

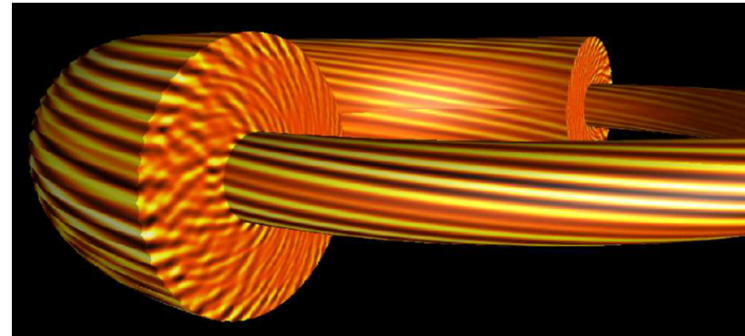
GKVコード概要

石澤明宏（京都大学）

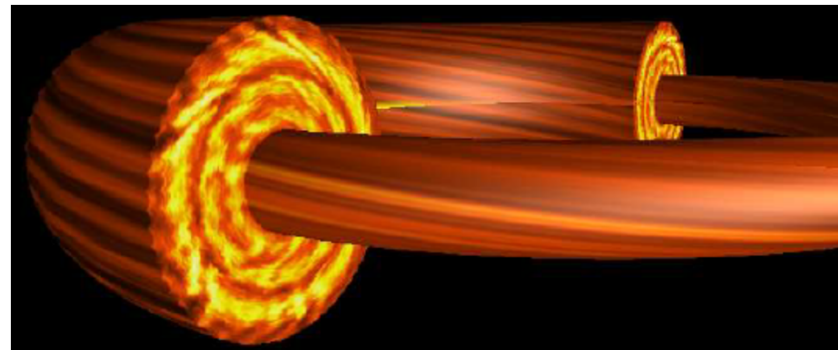
開発チーム：渡邊智彦、前山伸也（名大）、
沼波政倫、仲田資季、洲鎌英雄（NIFS）

GKVコード

- 磁場閉じ込めトーラスプラズマにおける乱流揺動の計算
- 与えられた強い磁場、温度、密度分布の下での揺動の時間発展が従うジャイロ運動論方程式を解く
 - 微視的不安定性(またはドリフト波不安定性)の評価
 - 線形成長率、実周波数
 - 固有関数分布など



- 微視的乱流による乱流輸送の評価
 - 輸送係数、スペクトル
 - ゴーナル流生成など



A. Ishizawa, Journal of Plasma Physics, 81, 435810203 (2015)

GKVは分布関数の揺動が従うボルツマン方程式を解く

ボルツマン方程式

$$\left[\frac{\partial}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla + \frac{q_s}{m_s} \left(\mathbf{E} + \frac{1}{c} \mathbf{v} \times \mathbf{B} \right) \cdot \frac{\partial}{\partial \mathbf{v}} \right] F_s = C_s(F_s)$$

$f_s = F_{Ms} + \delta f_s$ 分布関数を平衡部分(マクスセル分布)と揺動部分に分ける

揺動に対して以下の仮定

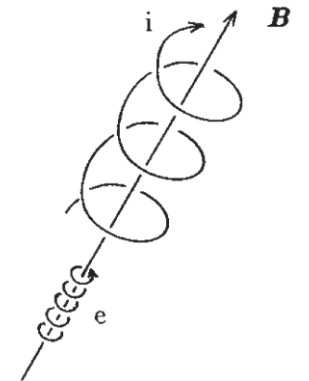
$$F_{Ms} = \frac{n_0}{(2\pi T_s / m_s)^{3/2}} \exp\left(-\frac{m_s v_{\parallel}^2}{2T_s} - \frac{\mu B}{T_s}\right)$$

1. 振幅: 小さい
2. 空間構造: フルート近似
3. 時間スケール: ドリフトオーダリング → ジャイロ平均

$$\frac{\delta f_s}{F_{Ms}} \approx \frac{k_{\parallel}}{k_{\perp}} \approx \frac{\omega}{\Omega_s} \approx \frac{e\delta\phi}{T_s} \approx \frac{\delta A_{\parallel}}{B_0 \rho_s} \approx \varepsilon$$

1
2
3
1
1

$$\begin{aligned} & (x, y, z, v_{\parallel}, v_{\perp}, \zeta) \\ & \downarrow \\ & (x, y, z, v_{\parallel}, v_{\perp}) \end{aligned}$$



