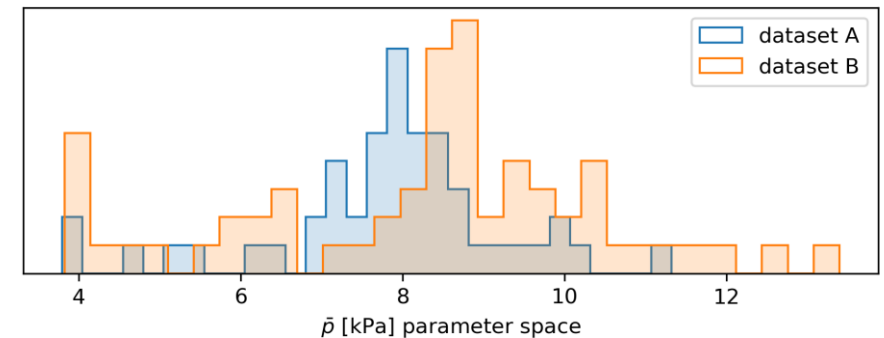
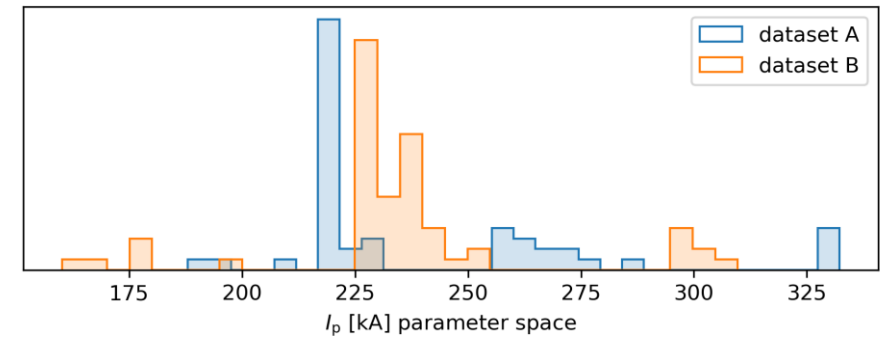
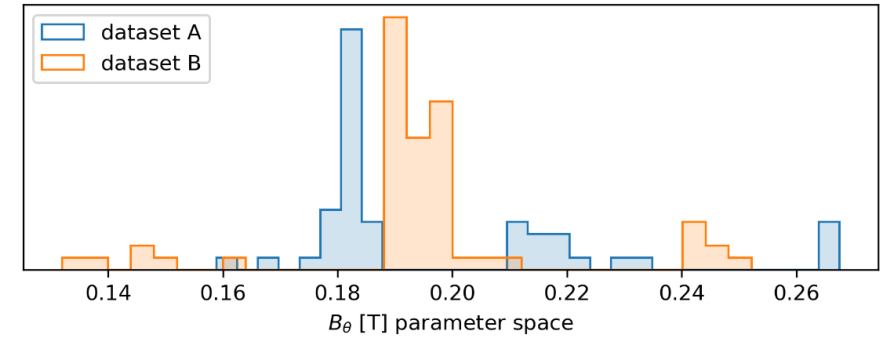
3. KONSTRUKCE DATABÁZE MĚŘENÍ

Sestavena databáze, dva soubory **A** a **B**

- **A**: 49 profilů z nedávných kampaní
- **B**: 62 profilů ze starších kampaní
 - Rozšíření rozsahu škálovacích parametrů
 - Potenciálně více šumu v TS
- Automatizovaný předvýběr + manuální kontrola

Kritéria:

- ELMy H-mód plazma
- TS měření proběhlo v 70-85% ELM cyklu
- Omezení zkreslujících vlivů (RMP cívky, seeding, slabá boronizace)



