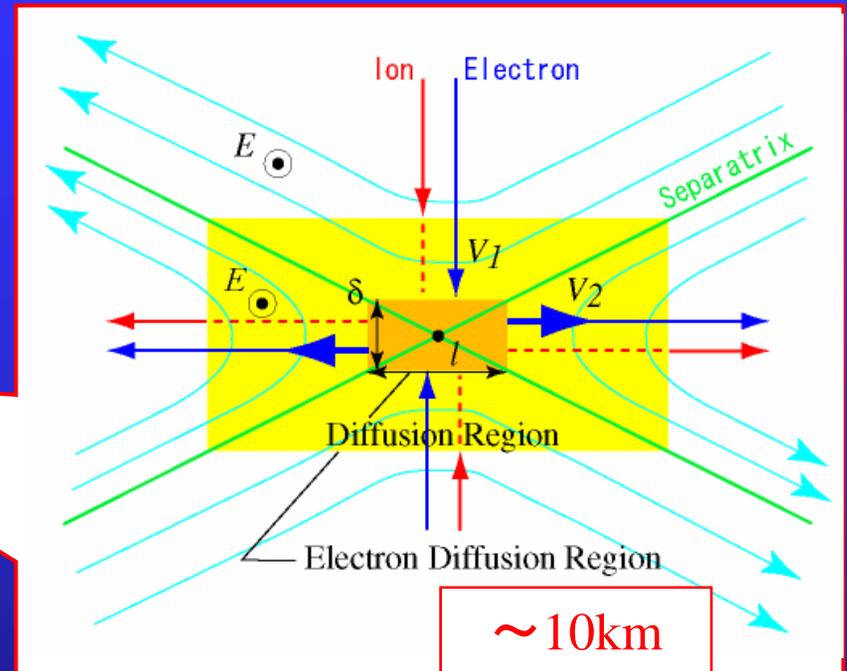
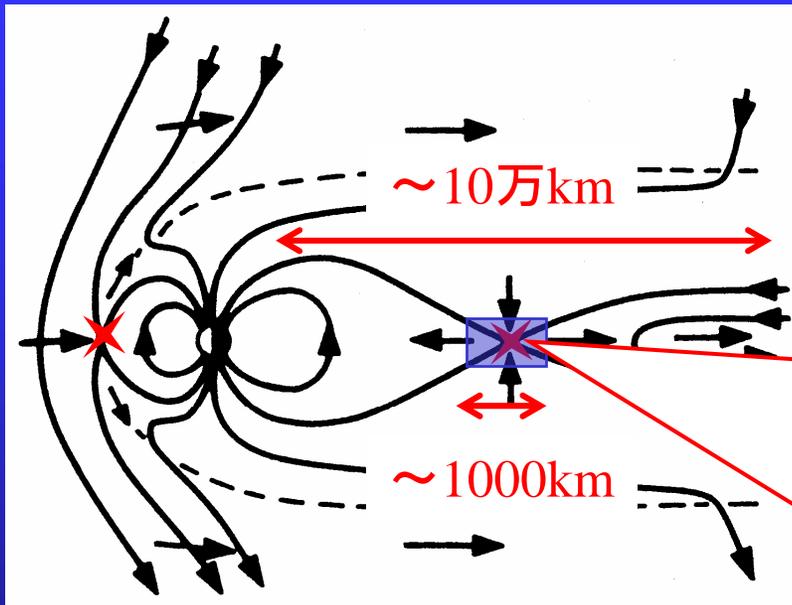


キンクした電流層における高速磁気 リコネクション

藤本 桂三

理化学研究所 計算宇宙物理研究室
(基礎科学特別研究員)