空間構造と時間スケール

空間構造: フルート近似

$$\mathbf{b} \cdot \nabla f / \nabla_{\perp} f \approx \epsilon \ll 1$$

$$k_{\parallel} / k_{\perp} \approx \epsilon \ll 1$$

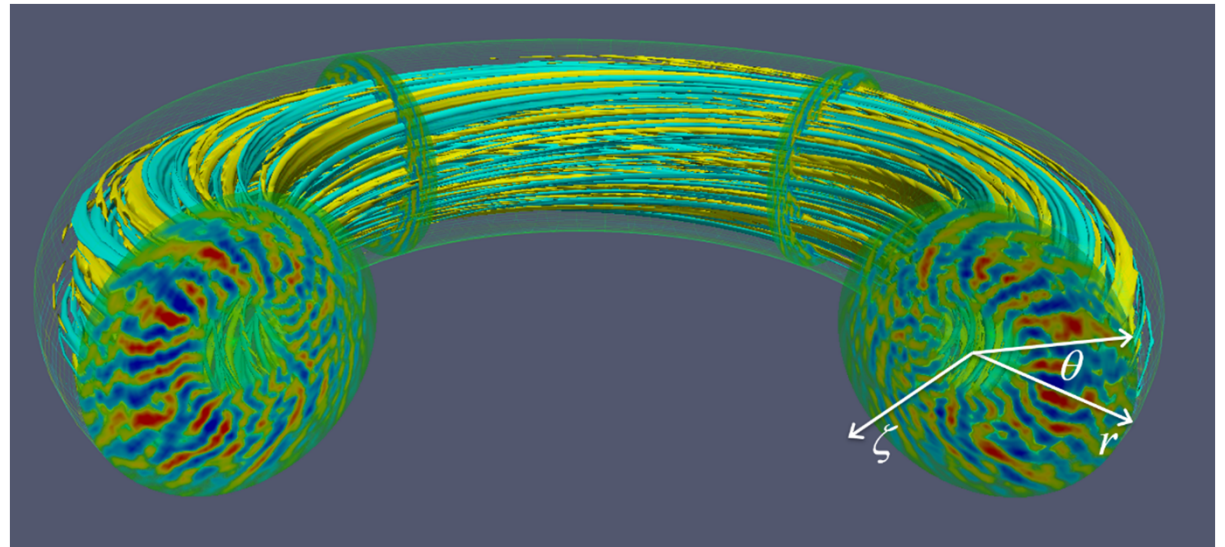
$$\nabla_{\perp} = \nabla - \mathbf{b} \cdot \nabla \quad \mathbf{b} = \mathbf{B}/B$$

揺動のアイコナル表現

$$\delta f_s(\mathbf{X}, v_{\parallel}, \mu) = \sum_k \delta f_{sk}(k_x, k_y, z, v_{\parallel}, \mu) \exp(iS_k)$$

$$\mathbf{v} = v_{\parallel} \mathbf{b} + \mathbf{v}_{\perp}$$

$$\nabla S_k = \mathbf{k}_{\perp} = (k_x, k_y)$$



時間スケール: ドリフトオーダリング

MHDオーダリング: 揺動電場の振幅が大きく、そのExB速度がイオン熱速度と同程度

$$v_E \simeq v_{Ti}$$

ドリフトオーダリング: 揺動電場が弱く、そのExB速度がイオン熱速度より十分小さい

$$v_E \simeq \epsilon v_{Ti}$$

ジャイロ運動論方程式

$$\frac{D\delta f_{sk}}{Dt} + v_{Ts} v_{//} \mathbf{b}^* \cdot \nabla \delta f_{sk} - v_{Ts} \mu \mathbf{b} \cdot \nabla B \frac{\partial \delta f_{sk}}{\partial v_{//}} = -i \mathbf{v}_{ds} \cdot \mathbf{k}_{\perp} \left(\delta f_{sk} + \frac{q_s F_{sM}}{T_s} \phi_k J_{0s} \right)$$

$$+ i \mathbf{v}_{*s} \cdot \mathbf{k}_{\perp} \frac{q_s F_{sM}}{T_s} (\phi_k - v_{Ts} v_{//} A_{//k}) J_{0s} + v_{Ts} v_{//} \frac{q_s F_{sM}}{T_s} E_{//k} + C(\delta f_{sk})$$

$$\lambda_{Di}^2 k_{\perp}^2 \phi_k = \sum_s \left(q_s \delta \hat{n}_{sk} - \frac{q_s^2}{T_s} [1 - \Gamma_{0s}] \phi_k \right) \quad k_{\perp}^2 A_{//k} = \beta_i \sum_s q_s \delta \hat{u}_{sk}$$

