捕捉電子モードと電子温度勾配駆動モードの競合過程に関するジャイロ運動論的シミュレーション研究

朝比祐一[1]，　石澤明宏[2]，　渡邉智彦[3]，　洲鎌英雄[2], 筒井広明[1]，　飯尾俊二[1]

東京工業大学[1]，　核融合科学研究所[2]，　名古屋大学[3]

Outline

研究背景と手法

- 電子温度勾配乱流について
- 研究手法

ETG乱流に対する捕捉電子モードの影響

- 非線形計算による輸送の評価
- 非線形相互作用の解析
- ゾーナルフローの残留レベル

結論

- 結論および今後の課題

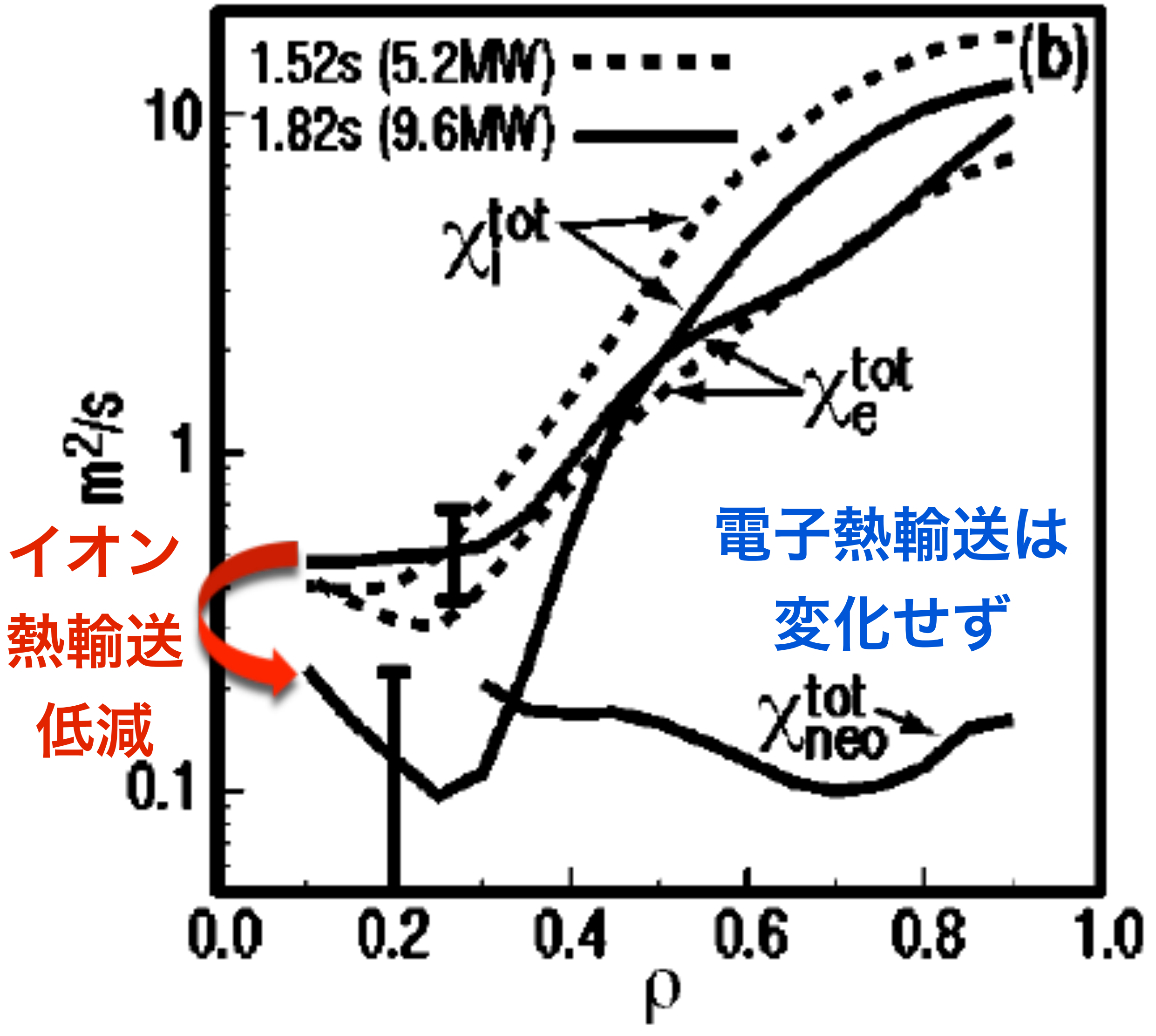
電子温度勾配乱流

- 異常電子熱輸送
  - 理論予測を大きく上回る電子のエネルギー輸送
  - イオンの閉じ込めが改善している場合にも**電子の閉じ込めは改善しない**場合が存在
  - イオンスケールの乱流だけでは説明できない

⇩

電子スケールの乱流

(電子温度勾配駆動乱流)

