

ビーム放射分光法を用いたCHSにおける 周辺部輸送障壁形成時のMHD揺動計測

東大院・工 A東大高温プラズマセ
大石鉄太郎, A門信一郎

Contents

- 研究の背景
 - CHSにおけるETB形成
- **ビーム放射分光法(BES:Beam Emission Spectroscopy)を用いた密度揺動計測の原理**
- 実験および解析
 - ETB形成時のMHD揺動
 - ...low frequency mode とその 2nd harmonic ,
および fishbone-like mode の空間分布
- まとめ

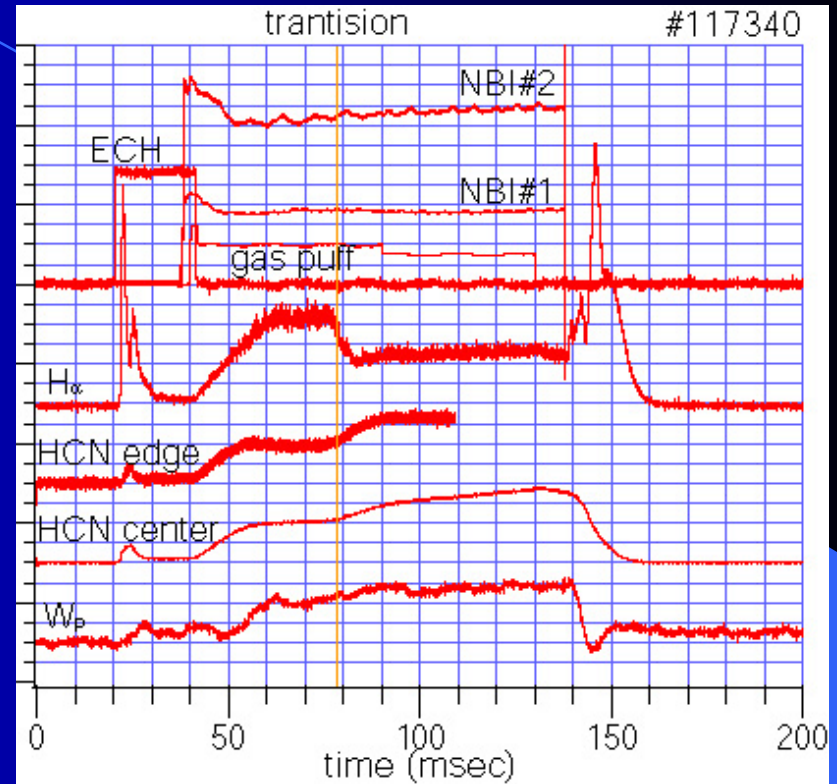
研究の背景

-CHS(Compact Helical System)における周辺部輸送障壁(ETB)の形成-

- CHSにおけるETB形成の条件
 - NBI2本のco-injectionにより加熱パワー P_{NBI} が閾値 P_{th} を超えるとETB形成

- ETB形成を示唆する各種計測
 - H_{α} emissionが低い状態に遷移
 - 遷移時に n_e , W_p

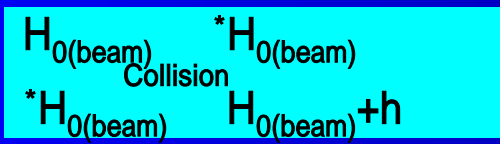
- ETB形成に関する最近の研究
 - LCFS近傍での密度上昇(トムソン散乱, プローブ, LiBP, BES)
 - 磁気軸シフトや回転変換制御によるETB形成挙動の変化
 - 輸送障壁形成前後のLCFS近傍での揺動の変化(プローブ, BES)



...揺動の空間分布を知るためには局所計測が必要
ビーム放射分光法 (Beam Emission spectroscopy:BES)