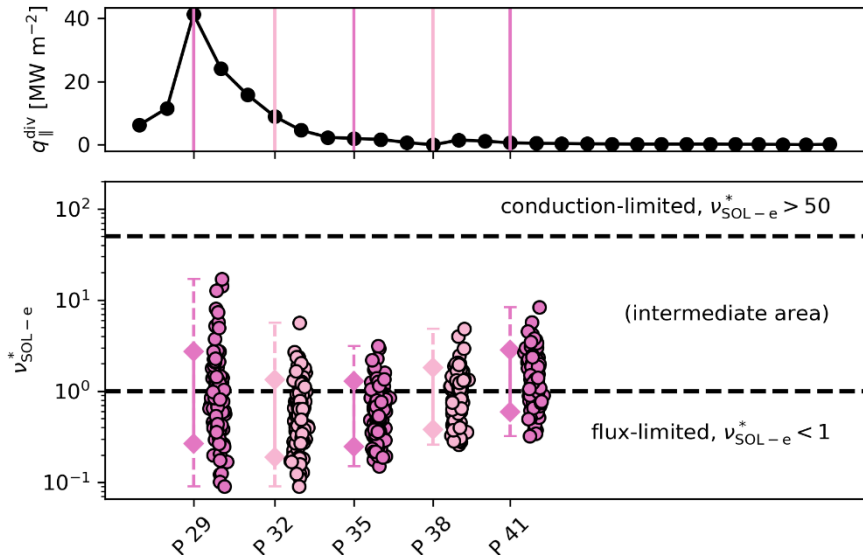


4. VÝSLEDKY: ZÁVISLOST MEZI UPSTREAM A DOWNSTREAM

Závislost mezi λ_q na divertoru a λ_{T_e} , λ_{n_e} v upstream oblasti

[P.C. Stangeby *et al* 2010 *Nucl. Fusion* **50** 125003]

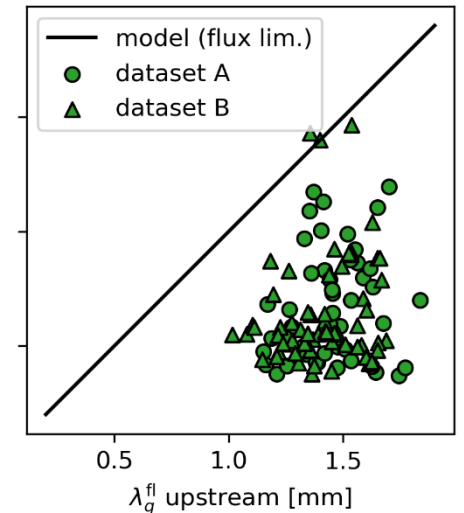
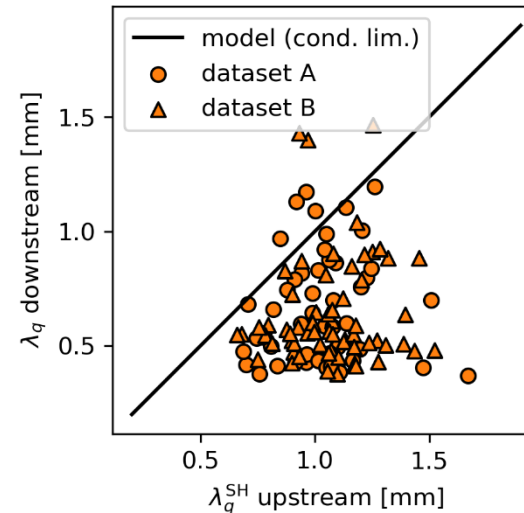
- Dva modely podle přenosu tepla v SOL (vedení X proudění)
- V případě strany LFS v tokamaku COMPASS – převážně režim proudění (*flux-limited*)



$$v_{\text{SOL-e}}^* \approx 10^{-16} \frac{n_{\text{up}} L_{\parallel}}{T_{\text{up-e}}^2} \quad [\text{m}^{-3}, \text{m}, \text{eV}]$$

$$\lambda_q^{\text{SH/cond.-lim.}} = \frac{2}{7} \lambda_{T_e}$$

$$\frac{1}{\lambda_q^{\text{flux-lim.}}} = \frac{3/2}{\lambda_{T_e}} + \frac{1}{\lambda_{n_e}}$$



4. VÝSLEDKY: SROVNÁNÍ S PUBLIKOVANÝMI MODELÝ

Škálování útlumové délky λ_q

- $B_\theta = B_{\text{pol,MP}}$ poloidální pole na *midplane*
- \bar{p} střední hodnota tlaku plazmatu (úměrné energii)
- p_{95} tlak na okraji (\sim souvisí s gradientem)

Model

Vzorec

Goldston 2011
(heuristické)

$$\lambda_q \approx P_{\text{SOL}}^{1/8} \frac{q_{\text{cyl}}^{9/8}}{B_\phi^{7/8}}$$

Eich 2013 B_θ

$$\lambda_q = (0.63 \pm 0.08) \cdot B_\theta^{(-1.19 \pm 0.08)}$$

Eich 2013 – Goldston

$$\lambda_q = (0.86 \pm 0.25) \cdot B_\phi^{(-0.80 \pm 0.21)} \cdot q_{\text{cyl}}^{(1.11 \pm 0.15)} \cdot P_{\text{SOL}}^{(0.11 \pm 0.09)} \cdot R_0^{(-0.13 \pm 0.16)}$$