$$\delta \hat{n}_{sk} = \int dv^3 \delta f_{sk} J_{0s}$$

$$\delta \hat{u}_{sk} = \int dv^3 v_{//} \delta f_{sk} J_{0s}$$

非線形項

$$\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \frac{1}{B} [\phi J_{0s}, \quad]_k$$

$$\mathbf{b}^* \cdot \nabla = \mathbf{b} \cdot \nabla - \frac{1}{B} [A_{//} J_{0s}, \quad]_k$$

$$E_{//k} = -\mathbf{b}^* \cdot \nabla \phi_k J_{0s} - \frac{\partial A_{//k}}{\partial t} J_{0s}$$

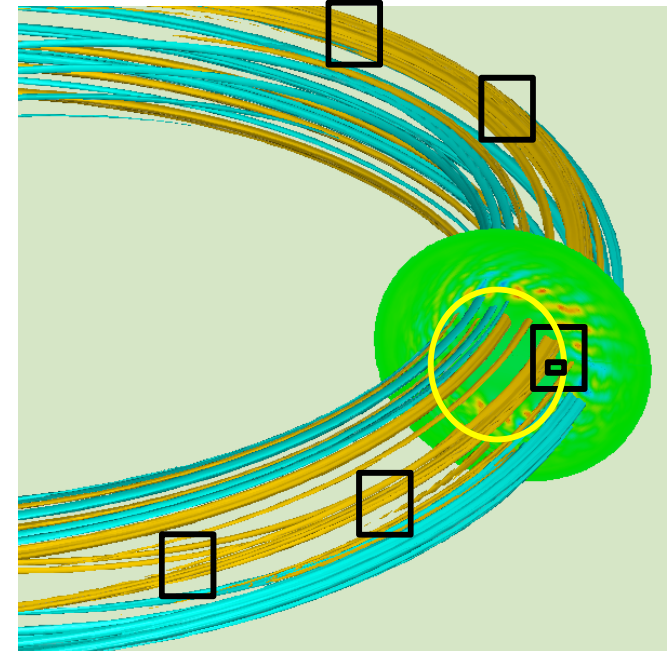
$$\mathbf{v}_{ds} = \frac{1}{q_s B} (\mu \nabla B + m_s v_{//}^2 \mathbf{b} \cdot \nabla \mathbf{b})$$

$$\mathbf{v}_{*s} = \frac{T_s}{q_s B} \mathbf{b} \cdot \nabla \ln F_{Ms}$$

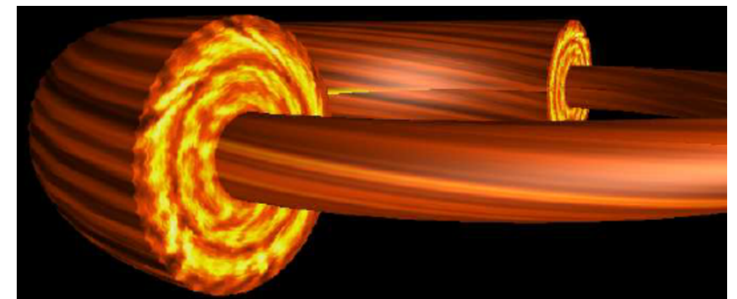
GKVの計算領域と計算できる不安定性

- 一本の磁力線の周りをシミュレーション領域とする(小半径方向に非常に狭い領域)
- GKVが計算できる不安定性
 - イオン(電子)温度勾配不安定性
 - 捕捉電子(イオン)モード
 - 運動論的バルーニングモード
 - 微視的テアリングモード
- ほとんど全てのドリフト波不安定性が計算できる
- 低トロイダルモード数不安定性は計算できない

