

L-H přechod v tokamakovém plazmatu

studie lokálních parametrů okrajového plazmatu

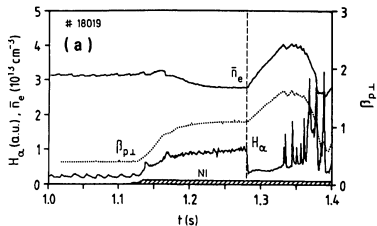
Ondřej Grover

SVK FTTF, Mariánská, 2017

- 1 Úvod: L-H přechod
 - Motivace zkoumání L-H přechodu
 - Teoretický model L-H přechodu
- 2 Experimentální výsledky
- 3 Závěr: shrnutí a plány do budoucna

High confinement mode

- $\sim 2 \times \nearrow \tau_E, \beta_p$
- referenční scénář pro ITER:
ELMy H-mód



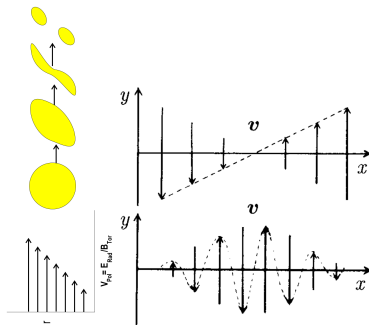
Obrázek: (Wagner, 1982)

L-H přechod

- empirická teorie: přechod při $P_{in} > P_{LH}$
- škálovací výrazy

$$P_{LH} = C n_e^\alpha B_\phi^\beta Z_{eff}^\gamma S^\delta f(R, a)$$
- robustní teorie zatím chybí

- střížné toky (lovec) dekorelují turbulentní struktury (kořist)
- zonální střížné toky ($k_p \ll k_r$) buzeny Reynoldsovým napětím (stress) $\partial_t \langle v_p \rangle \approx -\partial_r \langle \tilde{v}_r \tilde{v}_p \rangle$
- možnost vzniku limitních cyklových oscilací (LCO), dokud se nevytvoří střední střížný tok



Obrázek: "Slab" (desková) geometrie $(r, \theta, \phi) \rightarrow (x, y, z)$.

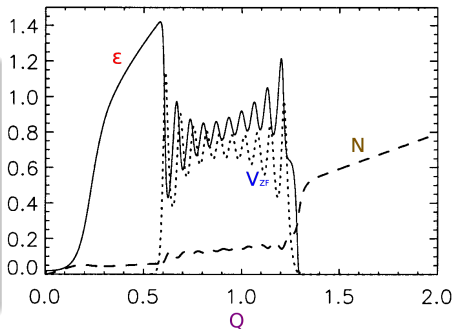
$$\partial_t \epsilon = a_1 \epsilon N - a_2 \epsilon^2 - a_3 V^2 \epsilon - a_4 V_{ZF}^2 \epsilon$$

$$\partial_t V_{ZF} = b_1 \frac{\epsilon V_{ZF}}{1 + b_2 V^2} - b_3 V_{ZF}$$

$$\partial_t N = -c_1 \epsilon N - c_2 N + Q, \quad V = d N^2$$

Veličiny v modelu

- ϵ intenzita driftové turbulence
- $V = \partial_r \langle v_E \rangle$ střední střižný tok
- $V_{ZF} = \partial_r \tilde{v}_E$ zonální střižný tok
- $N = \partial_r p_i$ gradient iont. tlaku
- Q vnější ohřev



Reynolds stress (Reynoldsovo napětí)

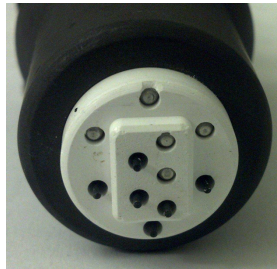
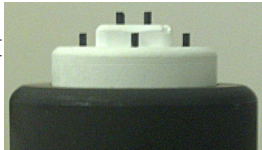
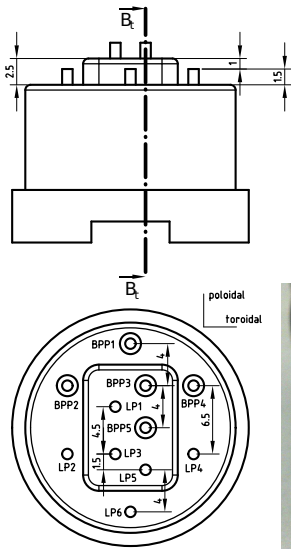
$$\frac{\partial \langle v_p \rangle}{\partial t} = -\nabla_r \langle \tilde{v}_r \tilde{v}_p \rangle \quad (1)$$

