

2008年03月17-19日

第11回若手科学者によるプラズマ研究会

LHDにおける $H\alpha$ 光検出器アレイによる  
高速イオン励起アルヴェン固有モードの空間構造測定

小川国大<sup>1</sup>, 東井和夫, 磯部光孝, 渡辺文武<sup>1</sup>, 鈴木千尋, 加藤太治, 佐藤國憲

自然科学研究機構核融合科学研究所  
名古屋大学工学研究科<sup>1</sup>



# 概要

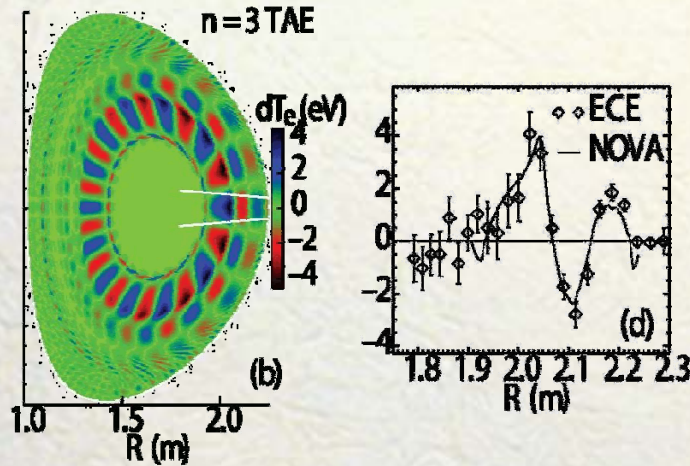
---

- 背景・目的
- アルヴェン固有モード
- $H\alpha$ 放射
- 実験装置と主な計測装置
- 実験結果
  - $H\alpha$ アレイによるTAEの空間分布情報計測
- まとめ



## 背景・目的

DIII-DにおけるECEによるAEの空間構造測定



M.A. Van Zeeland *et al.*, Phys. Rev. Lett. **97**, 135001 (2006)

- $\alpha$  粒子の電子による減速過程
  - $V_A \sim V_\alpha$  になった際にアルヴェン固有モード(AE)を励起する可能性がある。
- AEは $\alpha$  粒子の異常輸送を招き核融合反応停止や第一壁の損傷をもたらす。
- AEによる異常輸送を防ぐことはヘリカルにおいてもトカマクにおいても重要である。
- AEの特性を調べる上で、AEの空間分布の計測は重要である。
  - 反射計、干渉計、BESなどを用いた計測が行われている。
  - DIII-Dで電子サイクロトロン放射(ECE)測定により、アルヴェン波の空間分布が測定
  - さらに単純で簡便な計測方法の探究



- $H\alpha$  揺動によるAEの空間構造観測

# アルヴェン固有モード(AE)

- シアルヴェン波
  - アルヴェン固有モードはシアルヴェン波の一種

$$\frac{\partial^2 \xi_{\perp}}{\partial z^2} = -\frac{\omega^2}{V_A^2} \xi_{\perp}$$

シアルヴェン波の分散関係

但し、 $V_A = B/\sqrt{\mu_0 \rho}$

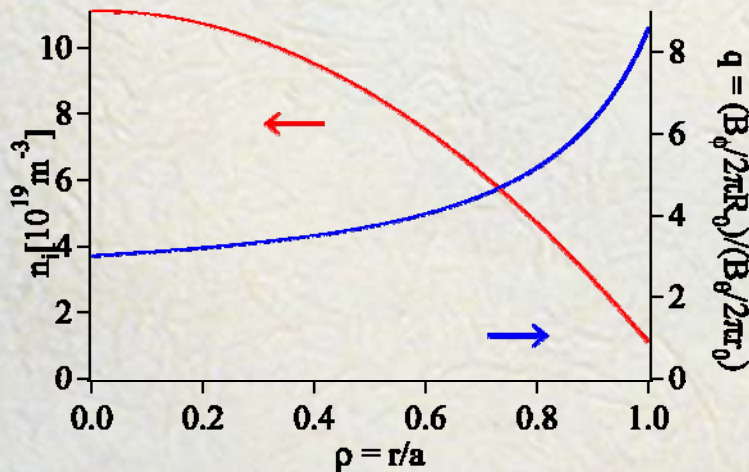
$\omega$ は波の角周波数、 $z$ 軸に磁場をとり $\perp$ はx-y平面

$$\omega = k_{\parallel} V_A$$

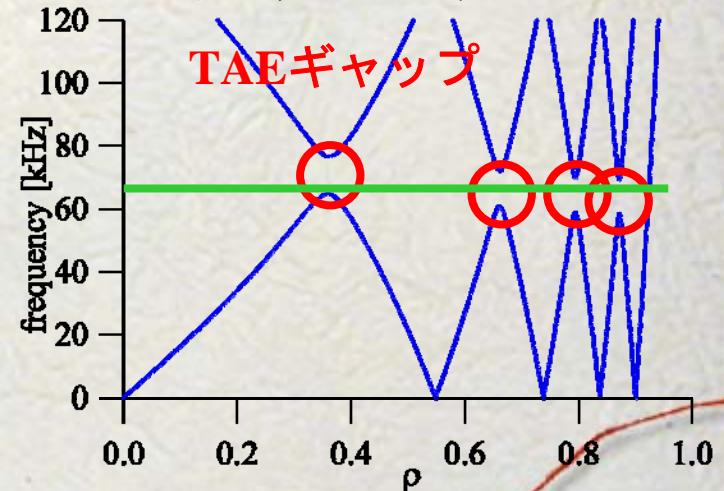
$$B = B_0 (1 - \epsilon_t \cos(\theta))$$