磁氣擴散領域

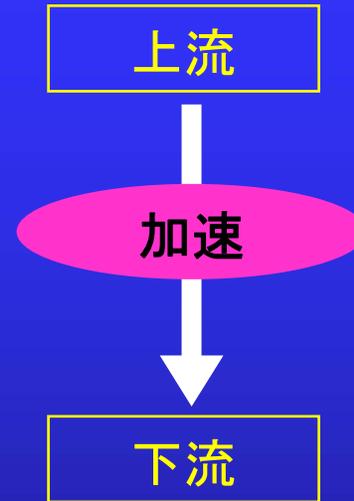
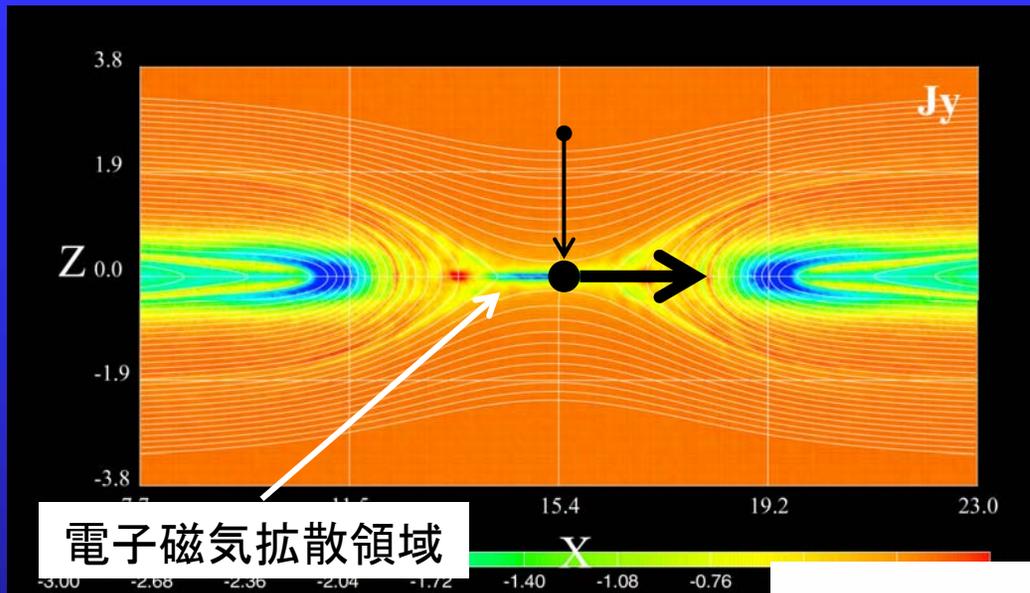


$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = \frac{\eta}{\mu_0} \nabla^2 \vec{B} \quad (\eta: \text{Resistivity}, \vec{E} \neq -\vec{V} \times \vec{B})$$

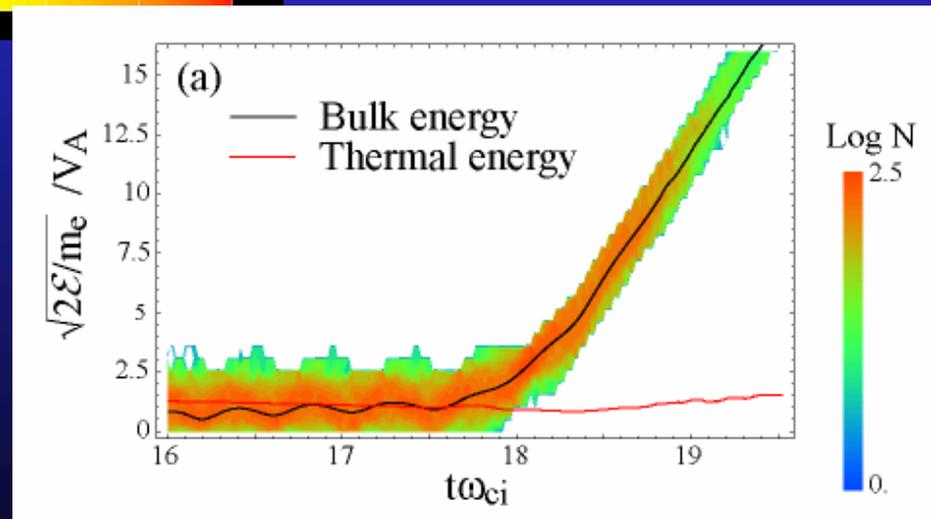
$$\vec{E} = \eta \vec{j}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{B^2}{2\mu_0} + \frac{\varepsilon_0 E^2}{2} \right) = -\vec{j} \cdot \vec{E}, \quad \vec{j} \cdot \vec{E} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{2} \rho V^2 + \frac{1}{\gamma - 1} p \right)$$

