

TASK コードによる トカマクの統合輸送シミュレーション

京大工：福山 淳，本多 充，仁科周一朗

内 容

- 目 的
- TASK コードシステム
- 電子サイクロトロン波電流駆動解析
- アルヴェン固有モード解析
- まとめ

核燃焼プラズマの解析

- **実験**

- 測定技術の進歩：高い空間分解能，高い時間分解能．プラズマ中電磁界測定
- 大型プラズマ実験：経費の増大，ショット数の減少
- ITER 核燃焼プラズマ：約10年後

- **理論**

- 非線形現象・乱流現象の解明

- **シミュレーション**

- 計算資源の指数的增长，計算手法の発展，ネットワークの高速・大容量化
- 個々のプラズマ現象：さまざまなコードによる詳細な解析
- プラズマ全体：単一コードによる記述は当面困難
- **核燃焼プラズマ全体の時間発展シミュレーション：必要性，現実性**

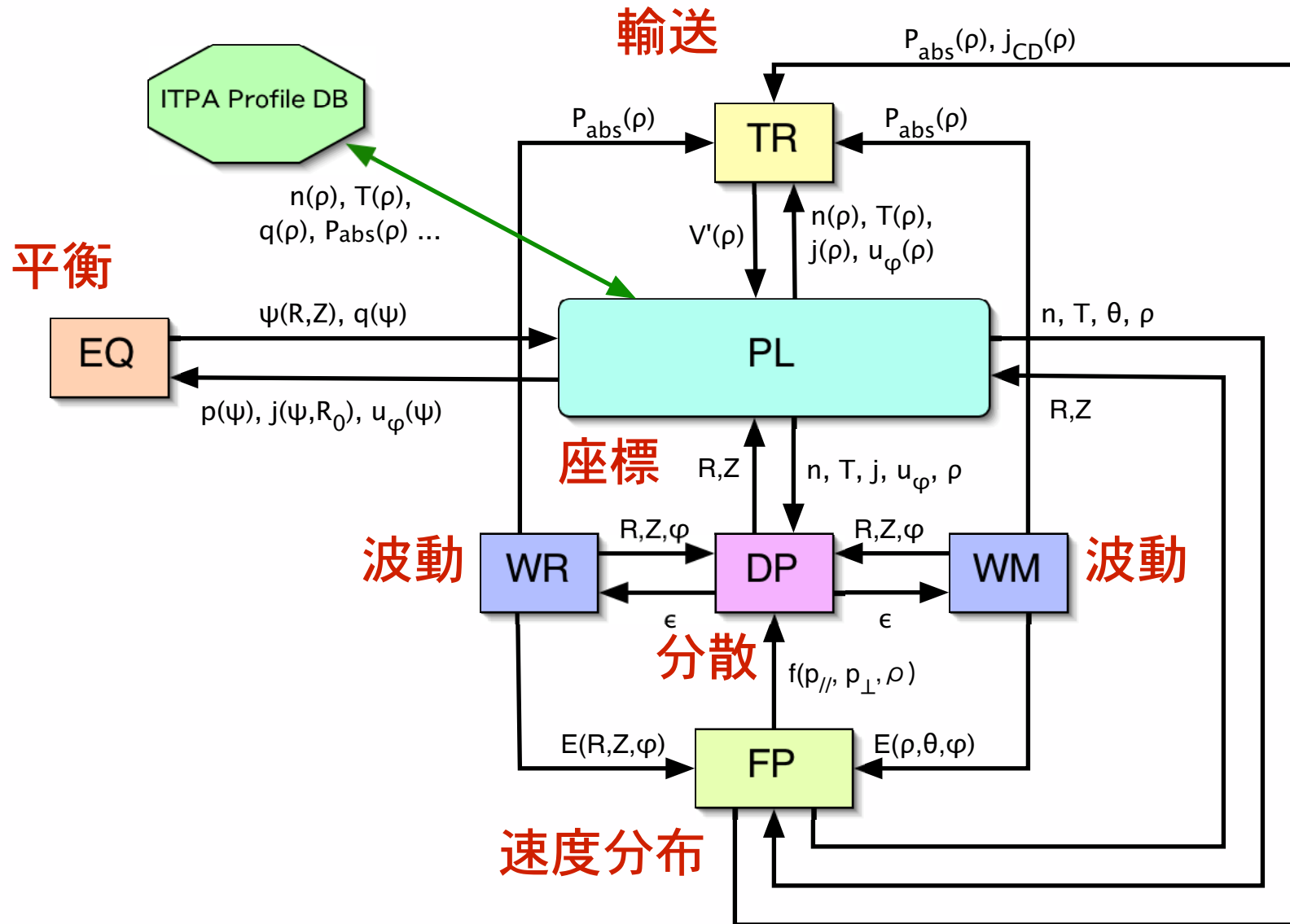
TASK コードシステム

- Transport Analyzing System for tokamak
- モジュール

TASK/EQ	2次元平衡解析	固定境界，トロイダル回転効果
PL	分布データ変換	磁気面座標 ↔ 実座標，分布データベース
TR	1次元輸送解析	拡散型輸送方程式，輸送モデル
WR	幾何光学的波動解析	EC, LH: 光線追跡法，ビーム追跡法
WM	波動光学的波動解析	IC, AW: アンテナ励起，固有モード
FP	速度分布解析	相対論的，軌道平均，3次元
DP	波動分散解析	局所誘電率テンソル，任意速度分布