BESの計測原理

中性粒子ビームからの放射光
(以下Beam Emission)の光強度
の経時変化を観測

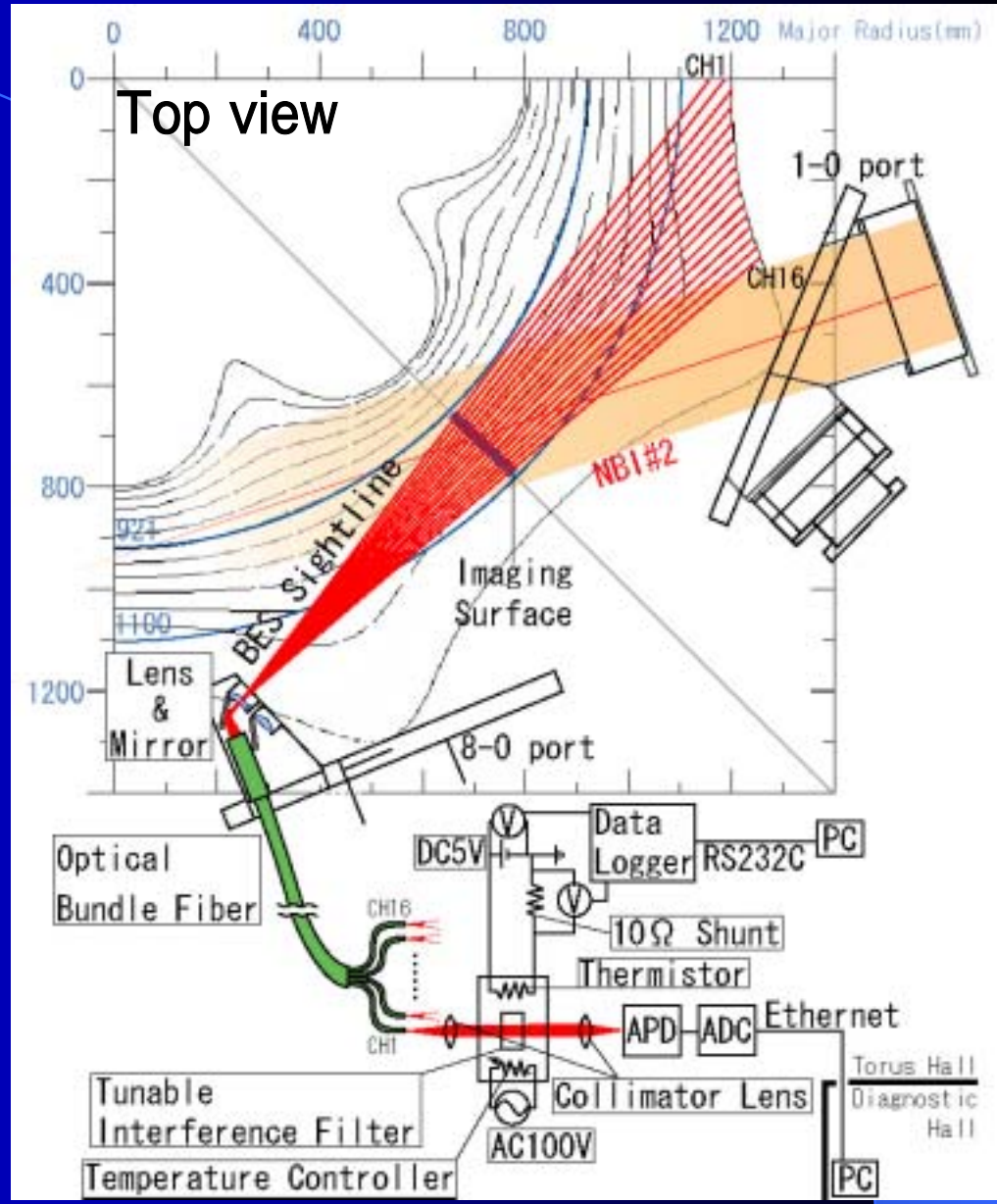


加熱用NBI(H^0 , 25 ~ 30keV)
Beam Emission: H_{α} (656.285nm)

観測視線16本, 1cm間隔
空間分解能 (観測視線の幅)
~ 1cm

現時点では8本の観測視線による
同時計測が可能

APDのカットオフ周波数=100kHz



BESの計測原理 ~ 密度勾配と密度揺動の同時計測

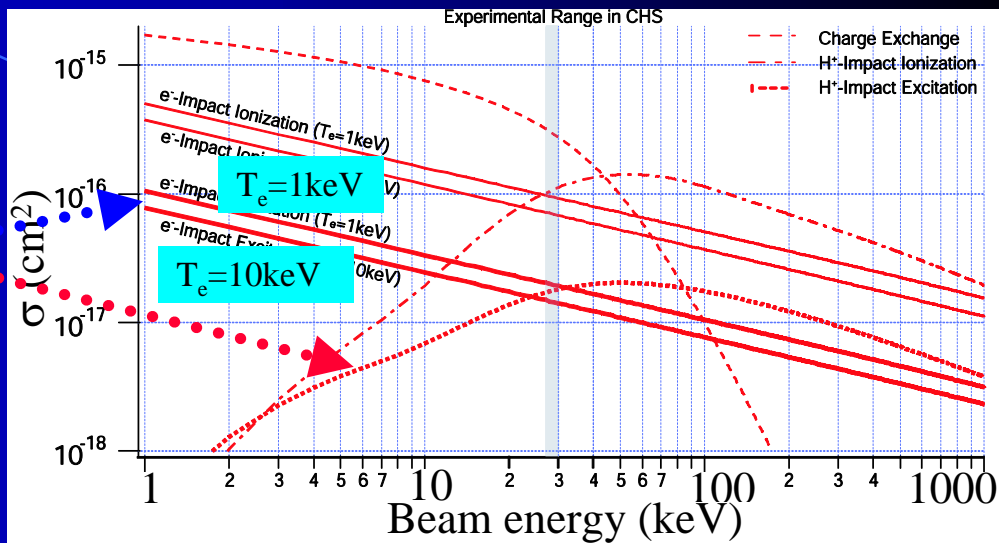
$$I \approx \frac{A_{32}}{A_{32} + A_{31}} \cdot h\nu \cdot \Delta V \cdot \Delta\Omega / 4\pi$$

$$\cdot (n_e \cdot n_{beam} \cdot \langle \sigma_e v \rangle + n_i \cdot n_{beam} \cdot \langle \sigma_i v \rangle)$$

$$= n_e \cdot n_{beam} \cdot v_{beam} \cdot (\langle \sigma_e v \rangle / v_{beam} + \langle \sigma_i v \rangle)$$

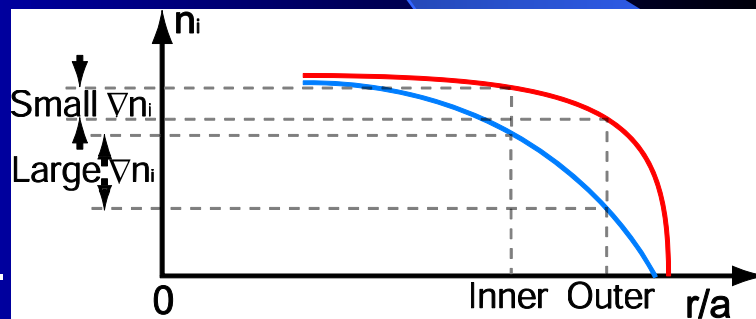
e-H⁰ collision **H⁺-H⁰ collision**

- H⁰ beam, 25~30keVでは
電子-ビーム粒子衝突の寄与
~ イオン-ビーム粒子衝突の寄与



- 密度勾配:
... 隣り合う観測視線で得られた信号から

$$\frac{n_e}{n_e} \frac{I_{inner} - I_{outer}}{\text{および } L_n^{-1}} \quad \frac{n_e}{n_e/n_e} \frac{I_{inner} + I_{outer}}{\text{が求められる}}$$



- 密度揺動:

$$\frac{\tilde{I}}{I} = F \left(\frac{\tilde{n}_e}{n_e}, \frac{\tilde{n}_i}{n_i}, \frac{\tilde{n}_{beam}}{n_{beam}}, \langle \sigma_e v \rangle (T_e, \tilde{T}_e) \right)$$

データ解析により除去

密度勾配と密度揺動の同時計測が可能

$$\frac{\tilde{I}}{I} = \frac{\tilde{n}}{n}(e, i)$$

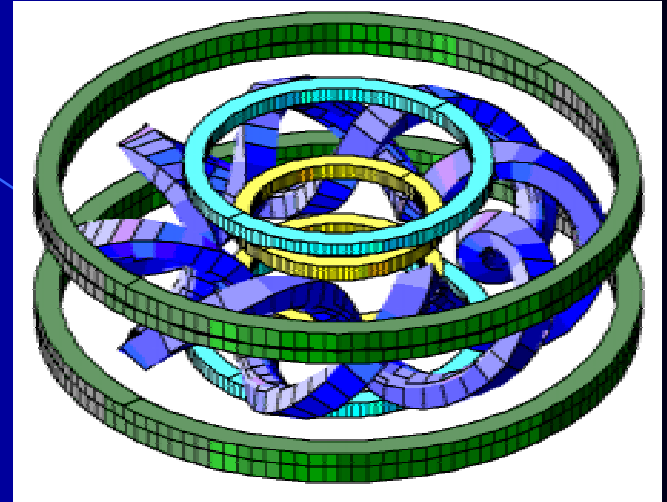
実験装置

CHS (Compact Helical System)

Parameter of CHS

- Configuration: Heliotron
- Multi polarity: $l=2$
- Toroidal periods: $m=8$
- Major radius: 1.0m
- Minor radius: 0.2m
- $n_e \sim 10^{13} \text{cm}^{-3}$
- $T_e \sim 1 \text{keV}$

標準磁場配位では $R_{ax}=92.1 \text{ cm}$, $B_{ax}=0.95 \text{ T}$.