2Dリコネクション



- 電子磁気拡散領域で強く加速
- 加熱はされない



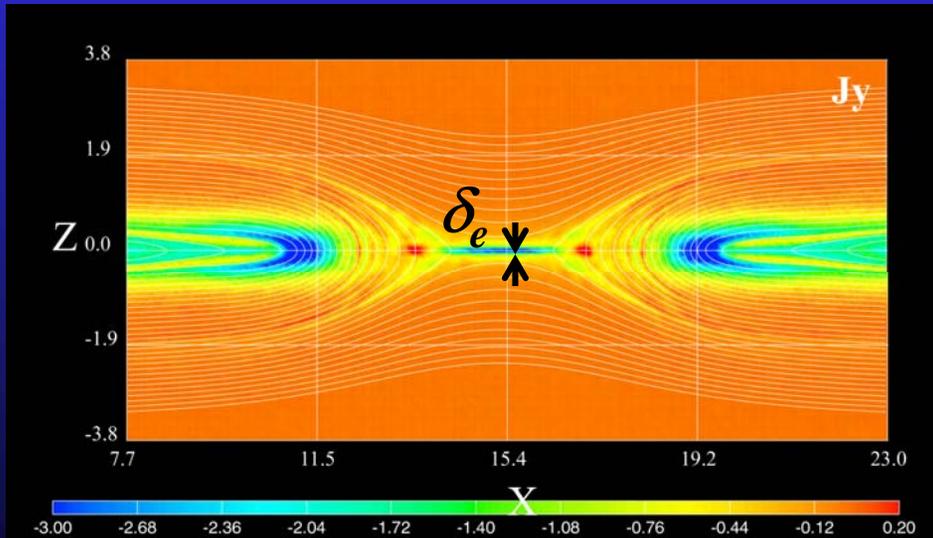
電子による慣性抵抗

[Speiser, 1970; Tanaka, 1995]

$$\eta_{in} = \frac{m_e \nu}{n_e e^2}, \quad \nu = \frac{1}{\tau_{tr}}$$

$$E_R = \eta_{in} j \approx \frac{m_e V_{ey}}{e \tau_{tr}}$$

- 短時間に加速
- 強く加速



$$\delta_e \approx \lambda_e (= c/\omega_{pe})$$

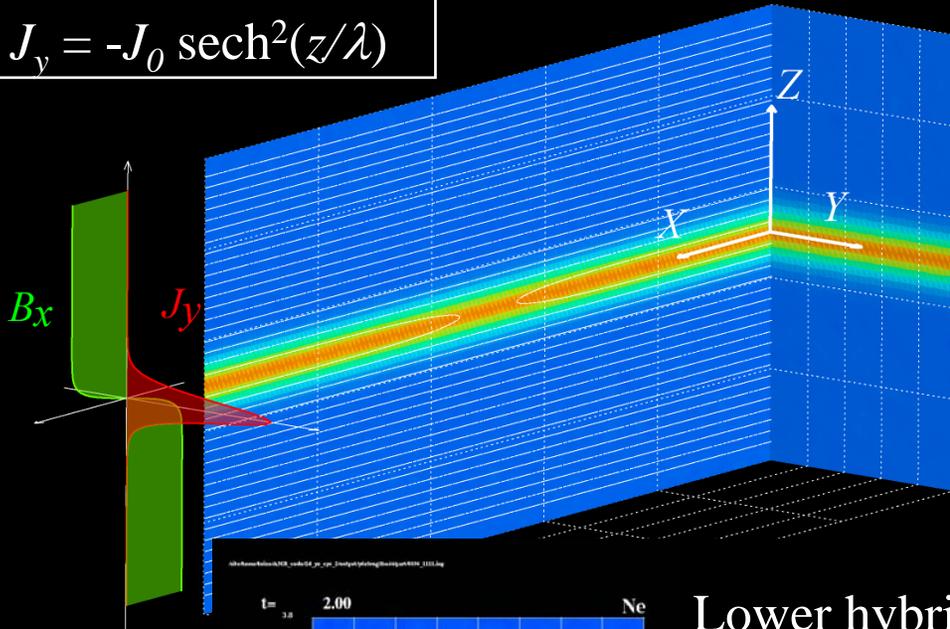
磁気圏尾部: $\sim 10\text{km}$ ($\Leftrightarrow 10^5\text{km}$)