- 開発中
 - 自由境界平衡解析
 - 流体型輸送解析
 - 2次元輸送解析
 - 運動論的線形安定性解析

TASK モジュール間のデータ交換



TASK コードの特色

- トカマクの時間発展シミュレーション
 - モジュール構造の統合シミュレーション
 - 様々な加熱・電流駆動機構
 - 高い移植性
 - ヘリカル系への拡張
 - MPI ライブラリを用いた並列分散処理
- 現状
 - 平衡・輸送解析
 - 平衡・波動伝播解析
 - 全モジュールの結合：進行中.
 - 実験データとの比較：進行中

波動分散解析：TASK/DP

- 誘電率テンソルのさまざまなモデル: (利用可能, 開発中)
 - 抵抗性 MHD モデル
 - 衝突を含めた冷たいプラズマモデル
 - 衝突を含めた暖かいプラズマモデル
 - 運動論的プラズマモデル (Maxwellian, 非相対論的)
 - 運動論的プラズマモデル (Maxwellian, 相対論的)
 - 運動論的プラズマモデル (任意速度分布, 非相対論的)
 - 運動論的プラズマモデル (任意速度分布, 相対論的)
 - ジャイロ運動論的プラズマモデル (Maxwellian, 非相対論)
 - ジャイロ運動論的プラズマモデル (任意速度分布, 非相対論的)
 - ジャイロ運動論的プラズマモデル (任意速度分布, 相対論的)
- 入力パラメータ：
 - $n, u_{\parallel}, T, B, \nabla_{\perp} p, \nabla_{\perp} B$
 - $n, u_{\parallel}, T, B, \nabla_{\perp} n, \nabla_{\perp} T, \nabla_{\perp} B, E_{\perp}$

幾何光学的波動伝播解析：TASK/WR

● 光線追跡法：

- 媒質の不均一の特性長 L に比べて波長 λ が十分小さい場合
- 伝播方向に対して垂直な方向の広がり d が十分大きい平面波

● ビーム追跡法

- 回折効果を含めて有限の太さをもつ波動ビームの伝搬を解析
- 展開パラメータ $\delta = \sqrt{\lambda/L} \ll 1$
- **ビーム形状**：ガウシアンビームの場合（エルミート多項式 H_n ）

$$E(\mathbf{r}) = \text{Re} \left[C(\delta^2 \mathbf{r}) e(\delta^2 \mathbf{r}) e^{i s(\mathbf{r}) - \phi(\mathbf{r})} \right]$$

— 振幅： C ，偏波ベクトル： e ，位相： $s(\mathbf{r}) + i\phi(\mathbf{r})$

$$s(\mathbf{r}) = s_0(\tau) + k_\alpha^0(\tau)[r^\alpha - r_0^\alpha(\tau)] + \frac{1}{2}s_{\alpha\beta}[r^\alpha - r_0^\alpha(\tau)][r^\beta - r_0^\beta(\tau)]$$

$$\phi(\tau) = \frac{1}{2}\phi_{\alpha\beta}[r^\alpha - r_0^\alpha(\tau)][r^\beta - r_0^\beta(\tau)]$$

— r_0 はビーム軸の位置， k^0 は軸上での波数

— ビームの等位相面の**曲率半径**： $R_\alpha = 1/\lambda s_{\alpha\alpha}$ ，**ビーム径**： $d_\alpha = \sqrt{2/\phi_{\alpha\alpha}}$

ビーム伝搬方程式

- ビーム電界をマクスウェル方程式に代入し，解をもつ条件より

$$\frac{dr_0^\alpha}{d\tau} = \frac{\partial K}{\partial k_\alpha}$$

$$\frac{dk_\alpha^0}{d\tau} = -\frac{\partial K}{\partial r^\alpha}$$

$$\frac{ds_{\alpha\beta}}{d\tau} = -\frac{\partial^2 K}{\partial r^\alpha \partial r^\beta} - \frac{\partial^2 K}{\partial r^\beta \partial k_\gamma} s_{\alpha\gamma} - \frac{\partial^2 K}{\partial r^\alpha \partial k_\gamma} s_{\beta\gamma} - \frac{\partial^2 K}{\partial k_\gamma \partial k_\delta} s_{\alpha\gamma} s_{\beta\delta} + \frac{\partial^2 K}{\partial k_\gamma \partial k_\delta} \phi_{\alpha\gamma} \phi_{\beta\delta}$$