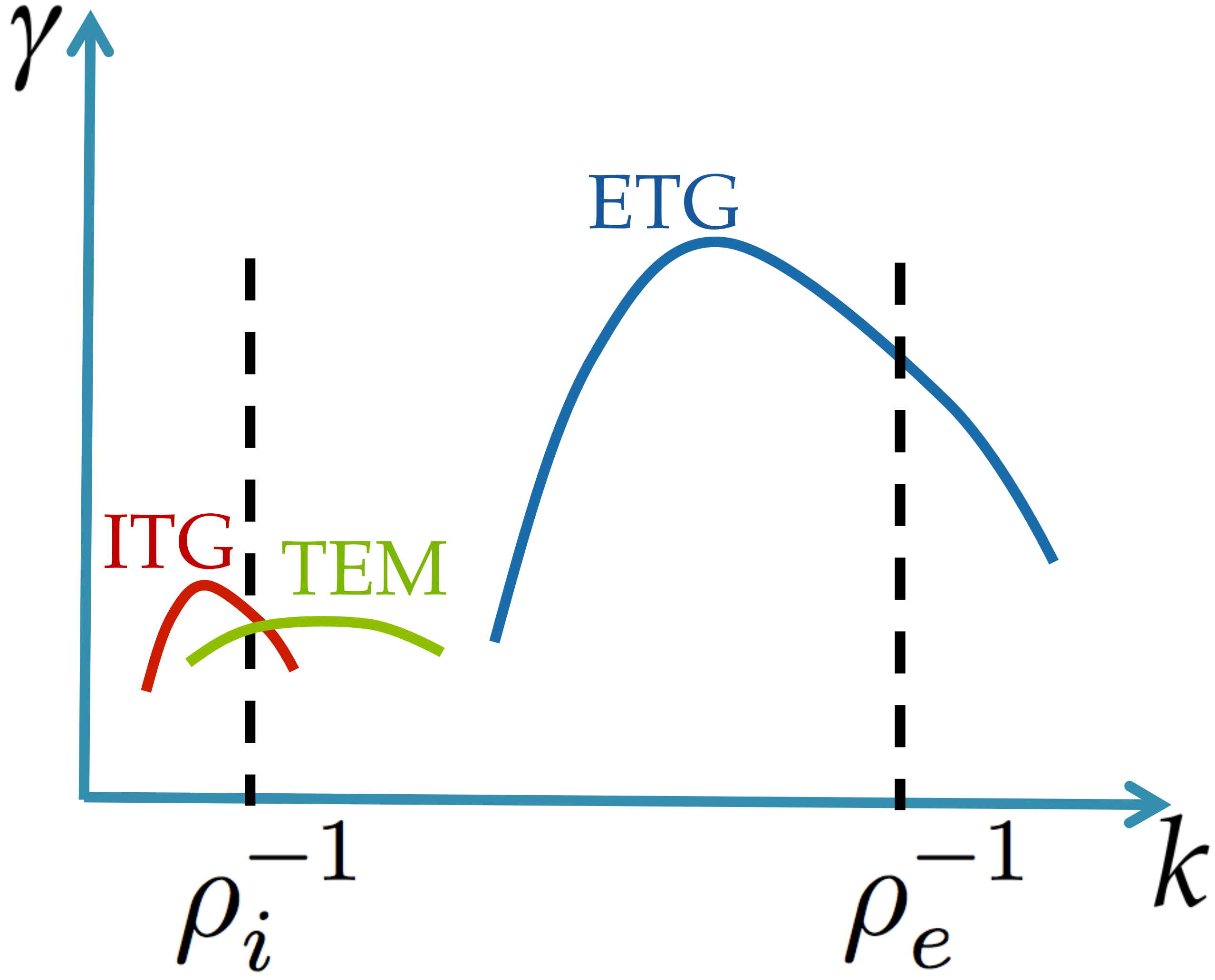


DIIIDにおける内部輸送障壁

B. W. Stallard et al, Phys. Plasmas. 6, 1978 (1999)

プラズマ乱流の駆動源

ドリフト波不安定性の線形成長率 (概念図)



・プラズマ内には異なる駆動源、時空間スケールを持つ不安定性が**同時に**存在

・従来のシミュレーションでは計算コストの問題で理想的な極限で別々に扱われてきたが・・・

<u>イオンスケール</u>

ITG
イオン温度勾配駆動モード

TEM
捕捉電子モード

<u>電子スケール</u>

ETG
電子温度勾配駆動モード

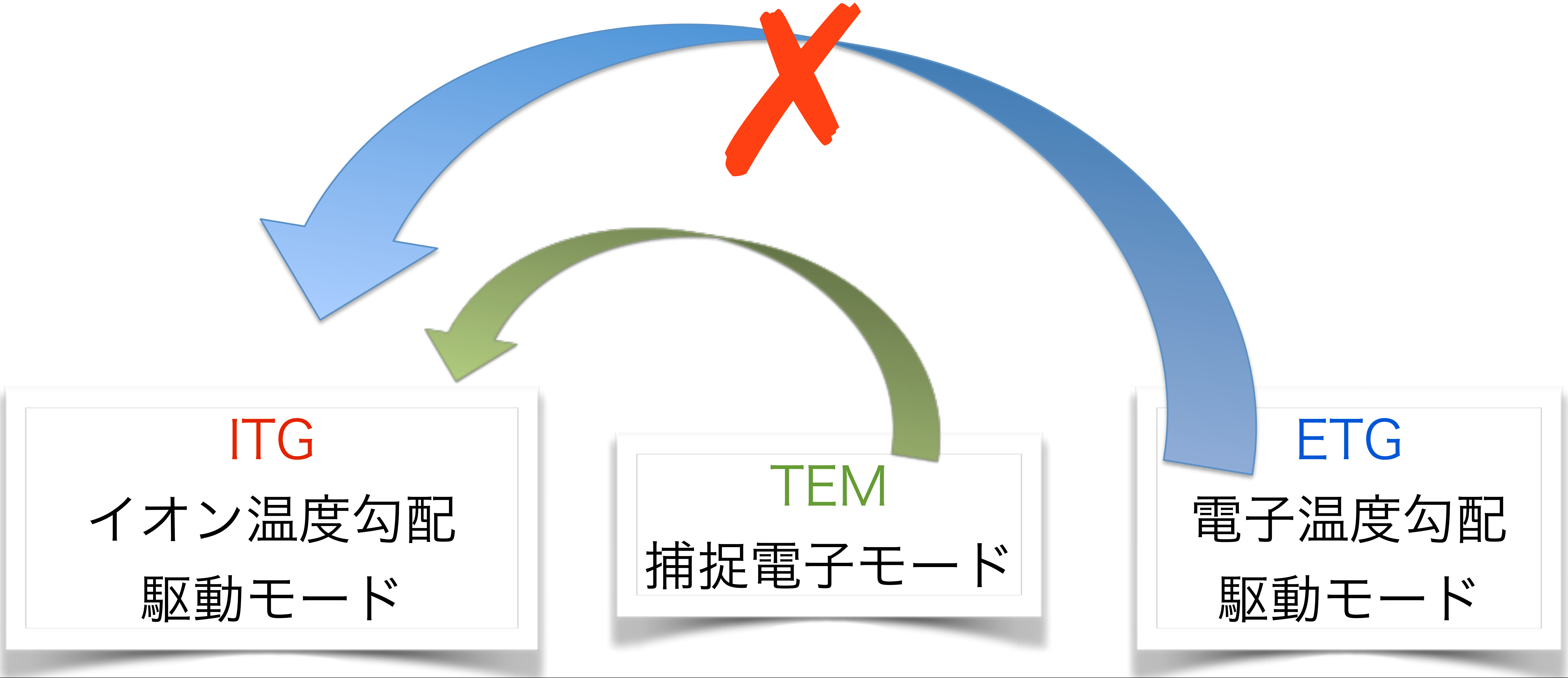
マルチスケールシミュレーション

イオン輸送に関するマルチスケールシミュレーション

イオンの熱輸送におけるTEM、ETGなどの影響

Candy et al. (2007)、 Waltz et al. (2007) Gorler et al. (2008)