トロイダル効果

イオン密度と安全係数



アルヴェンスペクトル





# H $\alpha$ 放射

- H $\alpha$ 放射( $\epsilon_\alpha$ ) (主量子数3 $\rightarrow$ 2の放射)

$$\epsilon_\alpha = \epsilon_{\alpha e} + \epsilon_{\alpha fast}$$

$$\epsilon_{\alpha e} \cong (n_{n-cold} + n_{n-fast}) n_e \langle \sigma_{ex} v_e \rangle$$

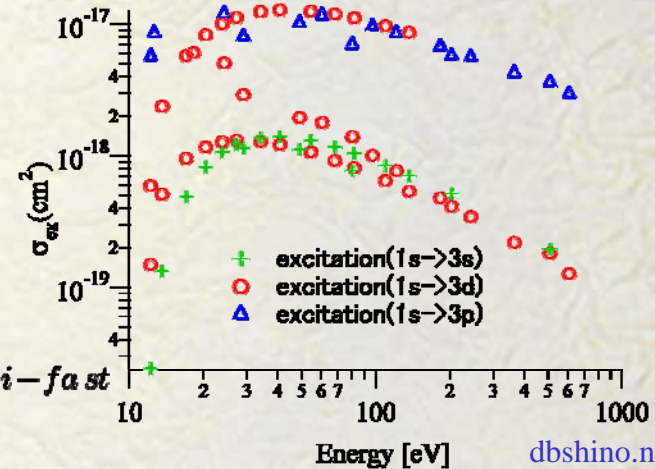
$$\epsilon_{\alpha fast} \cong n_{n-cold} \int \sigma_{ex}(v_{i-fast}) v_{i-fast} f(v_{i-fast}) dv_{i-fast} + n_{n-fast} \int \sigma_{ex}(\Delta v) \Delta v f(v_{i-fast}) dv_{i-fast}$$

$$\text{但し、} \Delta v = |v_{i-fast} - v_{n-fast}|$$

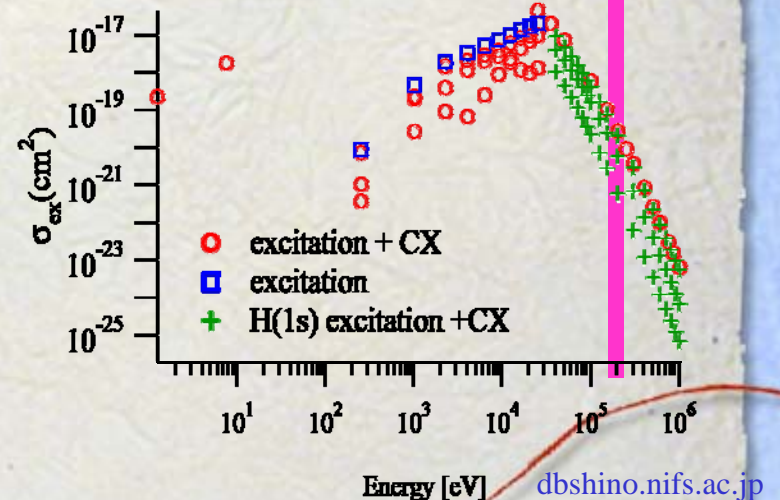
- H $\alpha$ 信号は中性粒子の電子による励起が主
  - 高速イオンの寄与はほとんどない。