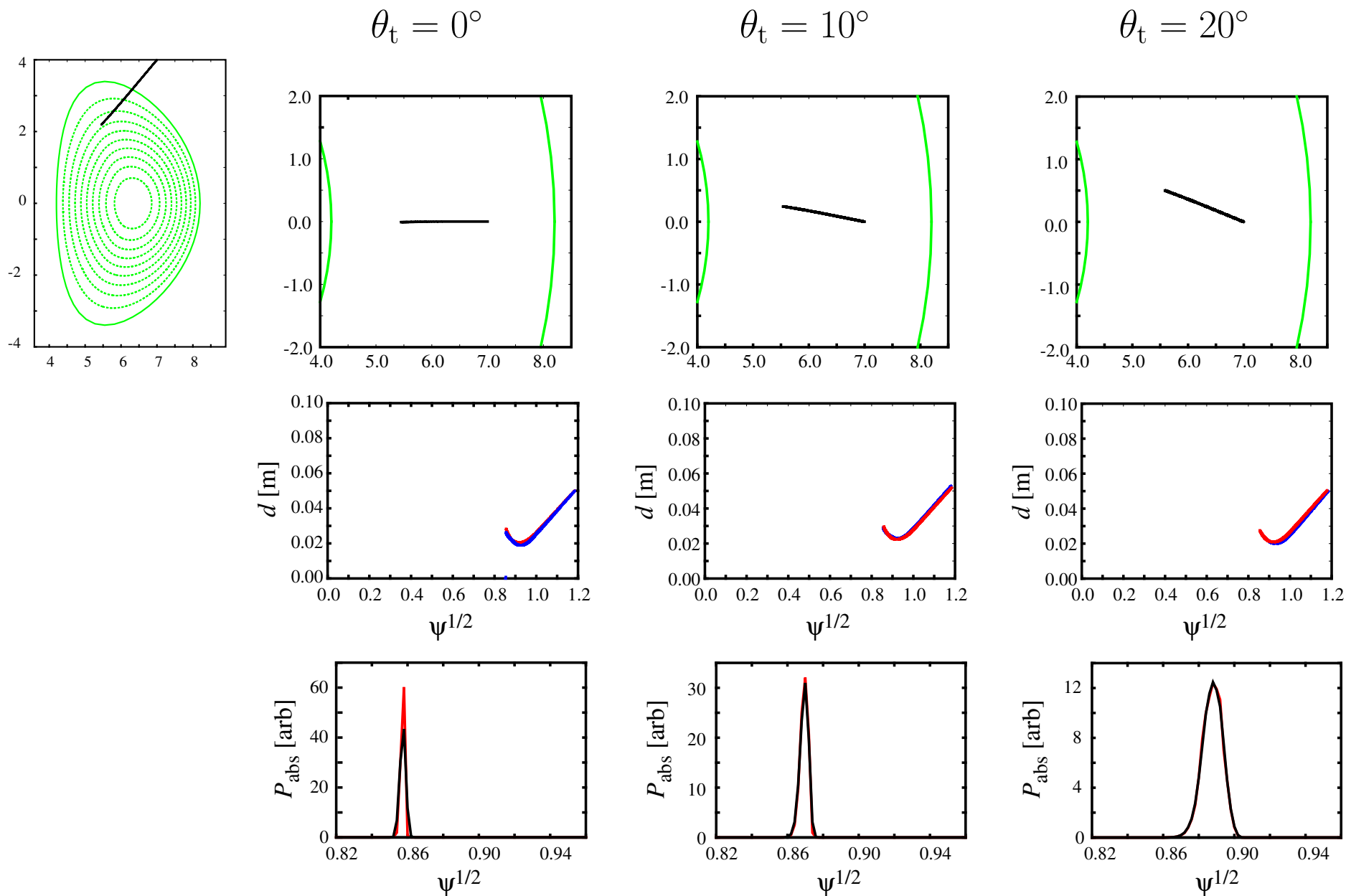
$$\frac{d\phi_{\alpha\beta}}{d\tau} = -\left(\frac{\partial^2 K}{\partial r^\alpha \partial k_\gamma} + \frac{\partial^2 K}{\partial k_\gamma \partial k_\delta} s_{\alpha\delta}\right) \phi_{\beta\gamma} - \left(\frac{\partial^2 K}{\partial r^\beta \partial k_\gamma} + \frac{\partial^2 K}{\partial k_\gamma \partial k_\delta} s_{\beta\delta}\right) \phi_{\alpha\gamma}$$

- これらの常微分方程式(18個)を積分することによって，ビーム軸の軌跡，ビーム軸上での波数，等位相面の曲率，ビームの幅を計算することができる．
- 波の振幅係数 C_{mn} に対する方程式

