

# L-H přechod a H-mód v tokamakovém plazmatu

Ondřej Grover

7. Česko-Slovenská studentská vědecká konference ve fyzice

## 1 Úvod

- Experimentální uspořádání
- H-mód a jeho význam pro budoucí zařízení

## 2 Analýza H-módu a L-H přechodu z makroskopického hlediska

- Algoritmus pro detekci L-H/H-L přechodů
- Výsledky hromadného zpracování dat

## 1 Úvod

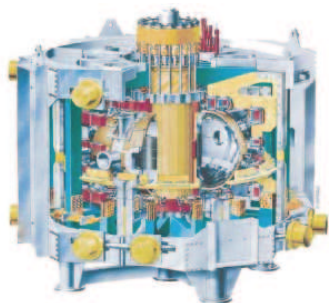
- Experimentální uspořádání
- H-mód a jeho význam pro budoucí zařízení

## 2 Analýza H-módu a L-H přechodu z makroskopického hlediska

- Algoritmus pro detekci L-H/H-L přechodů
- Výsledky hromadného zpracování dat

## tokamak COMPASS

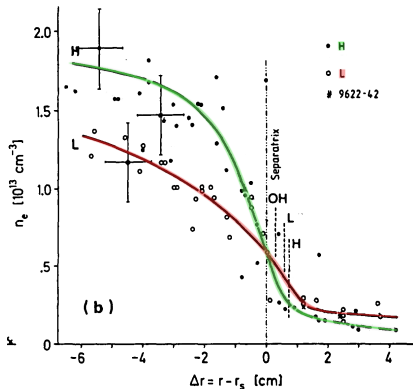
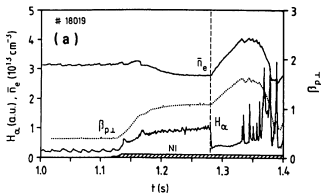
- $R_0 = 0,56 \text{ m}, a = 0,18 \div 0,23 \text{ m (D)}$
- $B_\phi = 0,9 \div 2,1 \text{ T}, I_{pl} < 400 \text{ kA}$   
(Weinzettl, 2011)



## Hlavní použité diagnostiky

- vyzařování  $H_\alpha$ ,  
 $\lambda = 656 \text{ nm}$   
(Wesson, 2011)
- $I_{pl}, n_e, I_{SFPS}$

- zvýšené  $\tau_E$ ,  $\beta_p$  (cca  $2\times$ ) (Wagner, 1982)
- přechod při překročení prahového výkonu
- **ELM instability**: dočasné narušení zvýšeného udržení
- referenční scénář pro ITER: ELMy H-mód



Obrázek: Převzato z (ASDEX Team, 1989)

## 1 Úvod

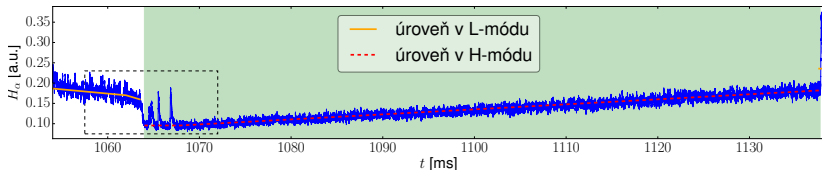
- Experimentální uspořádání
- H-mód a jeho význam pro budoucí zařízení

## 2 Analýza H-módu a L-H přechodu z makroskopického hlediska

- Algoritmus pro detekci L-H/H-L přechodů
- Výsledky hromadného zpracování dat

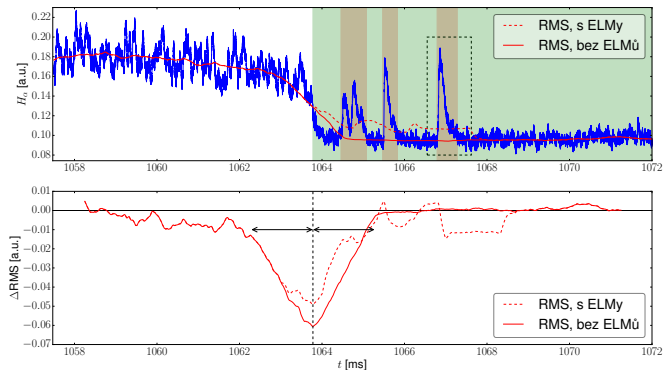
obvyklý přístup učící se algoritmy (SVM) (Murari, 2006)