- ETGなどの微小な構造はイオン熱輸送には影響を及ぼさない
- スケールの近いTEMはパラメータによっては重大な影響



マルチスケールシミュレーション

電子輸送に関するマルチスケールシミュレーション

電子の熱輸送におけるTEM、ITGなどの影響は？？？

▶ スケールの近い**TEM**の電子輸送への影響を調べる

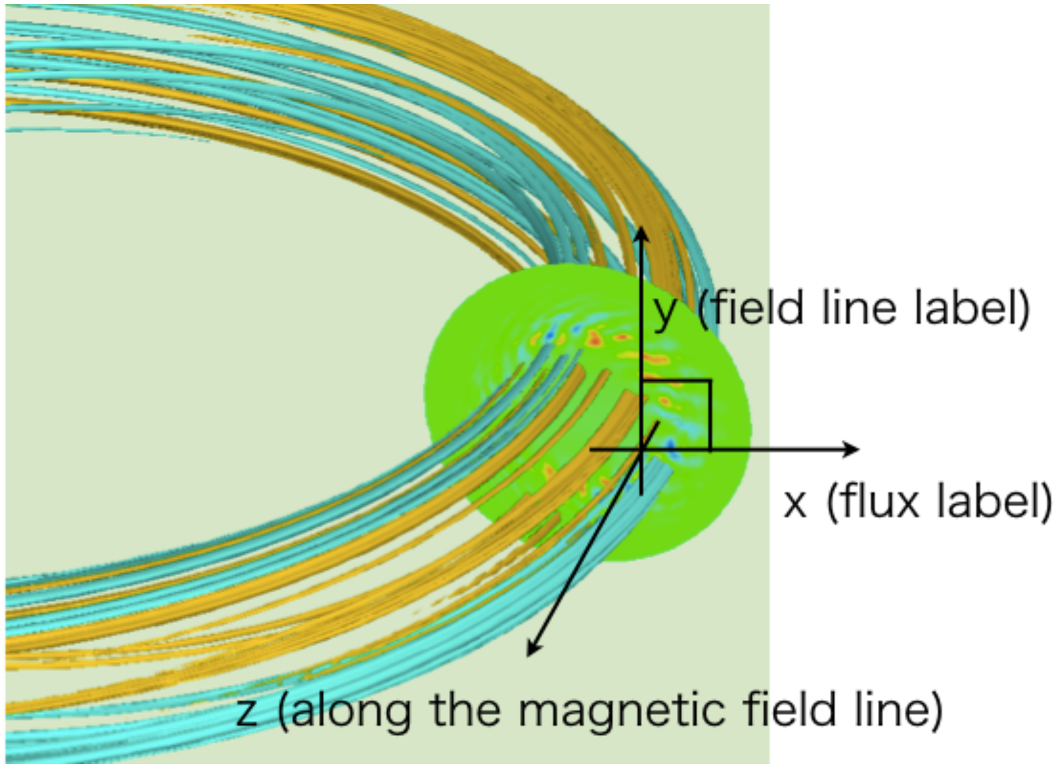
計算モデル

▶ ジャイロ運動論モデル

$$\left[\frac{\partial}{\partial t} + v_\parallel \mathbf{b}\cdot\nabla + i\omega_{Ds} - \mu\left(\mathbf{b}\cdot\nabla\Omega_s \frac{\partial}{\partial v_\parallel}\right)\right]\delta f_{s\mathbf{k}_\perp}$$
$$- \frac{c}{B_0}\sum_{\mathbf{k}_\perp = \mathbf{k}_\perp' + \mathbf{k}_\perp''} \mathbf{b}\cdot(\mathbf{k}_\perp' \times \mathbf{k}_\perp'')\,\delta\psi_{\mathbf{k}_\perp}\delta f_{s\mathbf{k}_\perp}$$
$$= F_{Ms}\left(i\omega_{*s} - i\omega_{Ds} - v_\parallel \mathbf{b}\cdot\nabla\right)\frac{e_s\delta\psi_{\mathbf{k}_\perp}}{T_s} + C_s\left(\delta f_{s\mathbf{k}_\perp}\right)$$

- 5次元位相空間において揺動の分布関数の時間発展を計算

▶ Flux tube配位



- **トロイダル効果**を反映
  (捕捉粒子、曲率ドリフト)
- バルーニング的性質を反映
  x, y方向: 急峻に変化
  z方向: 緩やかに変化

パラメータ (DIIIDにおける実験条件を模擬)

R/L	L	L	T	磁気シア	安全係数	ε	m	k	k	k	k
3.46	2	0	1	0.4	1.4	0.18	1836	0.022	1.41	0.035	2.24

研究手法

断熱的イオンモデル (ai)

イオン　**断熱近似**

電子　ジャイロ運動論

準中性条件

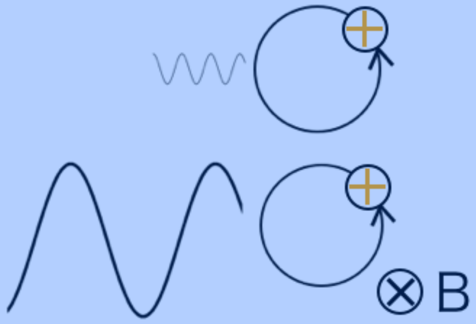
$$\delta n_i^{(p)} = -\frac{e_i n_i}{T_i}\phi$$

特徴

ETG

・**ETGの波長** … **マ半径**を仮定

波長がイオンラーマ半径程度の長波長のモードには、適用出来ない。



短波長モード　○

長波長モード　×

運動論的イオンモデル (ki)

イオン　**ジャイロ運動論**

電子　ジャイロ運動論

準中性条件

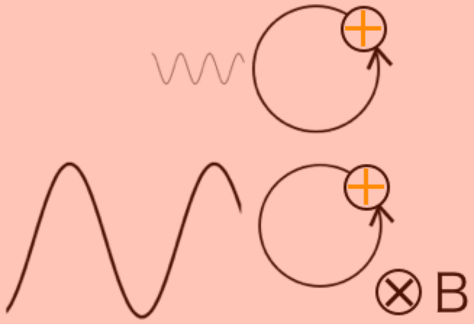
$$\delta n_i^{(p)} = -\frac{e_i n_i}{T_i}(1-\Gamma_{0i})\,\phi + \int J_{0i}\delta f_i^{(g)} d^3\boldsymbol{v}$$