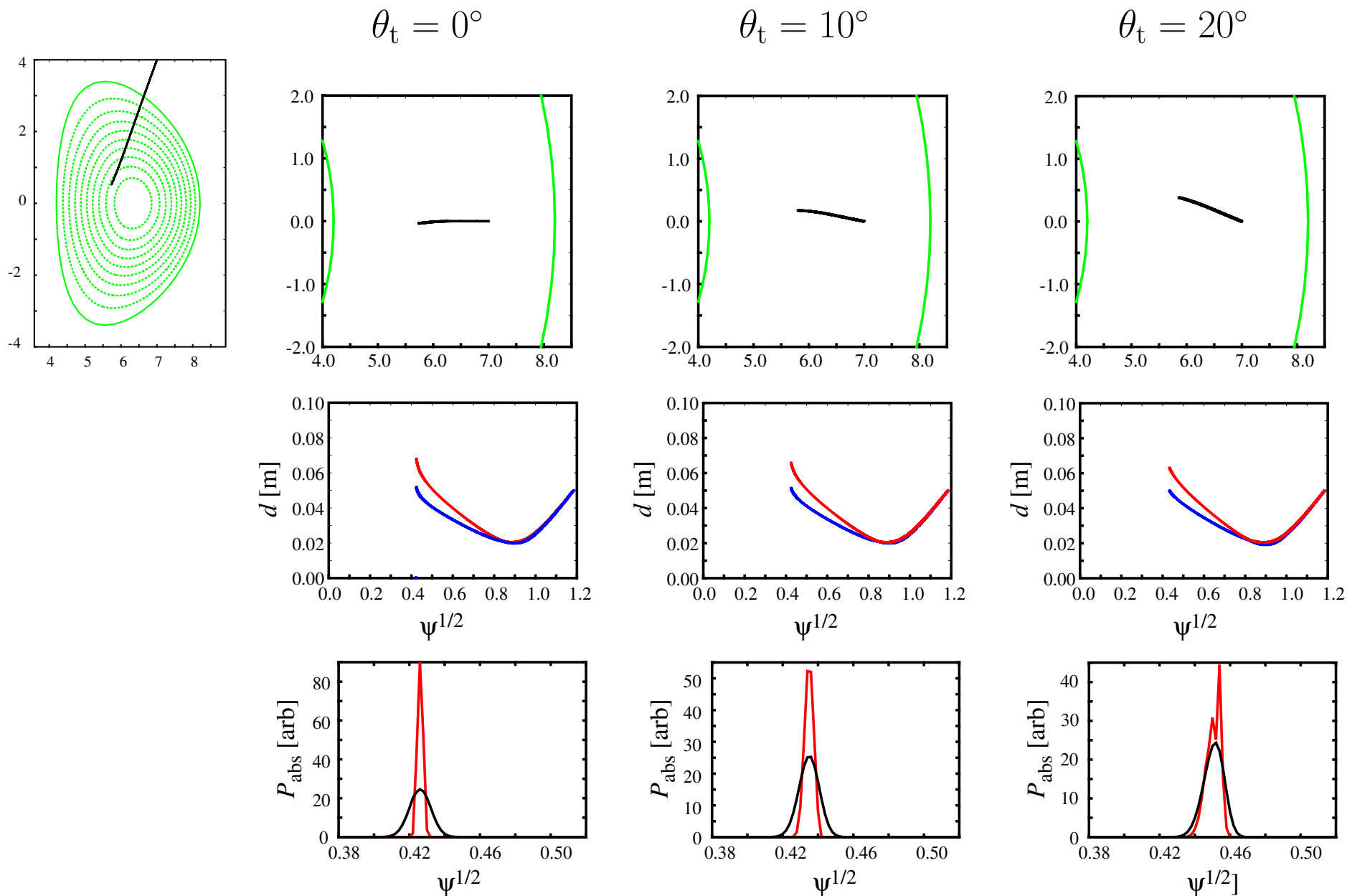
$$\nabla \cdot (\mathbf{v}_{g0} |C_{mn}|^2) = -2(\gamma |C_{mn}|^2)$$

\mathbf{v}_{g0} は群速度， $\gamma \equiv (\mathbf{e}^* \cdot \overleftrightarrow{\epsilon}_A \cdot \mathbf{e}) / (\partial K / \partial \omega)$ は波の吸収率