$$I_{H\alpha} \approx n_n n_e \langle \sigma v \rangle_{ex}$$

電子による励起断面積



イオンによる励起断面積



# 実験装置と主な計測装置

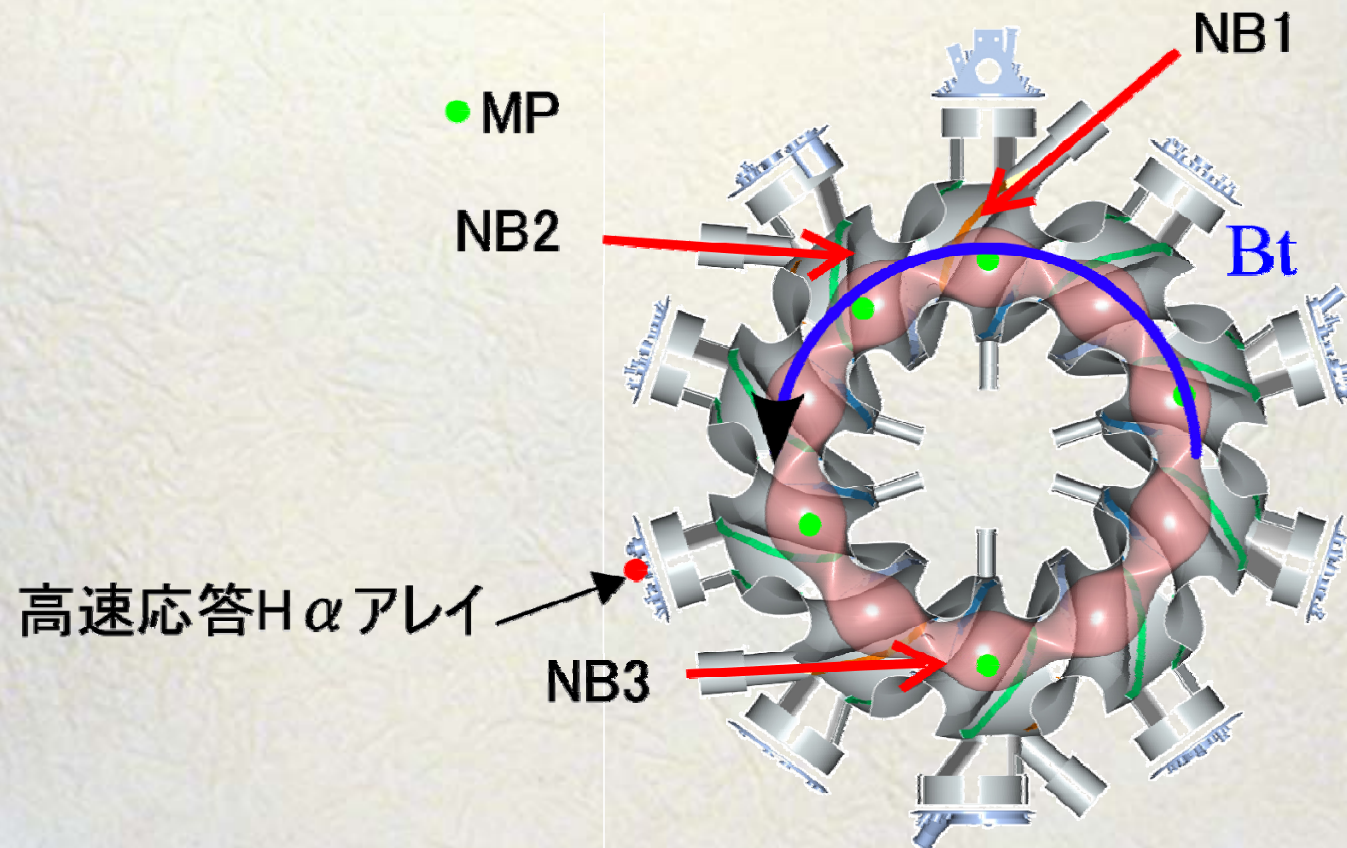
- 大型ヘリカル装置
- 高速応答H $\alpha$ 揺動観測器アレイ



# 大型ヘリカル装置(LHD)

- 中性粒子入射装置：出力  $\sim 4\text{MW} \times 3$ , エネルギー  $\sim 180\text{ keV}$ ,  $\text{H}^0$
- 磁場：  $0.425\text{ T} < B_t < 0.75\text{ T}$
- プラズマ大半径/平均小半径：  $3.6\text{ m}/0.6\text{ m}$

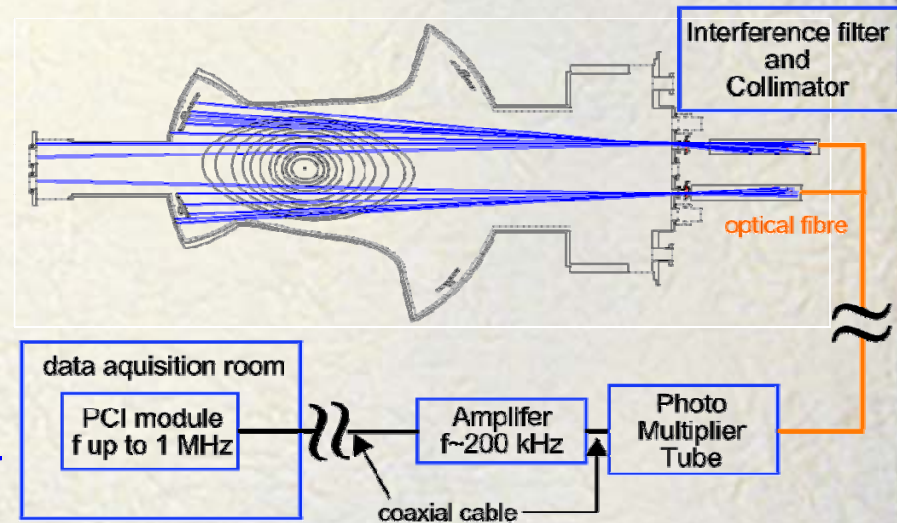
LHDと実験で主に使用した装置の配置図



# 高速応答H $\alpha$ 揺動観測器アレイ

- H $\alpha$ の信号は水素原子の電子による励起
- H $\alpha$ 揺動を観測することによってAE揺動の径方向変位による電子密度揺動の観測
  - ただし、電子密度勾配の存在が必要
- 全16視線
- 高時間応答~5  $\mu$ s
  - 観測されるTAEの周波数~100 kHz
- 多チャンネルによる空間分布導出可能性