大域計算結果



GKV(局所)計算結果



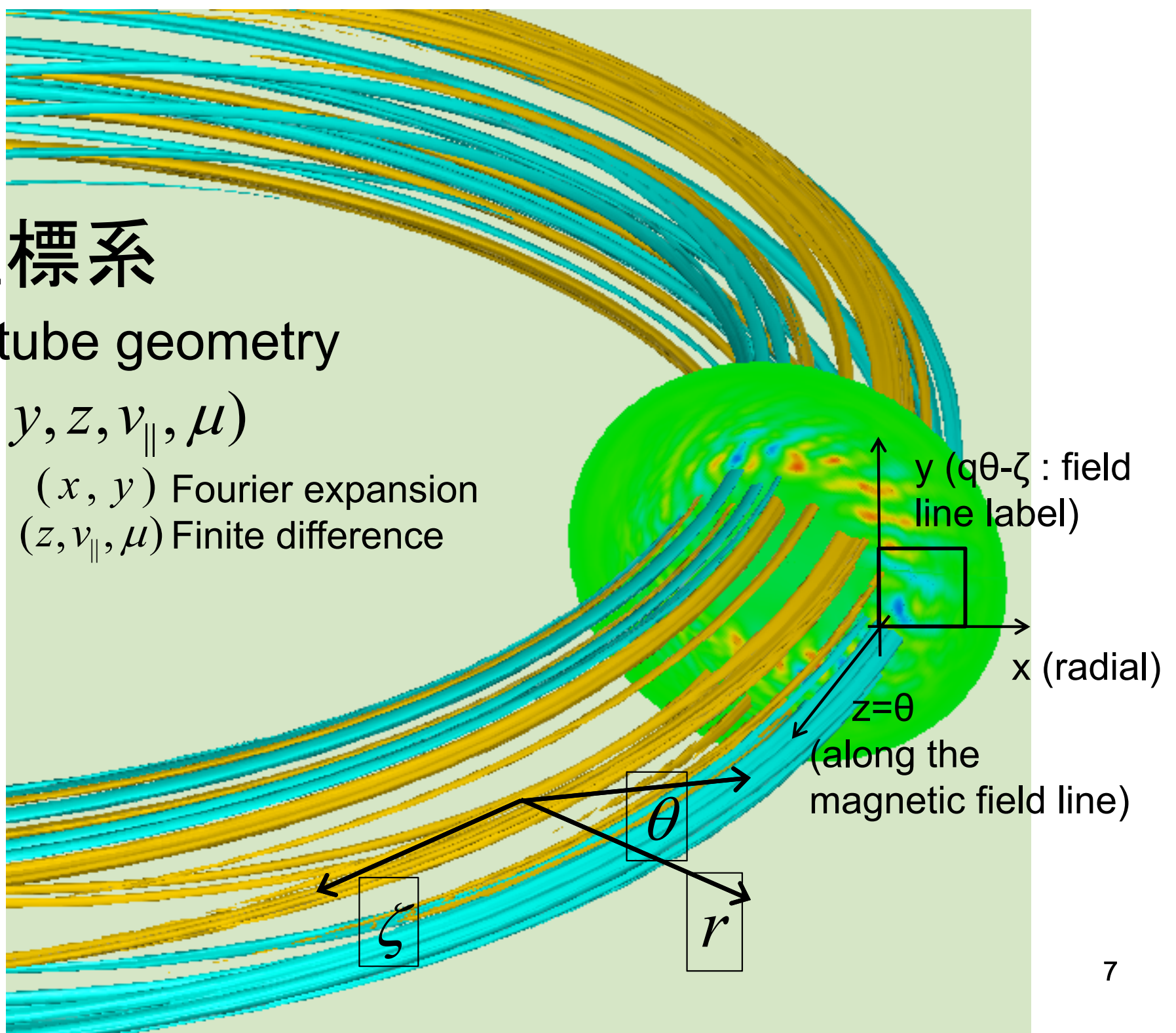
座標系

Flux tube geometry

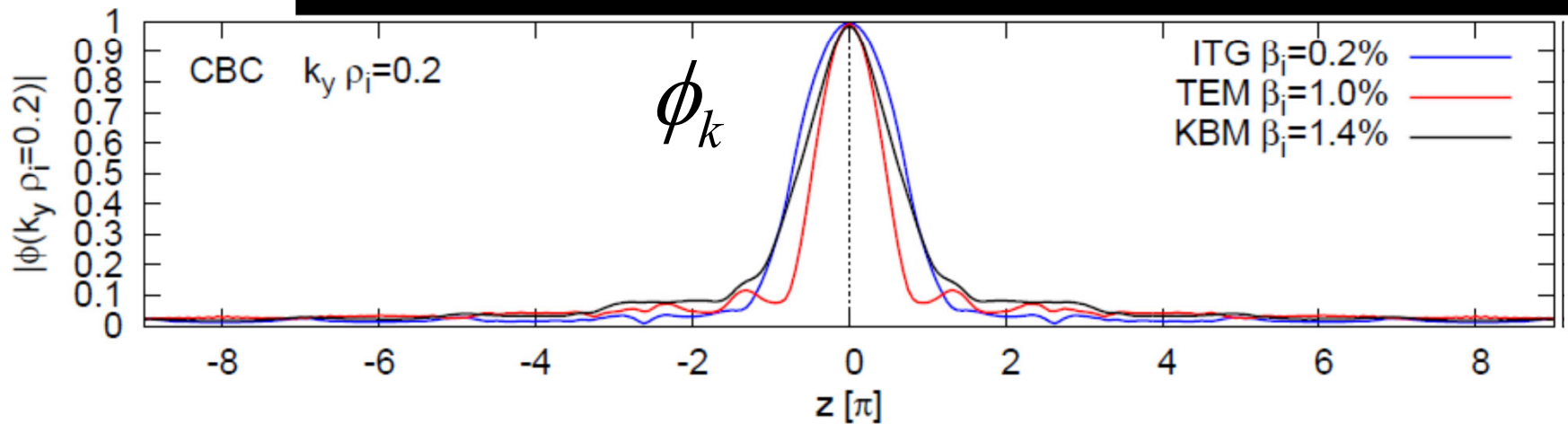