太陽フレア: $\sim 10^{-5}\text{km}$ ($\Leftrightarrow 10^4\text{km}$)

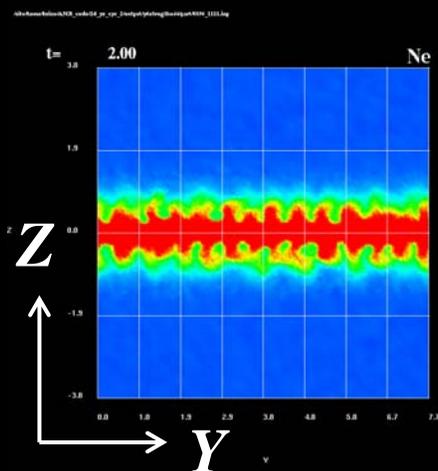
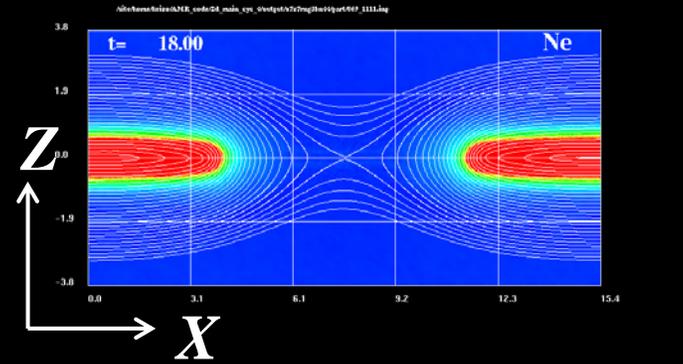
ハリス電流層における不安定モード

$$B_x = -B_0 \tanh(z/\lambda)$$

$$J_y = -J_0 \operatorname{sech}^2(z/\lambda)$$



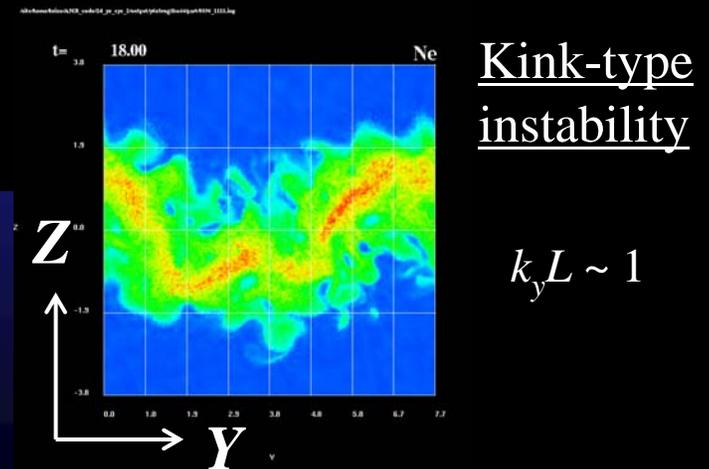
Tearing instability



Lower hybrid drift instability (LHDI)