Brunner 2018 \bar{p}

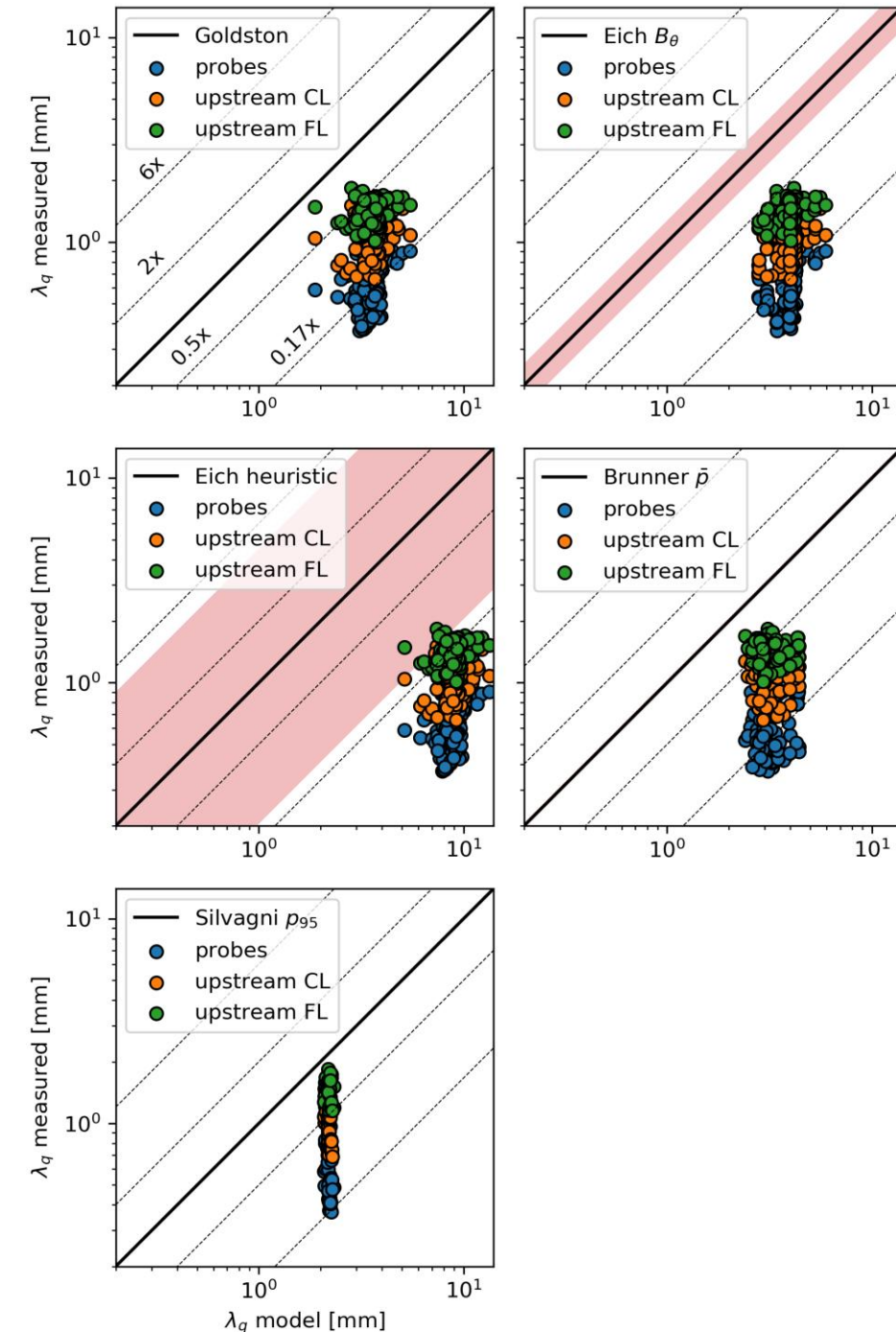
$$\lambda_q = (8.35 \pm 0.09) \cdot \bar{p}^{(-0.48 \pm 0.01)} \quad [\text{mm}; \text{kPa}]$$

Silvagni 2020 p_{95}

$$\lambda_q = (2.45 \pm 0.02) \cdot (p_e^{95})^{(-0.34 \pm 0.01)} \quad [\text{mm}; \text{kPa}]$$