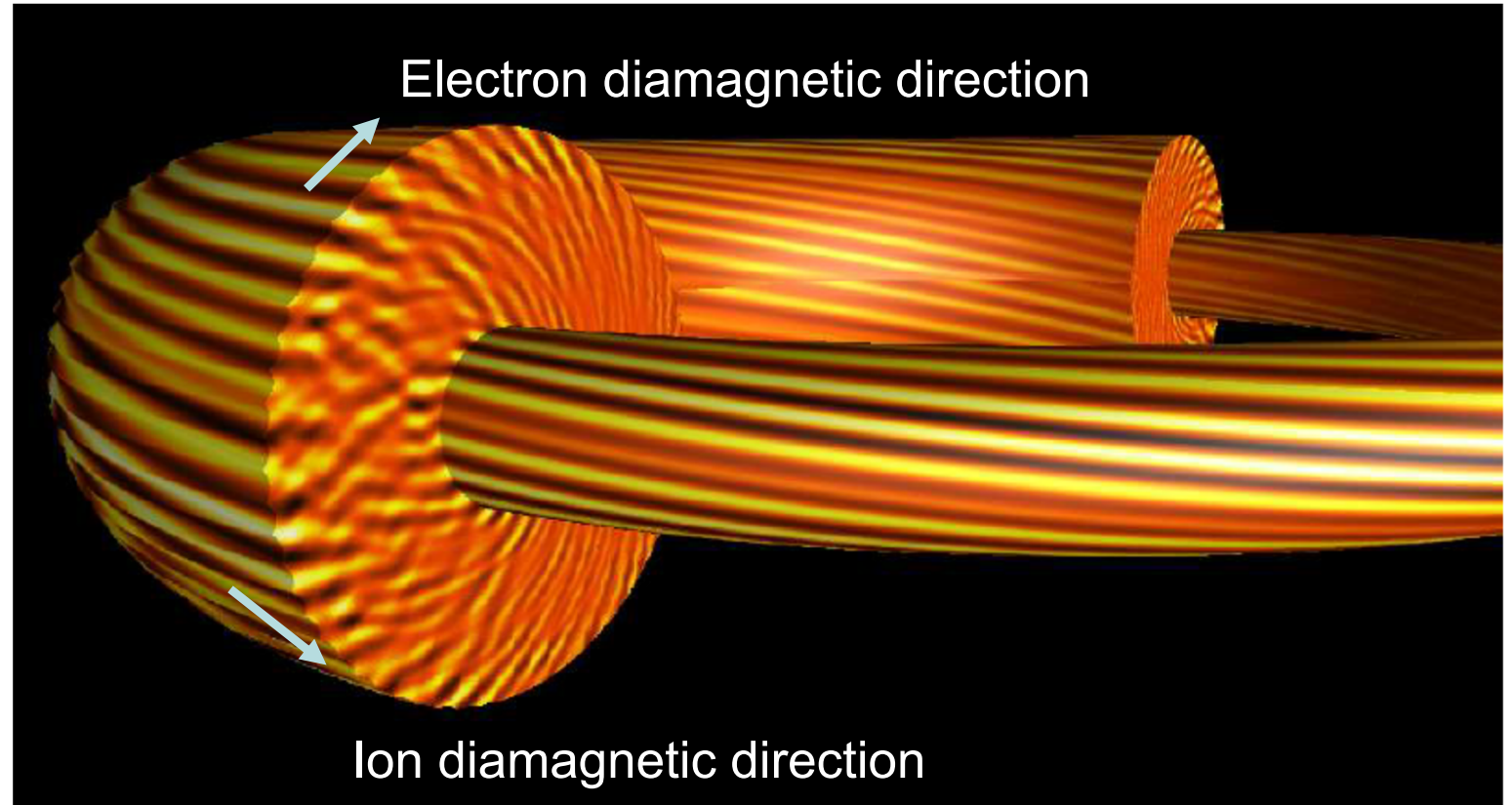
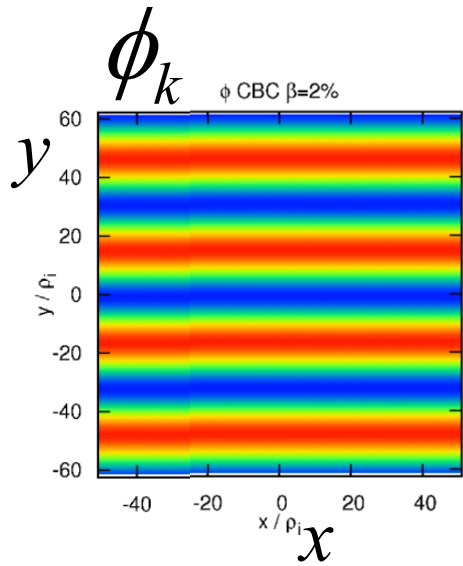
$(x, y, z, v_{\parallel}, \mu)$