$$k_y r_{Le} \sim 1$$

$$\gamma \sim \omega_{lh}$$

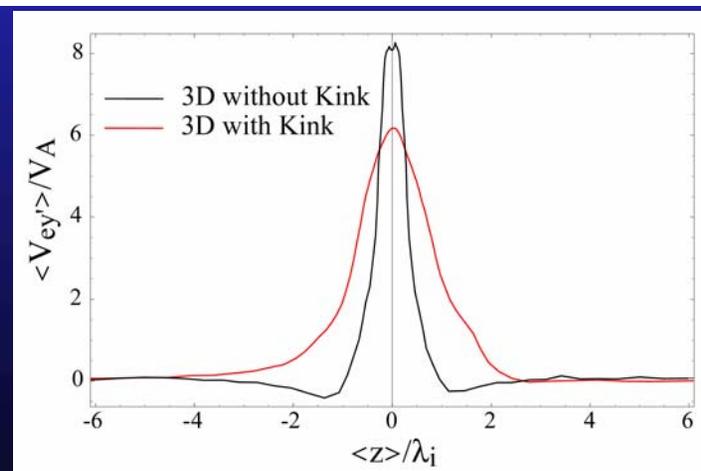
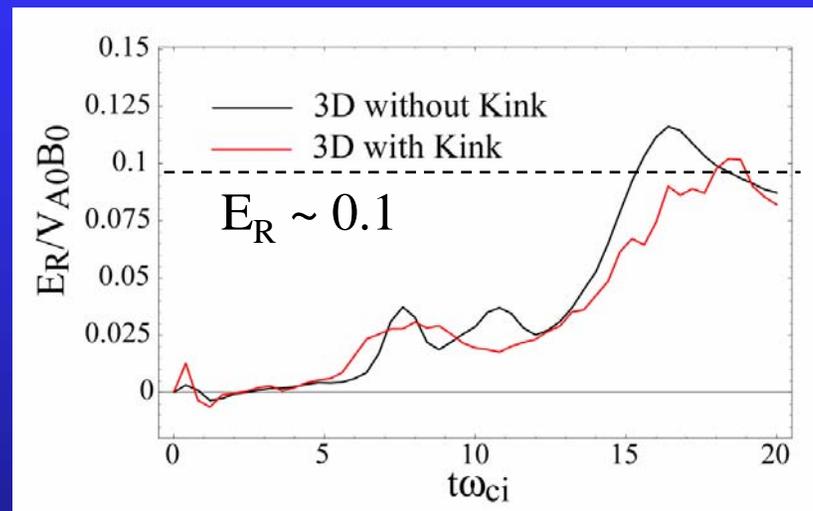
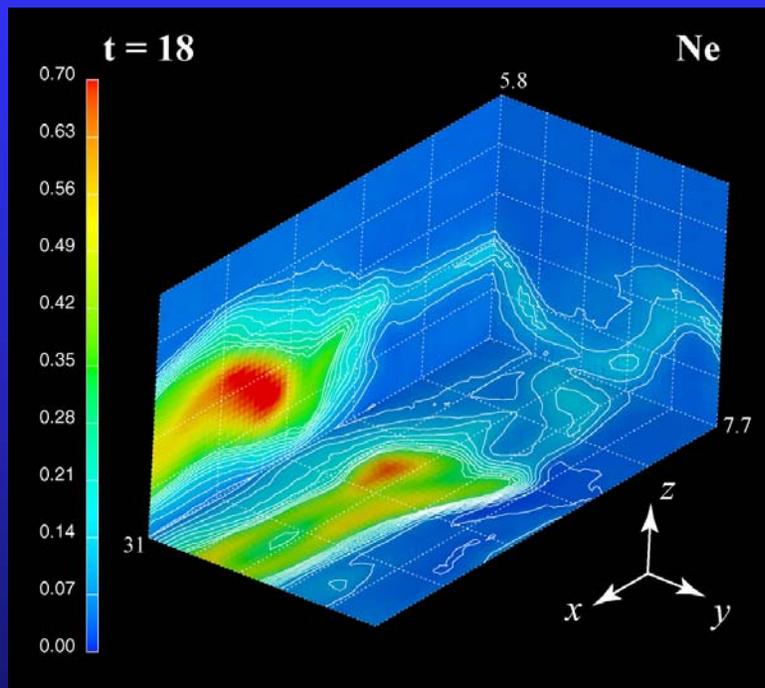


