

第7回高エネルギー粒子 TCM 報告

福山 淳 (京大工 原子核)

7th IAEA Technical Committee Meeting on
Energetic Particles in Magnetic Confinement Systems
Göteborg, Sweden, 2001/10/08-11

- 50 件の発表 (41 Oral, 9 Poster) , 約 55 人の参加
- **Category:**
 - Collective mode (3)
 - Runaway electrons (1)
 - Diagnostics (1)
 - Ripple loss (1)
 - MHD mode (1)

Topics

- **Alfvén Cascades**

- 実験 (JET, JT-60)
- 高速イオンの存在によって現れる固有モード (Breizman, Borba)
- 高速イオンによって不安定化される固有モード (Fukuyama)

- **Spherical Tokamaks:**

- 非断熱性によって現れる高速イオンの輸送 (Yavorskij)
- 圧縮性アルヴェン固有モード (NSTX)

- **Fishbone induced ITB:**

- 高速イオンの再分配に伴うポロイダル回転シアの発生 (Pinches)

Alfvén Cascades

- **実験 : (JET, JT-60)**
 - 反転磁気シア配位 , $n = 1 \sim 6$, $f = 20 \sim 120$ kHz
 - $q_{\min}$ の減少とともに , 周波数上昇
- **Interpretation of Alfvén Cascades in Tokamaks: (Breizman)**
 - 磁気シアが 0 となる半径の近傍に局在した EPM
 - 高速イオンの存在によって出現するモード
- **Modelling of Alfvén waves in JET plasmas (Borba)**
 - **CASTOR-K code**: MHD + Gyrokinetic
 - TAE 周波数ギャップの下限よりもわずかに低い周波数をもつ EPM
 - $q_{\min}$ の減少に伴う TAE 周波数ギャップ下限周波数の低下
- **Analysis of Alfvén eigenmodes driven by energetic ions (Fukuyama)**
 - **TASK/WM code**: Maxwell Eq + Kinetic Dielectric
 - 高速イオンがなくても TAE 周波数ギャップ下限近傍のモードは存在
 - 高速イオンによって不安定化

Alfvén Cascades

- **実験 : (JET, JT-60)**
 - 反転磁気シア配位 , $n = 1 \sim 6$, $f = 20 \sim 120$ kHz
 - $q_{\min}$ の減少とともに , 周波数上昇
- **Interpretation of Alfvén Cascades in Tokamaks: (Breizman)**
 - 磁気シアが 0 となる半径の近傍に局在した EPM
 - 高速イオンの存在によって出現するモード
- **Modelling of Alfvén waves in JET plasmas (Borba)**
 - **CASTOR-K code**: MHD + Gyrokinetic
 - TAE 周波数ギャップの下限よりもわずかに低い周波数をもつ EPM
 - $q_{\min}$ の減少に伴う TAE 周波数ギャップ下限周波数の低下
- **Analysis of Alfvén eigenmodes driven by energetic ions (Fukuyama)**
 - **TASK/WM code**: Maxwell Eq + Kinetic Dielectric
 - 高速イオンがなくても TAE 周波数ギャップ下限近傍のモードは存在
 - 高速イオンによって不安定化

Wave Equation

- **Maxwell's equation for stationary wave electric field E**

(angular frequency ω , light velocity c)

$$\nabla \times \nabla \times E = \frac{\omega^2}{c^2} \overset{\leftrightarrow}{\epsilon} \cdot E + i \omega \mu_0 j_{\text{ext}}$$

- $\overset{\leftrightarrow}{\epsilon}$: Dielectric Tensor

[Effects of finite temperature (Cyclotron damping, Landau damping)]

- j_{ext} : Antenna Current

- **Wave equation in non-orthogonal coordinates (radial components)**

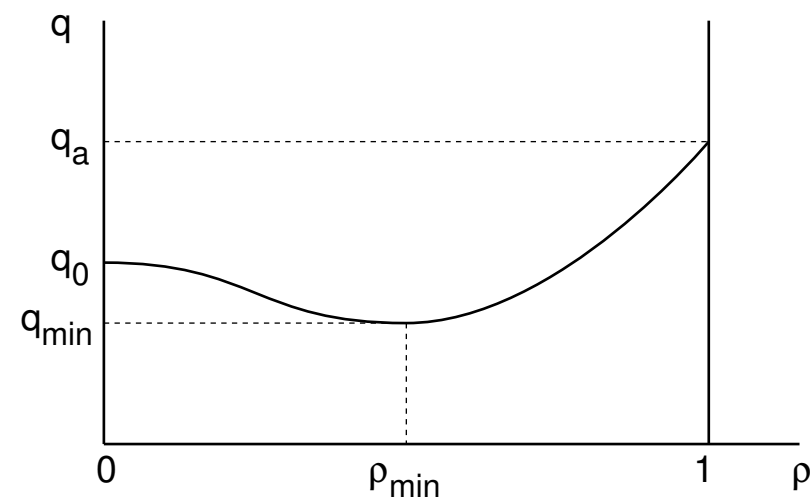
$$\begin{aligned} (\nabla \times \nabla \times E)^1 = & \frac{1}{J} \left[\frac{\partial}{\partial x^2} \left\{ \frac{g_{31}}{J} \left(\frac{\partial E_3}{\partial x^2} - \frac{\partial E_2}{\partial x^3} \right) + \frac{g_{32}}{J} \left(\frac{\partial E_1}{\partial x^3} - \frac{\partial E_3}{\partial x^1} \right) + \frac{g_{33}}{J} \left(\frac{\partial E_2}{\partial x^1} - \frac{\partial E_1}{\partial x^2} \right) \right\} \right. \\ & \left. - \frac{\partial}{\partial x^3} \left\{ \frac{g_{21}}{J} \left(\frac{\partial E_3}{\partial x^2} - \frac{\partial E_2}{\partial x^3} \right) + \frac{g_{22}}{J} \left(\frac{\partial E_1}{\partial x^3} - \frac{\partial E_3}{\partial x^1} \right) + \frac{g_{23}}{J} \left(\frac{\partial E_2}{\partial x^1} - \frac{\partial E_1}{\partial x^2} \right) \right\} \right] \end{aligned}$$