高速応答H $\alpha$ 揺動観測器アレイ  
fast response H $\alpha$  Diagnostic system



$$I_{H\alpha} \approx n_n n_e \langle \sigma v \rangle_{ex}$$

TAEなどシアアルヴェン波  
は非圧縮変位

$$\tilde{I}_{H\alpha} / I_{H\alpha} \propto \tilde{n}_e / n_e = -\nabla \cdot \xi_r - \frac{\xi_r \cdot \nabla n_e}{n_e}$$

$n_n$ は中性粒子密度、 $n_e$ は電子密度、 $\xi$ は変位



# 実験結果

H $\alpha$  アレイによるTAEの径方向分布情報計測結果

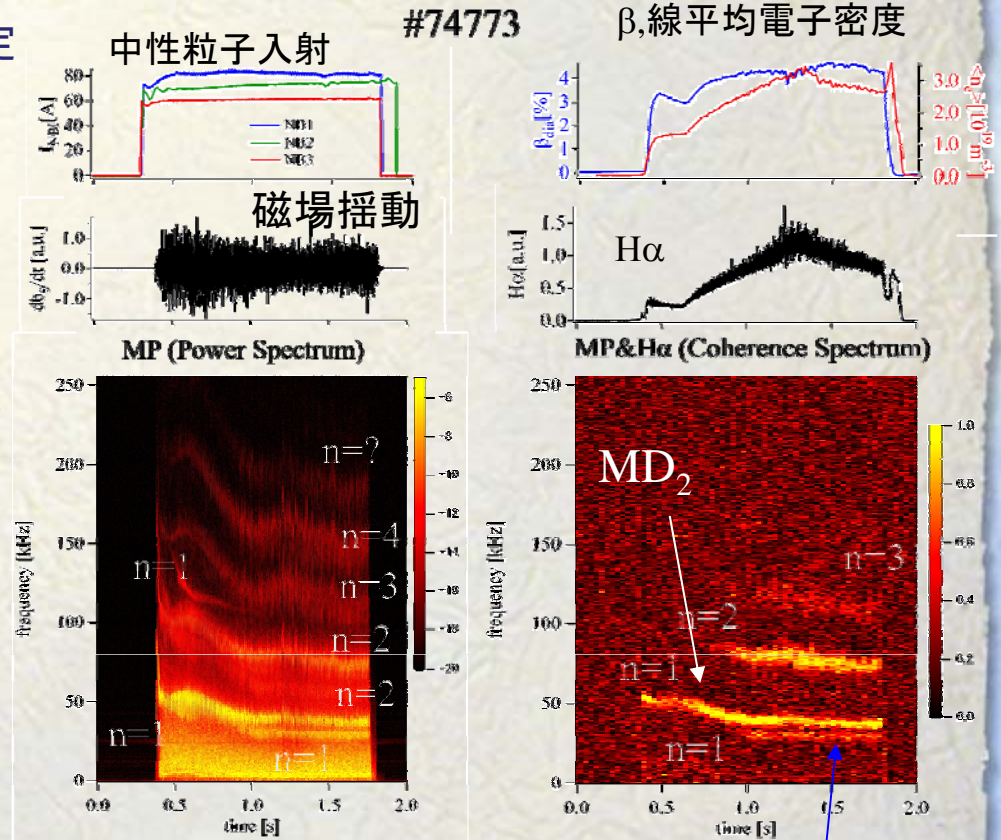
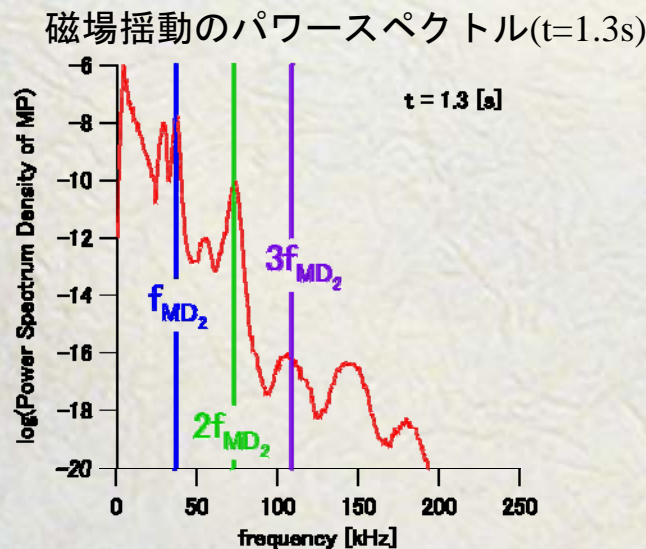


# 高速応答H $\alpha$ アレイによるTAEの空間分布情報測定

- H $\alpha$ を用いてTAE周波数帯に揺動が観測
- トロイダルモードは磁気プローブで同定

$$coherence \propto \frac{|\langle \tilde{n}_e \tilde{b}_\theta \rangle|}{|\tilde{n}_e| |\tilde{b}_\theta|}$$

- n=1の低周波側をMD<sub>1</sub>,高周波側をMD<sub>2</sub>
- n=2,3の揺動はn=1の揺動の高調モード
  - TAEギャップで励起されるものではない