Kink-type instability

$$k_y L \sim 1$$

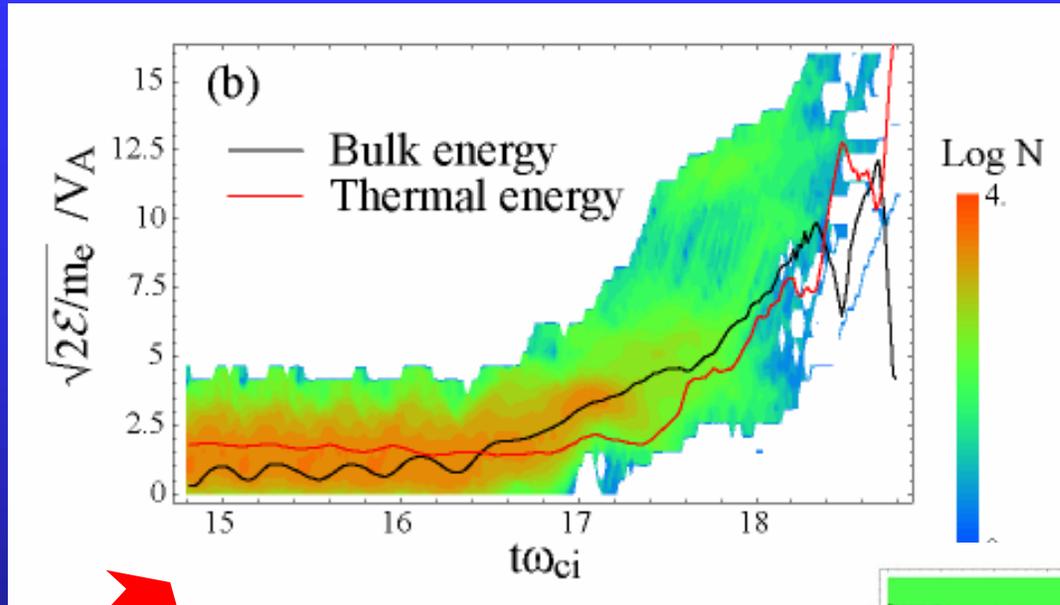
3Dリコネクション

➤ $m_i/m_e = 25$, $l_x \times l_y \times l_z = 31 \times 7.7 \times 31$

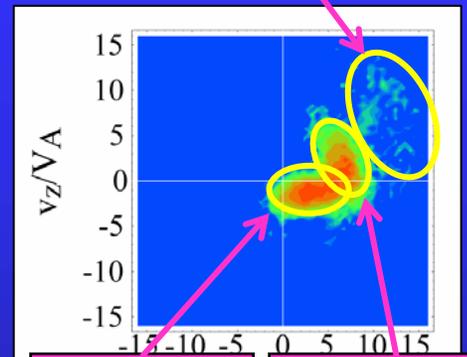


$$\frac{E_{R,kink}}{E_{R,nokink}} \propto \left(\frac{V_{e,kink}}{V_{e,nokink}} \right)^2 \approx 0.56$$