Beam Tracing in ITER-FEAT Plasma: $R_c = 2$ m, $d_{\text{ini}} = 0.05$ m



Beam Tracing in ITER-FEAT Plasma: $R_c = 2$ m, $d_{ini} = 0.05$ m



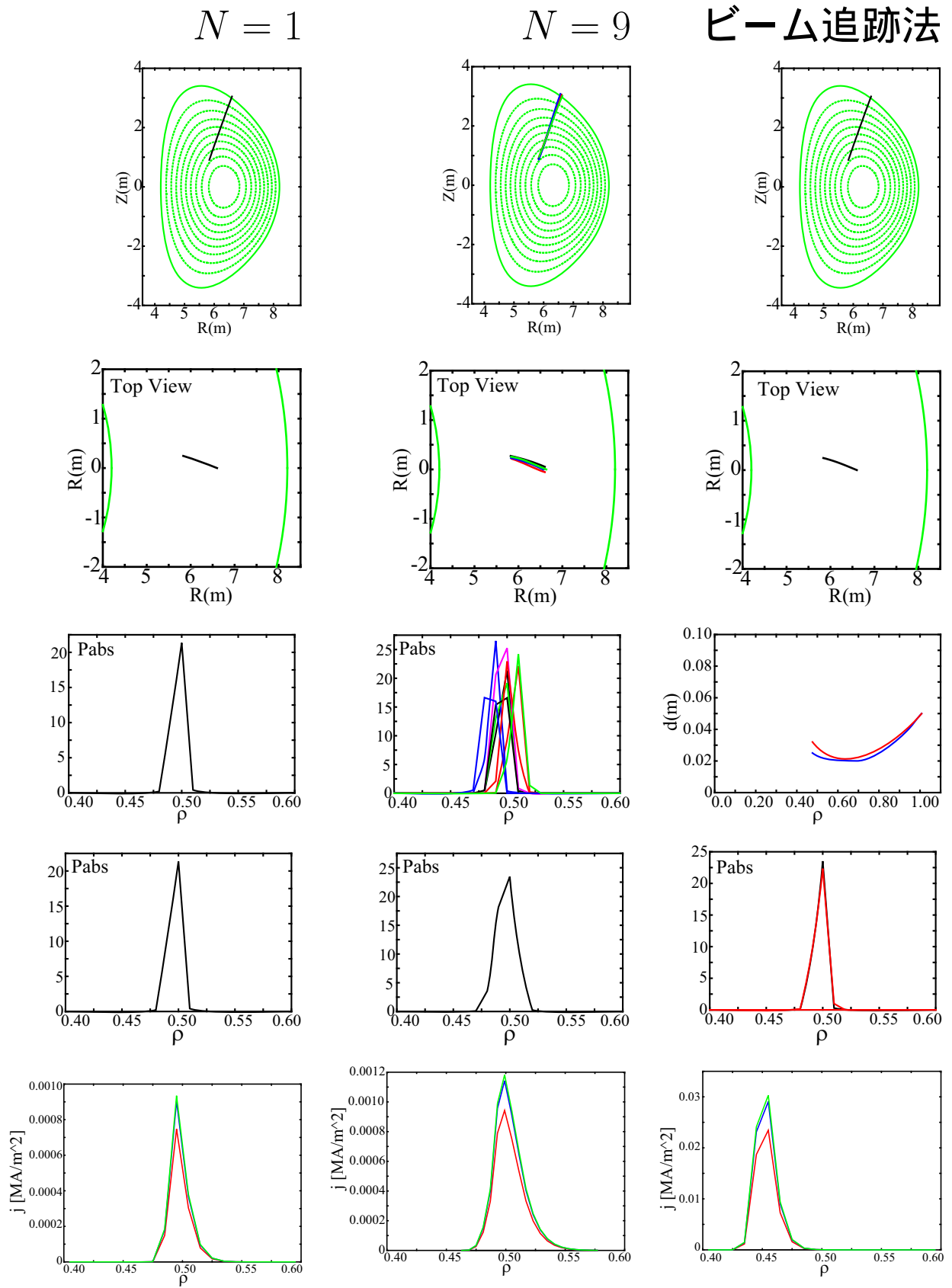
速度分布解析：TASK/FP

- **速度分布関数** $f(p_{\parallel}, p_{\perp}, \psi, t)$ に対する **フォッカー-プランク方程式**

$$\frac{\partial f}{\partial t} = E(f) + C(f) + Q(f) + L(f) \quad (1)$$

- $E(f)$: 直流電界による加速項
 - $C(f)$: クーロン衝突による衝突項
 - $Q(f)$: 波との共鳴によって生じる準線形拡散項
 - $L(f)$: 空間的拡散項
- **軌道平均** : バナナ軌道幅は 0 として軌道平均, 捕捉粒子効果
 - **相対論的** : 運動量 p , 衝突項は弱相対論的
 - **3次元** : 空間拡散 (古典的, 新古典的, 乱流拡散)

光線追跡法とビーム追跡法の比較



波動光学的波動伝播解析：TASK/WM

- 平衡解析から得られた**磁気面座標**： (ψ, θ, φ)

- **マクスウェル方程式**の境界値問題

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} = \frac{\omega^2}{c^2} \overleftrightarrow{\epsilon} \cdot \mathbf{E} + i\omega\mu_0 \mathbf{j}_{\text{ext}}$$

- 運動論的效果を含めた**誘電率テンソル**： $\overleftrightarrow{\epsilon}$

- **波一粒子共鳴相互作用**： $Z[(\omega - n\omega_c)/k_{\parallel}v_{\text{th}}]$

- **高速イオン：ドリフト運動論**

$$\left[\frac{\partial}{\partial t} + v_{\parallel} \nabla_{\parallel} + (\mathbf{v}_d + \mathbf{v}_E) \cdot \nabla + \frac{e_{\alpha}}{m_{\alpha}} (v_{\parallel} E_{\parallel} + \mathbf{v}_d \cdot \mathbf{E}) \frac{\partial}{\partial \epsilon} \right] f_{\alpha} = 0$$