$R_{rp} = \langle \tilde{v}_r \tilde{v}_p \rangle \dots$ Reynolds stress

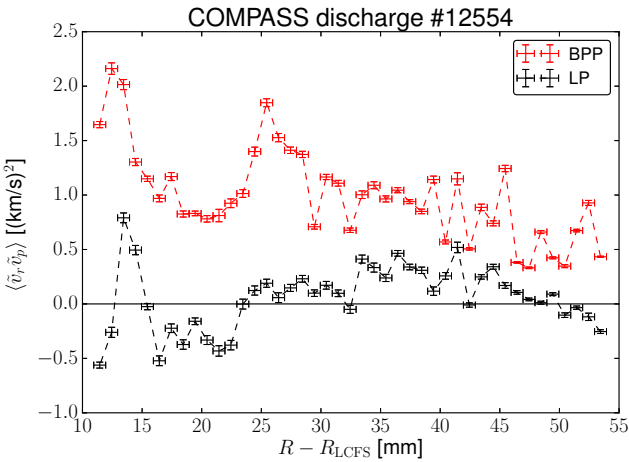
Elektrostatická turbulence

- $\tilde{v}_p \approx \tilde{v}_{E,p} = \frac{\tilde{E}_r}{B_\phi}$
- plovoucí potenciál Langmuirovy sondy $V_{fl} = \phi - \alpha T_e$

$$\begin{aligned} R_{rp} \propto \langle \tilde{E}_r \tilde{E}_p \rangle &= \langle \partial_r (\tilde{\phi} - \alpha \tilde{T}_e) \partial_p (\tilde{\phi} - \alpha \tilde{T}_e) \rangle = \\ &= \langle \partial_r \tilde{\phi} \partial_p \tilde{\phi} \rangle - \alpha \langle \partial_r \tilde{T}_e \partial_p \tilde{\phi} \rangle - \alpha \langle \partial_r \tilde{\phi} \partial_p \tilde{T}_e \rangle + \alpha^2 \langle \partial_r \tilde{T}_e \partial_p \tilde{T}_e \rangle \end{aligned}$$

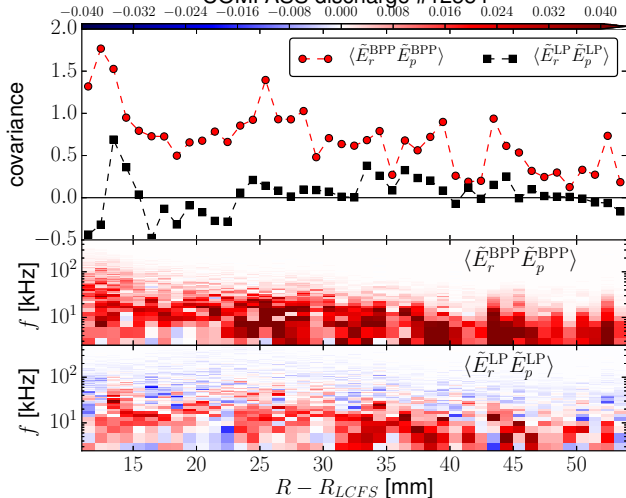


- 5 ball-pen (BPP) a 6 Langmuirových (LP) sond
- podobná geometrie sond ⇒ porovnání
- pro reciproký manipulátor → radiální profily