- $(x^1, x^2, x^3) = (\psi, \theta, \varphi)$

- Similar expression for poloidal and toroidal components

Analysis of TAE in Reversed Shear Configuration

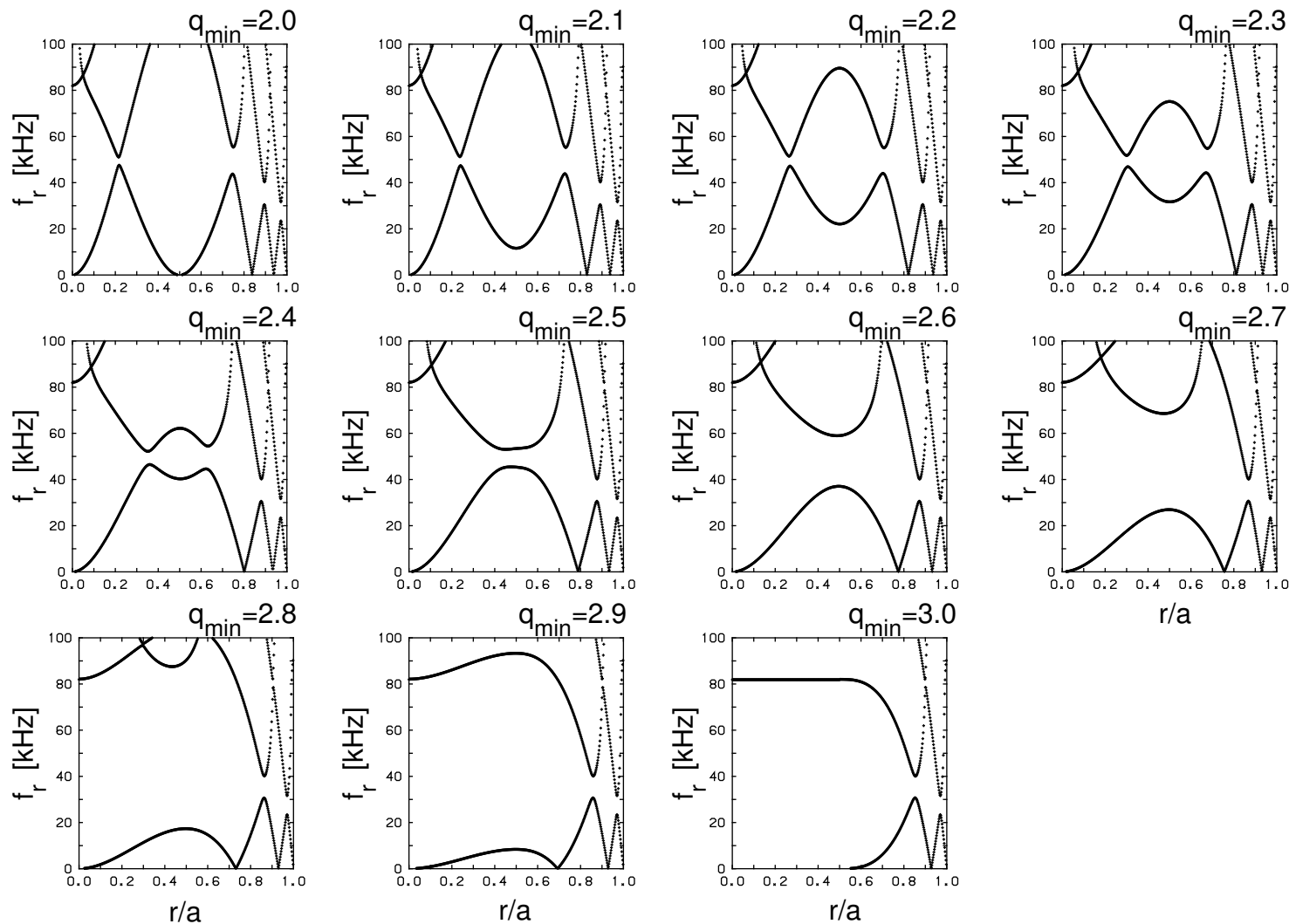
Assumed q profile



Plasma Parameters

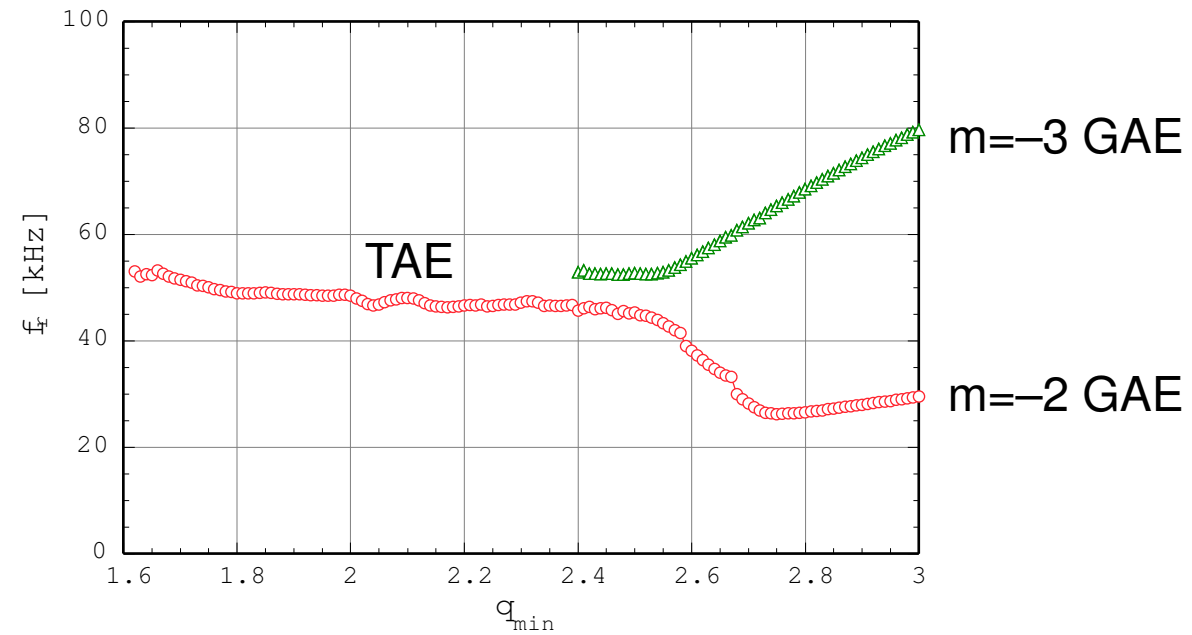
Major Radius	R_0	3 m
Minor Radius	a	1 m
Wall Radius	b	1.2 m
Toroidal Magnetic Field	B_0	3 T
Center Electron Density	$n_e(0)$	10^{20} m^{-3}
Edge Electron Density	$n_e(a)$	10^{20} m^{-3}
Central Temperature	$T(0)$	3 keV
Edge Temperature	$T(a)$	3 keV
Ion Species		Deuterium
Central Safety Factor	$q(0)$	3
Edge Safety Factor	$q(a)$	5
Toroidal Mode Number	n	1
q -Minimum Radius	$\rho_{\min}$	0.5