Imaging Optics

- Objective lens: $f=71.5 \text{ mm}$, $\phi=40.0 \text{ mm}$
- Fiber array: $\text{N.A.}=0.2$, $\phi=880 \mu\text{m}$ (core)

Detection Systems

- 干渉フィルタの透過中心波長は約 0.018 nm/K で温度制御が可能
30~60 でのオペレーションで
NBIの加速エネルギー 25~30 keV をカバー

Optical fibers (to APD)

Optical interference filters

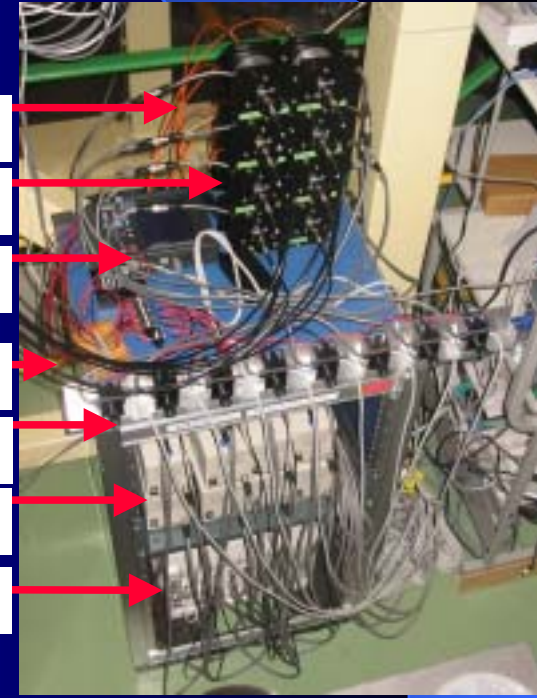
Data logger

Optical fibers (from plasma)

