

2006/06/13

第6回核融合エネルギー連合講演会 13J01

富山国際会議場

トカマクにおける波動加熱と電流駆動の 統合シミュレーション

福山 淳, 村上定義, 本多 充

京大工

TASK コードの特色

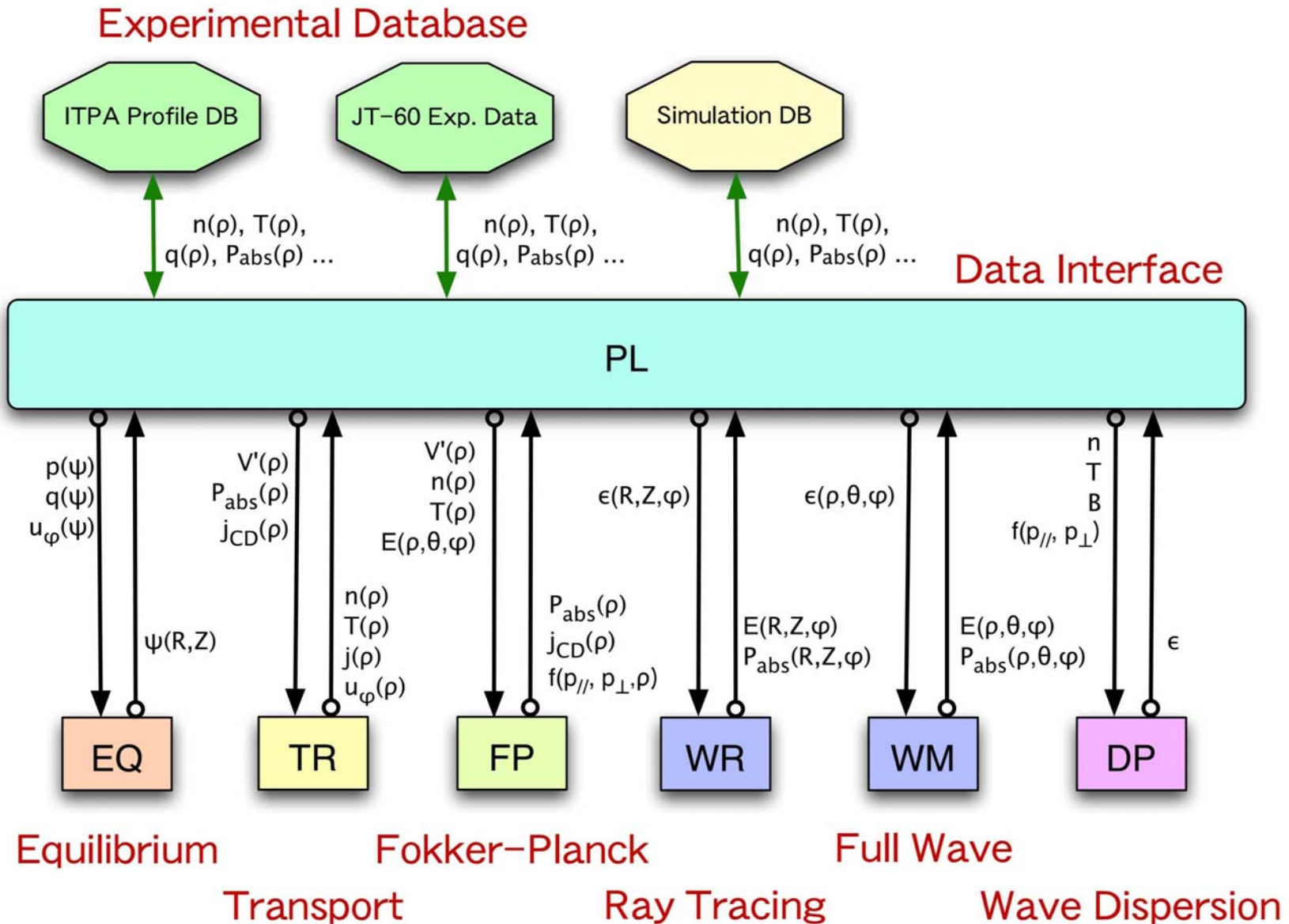
- トカマクの時間発展シミュレーション
 - モジュール構造の統合シミュレーション
 - 様々な加熱・電流駆動機構の実装
 - 高い移植性：UNIX系 (Linux, MacOSX, SX-OS 等)
 - MPI ライブラリを用いた並列分散処理
 - 実験データベースの利用：ITPA 分布データベース
 - ヘリカル系への拡張：LHD 計画研究（代表：中村祐司）
- 核燃焼プラズマ統合コード構想のコアコード
 - 最小限の統合コード：モジュールは交換可能
 - インターフェースの標準化：実装の検証
 - 利用者の拡大：マニュアル等の整備