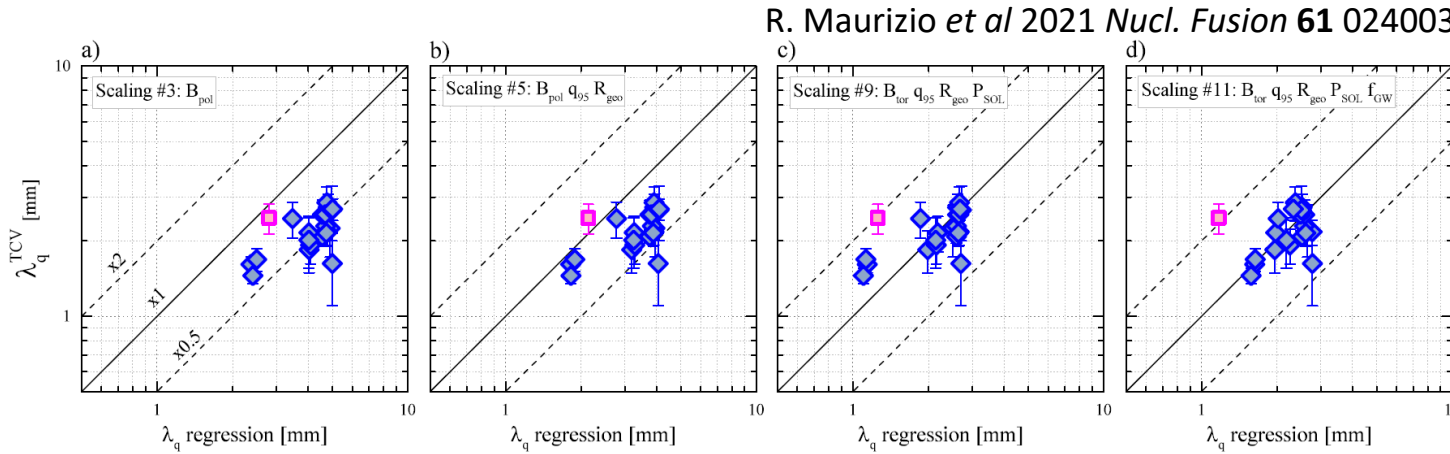
První poznatky – tokamak COMPASS

- Absence výrazného trendu (velký rozptyl dat): problém omezeného rozsahu parametrů, nejistota fitu naměřených profilů.
- Absolutní škála typicky výrazně menší než predikce modelů, faktor 2-6.



4. VÝSLEDKY: SROVNÁNÍ S PUBLIKOVANÝMI MODELÝ

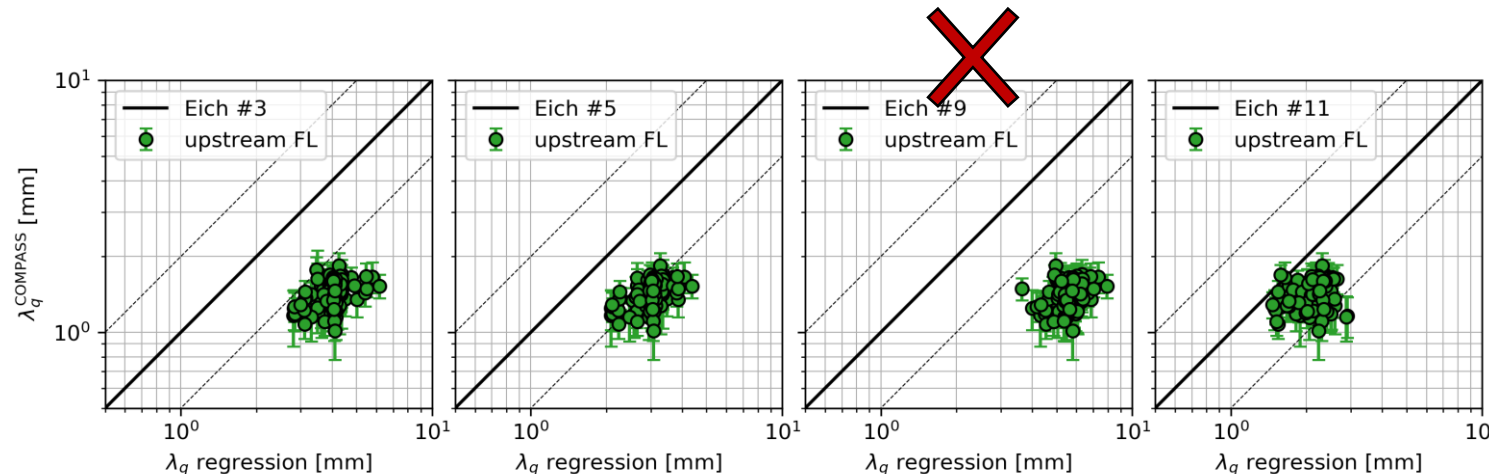
TCV



Publikované výsledky z tokamaku TCV

- Rozměry a parametry blízké tokamaku COMPASS
- Výrazný nesoulad s některými modely z Eich2013

COMPASS



c) se odchyluje výrazně více

Upstream měření na tokamaku COMPASS vykazuje obdobné odchýlení od modelů jako tokamak TCV



