

2005/09/21

日本物理学会 2005 秋季大会 21pWG-14

同志社大学京田辺キャンパス

科研費特別推進研究「乱流プラズマの構造形成と選択則の総合的研究」

## 輸送コードと乱流理論の結合

福山 淳, 本多 充

京大工

in collaboration with

伊藤早苗, 伊藤公孝, 矢木雅敏, P.H. Diamond



# 背景と内容

---

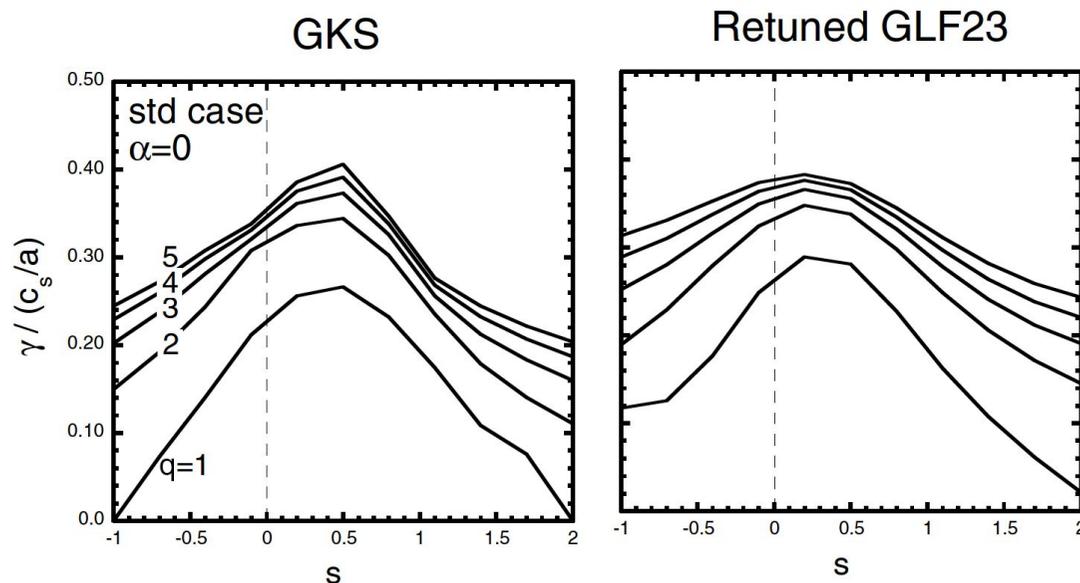
- 自律性の高い核燃焼プラズマの予測と制御
  - 信頼性の高い乱流輸送モデルの開発が必要
    - 分布とその時間発展の実験データとの系統的比較による検証
    - プラズマ乱流の直接数値シミュレーションによる検証
  - プラズマ中のさまざまな現象を取り入れた統合コードの開発が必要
- 輸送シミュレーションによる輸送モデルの比較
  - ITPA 分布データベースから得た実験データ：55 ショット
  - 実験データを取り入れた熱輸送シミュレーション：TASK/TR
  - 乱流輸送モデル：CDBM, CDBM05, GLF23, Weiland
- 帯状流を取り入れた乱流輸送モデルによる予備的解析

# イオン温度勾配モード乱流モデル (I)

- **GLF23 輸送モデル** : GA グループ (Waltz, Kinsey) 開発
  - 20 モードのジャイロ流体的線形安定性解析
  - 線形成長率から拡散係数評価 (準線形 Mixing Length Rule)

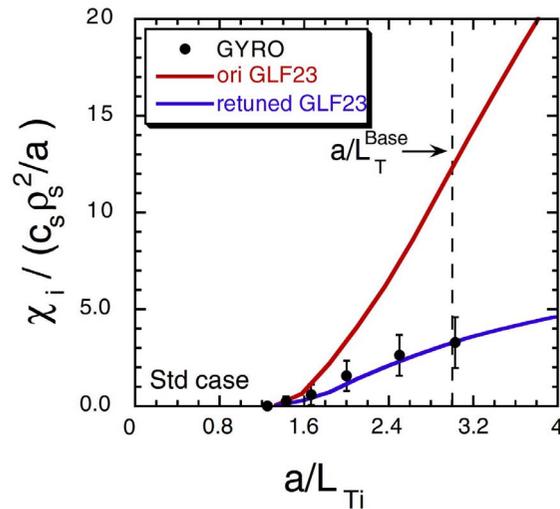
$$\chi \propto \frac{\gamma - \gamma_E}{k^2} \frac{\gamma_d \gamma}{\omega^2 + \gamma^2}, \quad \gamma_E : E \times B \text{ shear rate}, \quad \gamma_d : \text{帯状流減衰率}$$