TASK コードの構成

- Transport Analyzing System for tokamak
- モジュール

TASK/EQ	2次元平衡解析	固定・自由境界，トロイダル回転効果
TR	1次元輸送解析	拡散型輸送方程式，各種輸送モデル
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
LIB	共通ライブラリ	行列解法，特殊関数
PL	分布データ変換	磁気面座標 ↔ 実座標，分布データベース
開発中：TX	1次元輸送解析	流体型輸送方程式，輸送モデル
WA	線形安定性解析	波動伝播解析，巨視的不安定性
WI	積分形波動解析	FLR 効果，高次サイクロトロン高調波

TASK コードのモジュール構造



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**

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

- 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**

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

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

- $E(f)$: 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 次元の : 空間拡散 (古典的 , 新古典的 , 乱流拡散)

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)

小型トカマクにおける EC 波伝播解析

- 小型球状トカマク : **LATE** (Kyoto University)
 - T. Maekawa et al., IAEA-CN-116/EX/P4-27 (Vilamoura, Portuga, 2004)
 - $R = 0.22$ m, $a = 0.16$ m, $B_0 = 0.0552$ T, $I_p = 6.25$ kA, $\kappa = 1.5$
 - $f = 2.8$ GHz, トロイダルモード番号 $n = 12$, 異常波入射