$q_{\min}$ Dependence of Alfvén Frequency Profile

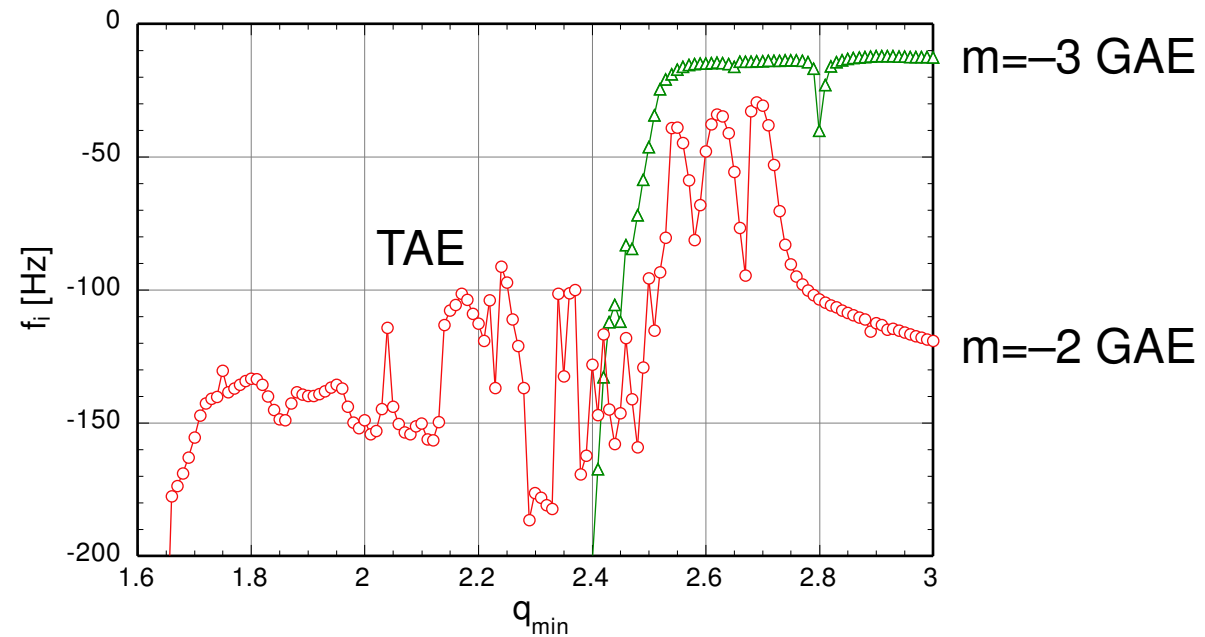


$q_{\min}$ Dependence of Eigen Frequency and Damping Rate

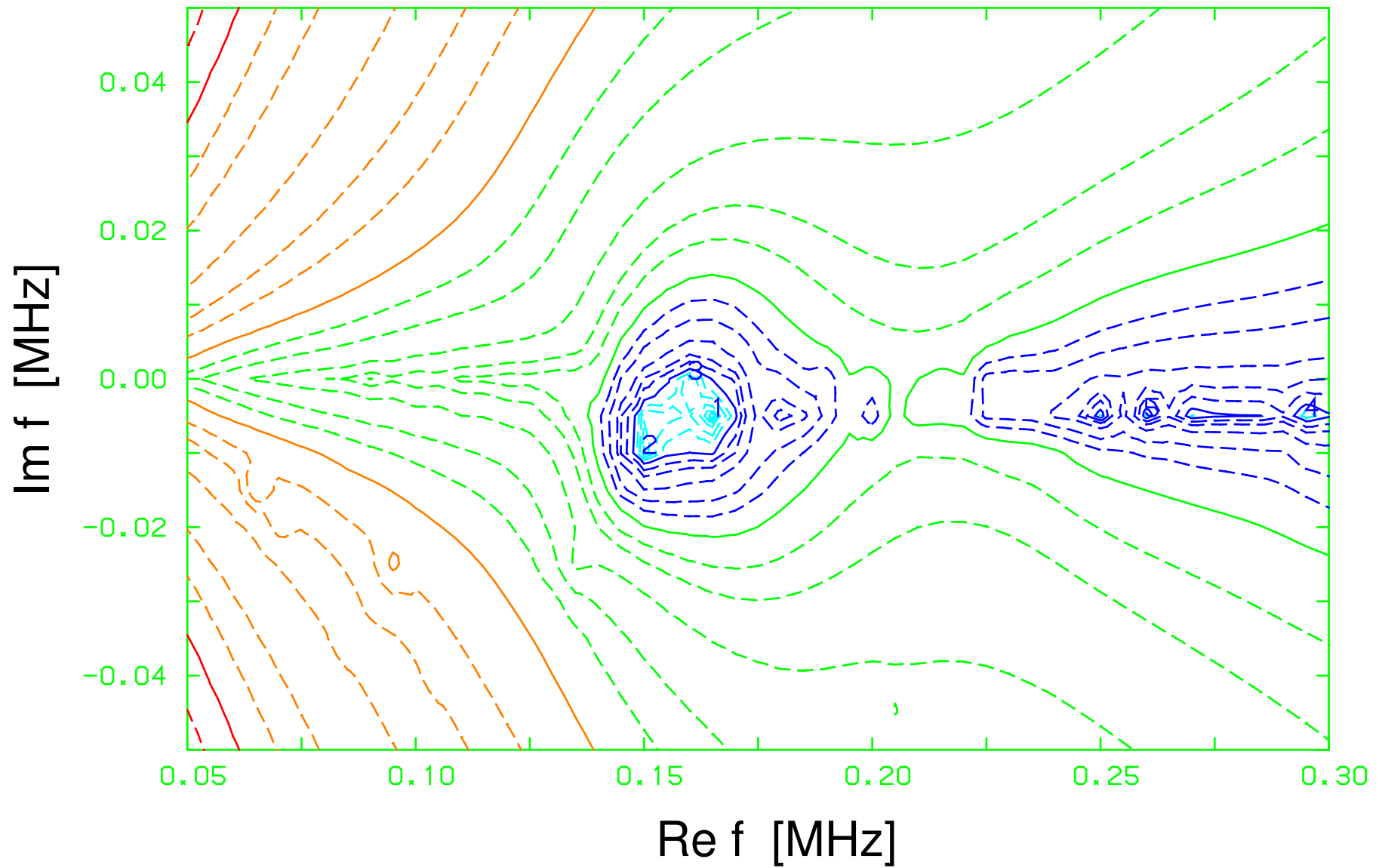
Eigen Frequency