- **理論** : ジャイロ運動論的線形安定性解析 : **GKS**
  - いろいろな配位において線形安定性を比較し, 係数を較正

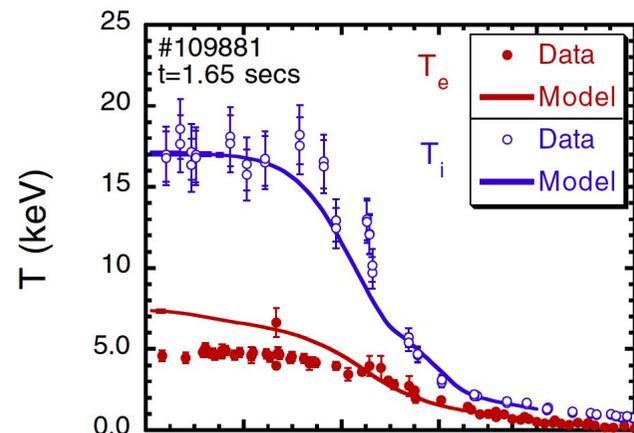


# イオン温度勾配モード乱流モデル (II)

- シミュレーション: ジャイロ運動論的非線形シミュレーション: **GYRO**
  - 線形成長率と拡散係数との関係を較正



- 実験をかなりよく再現



# 電流拡散性バルーニングモード乱流輸送モデル

## ● 熱拡散係数

$$\chi_{\text{TB}} = F(s, \alpha, \kappa, \kappa_M, \omega_{E1}) \alpha^{3/2} \frac{c^2}{\omega_{pe}^2} \frac{v_A}{qR}$$

磁気シア  $s \equiv \frac{r}{q} \frac{dq}{dr}$

圧力勾配  $\alpha \equiv -q^2 R \frac{d\beta}{dr}$

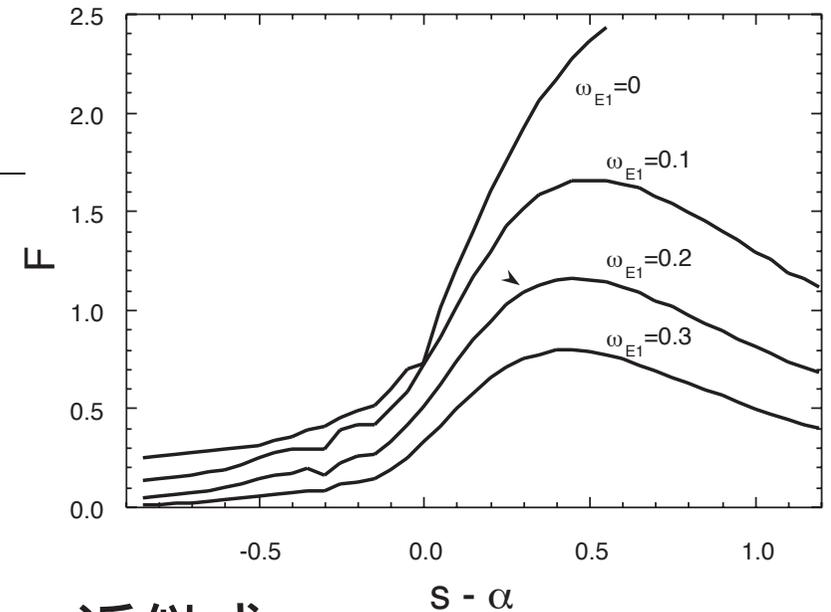
楕円率  $\kappa \equiv b/a$

磁気曲率  $\kappa_M \equiv -\frac{r}{R} \left(1 - \frac{1}{q^2}\right)$

$E \times B$  回転シア  $\omega_{E1} \equiv \frac{qR}{sv_A B_\theta} \frac{dE}{dr}$

- 負磁気シア，磁気軸シフト，楕円率， $E \times B$  回転シアは輸送を減少させる。

## ● 因子 $F$ の $s - \alpha$ 依存性



## ● 近似式

$$F(s, \alpha, \kappa, \omega_{E1}) = \left( \frac{2\kappa^{1/2}}{1 + \kappa^2} \right)^{3/2}$$