- ポロイダルおよびトロイダル**モード展開**

- **正確な k_{\parallel} 評価**

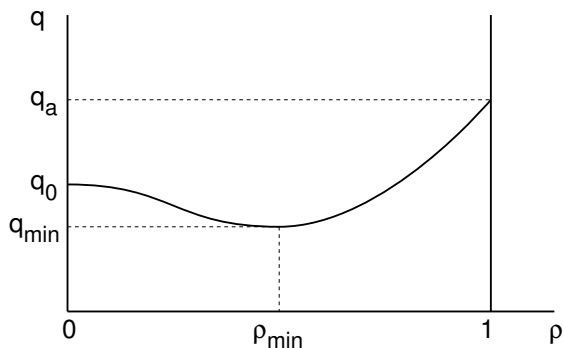
- 固有モード解析：電界振幅を最大とする**複素固有周波数**

- **電子密度に比例する励起**

Analysis of TAE in Reversed Shear Configuration

q_{\min} Dependence of Eigenmode Frequency

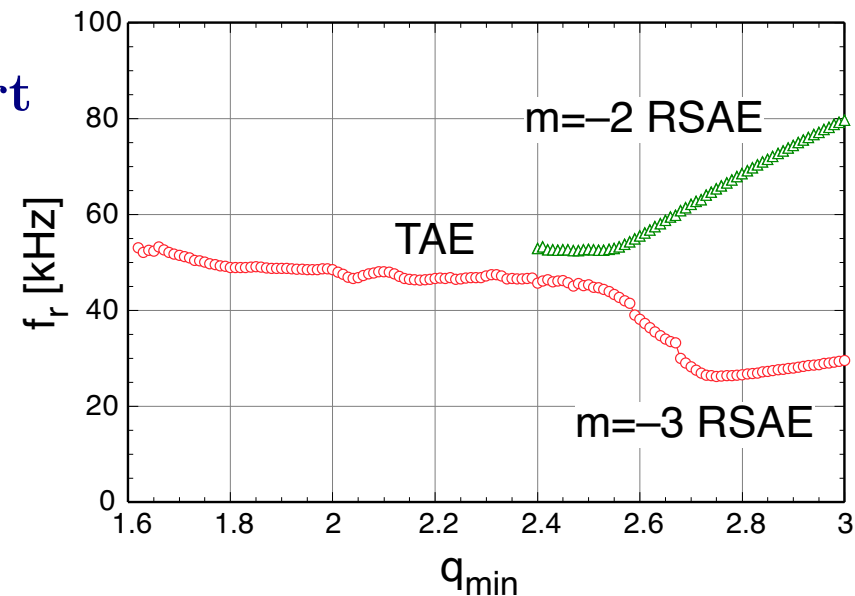
Assumed q profile



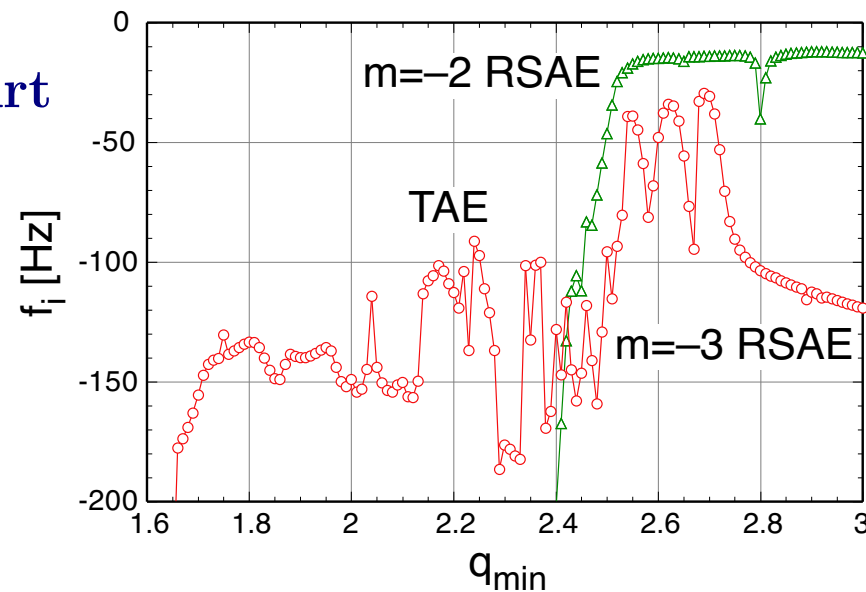
Plasma Parameters

R_0	3 m
a	1 m
B_0	3 T
$n_e(0)$	10^{20} m^{-3}
$T(0)$	3 keV
$q(0)$	3
$q(a)$	5
ρ_{\min}	0.5
n	1
Flat density profile	

Real part

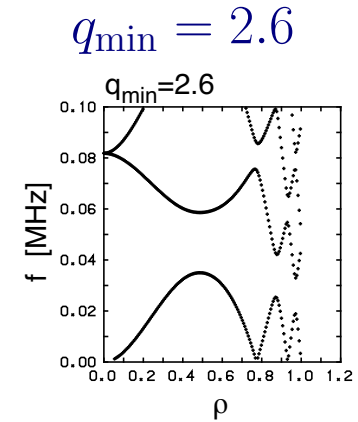
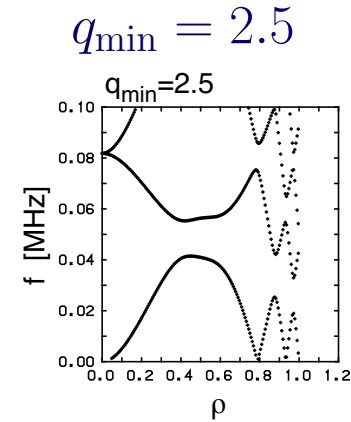
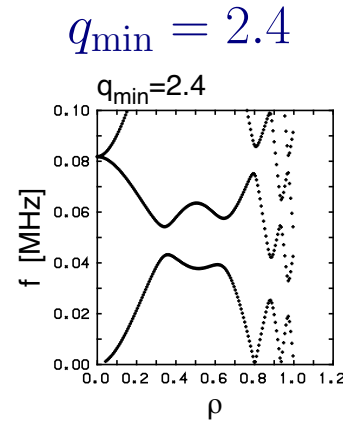