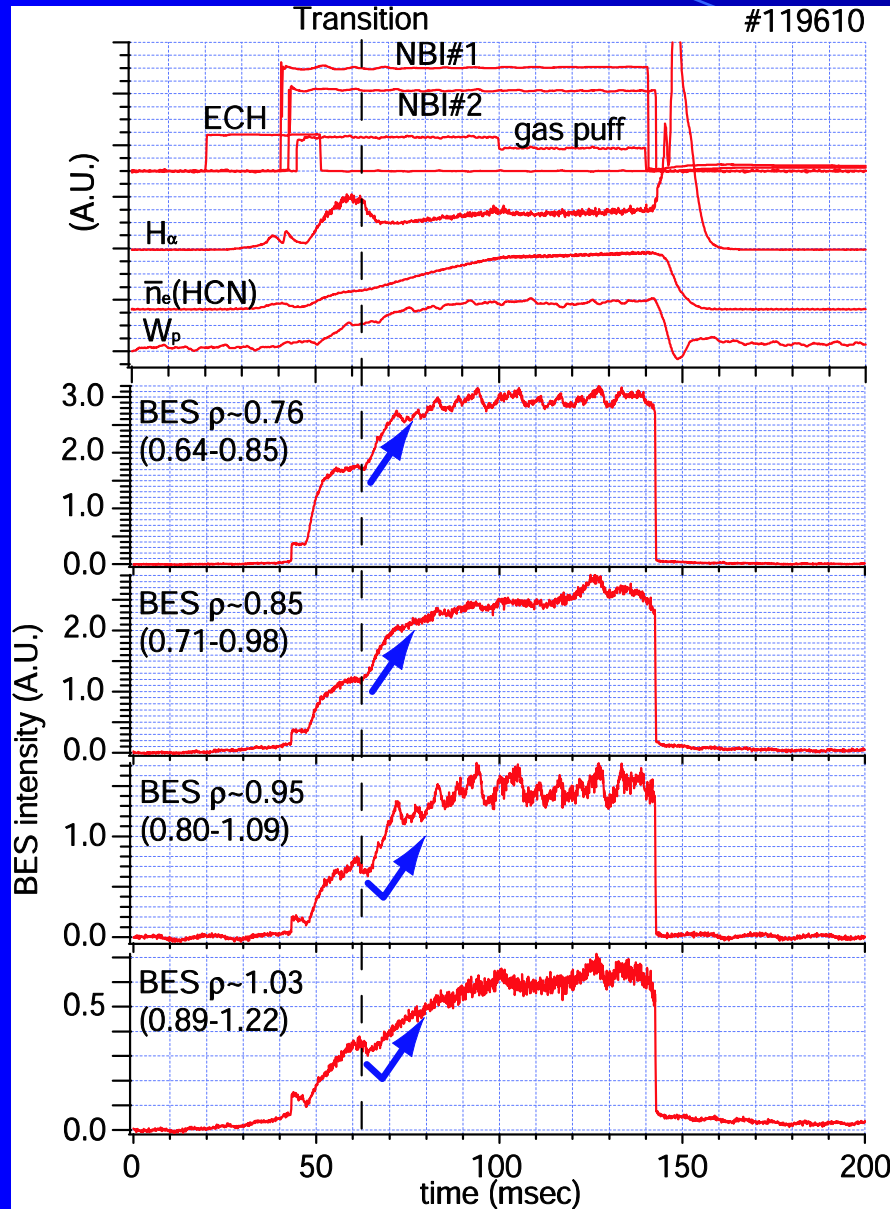
Potentiometer

APD module

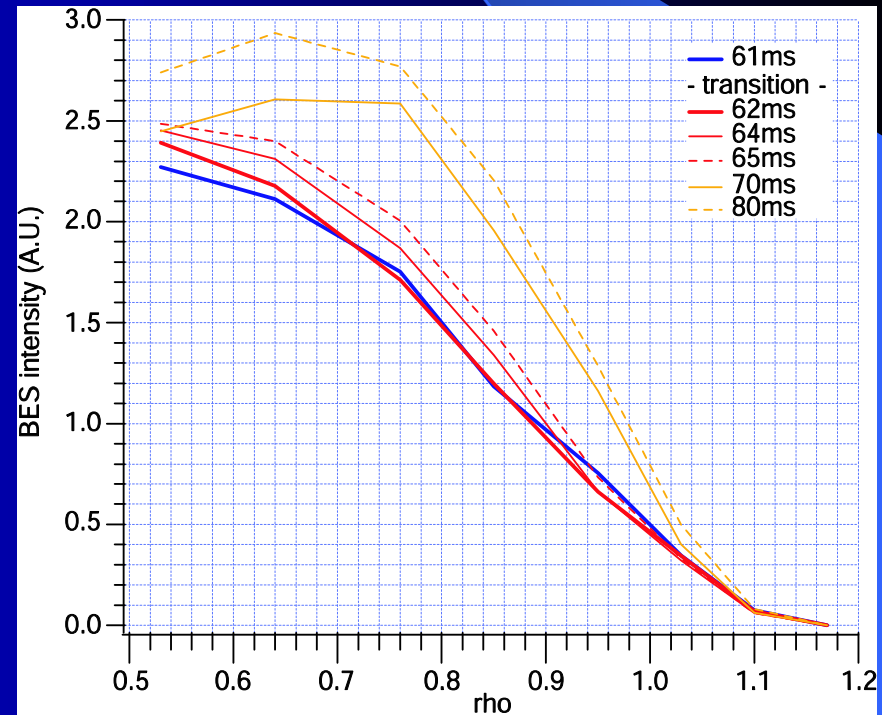
AD converter



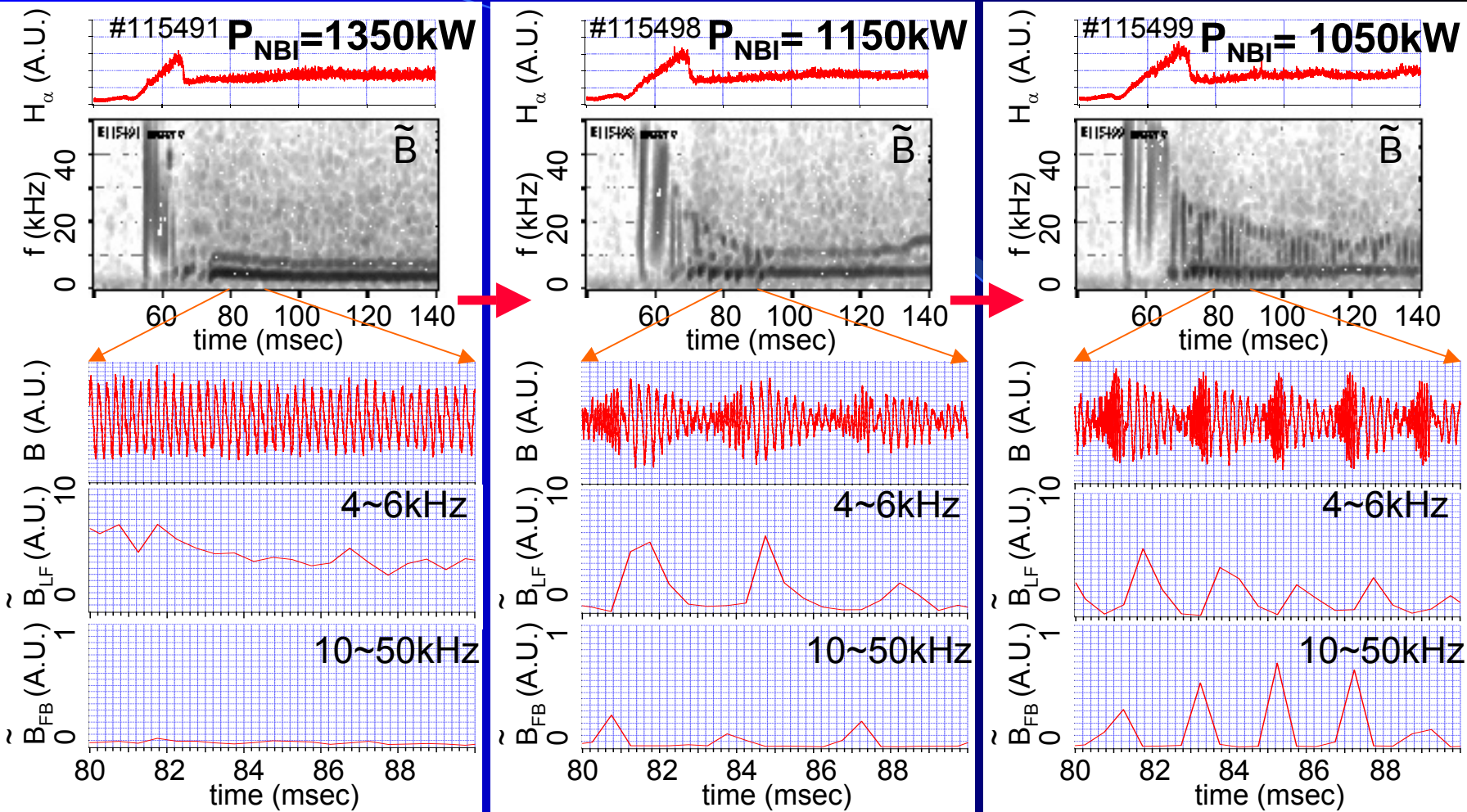
ETB形成による周辺部の密度変化



- 遷移時にLCFSの内側では密度増, 外側では密度減
閉じ込め改善, out fluxの減少
- ETBのfoot point はLCFSの近傍



ETB形成時のMHD揺動の加熱パワー依存性



- $P_{NBI} \sim P_{th}$... 4~6 kHz程度の揺動(low frequency mode:LF)とその倍波が同時に発生
- $P_{NBI} \sim P_{th} (\sim 1000 \text{ kW})$... LFと10~50 kHz程度のFishbone-likeな揺動(FB-like)が交互に発生
- LFは $m=2$, 電子反磁性方向に伝播. FB-likeは $m=2$, イオン反磁性方向に伝播