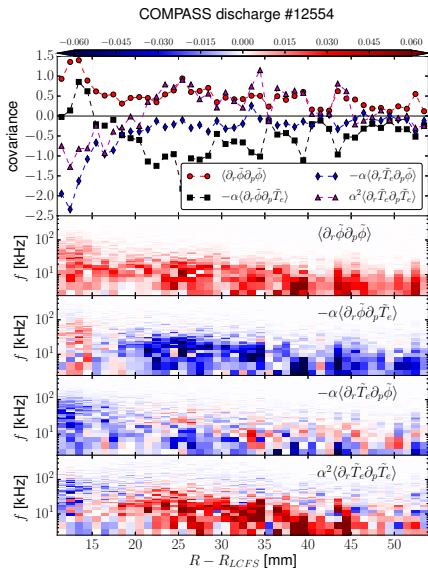


- $R_{rp}^{\text{BPP}} > R_{rp}^{\text{LP}}$
- $R_{rp}^{\text{BPP}} > 0$
- podobné tvary profilů (gradienty)

COMPASS discharge #12554

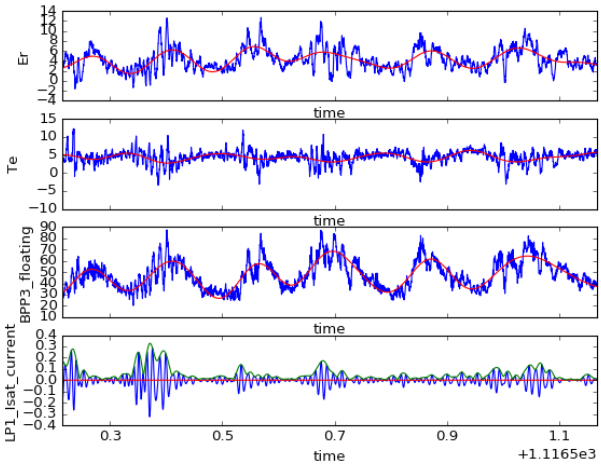





- $R_{rp} = \frac{1}{B_\phi^2} \langle \tilde{E}_r \tilde{E}_p \rangle$
- $\langle a(t)b(t) \rangle = \int \frac{A(f)B(f)}{df}$
- $f \in \langle 50, 500 \rangle$ kHz:
 $\langle \tilde{E}_r^{\text{LP}} \tilde{E}_p^{\text{LP}} \rangle < 0$



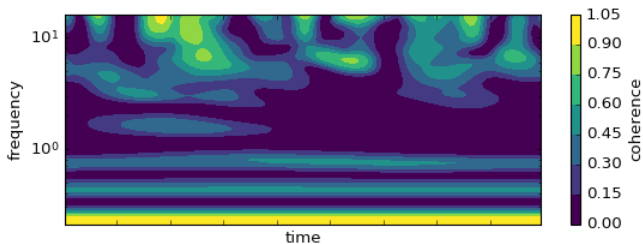
$$\langle \tilde{E}_r^{\text{LP}} \tilde{E}_p^{\text{LP}} \rangle = \sum \langle \rangle$$

• přelom na $\Delta R \approx 17$ mm

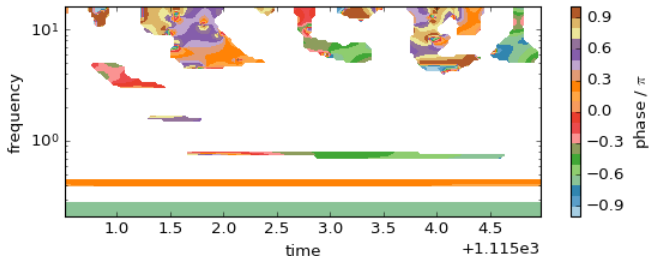


-  $n_e \propto I_{sat,i}$
-  $\delta n_e \nearrow \rightarrow E_r \nearrow$
-  kandidát na LCO

coherence LP1_Isat_current,Er



• fázový posun pro $f \approx 8$ kHz: $\approx \frac{\pi}{2}$



• 112 shotů (CC 16.08) \rightarrow 1 ms

- zopakování session pro LCO s boronizovanou stěnou
- vyrobení sondy z lepšího bor-nitridu a vypéct ji
- hluboké zásuny pro hledání zonálních struktur na $\langle v_p \rangle$

Bonusové plány

- porovnat vliv T_e na R_{rp} se simulacemi
- parametrické zkoumání profilů $R_{rp}(r)$

- model lovec-kořist: střížné toky-turbulence možný model pro L-H přechod
- měření zásadního vlivu fluktuací T_e na Reynoldsovo napětí
- první pozorování “LCO-like” oscilací