Imag part

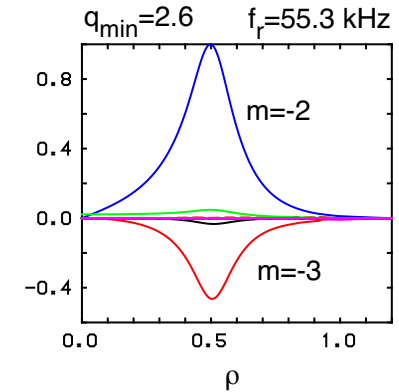
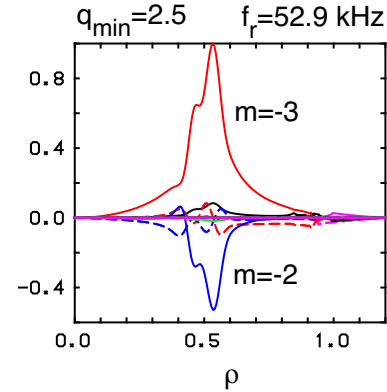
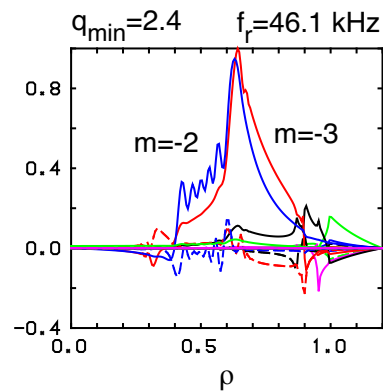


Eigenmode Structure

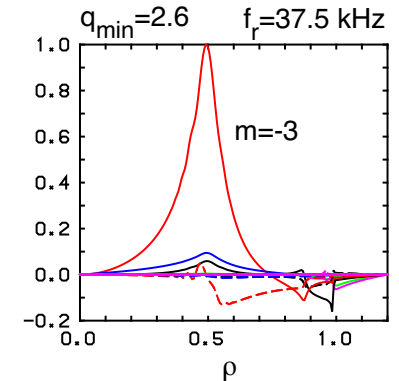
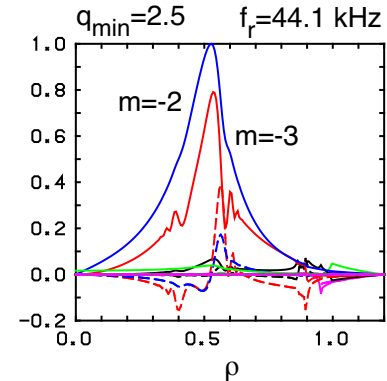
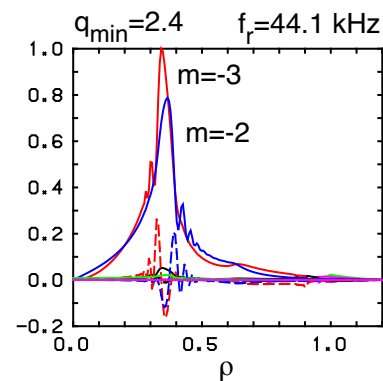
Alfvén resonance



Higher freq.



Lower freq.



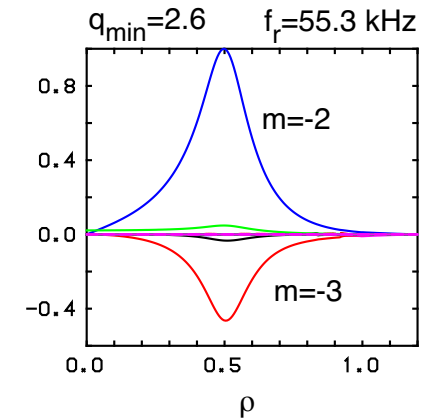
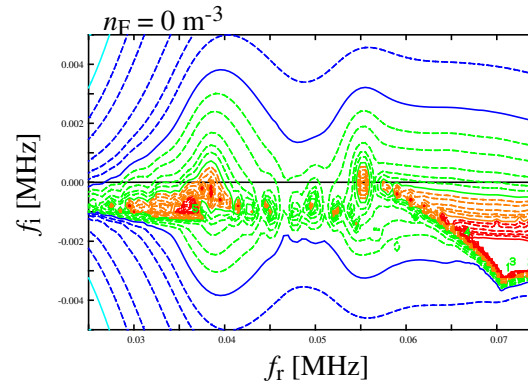
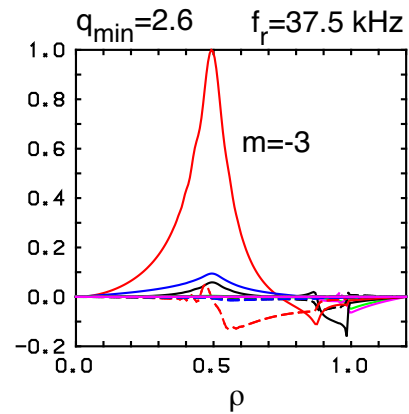
TAEs