特徴

ETG+TEM

・…

輸送で重要なイオンラーマ半径程度の長波長のモードにも、適用可能。



短波長モード　○

長波長モード　○

▶ GKVコードを用いたジャイロ運動論的シミュレーションにより、ETG乱流輸送における**TEM**の影響を明らかにする。

Outline

研究背景と手法

- 電子温度勾配乱流について
- 研究手法

ETG乱流に対する捕捉電子モードの影響

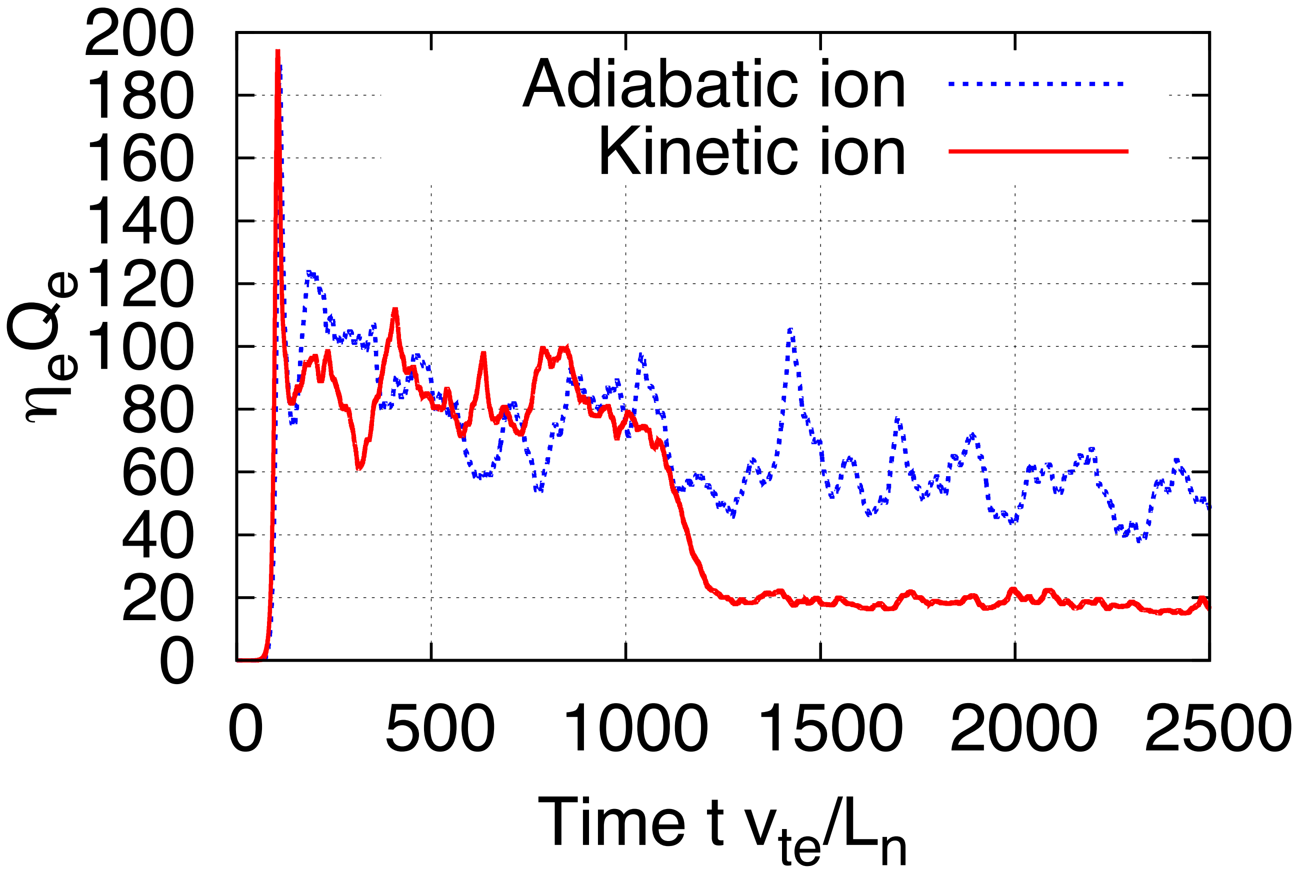
- 非線形計算による輸送の評価
- 非線形相互作用の解析
- ゾーナルフローの残留レベル