(x, y) Fourier expansion

(z, v_{\parallel}, μ) Finite difference

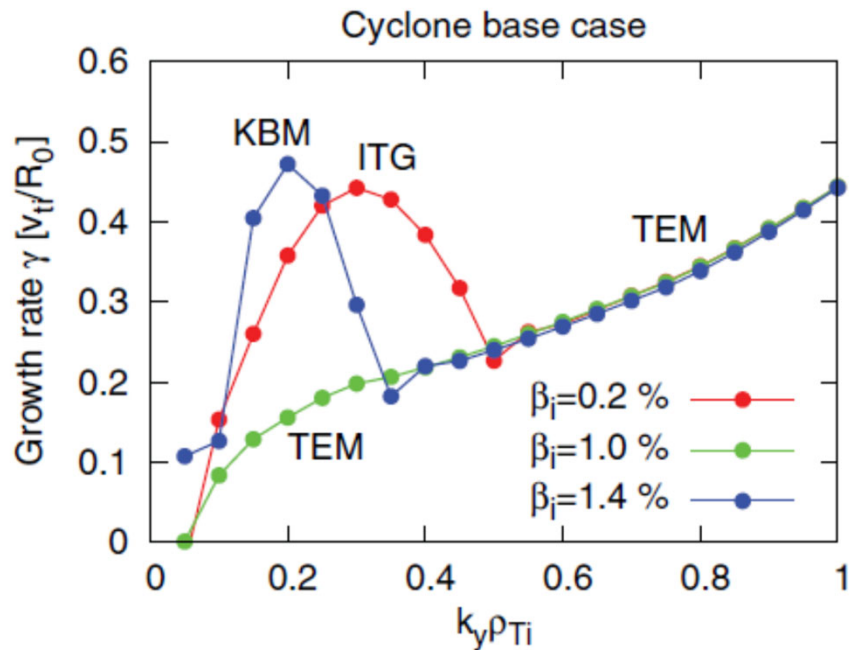


不安定性の揺動分布 (ITG mode)