BESを用いてこれらのMHD揺動の空間分布計測を行う。

ETB形成後の密度揺動

(1) $P_{NBI} \sim P_{thr}$ の場合

(a) 磁場揺動スペクトル

- 遷移前からFB-like
- 遷移後はLFとFB-likeが交互に現れる

(b) 周辺部($\rho=0.80 \sim 1.08$)の密度揺動スペクトル(BES)

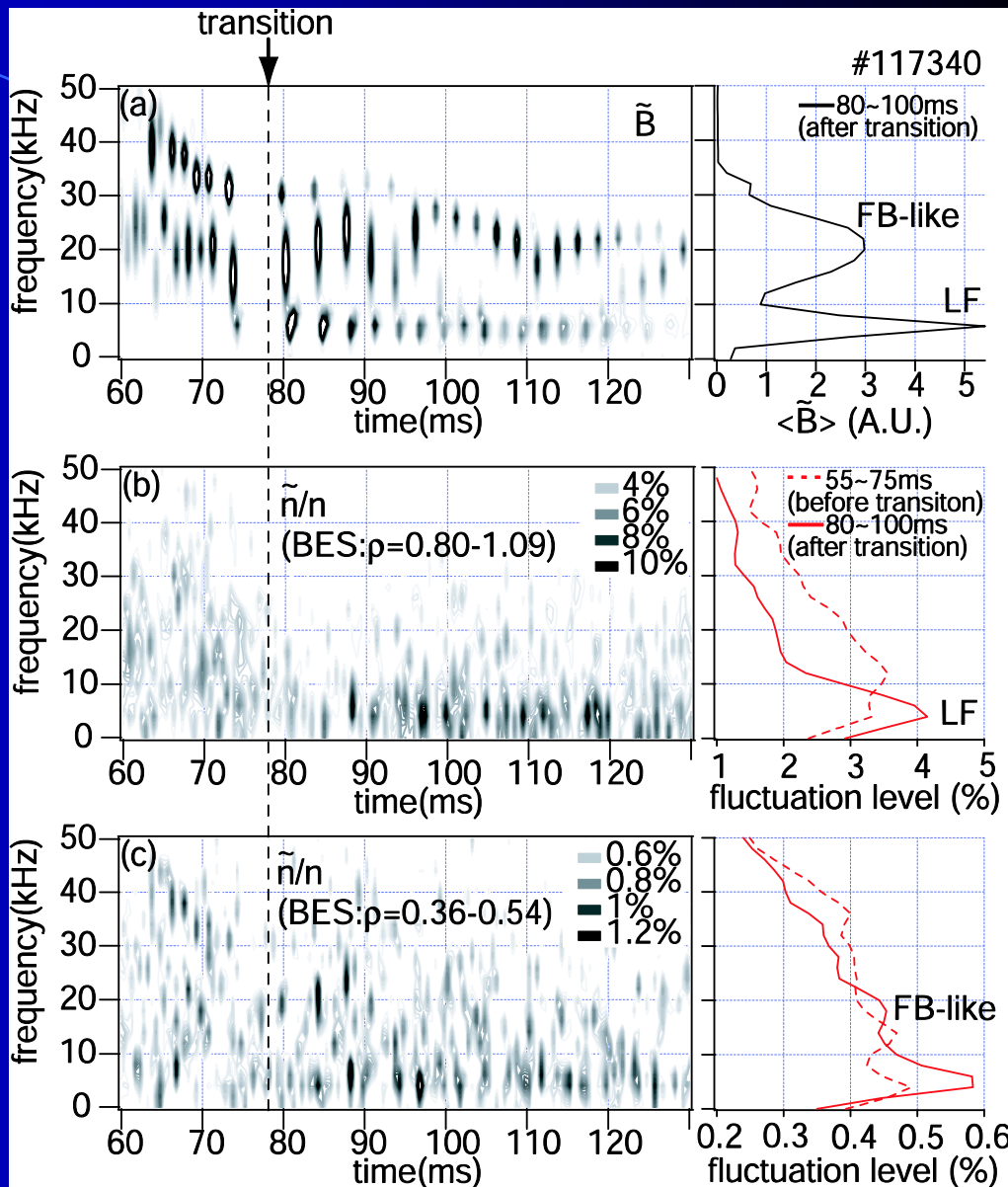
- 磁場揺動のLFと同じ周波数の密度揺動が周辺部に存在

(c) 中心部($\rho=0.38 \sim 0.54$)の密度揺動スペクトル(BES)

- 中心部にFB-likeな密度揺動
- LFと同期した揺動

中心部にもLFが存在
or/and
周辺部のLFによりプローブ
ビームの密度が変調を受けた

周辺部のLFによる
ビーム変調の定量的評価が必要



LFの空間分布

- 周辺部, 中心部ともにLFが現れている
99, 102, 104, 109 msecに着目
... LFの空間分布
 - 周辺部で強く, $\rho \sim 0.95$ 付近で最大
 - 中心部でも観測される 密度揺動 or ビーム揺動?

- 中心部のビーム揺動の見積り
(1) 周辺部のLFをガウス型の構造を持った摂動と考える.

- $\rho \sim 0.95$ がピーク
- ピーク値は $\rho \sim 0.95$ における n_e の5~10%
- $\rho = 0.1$ 程度の1/e半幅