Bt = 0.425 T, Rax=3.6 m

$V_b/V_A=3.47$

MD<sub>1</sub>



# コヒーレンスを用いたTAE揺動評価について

$$\tilde{I}_{H\alpha} = \int n_0 \widetilde{n_e} \langle \sigma v \rangle dl \cong n_0 \int \tilde{n}_e dl \quad (@\rho \leq 1) \quad \tilde{I}_{H\alpha} = \tilde{I}_{H\alpha AE} + \tilde{I}_{H\alpha ref} + \tilde{I}_{H\alpha SOL}$$

$$\langle \tilde{I}_{H\alpha} \tilde{b}_{\theta AE} \rangle = \langle \tilde{I}_{H\alpha AE} \tilde{b}_{\theta AE} \rangle + \langle \tilde{I}_{H\alpha ref} \tilde{b}_{\theta AE} \rangle + \langle \tilde{I}_{H\alpha SOL} \tilde{b}_{\theta AE} \rangle$$

AE成分

背景分:ランダムな反射  
(AE成分を含む可能性あり)

=0  
SOLにAE揺動はない

$$\gamma = \frac{\langle \tilde{I}_{H\alpha} \tilde{b}_{\theta} \rangle}{|\tilde{I}_{H\alpha}| |\tilde{b}_{\theta}|} \cong \frac{\langle n_0 \int \tilde{n}_e dl \tilde{b}_{\theta} \rangle}{|n_0 \int \tilde{n}_e dl| |\tilde{b}_{\theta}|} \cong \frac{\langle \int \tilde{n}_e dl \tilde{b}_{\theta} \rangle}{|\int \tilde{n}_e dl| |\tilde{b}_{\theta}|}$$

シアアルヴェン波は非圧縮性

$$\tilde{n}_{eAE} = -n_e \nabla \cdot \xi_{AE} - \xi_{AE} \cdot \nabla n_e$$

$$\Delta\gamma \cong \frac{\langle \int \tilde{n}_e dl \tilde{b}_{\theta AE} \rangle}{|\int \tilde{n}_e dl| |\tilde{b}_{\theta AE}|} - \gamma_{back} \cong \frac{\langle \int -\xi_{rAE} \cdot \nabla n_e dl \tilde{b}_{\theta AE} \rangle}{|\int \tilde{n}_{eAE} dl| |\tilde{b}_{\theta AE}|}$$

ただし

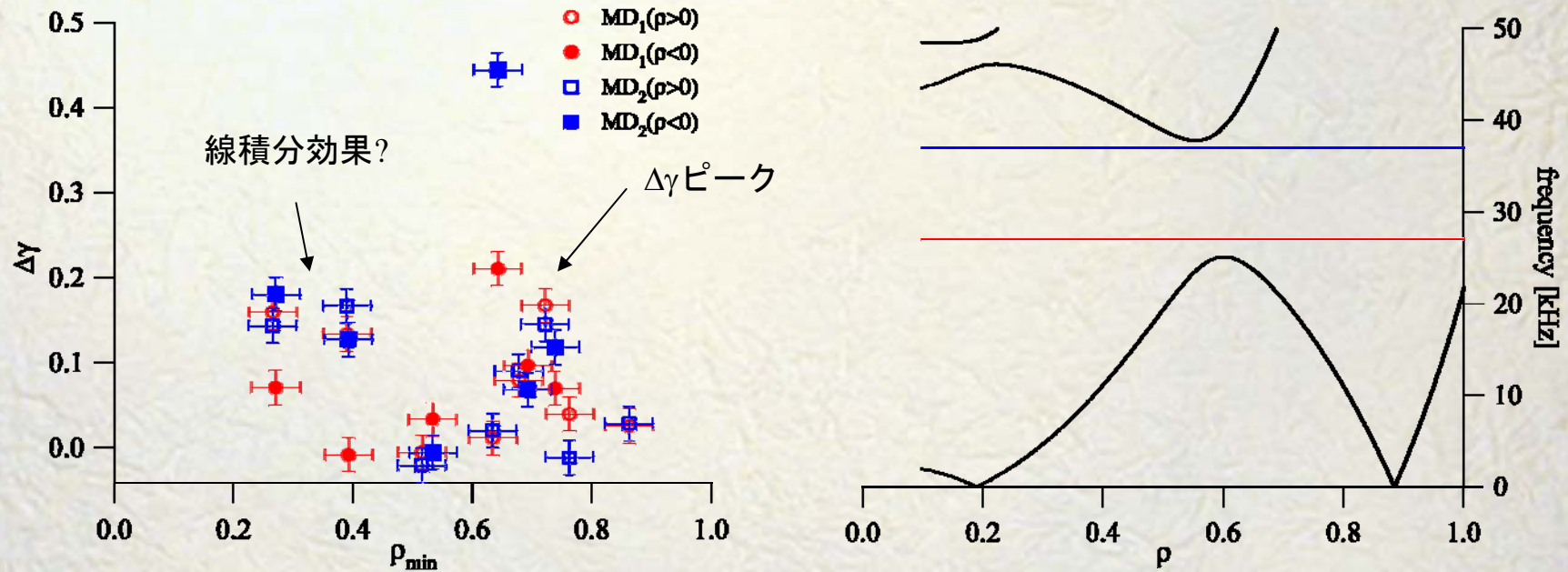
$$\tilde{I}_{H\alpha AE} \gg \tilde{I}_{H\alpha ref}, \tilde{I}_{H\alpha SOL}$$