結論

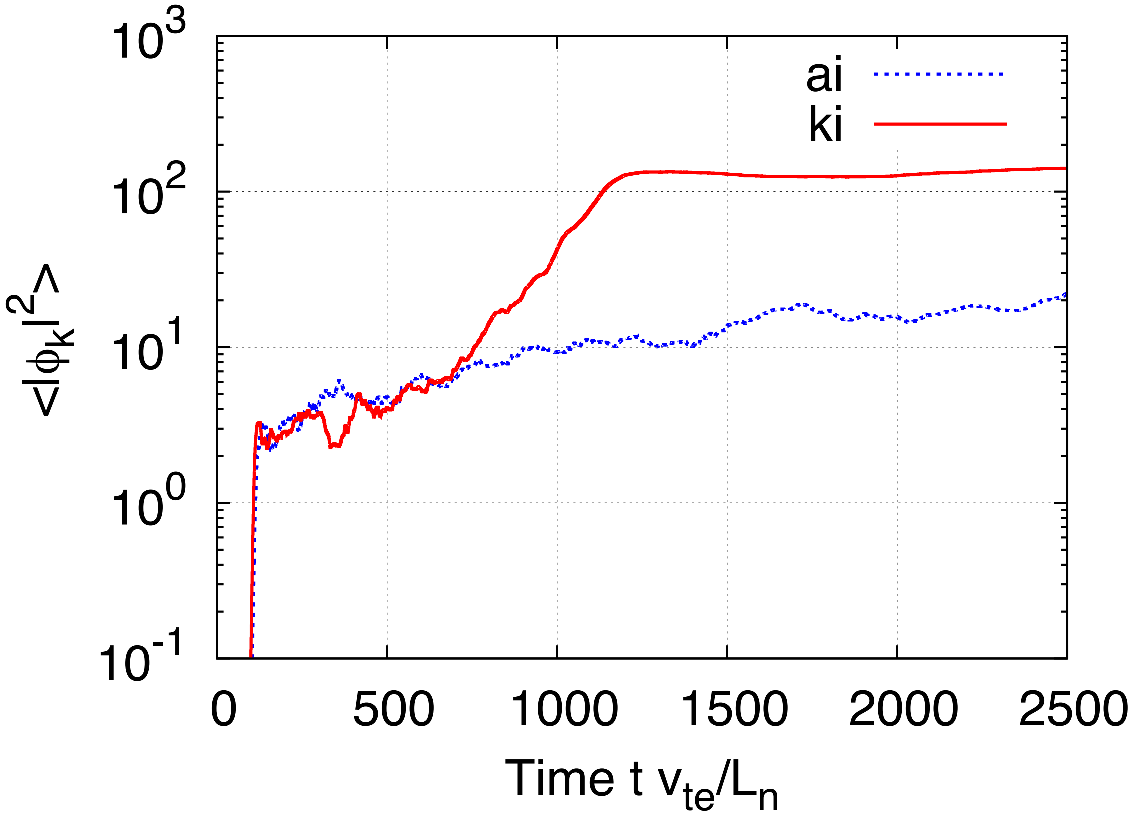
- 結論および今後の課題

捕捉電子モードが不安定化 ➡ 輸送低減

電子エネルギー束の時間発展



ゾーナルフロー振幅の時間発展



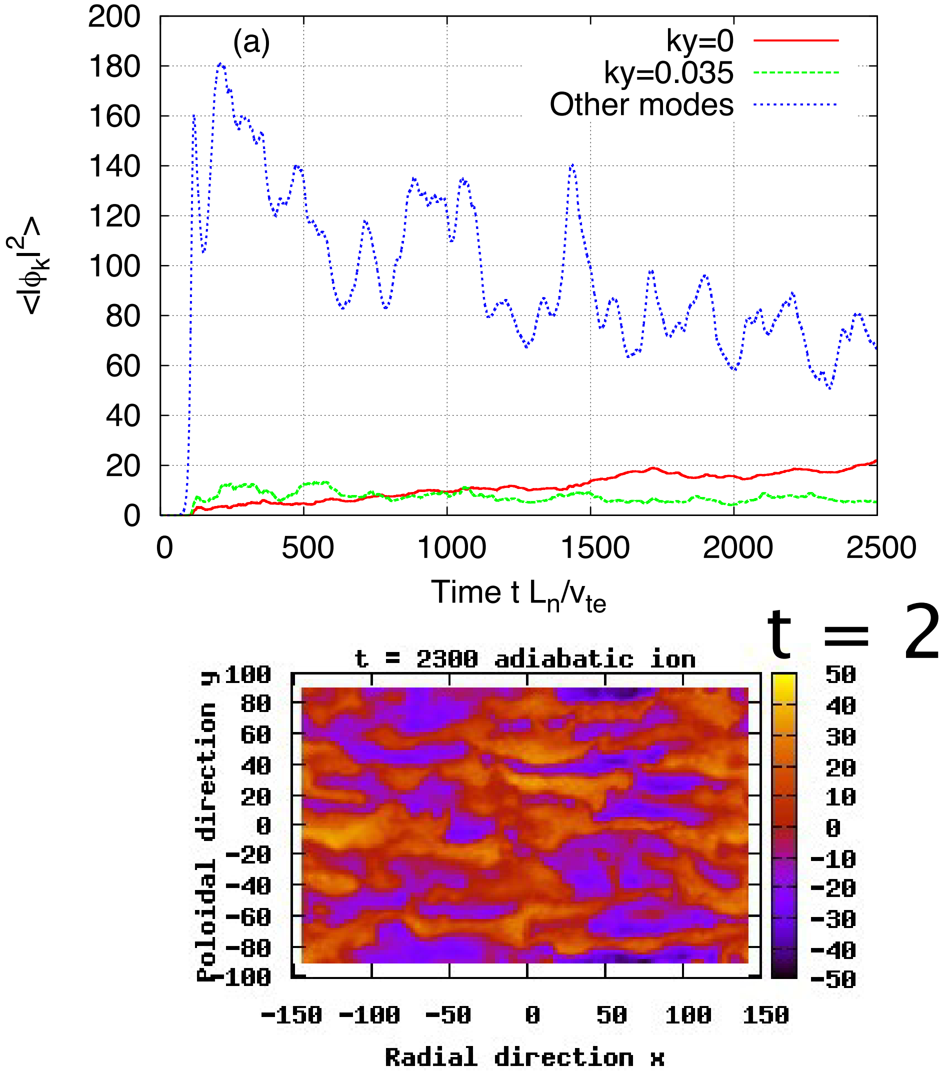
青：断熱的イオンモデル (ETG)

赤：運動論的イオンモデル (ETG + **TEM**)

- ETGの線形成長過程と飽和過程（t < 1000）は変わらない(青赤)
- TEMが緩やかに成長しゾーナルフロー駆動、その後輸送低減（**赤**）

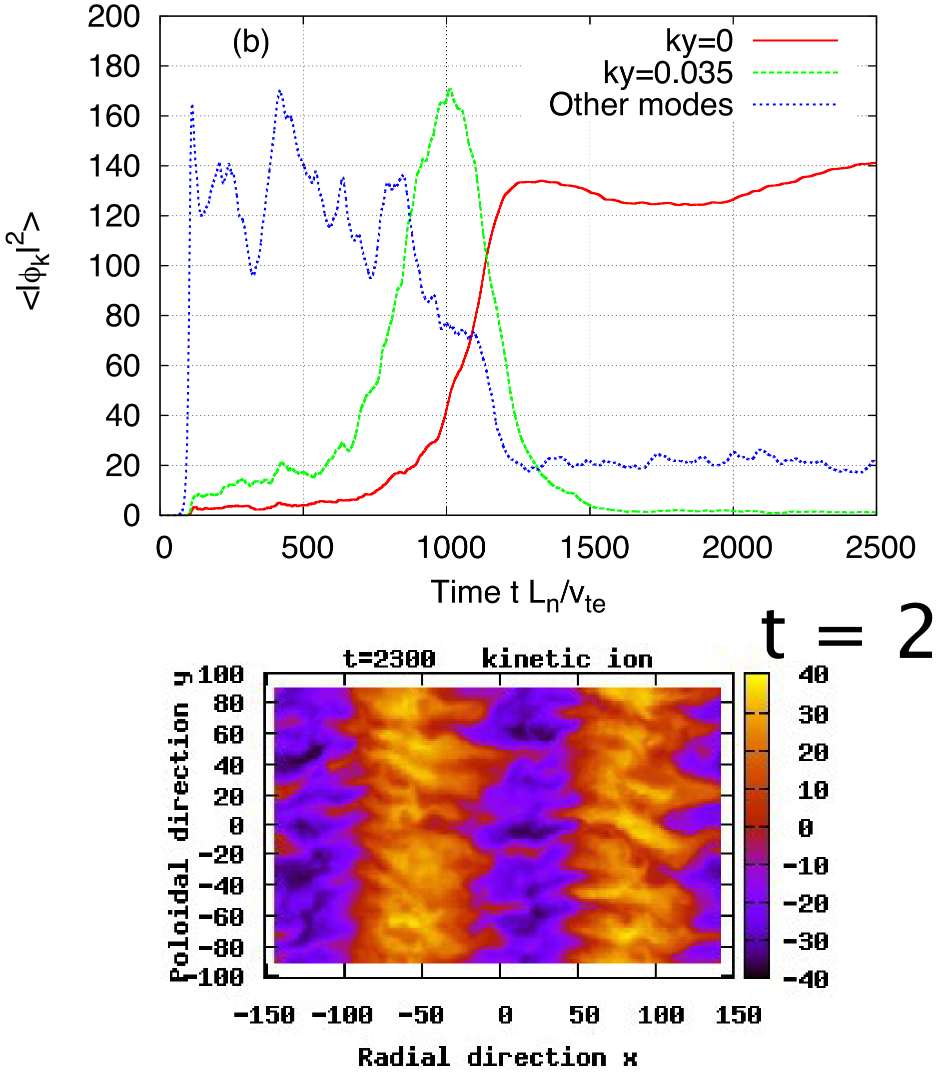
運動論的イオンモデルではTEMが線形成長

断熱的イオンモデル



t = 2300

運動論的イオンモデル



t = 2300

▶ **運動論的イオンモデル**では、線形不安定な**捕捉電子モード**が指数的に成長し、それに伴って**ゾーナルフロー**が卓越

非線形相互作用の可視化

Entropy Balance Eq. (保存量)

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\sum_s T_s S_{s\mathbf{k}_\perp}\right) = \boxed{\sum_s T_s \mathcal{T}_{s\mathbf{k}_\perp}} + \frac{1}{4\pi}\left(k_\perp^2 + \sum_s \frac{1}{\lambda_{Ds}^2}\right)\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{dt}}W_{\mathbf{k}_\perp}$$
$$+ \sum_s \frac{1}{L_{ns}} T_s \Gamma_{s\mathbf{k}_\perp} + \sum_s \frac{1}{L_{Ts}}\left(Q_{s\mathbf{k}_\perp} - \frac{3}{2}T_s\Gamma_{s\mathbf{k}_\perp}\right) + \sum_s T_s \mathcal{D}_{s\mathbf{k}_\perp}$$

Entropy Transfer Function (Nakata et al.)

$$\mathcal{T}_{s\mathbf{k}_\perp} = \sum_{\mathbf{p}_\perp}\sum_{\mathbf{q}_\perp} \mathcal{J}_s\left[\mathbf{k}_\perp|\mathbf{p}_\perp, \mathbf{q}_\perp\right]$$

$$\mathcal{J}_s\left[\mathbf{k}_\perp|\mathbf{p}_\perp, \mathbf{q}_\perp\right] \equiv \delta_{\mathbf{k}_\perp+\mathbf{p}_\perp+\mathbf{q}_\perp,0}\langle \frac{c}{B_0}\mathbf{b}\cdot(\mathbf{p}_\perp \times \mathbf{q}_\perp)\int d\mathbf{v}\frac{1}{2F_{Ms}}$$
$$\times \ \mathrm{Re}\left[\delta\psi_{\mathbf{p}_\perp} h_{s\mathbf{q}_\perp} h_{s\mathbf{k}_\perp} - \delta\psi_{\mathbf{q}_\perp} h_{s\mathbf{p}_\perp} h_{s\mathbf{k}_\perp}\right]\rangle$$