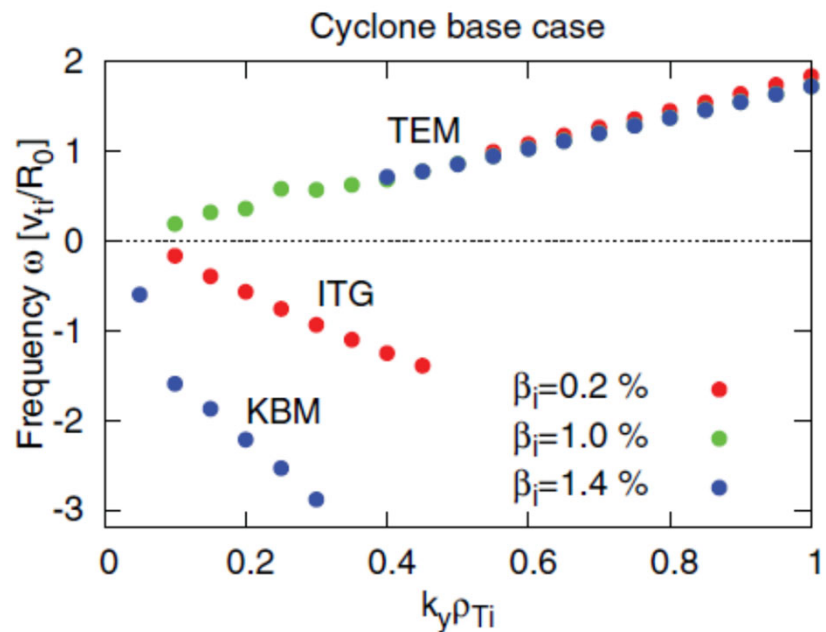


線形計算結果

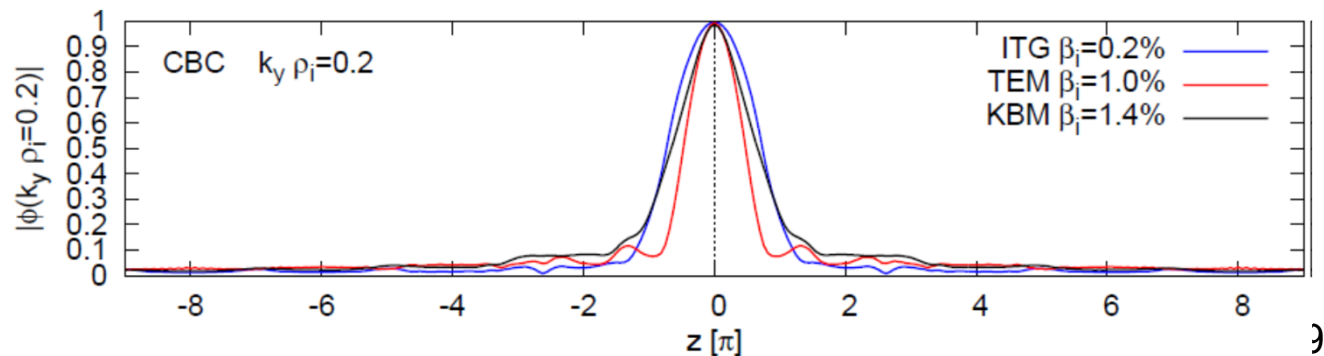
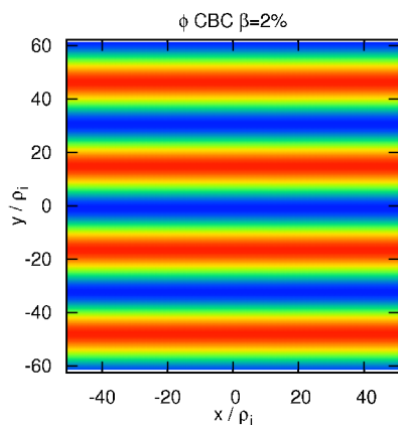
線形成長率