$\xi_{AE}$ : AEによる変位,  $\tilde{I}_{H\alpha AE}$ : AEによるH $\alpha$ 揺動,  $\tilde{I}_{H\alpha ref}$ : 壁面からの反射H $\alpha$ の揺動,  
 $\tilde{I}_{H\alpha SOL}$ : ダイバータ板などSOLからのH $\alpha$ の揺動,  $\gamma$ : コヒーレンス,  $\tilde{b}_{\theta AE}$ : AEによる磁場揺動

$\Delta\gamma$ はAEによる変位 $\xi_r$ を $\nabla n_e$ の重みをつけて視線積分したものを表す。  
 ただし $I_{refH\alpha}$ によるコヒーレンスのオフセットの影響→実際の解析データから判定する必要あり。

# H $\alpha$ による観測と計算によるTAEの径方向分布との比較

## $\Delta\gamma$ とアルヴェンスpekトルの比較



- $\Delta\gamma$ を用いた空間分布導出
- 観測された密度を用いた3次元MHD平衡計算(VMEC)からアルヴェンスpekトルを計算
- $\Delta\gamma$ のピーク位置がTAEギャップの位置に相当
  - ずれ・中心部分での上昇は線積分効果かの検証
  - 理論により得られる固有関数を用いて計算したH $\alpha$ 揺動と一致するかの検証



## まとめと今後の課題

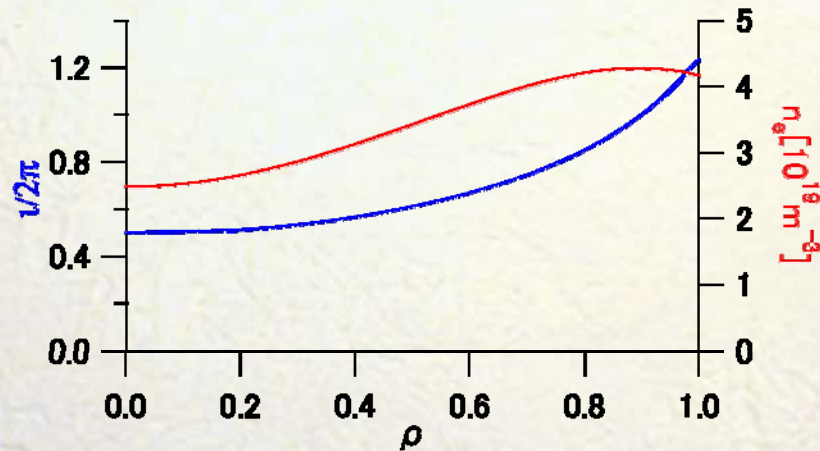
- 高速応答H $\alpha$ アレイによるTAE揺動の観測
  - 磁気プローブとのコヒーレンスをとることによって観測
- 高速応答H $\alpha$ アレイによるTAEの空間分布取得
  - $\Delta\gamma$ を用いることによってAEと関係のある揺動のみ抽出
  - $\Delta\gamma$ はTAEの径方向情報を与えている。
- 今後の課題
  - TAEギャップと $\Delta\gamma$ のピークのずれは線積分効果によるものかの検証
  - 固有関数と一致するか比較
  - マイクロ波反射計、軟X線/超軟X線揺動検出器アレイ、マルチチャンネルCO<sub>2</sub>レーザー反射計によるAEの空間情報との比較検討