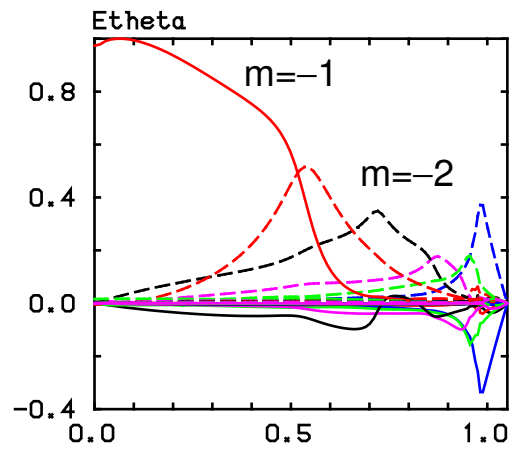
-Damping Rate



Complex Eigen Frequency of Alfvén Eigenmode

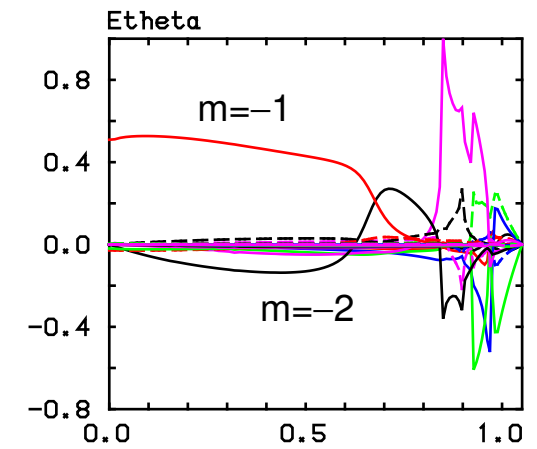


Radial Mode Structure of Alfvén Eigenmode ($n = 1$)