- potřeba dobré trénovací databáze



hlavní myšlenka detekce poklesu/vzestupu vyzařování  $H_\alpha$

- založené na fyzikálním chování
- signál  $H_\alpha$  téměř vždy dostupný

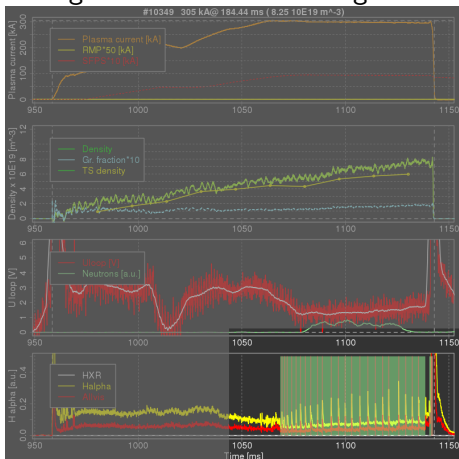


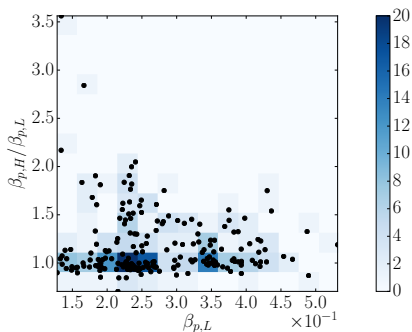
- 1 nahrazení oblastí ELMů lin. spojnic
  - lok. maxima korelace s náběhem
- 2 detekce přechodů
  - lok. extrémy RMS mezi sousedními oblastmi



- GUI pro validaci dat
- často detekovány nadbytečné jevy
  - ELMů 52.2%
  - H-módů 46.2%
- méně často jevy nedetekované
  - ELMů 23.1%
  - H-módů 8.2%
- odchylka detekce valid. jevů pod 1 ms
  - ELMů 97.1%
  - H-módů 79.3%

## Integrace do COMPASS Logbooku





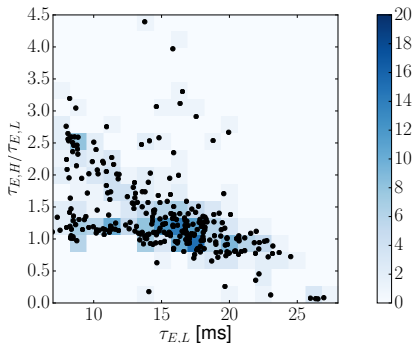
Obrázek: 130 validovaných výbojů

 $\beta_p$ : "účinnost mag. udržení"

$$\beta_p = \frac{\langle p \rangle}{\frac{\langle B_p \rangle^2}{2\mu_0}}$$

(Wesson, 2011)

- až 2× zvýšení
- dočasné přerušení H-módu  
→ nevýrazné zvýšení ( $\sim 1$ )

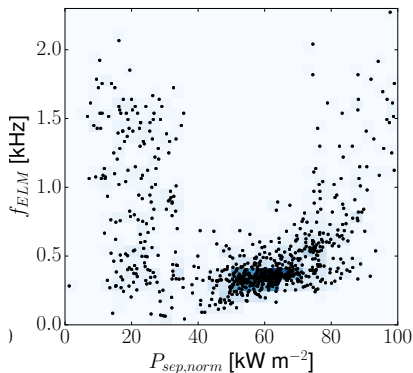


Obrázek: 80 validovaných výbojů (bez NBI)