5. VÝSLEDKY MĚŘENÍ VÝKONOVÉ ROVNOVÁHY

Výkonová rovnováha v tokamaku COMPASS:

$$\underbrace{P_{\text{ohm}} + P_{\text{NBI}}}_{\text{Ohřev}} - \frac{dW_p}{dt} = \underbrace{P_{\text{rad}} + P_{\text{div}}^{\text{LFS}} + P_{\text{div}}^{\text{HFS}}}_{\text{Ztráty/Výstup}} \quad P_{\text{div}} = \int_{\text{div}} q_{\perp} dS$$

Měření

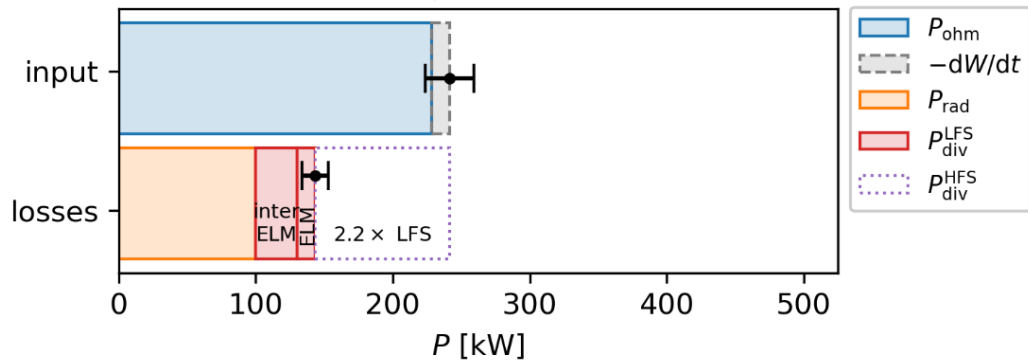
- P_{ohm} ohmický ohřev
- P_{NBI} ohřev pomocí neutrálních svazků (NBI), nejistota v účinnosti
 - Uvažováno: 80% účinnost neutralizace, cca 30% ztráty při vedení svazku, 40% ztráty zpětné nábojové výměny
- P_{rad} záření z plazmatu (bolometrie)
- P_{div} tepelný tok na divertor, měřeno pouze na LFS, odhad HFS, výkon i během ELM
- W_p energie plazmatu (přibližná hodnota z rekonstrukce ekvilibria EFIT)



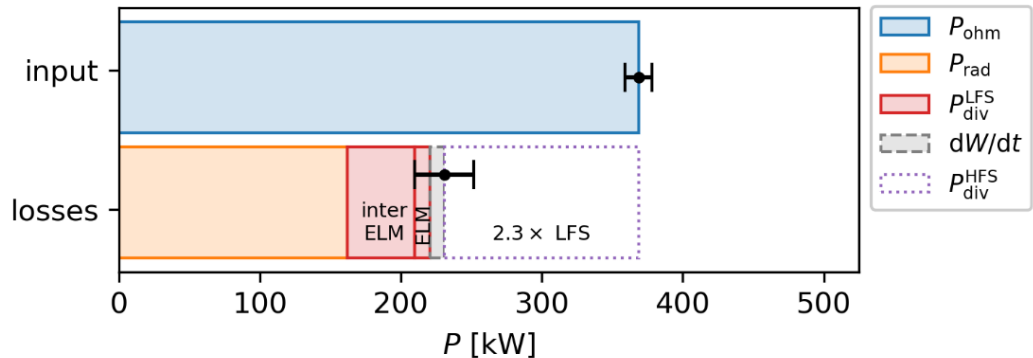
5. VÝSLEDKY MĚŘENÍ VÝKONOVÉ ROVNOVÁHY

A) Ohmické výboje (bez NBI)