実周波数

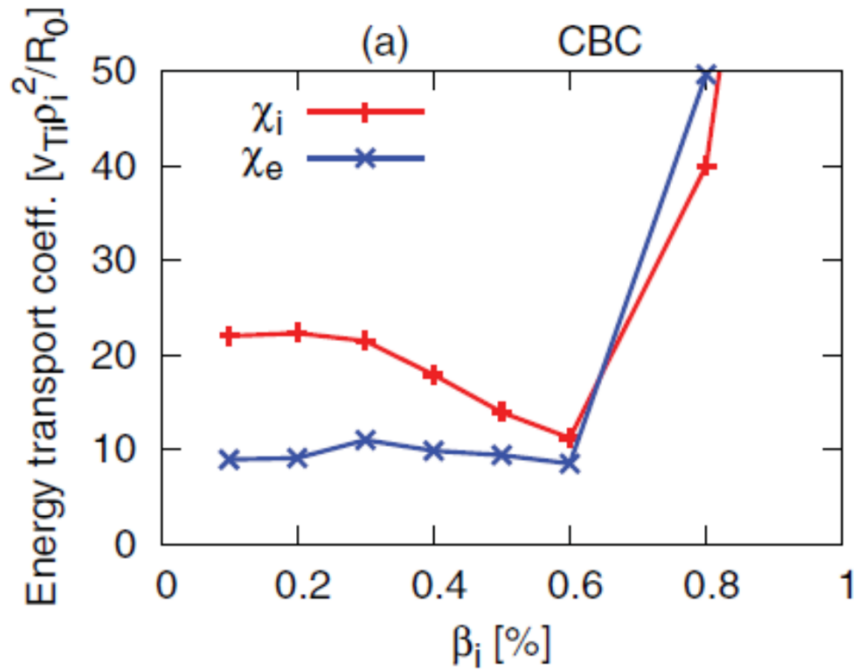


固有関数分布

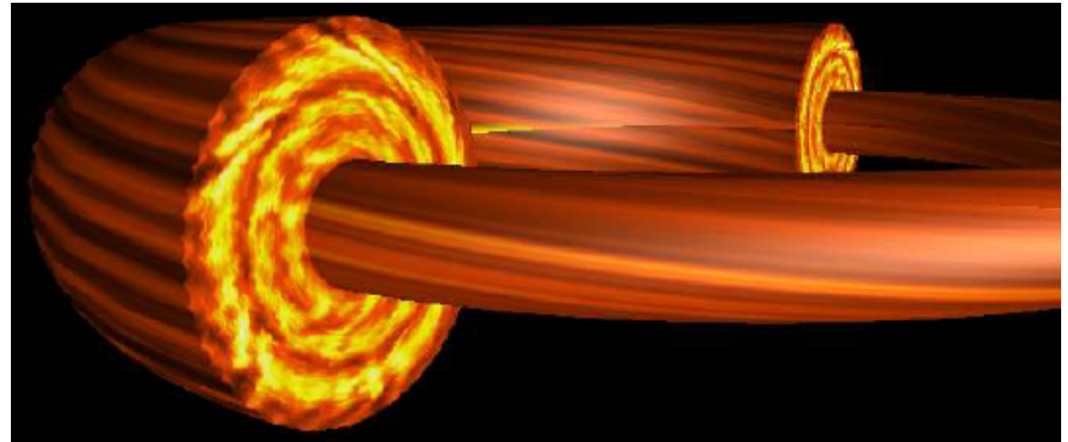


非線形計算結果

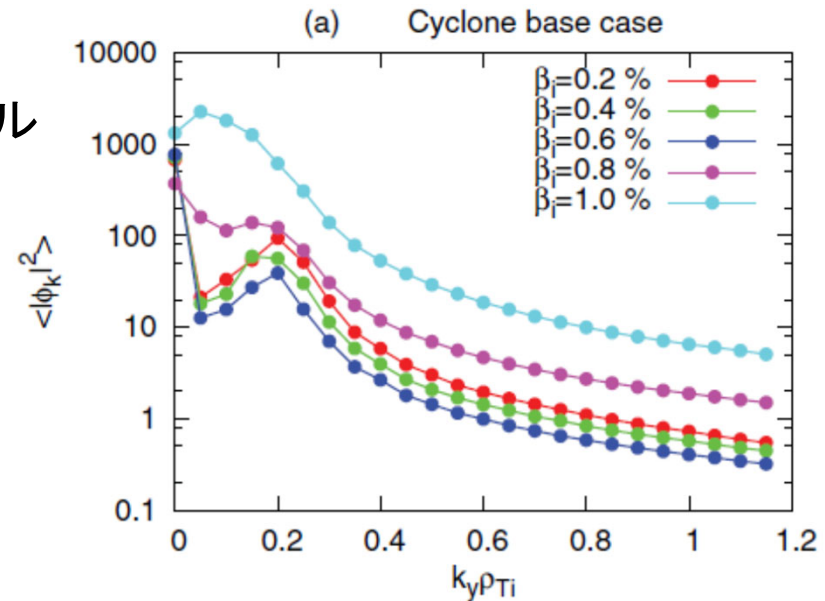
輸送係数



静電ポテンシャル揺動 ϕ



スペクトル



おわりに

- 皆さんの研究に是非GKVコードをご活用ください
- 今後継続的にメンテナンス/バージョンアップ予定
- GKVホームページ(過去の講習会資料もこちらから)
 - <http://www.p.phys.nagoya-u.ac.jp/gkv/>
- 最新ソースコードはGitHubリポジトリからもダウンロードできます
 - <https://github.com/GKV-developers/gkvp>
- 利用上の注意
 - コードの著作権は開発者に帰属します
 - 非営利研究には自由に使ってください
 - 結果の正しさは必ずしも保証しません
 - 配布されたコードから変更を加えて実行した結果を公表する場合は、変更点を論文などに明記してください
 - GKVを使用した論文では、以下の文献を引用してください
 - Watanabe, T-H., and H. Sugama. “Velocity-space structures of distribution function in toroidal ion temperature gradient turbulence.” *Nuclear Fusion*46.1 (2006): 24.
- この概要の詳細
 - A. Ishizawa, et.al., *Journal of Plasma Physics*, 81, 435810203 (2015)