# Appendix

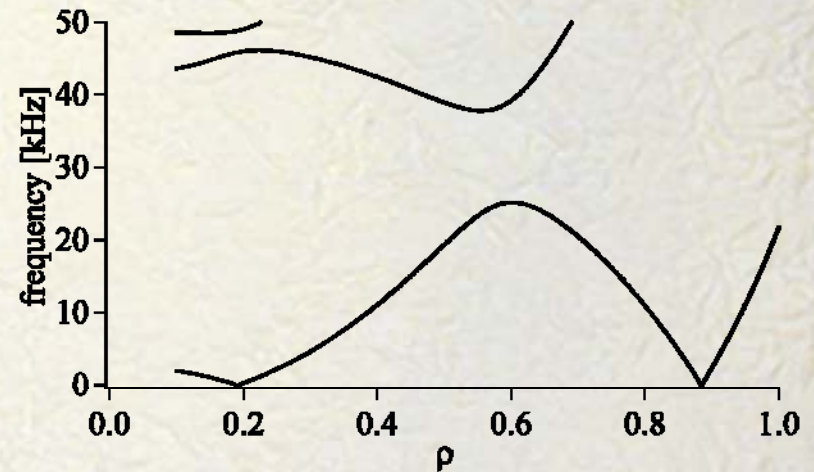




# アルヴェンスペクトル



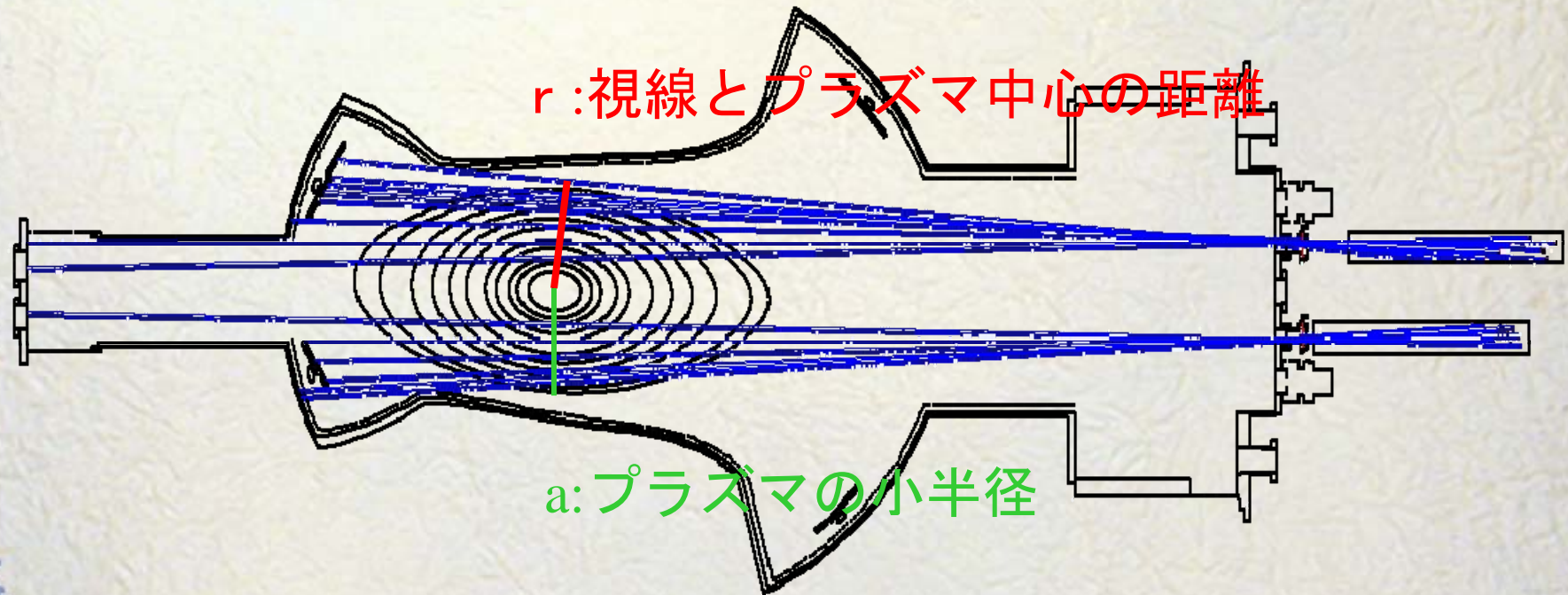
実験で得られた電子密度と計算によって得た安全係数



シアアルヴェンスペクトル( $n=1$ )

- 密度分布はトムソン散乱装置より導出
- 回転変換( $1/2\pi=1/q$ )は実験で得られた計測値を用い平衡コード(VMEC)によってプラズマの平衡を計算し得た。
- プラズマは純水素だと仮定