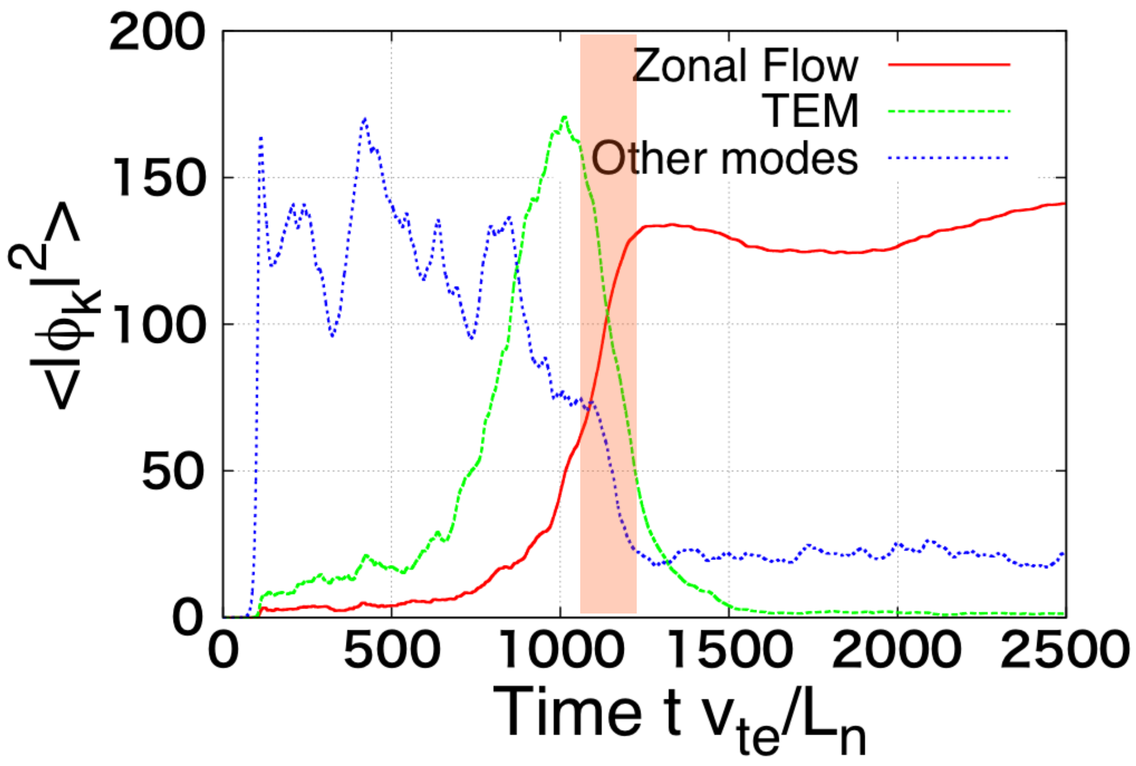
非線形相互作用によるEntropyの伝達に対応

異なるモード間の**非線形相互作用を可視化**

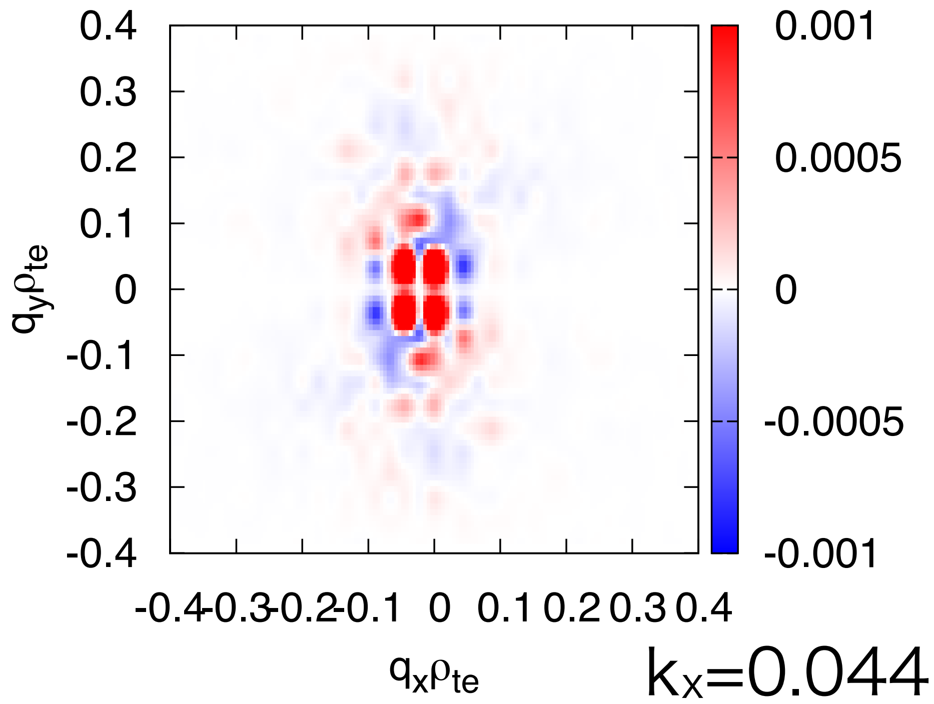
➡ TEMによるZFの形成、ZFのETGへの影響

捕捉電子モードによるゾーナルフロー駆動

ポテンシャルの各成分の時間発展



ゾーナル成分の伝達関数



$$\mathcal{J}_e\left[\mathbf{k_{ZF}}\middle|\mathbf{p}_\perp,\mathbf{q}_\perp\right]$$