遮断層の透過

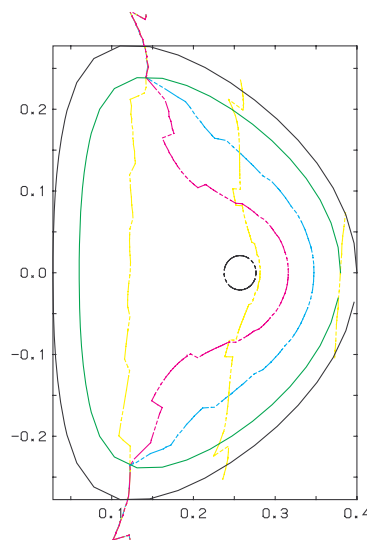


高域混成共鳴層に
沿った伝播

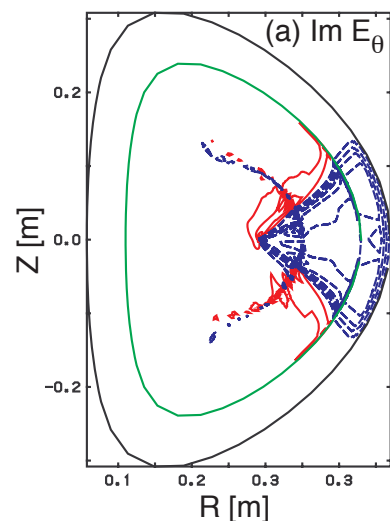


高域混成共鳴近傍
での衝突減衰

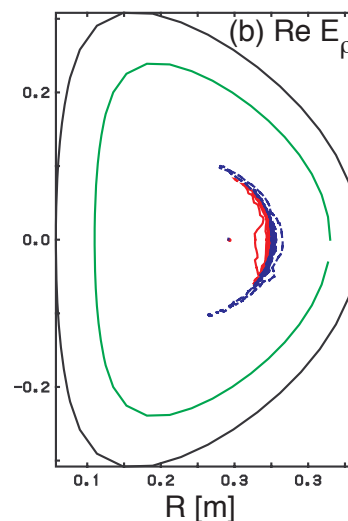
UHR, cutoff,



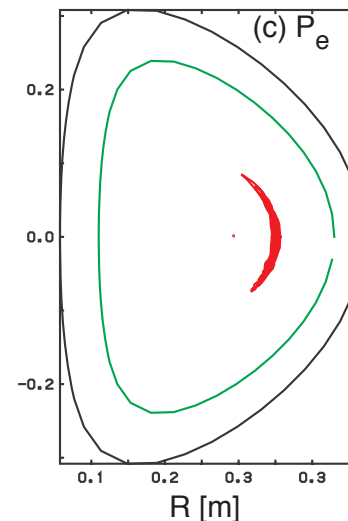
$\text{Im}E_\theta$



$\text{Re}E_\rho$

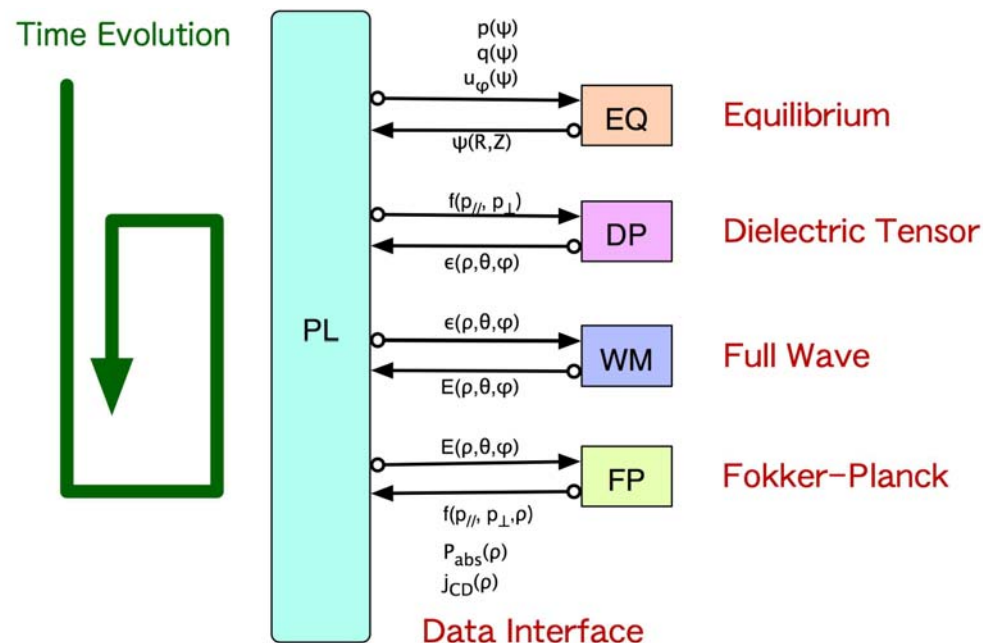


P_{abs}



速度分布関数 $f(v)$ の変形を取り入れた自己無撞着な解析

- 速度分布関数のマクスウェル分布からのずれ
 - 高速イオン存在下における ICRF 波の吸収
 - LHCD における電流駆動効率
 - ECCD による NTM 安定化
- $f(v)$ の変形を取り入れた自己無撞着な波動伝播解析



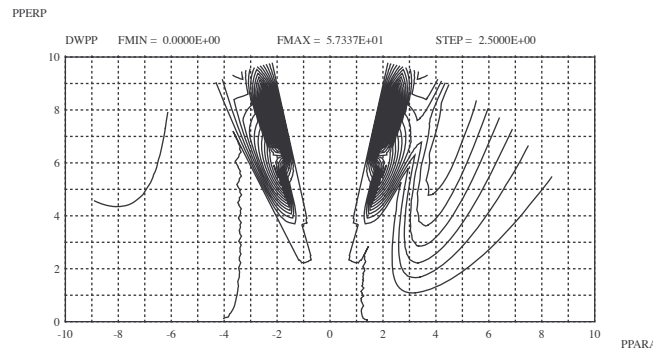
自己無撞着な波動伝播解析の進展

● TASK におけるコード開発

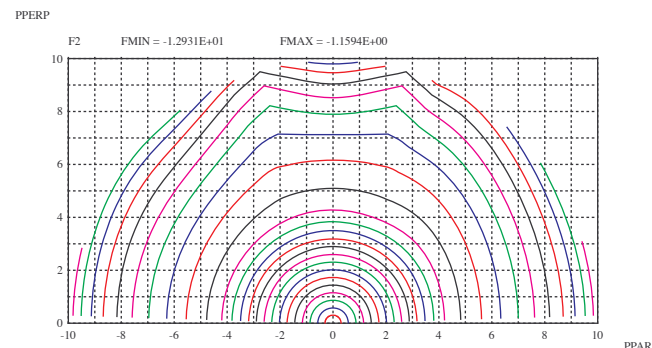
- 任意速度分布関数に対する光線追跡法： 既に実施
- 任意速度分布関数に対する波動光学的伝播解析： 完了
- 光線追跡法の結果を用いた速度分布解析： 既に実施
- 波動光学的伝播解析の結果を用いた速度分布解析： ほぼ完了
- 自己無撞着な反復計算： 予備的結果

● 少数イオン ICRF 加熱に伴う高速イオンテイル形成

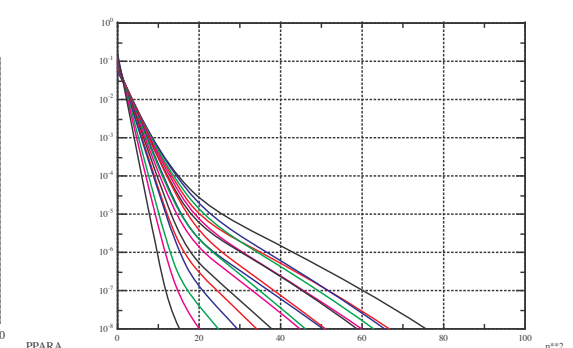
準線形拡散係数



速度分布関数



テイル形成



まとめ

- 波動加熱および電流駆動における速度分布関数の変形を取り入れた自己無撞着な解析に向けて TASK コードの改良が進行中
 - 任意速度分布関数に対する波動伝播解析が可能になった．
 - 波動伝播解析の結果を用いた速度分布解析もほぼ実現（速度分布解析の多成分化が進行中）
 - 波動伝播解析と速度分布解析の結合もほぼ完了（現在はファイルによるデータ交換）almost completed.
- 小型球状トカマクにおける電子サイクロトロン波の波動光学的伝播解析を行った．
 - 遮断層の透過と高域混成共鳴層における吸収が記述できる．
 - 電子バーンシュタイン波へのモード変換の解析には，有限ラーモア半径効果を取り入れた積分方程式による波動伝播解析が必要：現在進行中