$$\times \begin{cases} \frac{1}{1 + G_1 \omega_{E1}^2} \frac{1}{\sqrt{2(1 - 2s')(1 - 2s' + 3s'^2)}} & \text{for } s' = s - \alpha < 0 \\ \frac{1}{1 + G_1 \omega_{E1}^2} \frac{1}{\sqrt{2} s'^{5/2}} & \text{for } s' = s - \alpha > 0 \end{cases}$$

# 帯状流を含めた乱流輸送モデル (1)

- Ref. K. Itoh et al., Phys. Plasmas 12 (2005) 062303
- **Fitting Formula:** [ $\Theta(\gamma_L - \gamma_{L,c})$ : Heaviside function]

$$\chi_i = \sqrt{\chi_{I+II}^2 + \chi_{III}^2 \Theta(\gamma_L - \gamma_{L,c})}$$

- **Region I + II:**  $\gamma_L < \gamma_{L,c}$

$$\chi_{I+II} = \frac{\sqrt{\nu}}{\sqrt{\gamma_L} + \sqrt{\nu}} \frac{\gamma_L}{k_r^2}$$

where

$$\nu = \frac{1}{1 - \mu} \frac{k_{\perp}^4}{k_{\theta}^2 q_r^2} \nu_{\text{damp}}, \quad \mu = (1 + 2q^2) \frac{\mu_{\parallel}}{D_{rr}}$$

$$\chi_{I+II} \sim \frac{\gamma_L}{k_r^2} \text{ for } \gamma_L \ll \nu, \quad \chi_{I+II} \sim \sqrt{\frac{\nu}{\gamma_L}} \frac{\gamma_L}{k_r^2} \text{ for } \gamma_L \gg \nu$$

## 帯状流を含めた乱流輸送モデル (2)

- **Region III:**  $\gamma_L > \gamma_{L,c}$

$$\chi_{III} = A \left( \sqrt{1 + \frac{2}{A} \frac{\gamma_L - \gamma_{L,c}}{\gamma_L}} - 1 \right) \frac{\gamma_L}{k_r^2}$$

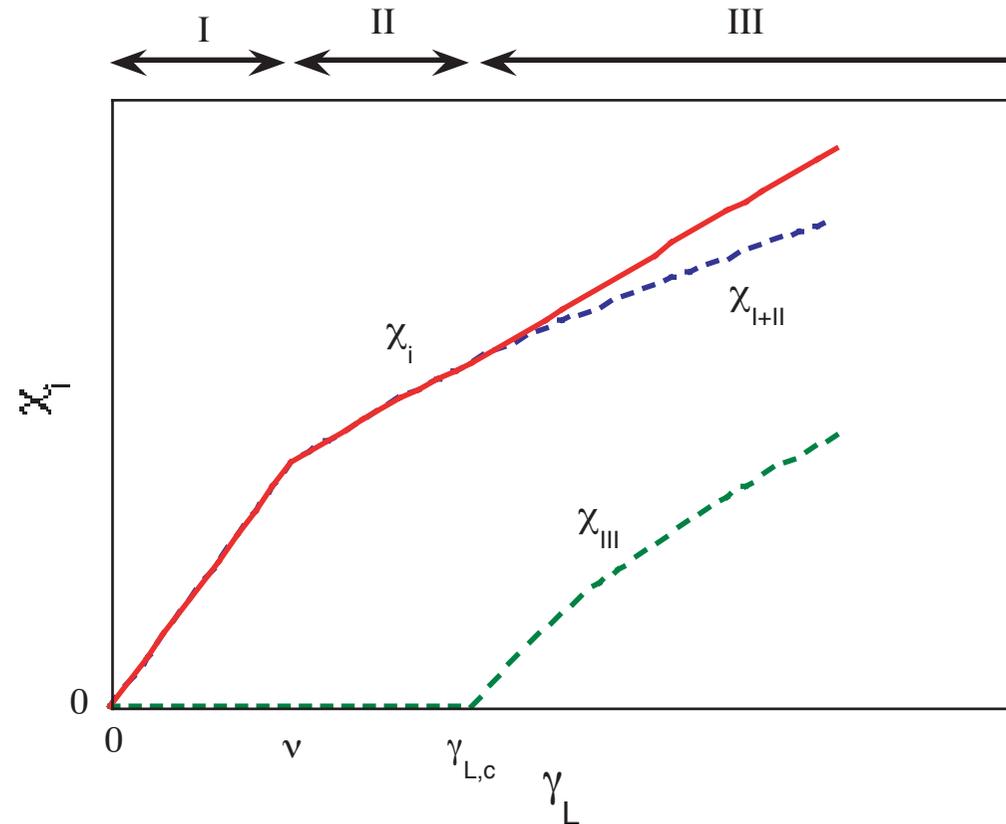
$$A = \frac{\mu H \rho_s^2 k_{\perp}^4}{4(1 - \mu) q_r^2}, \quad \gamma_{L,c} = \frac{(1 - \mu)^2 k_r^2}{\sqrt{2} \mu H k_{\perp}^2} \omega_*$$