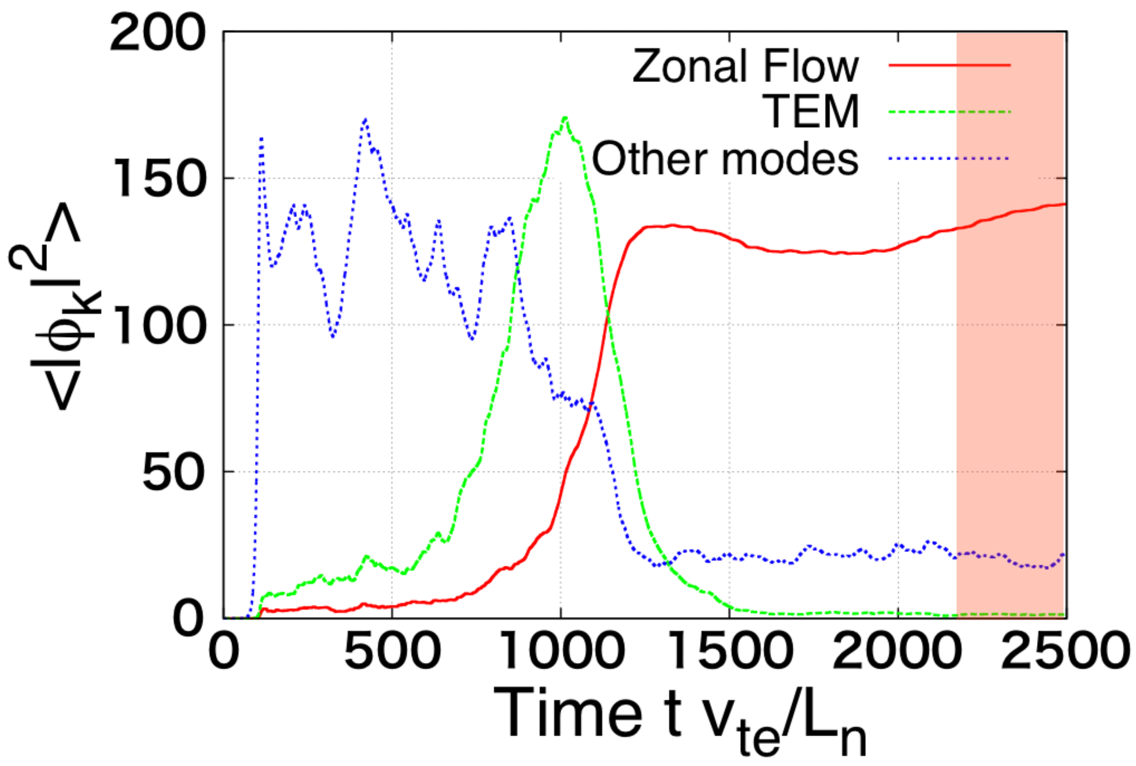
$\mathcal{J}_e\left[\mathbf{k_{ZF}}\middle|\mathbf{p}_\perp,\mathbf{q}_\perp\right] > 0$： 乱流➡ゾーナルフロー

▶ ゾーナルフロー (k_x=0.044, k_y = 0)は、捕捉電子モード(q_x=0, q_y = 0.035)からエントロピーを受け取っている。

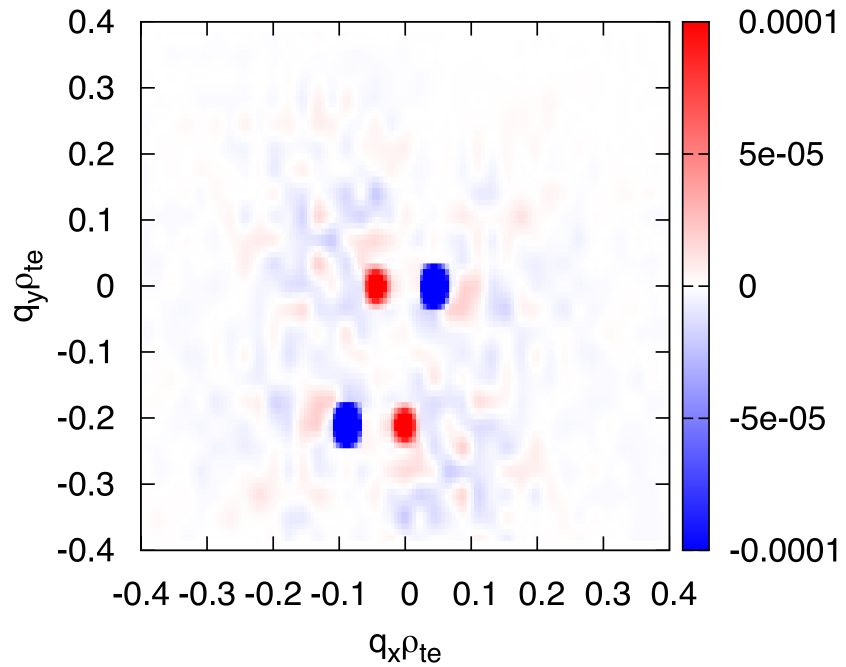
➡ ゾーナルフローは**捕捉電子モード**によって駆動されている

ゾーナルフローによるETG乱流の抑制

ポテンシャルの各成分の時間発展



ETG(p_x=0.044, p_y = 0.21)の伝達関数



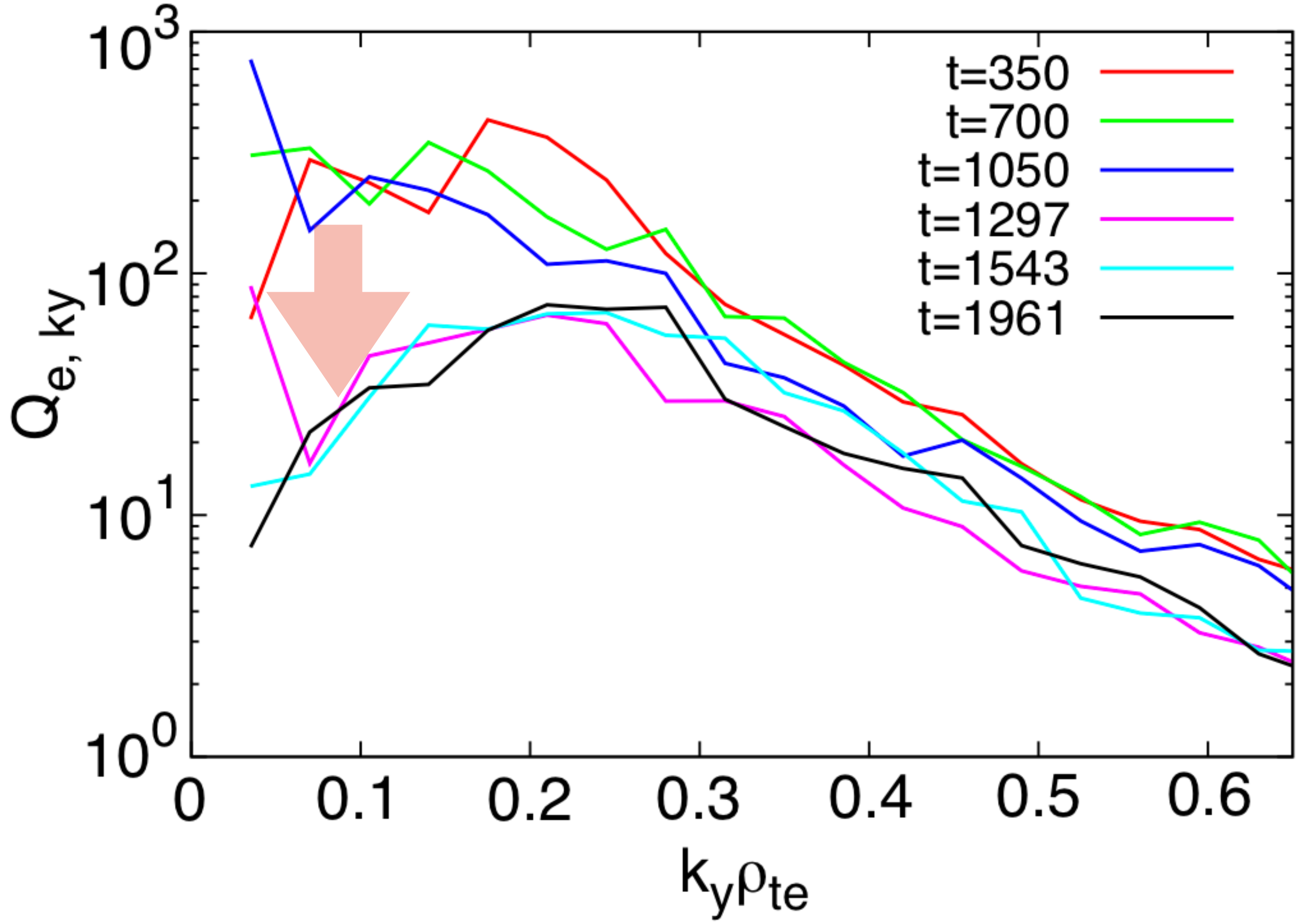
$$\mathcal{J}_e\left[\mathbf{p}_\perp|\mathbf{q}_\perp,\mathbf{k}_\perp\right]$$