# H $\alpha$ の視線の $\rho$ について

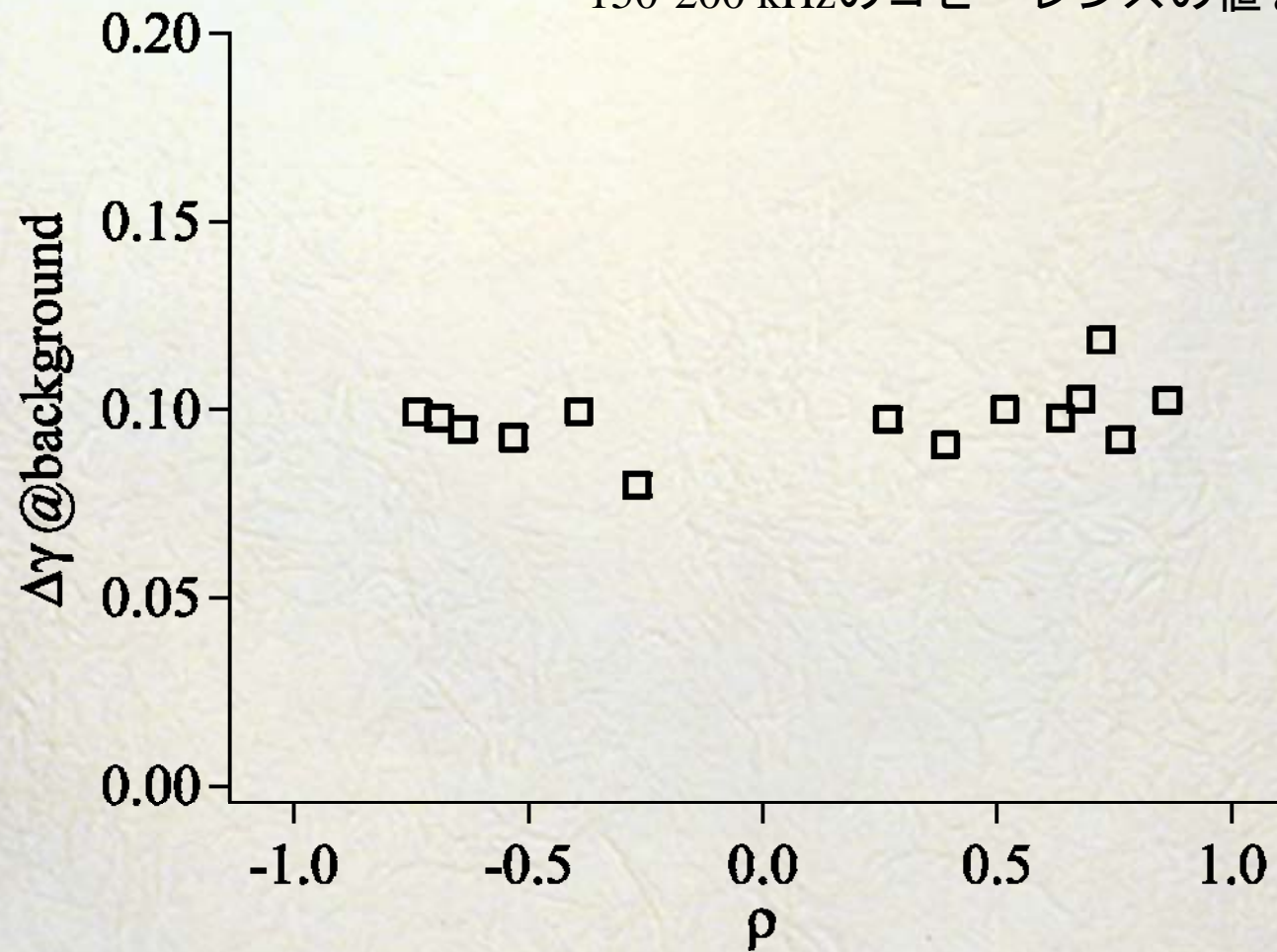


$$\rho = r/a$$

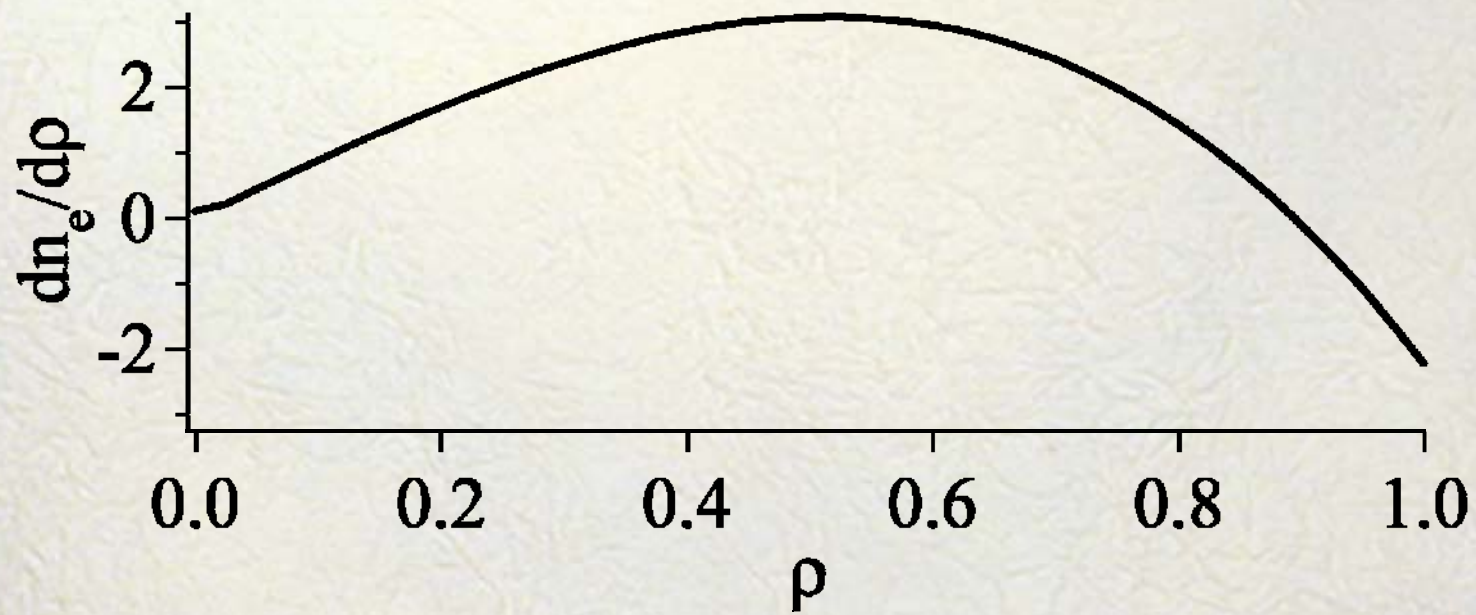


## $\Delta\gamma$ の背景の値

背景は揺動の観測されていない  
150-200 kHzのコヒーレンスの値を用いた。



# $\nabla n_e$ の径方向分布





# H $\alpha$ 放射強度 (校正済み)