$$H = \frac{2}{1 + k_{\perp}^2 \rho_s^2} + \frac{6 q_r^2}{\Delta \omega^2 \rho_s^2} \frac{\partial v_g^2}{\partial k_r^2}$$

$$\chi_{III} \sim \frac{\gamma_L - \gamma_{L,c}}{k_r^2} \text{ for } \gamma_L \gtrsim \gamma_{L,c}, \quad \chi_{III} \sim \sqrt{2A} \frac{\gamma_L}{k_r^2} \text{ for } \gamma_L \gg \gamma_{L,c}$$

$$\sqrt{2A} \sim O(k_{\perp} \rho_s)$$

# 帯状流を含めた乱流輸送モデル (3)



Region I: 帯状流が無視できる領域

Region II: 帯状流の衝突減衰が支配的な領域

Region III: 帯状流の非線形飽和が支配的な領域

# ITG モデルによる解析 (Preliminary)

---

- 線形成長率  $\gamma_L$  の選び方
- 波数  $k_\theta, k_r, q_r$  の選び方
- 解析例 : ITG model proposed by R. Waltz (1984)

- 線形成長率 :

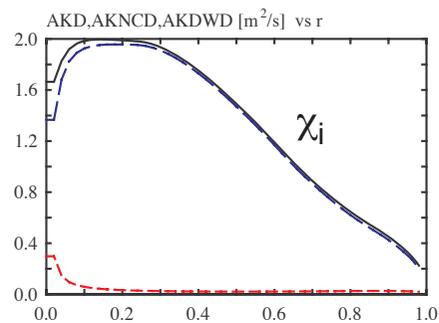
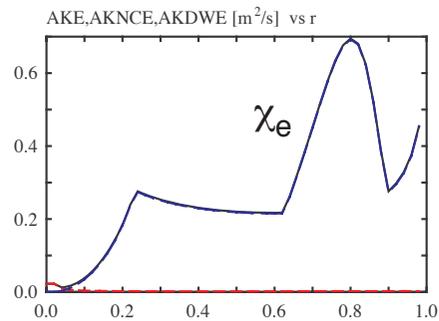
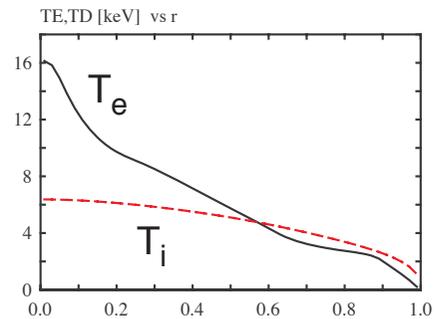
$$\gamma_L = 2.5 H(\xi) \sqrt{\frac{2\eta_i T_i L_n}{T_e R}} \omega_*$$