discharge #18250 | time 1250.1-1275.6 ms

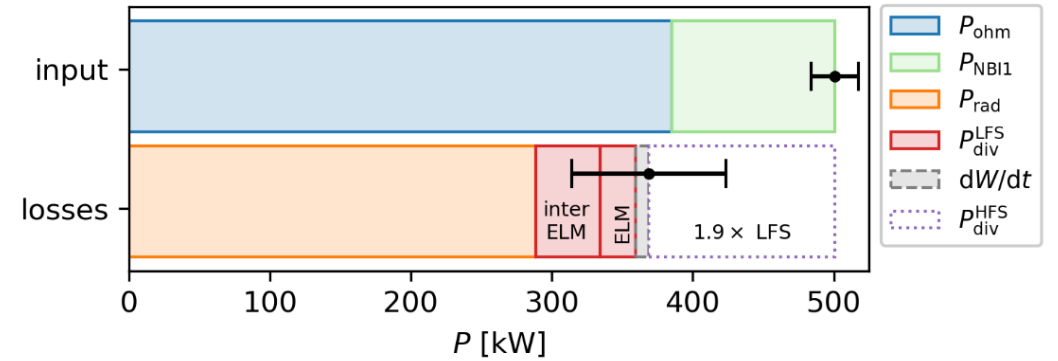


discharge #19147 | time 1140.5-1157.6 ms

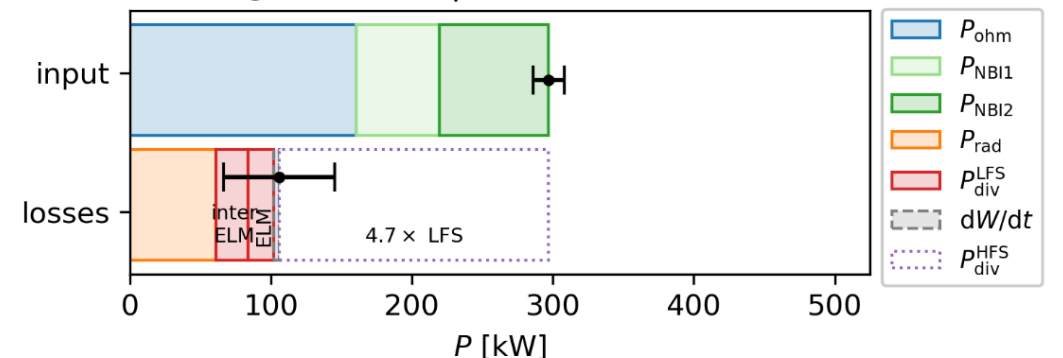


B) Výboje s NBI

discharge #18455 | time 1097.0-1135.4 ms



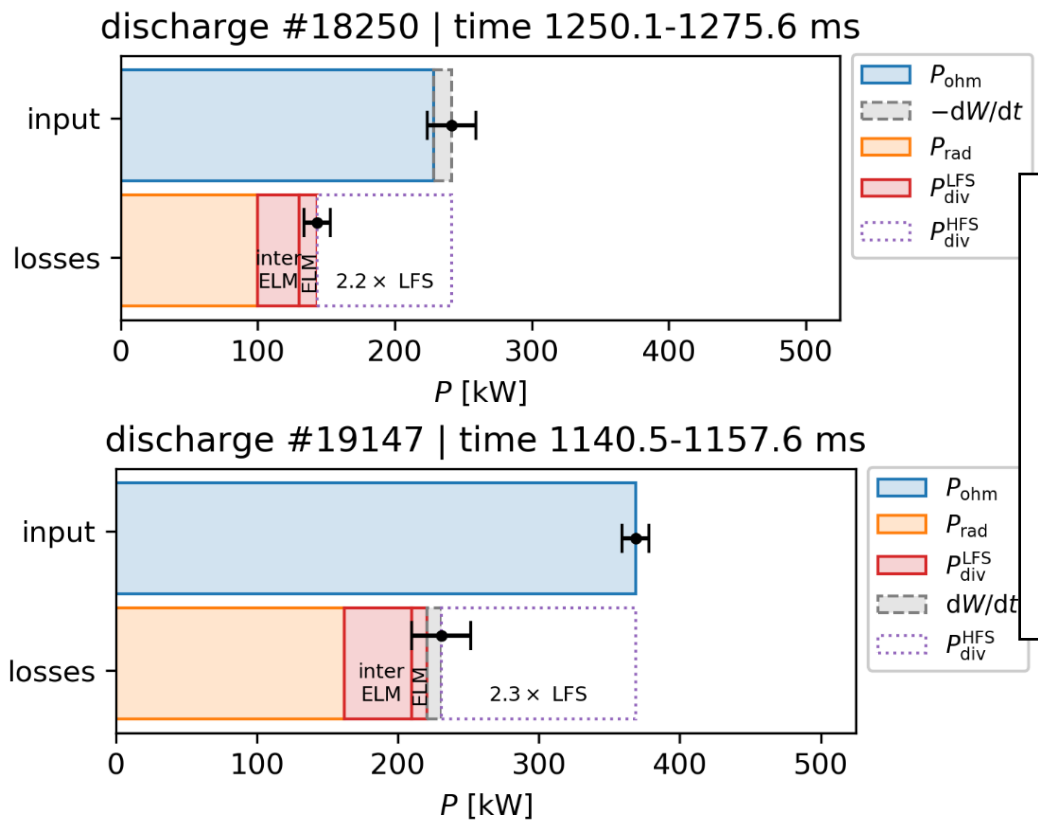
discharge #20518 | time 1127.2-1158.5 ms