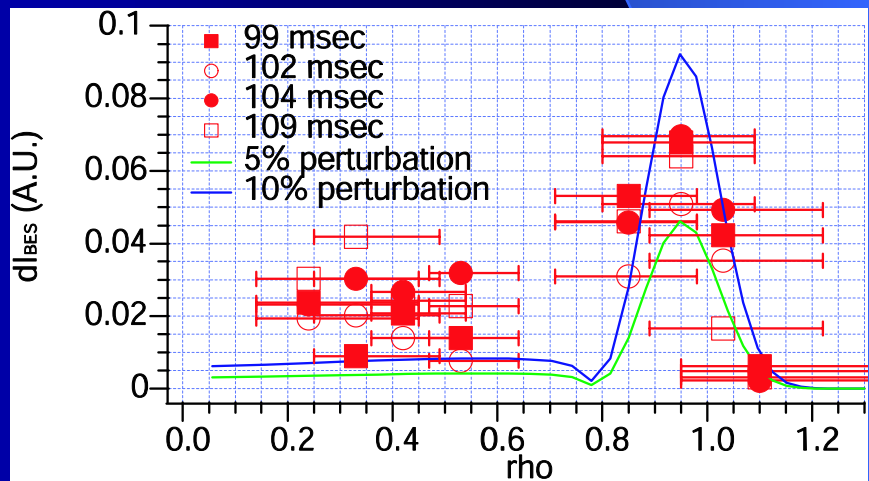
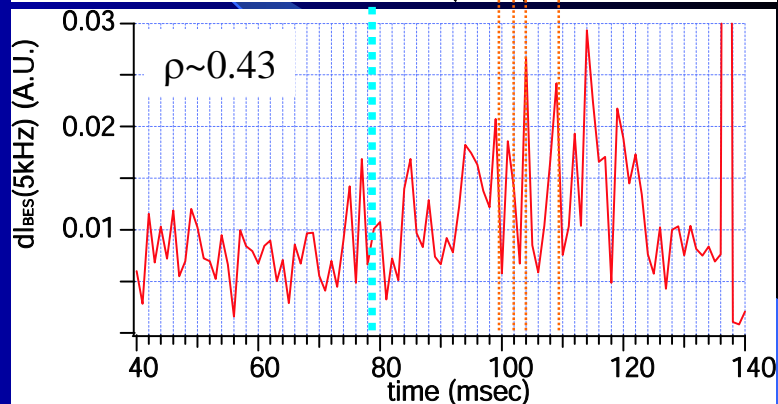
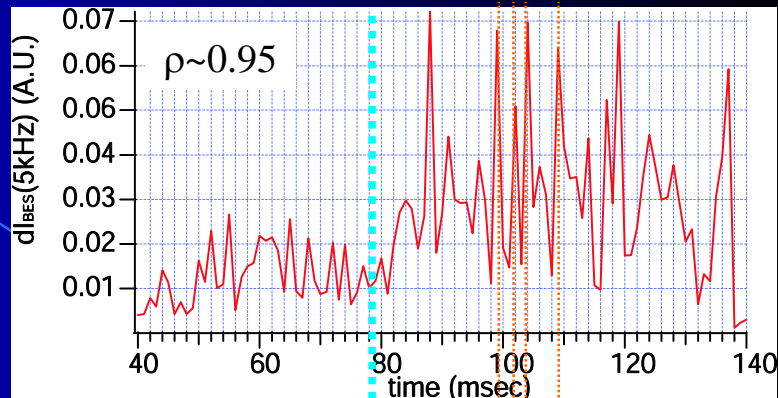
- (2) トムソン散乱から密度プロファイル $n_e(\rho)$ を求める.
- (3) ビーム減衰の式

$$n_b(x) = n_b(0) \cdot \exp(-\sigma_{loss} \int_0^x n_e(x) dx)$$

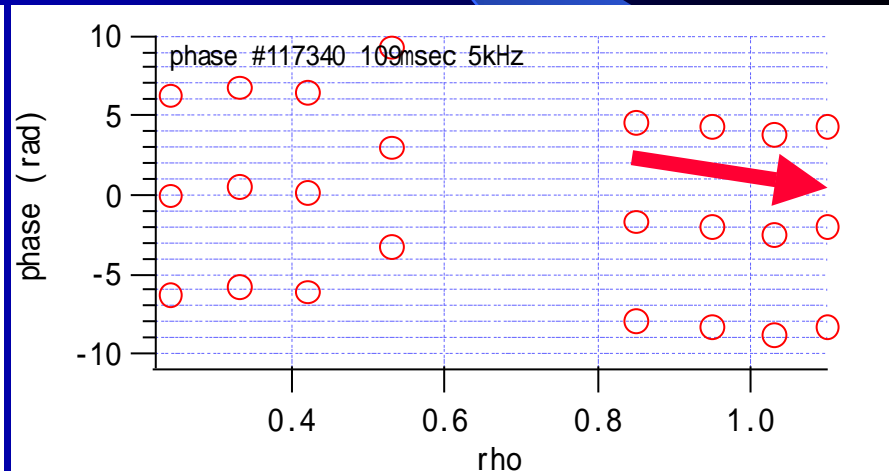
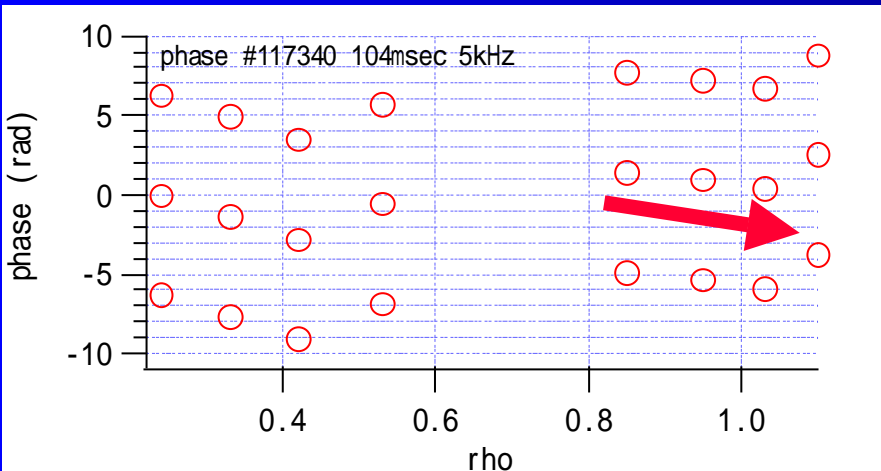
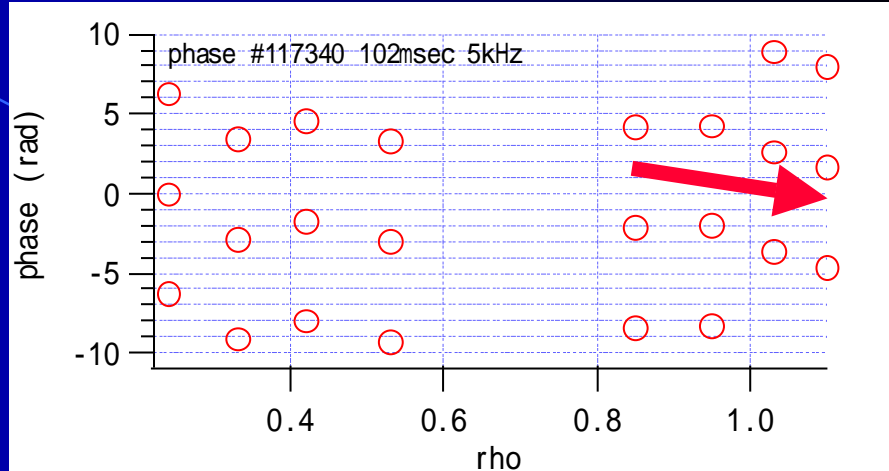
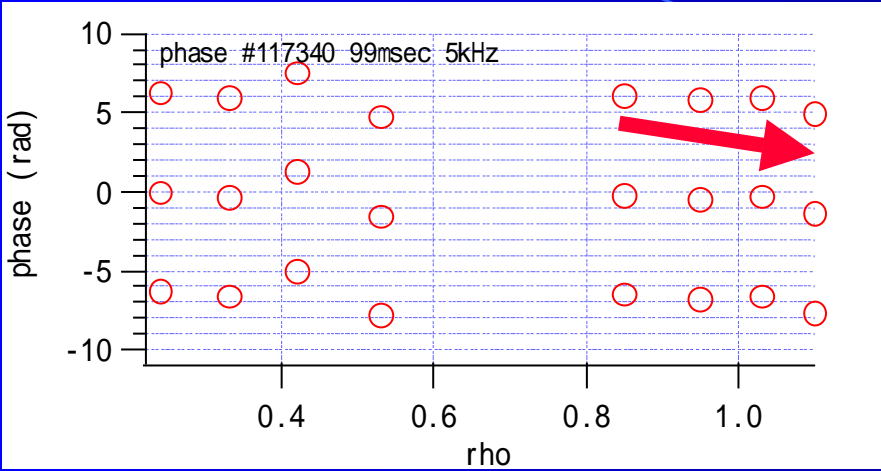
(xはビームライン上の座標)を用いて, (1)の摂動が加わった時の中心部でのビーム変調を計算する.