Double TAE

RSAE

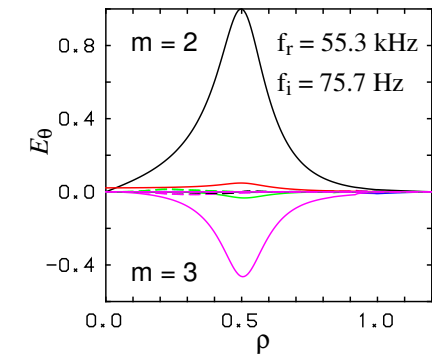
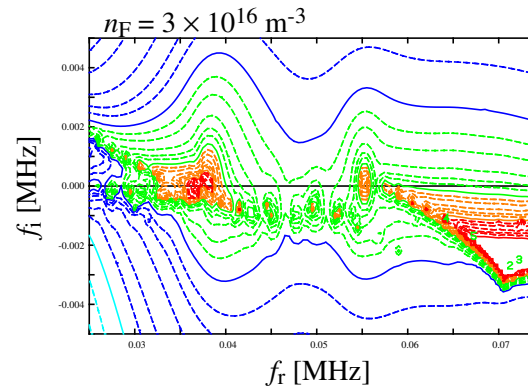
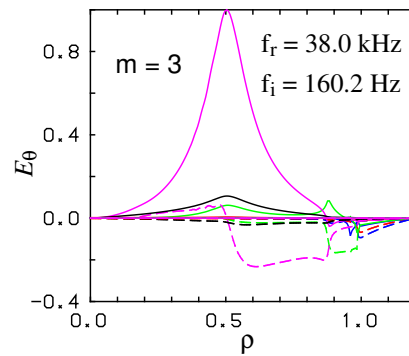
Excitation by Energetic Particles ($q_{\min} = 2.6$)

- Without EP



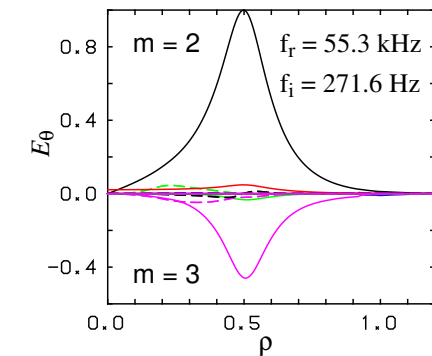
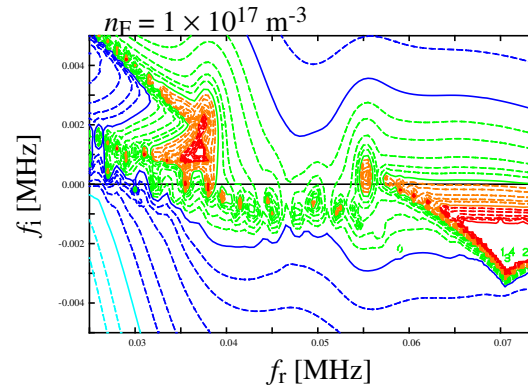
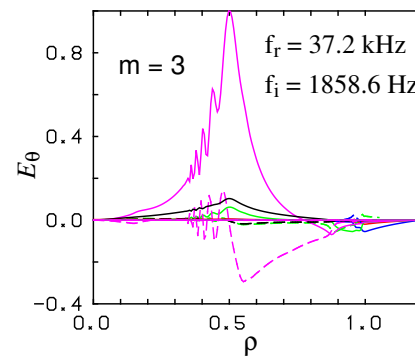
- With EP

3×10^{16} m⁻³
 360 keV
 0.5 m



- With EP

1×10^{17} m⁻³
 360 keV
 0.5 m



まとめ

- 核燃焼プラズマの時間発展をシミュレーションするため、平衡・輸送解析をベースにした統合コードが検討されている。そのコアとなり得るコードとしてTASK コードを開発している。
- TASK コードには、平衡、輸送、波動伝播、速度分布等のモジュールが含まれ、モジュール間のデータ交換により、加熱・電流駆動を含めた時間発展解析が可能である。
- 平衡解析と組み合わせた波動伝播解析の例として、ビーム追跡法による電子サイクロトロン波電流駆動の解析および負磁気シア配位におけるアルヴェン固有モードの解析の結果を示した。
- 今後の課題
 - データ交換インターフェース仕様の策定とソースプログラムの公開
 - 輸送モデルの拡張、ITPA 分布データベースとの比較
 - MHD 安定性解析コード等との結合
 - 定常運転シミュレーション