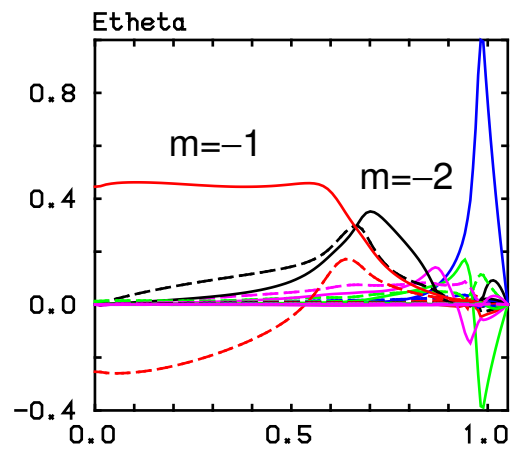
$$f_r = 97.0 \text{ kHz}$$

$$f_i = -23.6 \text{ kHz}$$



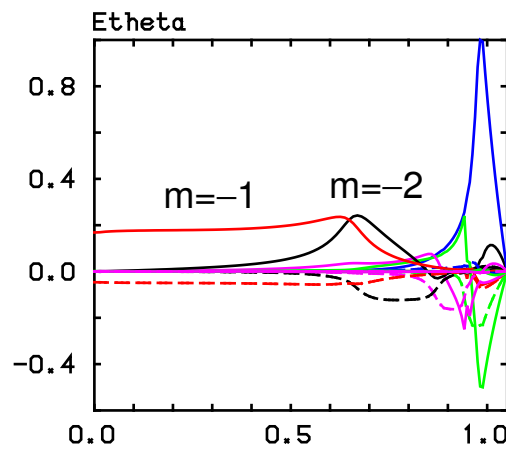
$$f_r = 199.4 \text{ kHz}$$

$$f_i = -3.37 \text{ kHz}$$



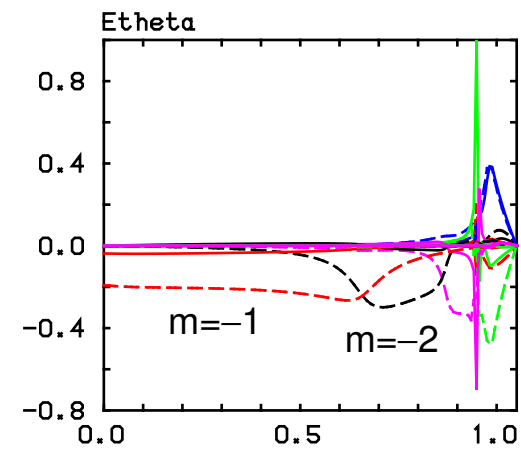
$$f_r = 136.4 \text{ kHz}$$

$$f_i = -24.1 \text{ kHz}$$



$$f_r = 149.8 \text{ kHz}$$

$$f_i = -8.12 \text{ kHz}$$

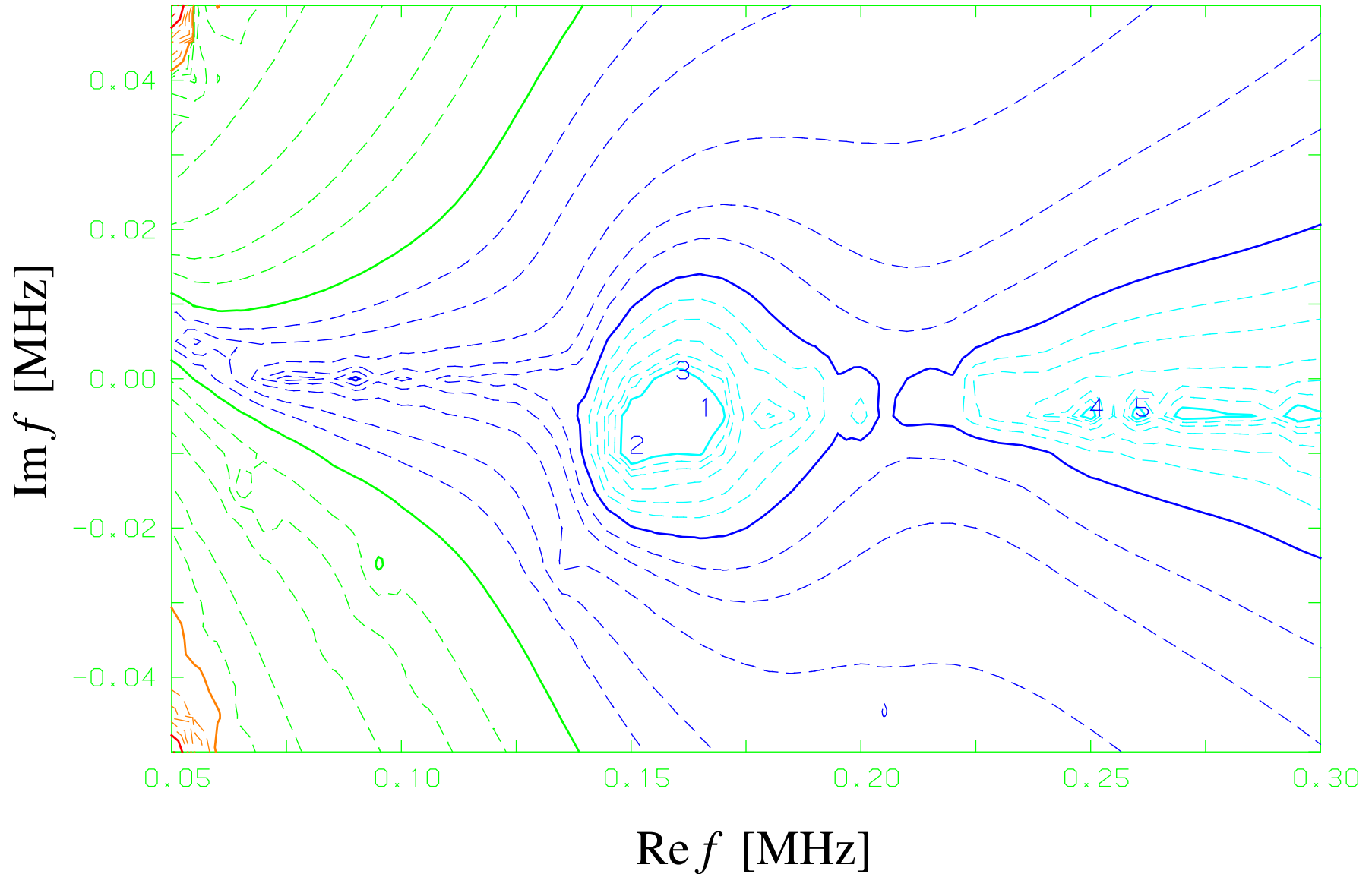


$$f_r = 164.3 \text{ kHz}$$

$$f_i = -5.08 \text{ kHz}$$

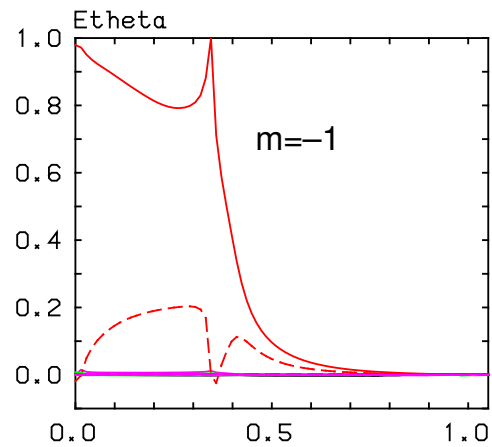