中心部での揺動強度は
「LFが周辺部に局在」と仮定しての計算値より
実験値のほうが有意に大きい
中心部にもLFが存在している

transition



LFの位相



- 周辺部では位相が連続的に変化...数100m/sのオーダーで外側に伝播
- 中心部でも位相差が存在...「中心部にもLFが存在している」ことをサポート
位相変化の規則性は今のところ見出せず

ETB形成後の密度揺動

(2) $P_{NBI} > P_{thr}$ の場合

(a) 磁場揺動スペクトル

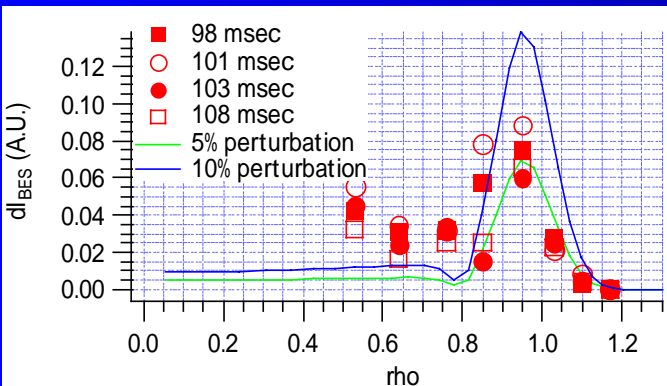
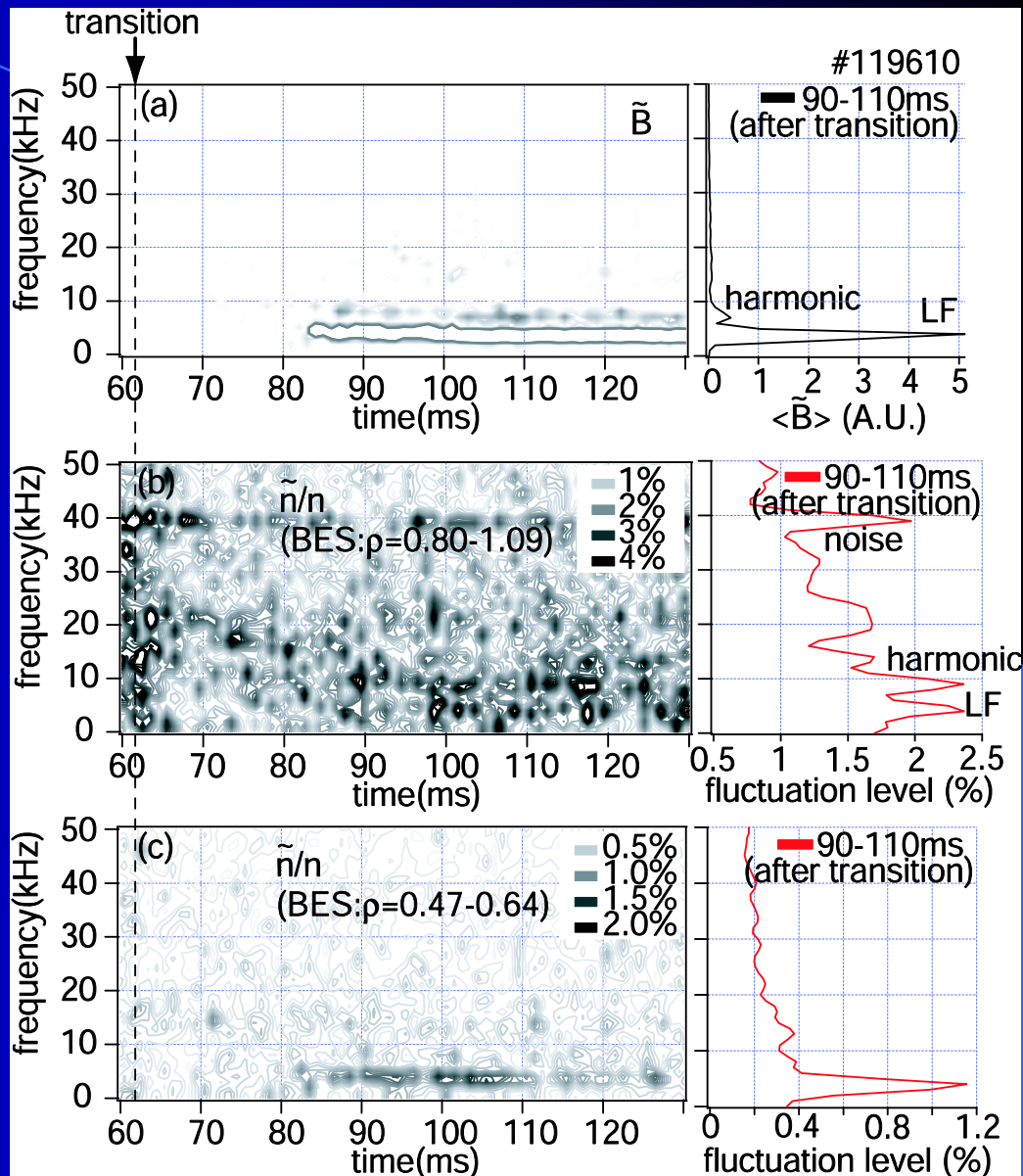
遷移後にLFとharmonicが同時に現れる