$$H(\xi) = \frac{1}{1 + \exp[-6(\eta_i - \eta_c)]}$$

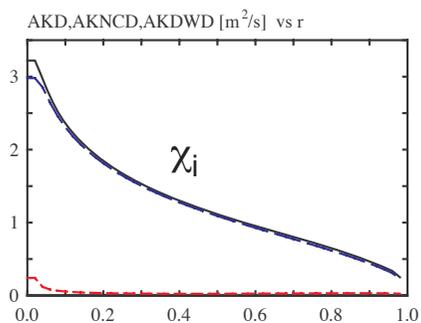
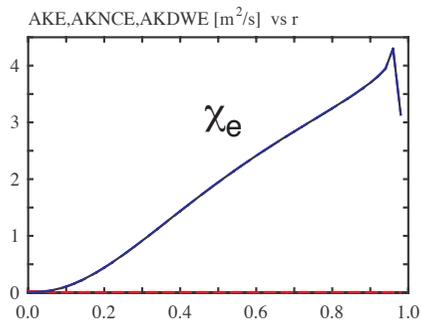
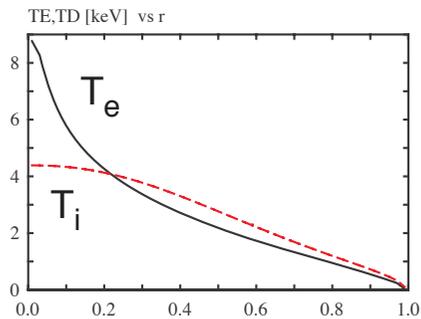
- 電子 : 捕捉電子モード, 抵抗性通過電子モード
- 仮定 :  $k_\perp \rho_s = 0.3, k_\theta \sim k_r \sim q_r, \mu = 1/2$
- 係数
  - Original Waltz model: 0.05
  - Zonal flow model: 1

# 輸送シミュレーション例 (Preliminary)

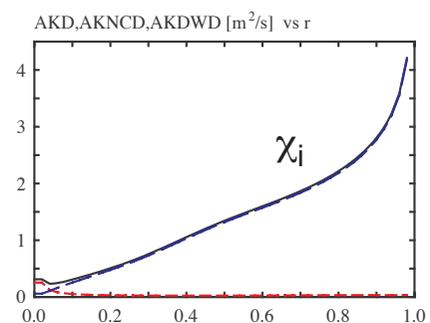
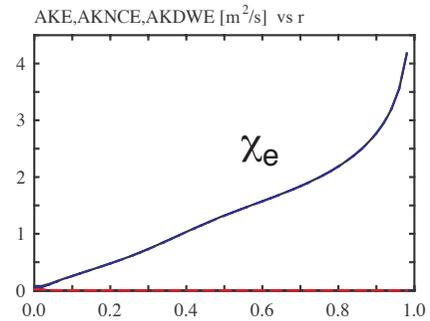
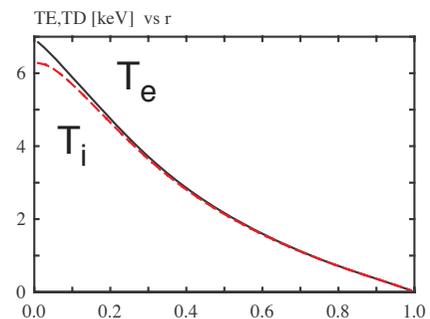
## ITG (Waltz)



## ITG with Zonal Flow



## CDBM



## まとめ

---

- 高温プラズマの乱流輸送に関するさまざまな非線形現象の理論解析と大規模数値シミュレーションが進みつつあり，実験データとの比較によって定量的な理解が深まりつつある．
- K. Itoh 他によって導かれた帯状流の効果を含めたイオン熱輸送係数の表式に対して，イオン温度勾配モードの線形成長率を代入し，熱輸送シミュレーションを行った．従来のモデルでは実験を再現するために必要とされていた  $1/20$  の係数はほぼ不要になった．線形成長率モデルの改良や定量的な解析を今後進める必要がある．
- 輸送障壁形成には，線形モードの選択が重要．バルーニングモードや非線形効果によって自己維持されるモード等も考慮する必要がある．