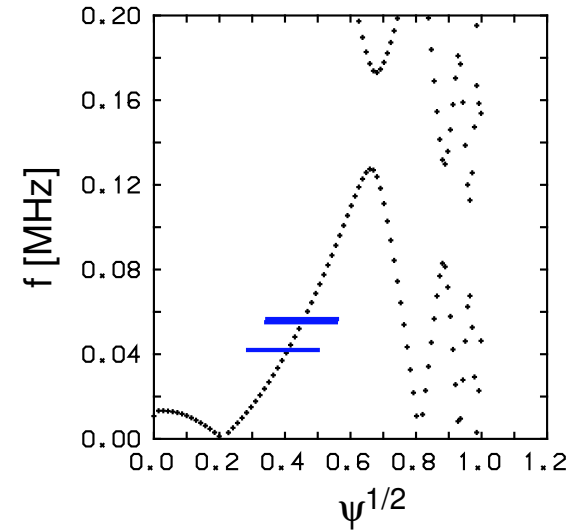
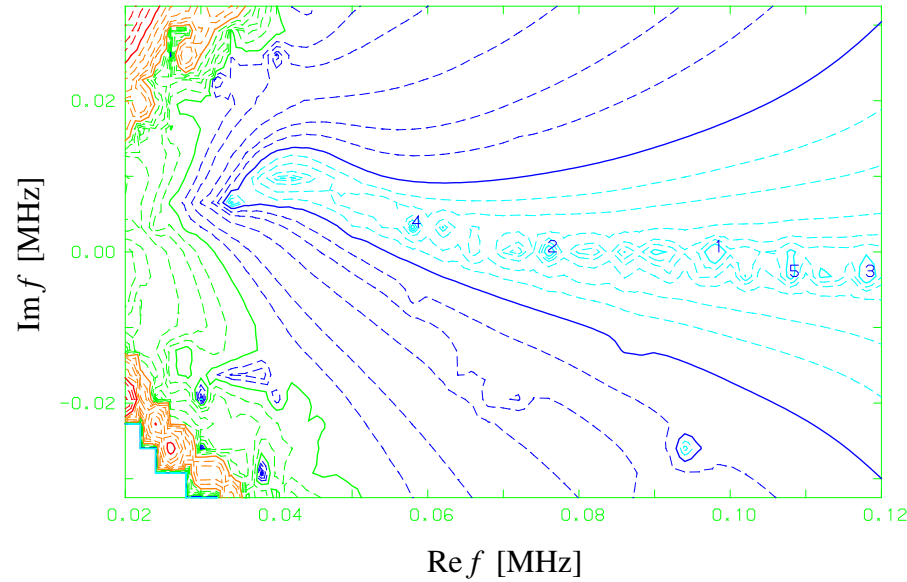
Mode Structure with Energetic Particle

- $n_{F0} = 2 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$, $T_B = 500 \text{ keV}$, $L_{nB} = 0.5 \text{ m}$



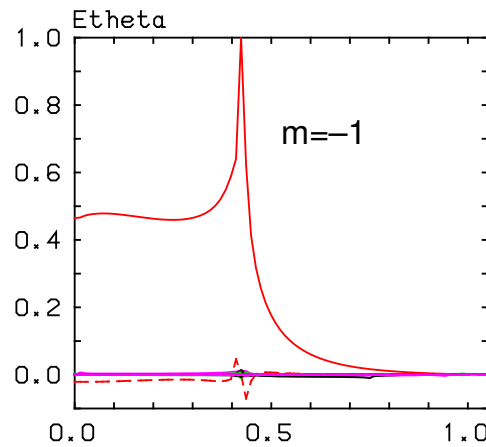
Modes and Eigenfunctions Driven by Energetic Ions

- $n_{F0} = 2 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$, $T_F = 500 \text{ keV}$, $L_{nF} = 0.5 \text{ m}$, $n = 1$