(b) 周辺部($\rho=0.80\sim 1.08$)の密度揺動スペクトル(BES)

磁場揺動のLF, harmonicと同じ周波数の密度揺動が周辺部に存在

(c) 中心部($\rho=0.38\sim 0.54$)の密度揺動スペクトル(BES)

中心部にLFが存在

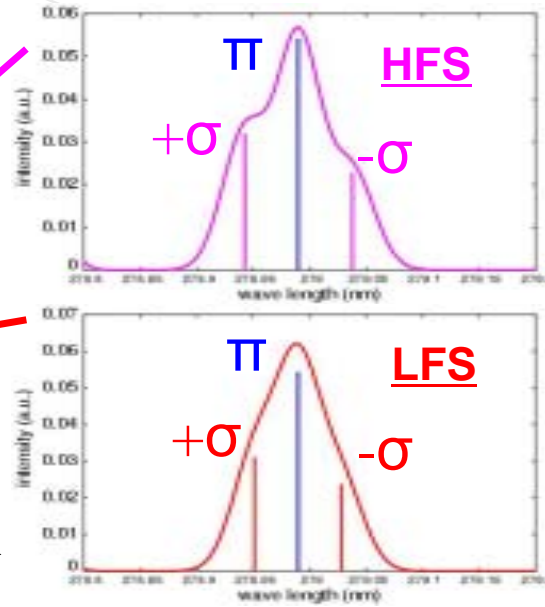
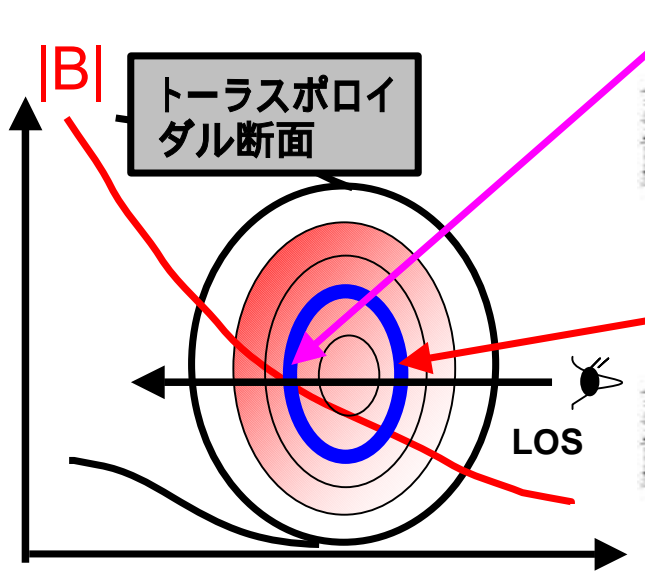


LFの強度分布

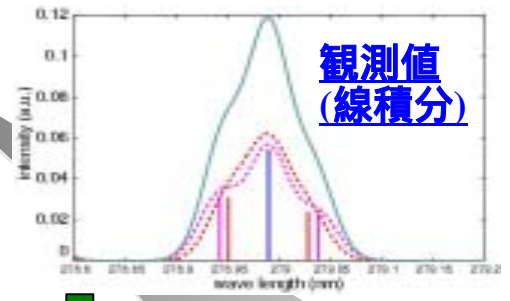
まとめ

- CHSにおけるETB形成時には, MHD揺動として...
 - 加熱パワーが遷移閾値よりも十分高ければ, low frequency mode (LF mode)とその倍波が発生する.
 - 加熱パワーが遷移閾値と同程度の時は, LF modeとfishbone-like mode (FB-like mode)が発生する.
- BESを用いて密度揺動を多点同時計測した結果...
 - FB-like modeは $\rho \sim 0.5$ 付近のプラズマ中心部に存在する.
 - LF modeはLCFS付近で最も強く観測され, 中心部にも強度は小さいが存在する.

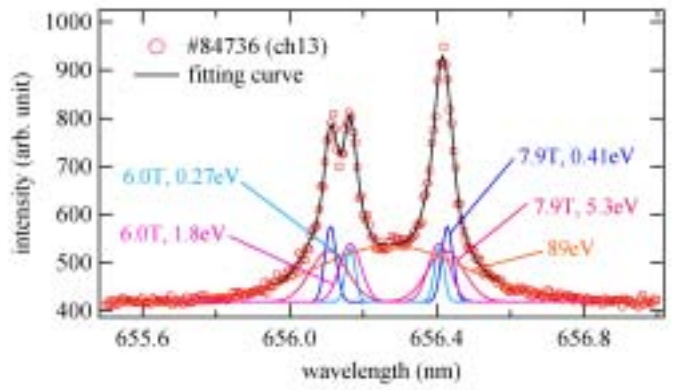
Zeeman効果を利用したTRIAM-1Mトカマクにおける発光の局所計測



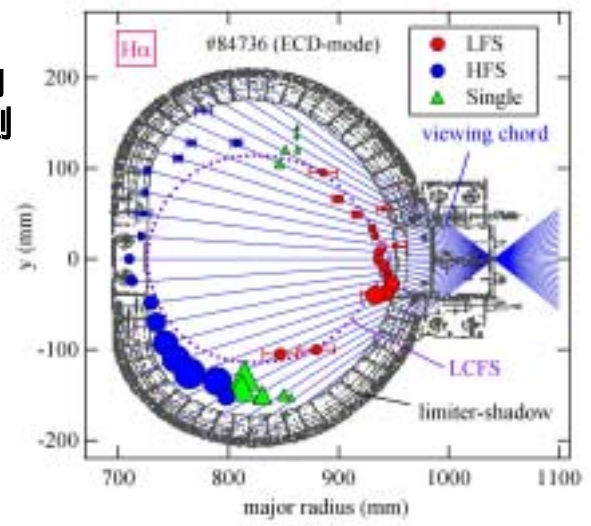
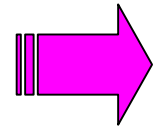
四電(東大院工) が
ポスターにて発表



フィッティングによって
スペクトルを分離



Poloidal方向
に25本の観測
視線で計測



H 線
発光分布

直線偏光子を用いて計測した
H スペクトル 成分
(三温度成分を仮定してフィッティング)