$\mathcal{J}_e\left[\mathbf{p}_\perp|\mathbf{q}_\perp,\mathbf{k}_\perp\right] > 0$ ：（ $\mathbf{p}_\perp$がエントロピーを**貰う**）

▶ $\mathbf{p}_\perp = (0.044, 0.21)$のモードが、$\mathbf{q}_\perp = (0, 0.21)$ のモードからエントロピーを受け取り、$\mathbf{q}_\perp = (0.088, 0.21)$ のモードにエントロピーを渡している。

➡ ZFを介し、**低kxから高kx**モードへのエントロピー移送

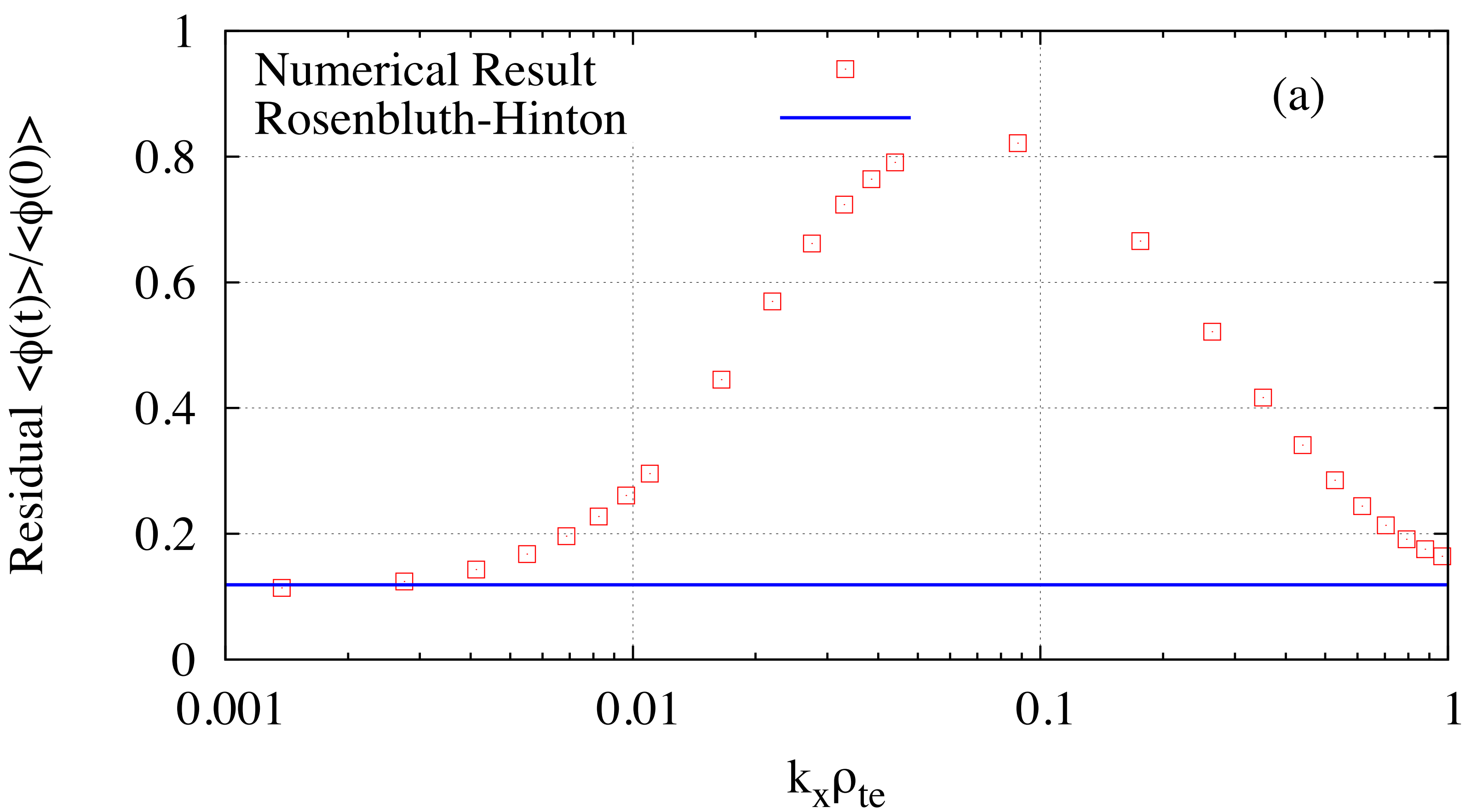
ゾーナルフローによる熱フラックスの低減



- ▶ TEMによるゾーナルフローの生成後 (t>1300)、$k_y\rho_{te} \leq 0.1$ のTEM-ETG領域において輸送フラックスが低減
- ▶ **ZFを介して**、異なるスケールのモード(TEM、ETG)間の相互作用

TEM駆動ZFが卓越する訳

ゾーナルフローの残りやすさはその波数によって変化する



- ▶ ETGは、高波数のゾーナルフローを駆動
  - ➡ 捕捉電子の運動によって遮蔽を受けやすい
- ▶ **TEM**は、より低波数のゾーナルフローを駆動
  - ➡ 捕捉電子、イオンどちらからも**遮蔽を受けにくい**

結論

TEM-ETG乱流のジャイロ運動論的シミュレーション

TEMの役割	エントロピー移送	ゾーナルフロー残留
・TEMは短い時間スケールでのETG不安定性の成長と飽和には影響を及ぼさない ・長い時間スケールで線形成長し、**ゾーナルフローを駆動**、**輸送を低減**させる	・TEMからゾーナルフローへのエントロピー移送を確認 ・ゾーナルフローを介しETGは径方向波数の低いモードから高いモードへ引き延ばされる	・ETGに駆動される高波数のゾーナルフローは捕捉電子で遮蔽され残留しにくい ・TEMが駆動する低波数のゾーナルフローは捕捉電子から遮蔽を受けにくく**残留しやすい**

今後の課題

- 磁場配位に対する依存性（磁気シアなど）
- その他のパラメータ依存性（密度勾配、温度比など）