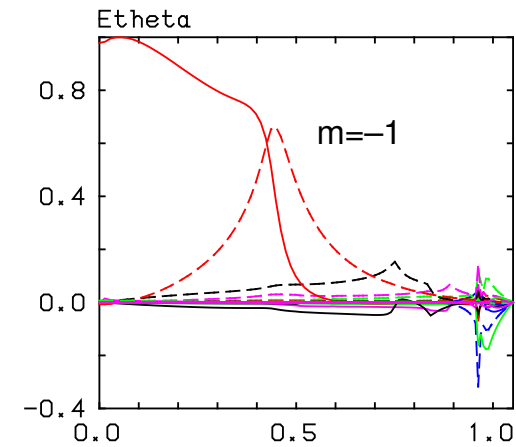
$$f_r = 41.8 \text{ kHz}$$

$$f_i = 8.1 \text{ kHz}$$



$$f_r = 57.7 \text{ kHz}$$

$$f_i = 3.6 \text{ kHz}$$

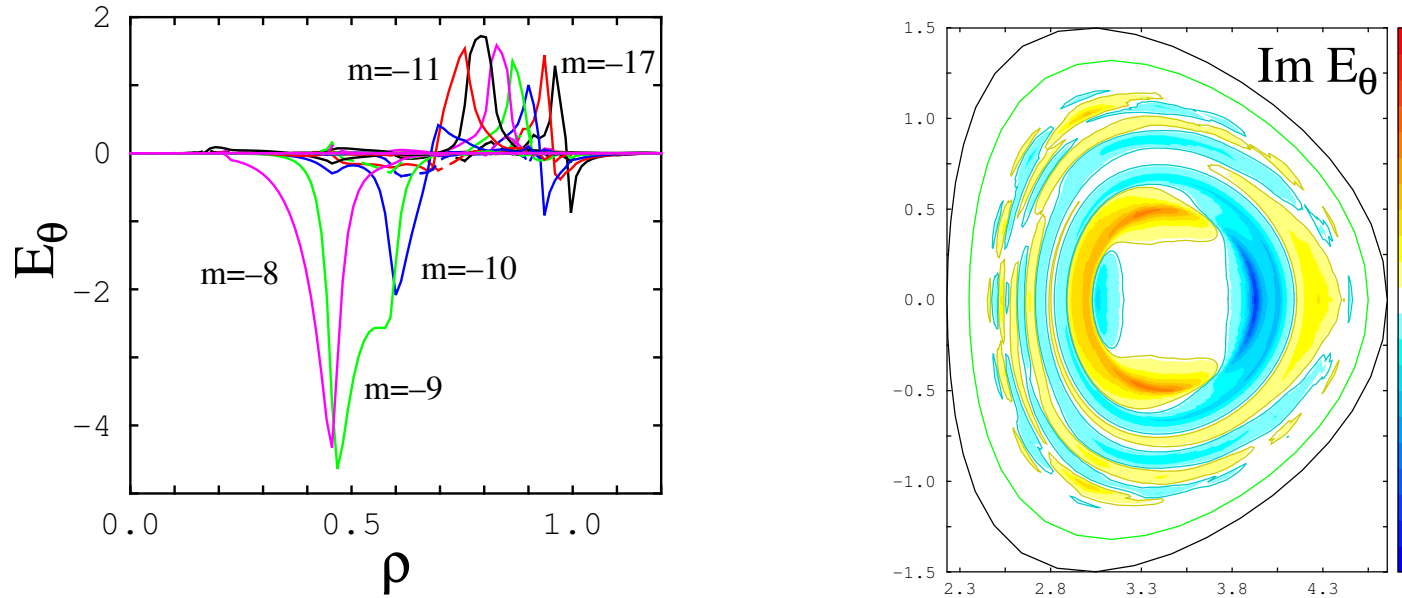


$$f_r = 58.0 \text{ kHz}$$

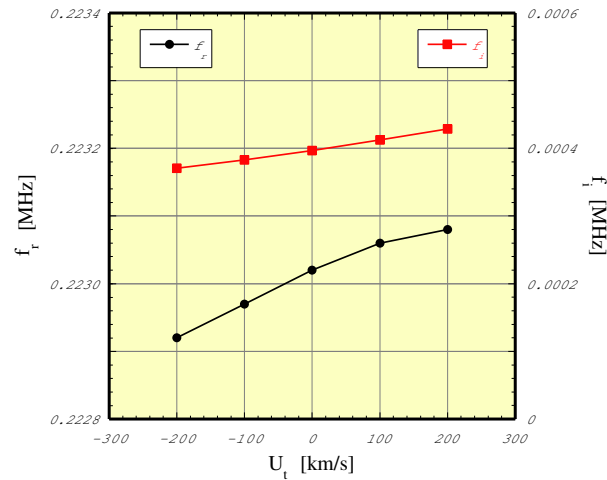
$$f_i = -6.0 \text{ kHz}$$

Effect of Rotation on $n = 7$ mode

- $n = 7, m = -17 \sim -3, f = 223$ kHz: Eigen function agree with Nova-K

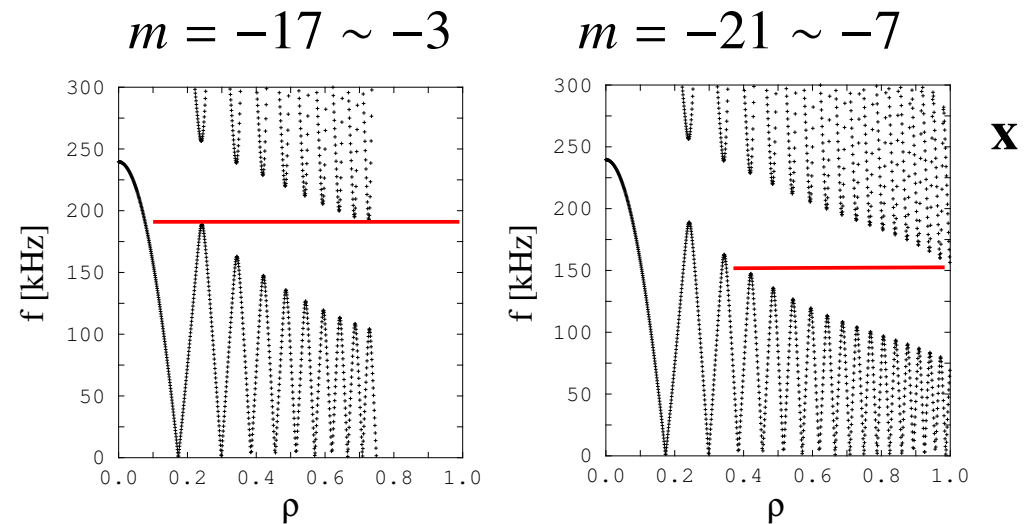


- Rotation velocity dependence: Stabilizing for co rotation with exp.

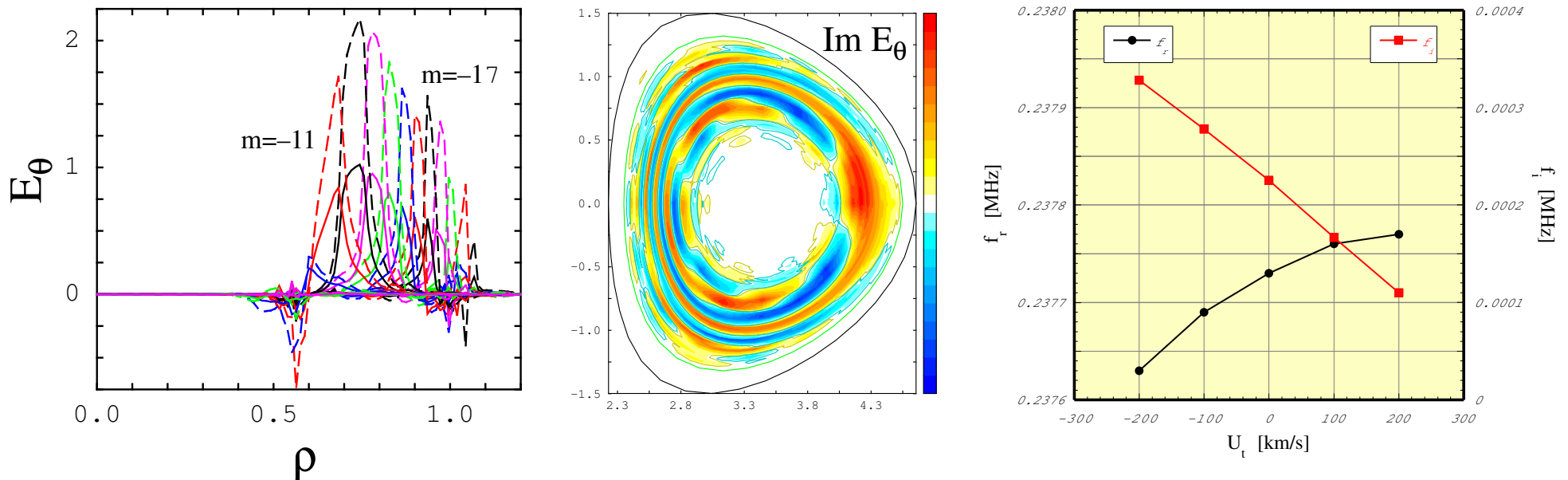


Influence of poloidal mode range : $n = 7$ mode

- Structure of Alfvén Continuum:



- $n = 7, m = -21 \sim -7, f = 238$ kHz : Destabilizing for co-rotation



球状トカマクにおける高速イオン

- **Non-adiabaticity induced fast ion transport in ST (Yavorskij)**

- 高速イオン運動の非断熱性
- ST 中の高速イオン : $\rho/L_B \gtrsim 0.1$