$\tau_E$ : "kvalita izolace"

$$\tau_E = \frac{W}{P_L} \quad (\text{Wesson, 2011})$$

- 2 – 3× zvýšení
- méně přesný výpočet
  - stacionární rovnováha:  $P_L \approx P_H = P_{OH}$
  - krátké H-módy



Obrázek: Výboje s č. 10000 a více (821 bodů z 24 validovaných výbojů)

### klasifikace ELMů (Zohm, 1996)

$$\begin{aligned} \text{typ I} \quad P_{sep} \nearrow &\rightarrow f_{ELM} \nearrow \\ \text{typ III} \quad P_{sep} \nearrow &\rightarrow f_{ELM} \searrow \end{aligned}$$

- ELMy typu I a pravděpodobně i typu III (Pánek, 2016)
- neznámé jevy nad 2 kHz

## Modifikace algoritmu pro real-time zpětnovazební systém

motivace akumulace nečistot v H-módu bez ELMů









nový přístup skryté Markovské procesy (pravděpodobnostní model)

## ELMům podobné jevy během L-H přechodu s $f > 2$ kHz

- měření oscilací turbulence vs. střížné toky
- limitní oscilace v modelu lovec – kořist (Cheng, 2014-11-01)

## hromadná analýza H-módu a L-H přechodu

- (částečně) automatizovaná detekce jevů
- porovnání změn veličin při L-H přechodu (cca  $2 \times \nearrow \tau_E, \beta_p$ )
- charakterizace ELM nestabilit (typy III, I)

-  ASDEX TEAM, 1989. The H-Mode of ASDEX. *Nuclear Fusion*. Roč. 29, č. 11, s. 1959. Dostupný také z WWW: (<http://stacks.iop.org/0029-5515/29/i=11/a=010>).
-  CHENG, J.; DONG, J.Q.; ITOH, K. et al., 2014-11-01. Low-intermediate-high confinement transition in HL-2A tokamak plasmas. *Nuclear Fusion*. Roč. 54, č. 11. Dostupný také z WWW: (<http://stacks.iop.org/0029-5515/54/i=11/a=114004?key=crossref.f37b6a1d0052f5eda573db228e502124>). ISSN 0029-5515.
-  MURARI, A.; VAGLIASINDI, G.; ZEDDA, M.K. et al., 2006. Fuzzy logic and support vector machine approaches to regime identification in JET. *IEEE Transactions on Plasma Science*. Roč. 34, č. 3, s. 1013–1020. Dostupný také z WWW: (<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1643335>). ISSN 0093-3813.
-  PÁNEK, R.; ADÁMEK, J.; AFTANAS, M et al., 2016. Status of the COMPASS tokamak and characterization of the first H-mode. *Plasma Physics and Controlled Fusion*. Roč. 58, č. 1, s. 014015. Dostupný také z WWW: (<http://stacks.iop.org/0741-3335/58/i=1/a=014015>).
-  WAGNER, F.; BECKER, G.; BEHRINGER, K. et al., 1982. Regime of Improved Confinement and High Beta in Neutral-Beam-Heated Divertor Discharges of the ASDEX Tokamak. *Phys. Rev. Lett.* Roč. 49, s. 1408–1412. Dostupný také z WWW: (<http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.49.1408>).
-  WEINZETTL, V.; PÁNEK, R.; HRON, M. et al., 2011. Overview of the COMPASS diagnostics. *Fusion Engineering and Design*. Roč. 86, č. 6-8, s. 1227–1231. Dostupný také z WWW: (<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0920379610005594>). ISSN 09203796.
-  WESSON, J., 2011. *Tokamaks*. 4. vyd. New York: Oxford University Press.
-  ZOHRM, H., 1996. Edge localized modes (ELMs). *Plasma Physics and Controlled Fusion*. Roč. 38, č. 2. Dostupný také z WWW: (<http://stacks.iop.org/0741-3335/38/i=2/a=001>).