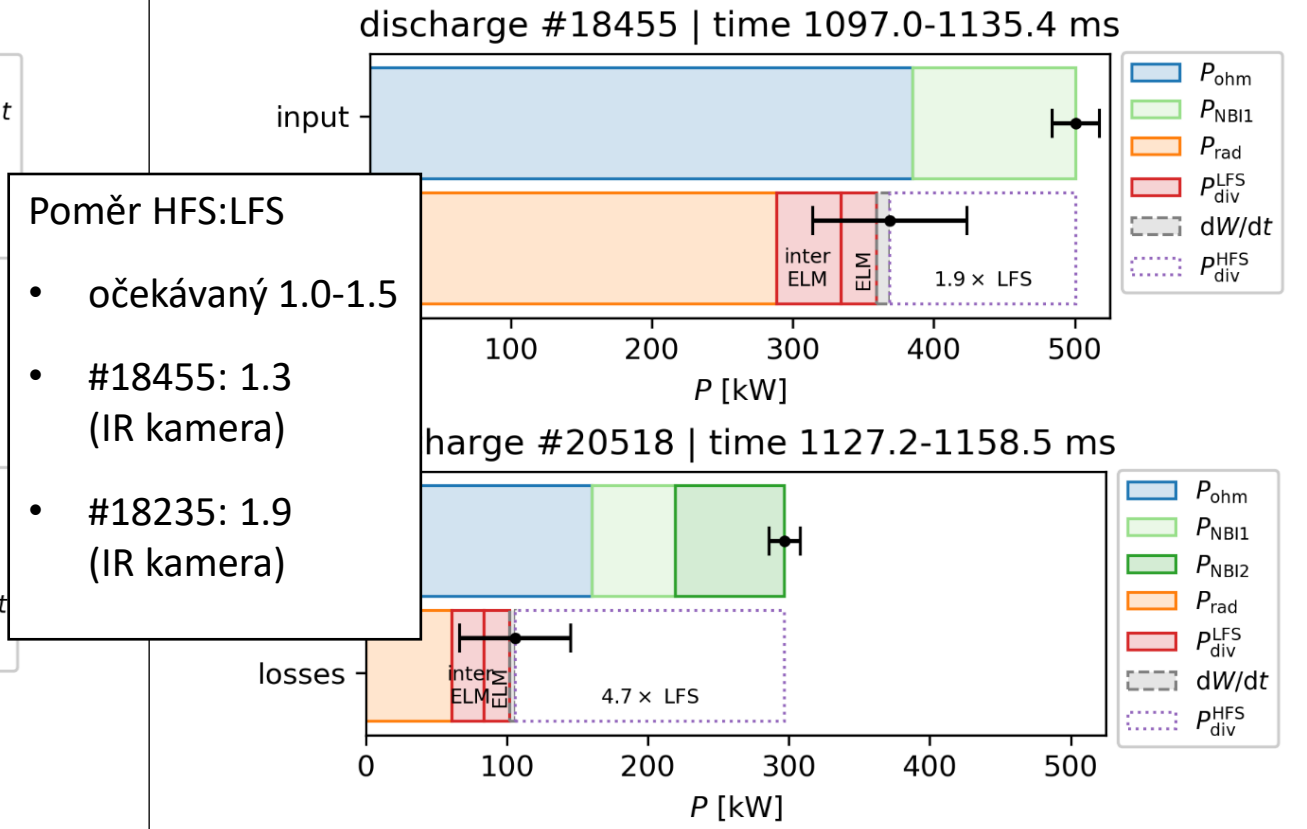


5. VÝSLEDKY MĚŘENÍ VÝKONOVÉ ROVNOVÁHY

A) Ohmické výboje (bez NBI)



B) Výboje s NBI



Poměr HFS:LFS

- očekávaný 1.0-1.5
- #18455: 1.3 (IR kamera)
- #18235: 1.9 (IR kamera)



1. Diskuze k anomálně krátkým λ_q při měření v oblasti *upstream*

- Pozorováno na tokamaku COMPASS i TCV
- Škálovací modely zřejmě nezahrnují všechny vlivy,
 - Jsou cíleny primárně na velké tokamaky

2. Diskuze k rozdílu mezi λ_q měření na divertoru a v *upstream*

- Vliv neznámých dějů v SOL vrstvě, v divertorové oblasti
 - Přispívat by mohl např. ExB drift, viz dizertace C. Silva 2000 a R. Maurizio 2020