- 捕捉運動とサイクロトロン運動の共鳴 : $\omega_c = \ell\omega_B$
- 磁気モーメント μ の不変性が破れ , 粒子運動が統計的

- **Compressional Alfvén eigenmode instability in NSTX (Gorlenkov/Cheng)**

- 圧縮性アルヴェン固有モード
- NSTX において NBI 入射時に観測される複数のモード :
 $0.8 \lesssim f \lesssim 2.5 \text{ MHz}, f \propto n^{-1}$
- トーラス外側に局在する圧縮性アルヴェン固有モード

$$\omega^2 \simeq \frac{m^2 v_A^2}{\kappa^2 r^2} \left(1 + \frac{k_{\parallel}^2 \kappa^2 r^2}{m^2} \right)$$

- 高速イオンによる励起と電子による吸収のバランス
- 異なる周波数をもつ複数のモードが存在することによる統計加熱

フィッシュボーン不安定性と内部輸送障壁形成

- **Fishbone generation of sheared flows and the creation of transport barriers (Pinches)**
- **ASDEX-U における内部輸送障壁：**
 - フィッシュボーン不安定性に引き続いて形成
 - フィッシュボーン不安定性に伴う高速イオンの再分配
 - 径方向電界の発生： $E \times B$ 回転速度シア
 - 乱流抑制による内部輸送障壁形成
- **必要 β_{fast} 値の評価：**

$$f \sim 20 \text{ kHz}, \quad \tau_{\text{repetition}} \sim 1 \text{ ms} \quad \longrightarrow \quad \beta_{\text{fast}} \sim 0.36\%$$