3. Diskuze k nepřesnostem ve výkonové rovnováze

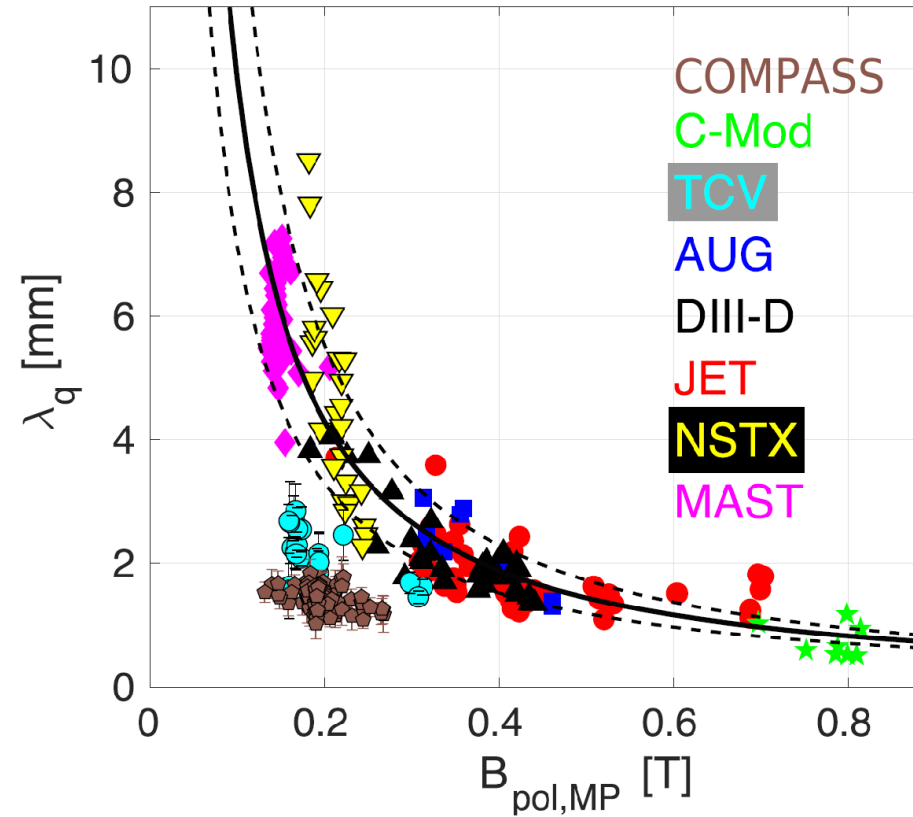
- Poměr HFS:LFS
 - Ohmické: pravděpodobně malé systematické chyby diagnostik
 - NBI: v některých případech silně nadhodnocený absorbovaný výkon
- Potenciální nepřesnost v měření P_{rad}
- Energie plazmatu W_p z EFIT má velkou nepřesnost
 - Idealizované předpoklady magnet. rekonstrukce



- Sesbírána databáze 49 + 62 profilů
- Rozdíl v měření na divertoru a měření v *upstream*
 - λ_q na divertoru menší o faktor 2-3 oproti upstream měření (režim proudění)
- Otestovány škálovací modely ze článků: Eich2013, Brunner2018, Silvagni2020 a další
- Anomálně malá inter-ELM λ_q v tokamaku COMPASS
 - Měření na divertoru faktor 3-6 menší
 - Měření v upstream faktor 2-3 menší
 - Obdobné výsledky publikovány i na tokamaku TCV, Maurizio2021, upstream měření
- Výkonová rovnováha pro několik výbojů, bez i s ohřevem NBI
 - Po uvážení $P_{\text{div}}^{\text{HFS}}$ se ztráty zdají být podhodnocené
 - V přítomnosti NBI je často odchýlení výraznější



DĚKUJI ZA POZORNOST.





DĚKUJI ZA POZORNOST.

- [1] J. Wesson, D. J. Campbell 2011. *Tokamaks*. Oxford university press.
- [2] P.C. Stangeby 2000. *The plasma boundary of magnetic fusion devices*. Philadelphia, Pennsylvania: Institute of Physics Pub.
- [3] J. Adamek *et al* 2017 *Nucl. Fusion* **57** 116017, <https://doi.org/10.1088/1741-4326/aa7e09>
- [4] P. Bilkova *et al* 2018 *JINST* **13** C01024, <https://doi.org/10.1088/1748-0221/13/01/C01024>
- [5] P. Vondracek 2019 *doctoral thesis*
- [6] P.C. Stangeby *et al* 2010 *Nucl. Fusion* **50** 125003, <https://doi.org/10.1088/0029-5515/50/12/125003>
- [7] T. Eich *et al* 2013 *Nucl. Fusion* **53** 093031, <https://doi.org/10.1088/0029-5515/53/9/093031>
- [8] D. Brunner *et al* 2018 *Nucl. Fusion* **58** 094002, <https://doi.org/10.1088/1741-4326/aad0d6>
- [9] D Silvagni *et al* 2020 *Plasma Phys. Control. Fusion* **62** 045015, <https://doi.org/10.1088/1361-6587/ab74e8>
- [10] J. Horacek *et al* 2020 *Nucl. Fusion* **60** 066016, <https://doi.org/10.1088/1741-4326/ab7e47>
- [11] R. Maurizio *et al* 2021 *Nucl. Fusion* **61** 024003, <https://doi.org/10.1088/1741-4326/abd147>