3Dリコネクション

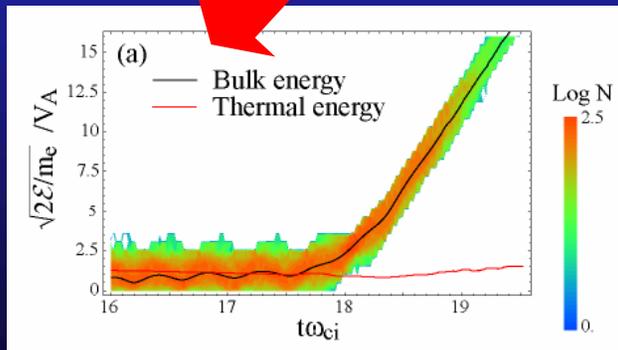


Scattering

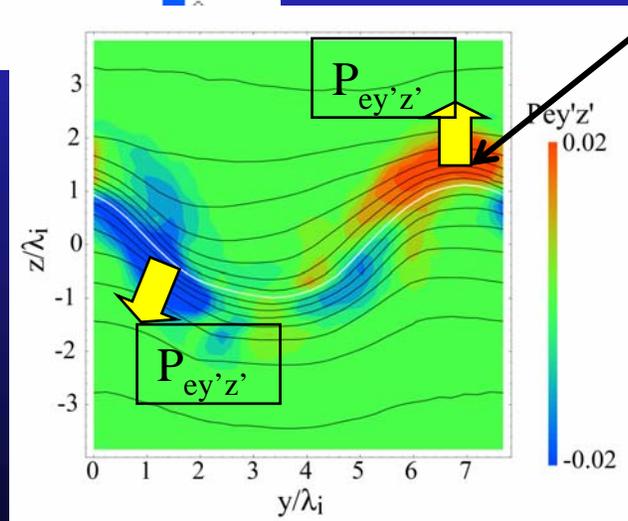


Inflow

Outflow



(2Dリコネクション)



3Dリコネクション

$$E_y = (\eta_{in} + \eta_{an}) j$$

慣性抵抗 異常抵抗

$$\eta_{in} = \frac{m_e}{n_e e^2} \frac{1}{\tau_{tr}} \approx \frac{m_e}{n_e e^2} \frac{V_{inflow}}{\delta_e}, \quad j \approx -\frac{1}{\mu_0} \frac{B_{inflow}}{\delta_e}$$

$$E_y \approx -\left(\frac{\lambda_e^2}{\delta_e^2} + \frac{\lambda}{\delta_e}\right) V_{inflow} B_{inflow}, \quad \lambda \equiv \frac{\eta_{an}}{\mu_0 V_{inflow}}$$

$$E_y = -V_{inflow} B_{inflow}$$

$$\delta_e \approx \frac{\lambda}{2} + \sqrt{\left(\frac{\lambda}{2}\right)^2 + \lambda_e^2} > \lambda_e \quad [\text{Vasyliunas, 1975}]$$

電流層の厚さ

電子慣性長

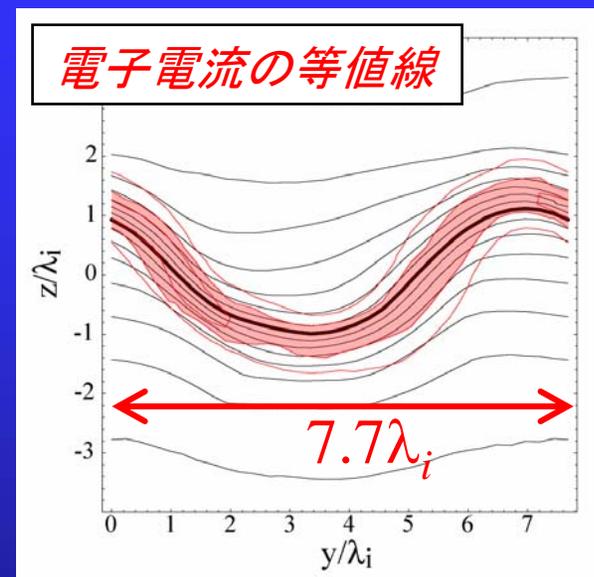
3Dリコネクション

➤ 電子のメアンダリングスケール

$$\omega \approx \frac{2V_{ey'}}{3c} \omega_{pe} \quad [\text{Speiser, 1965}]$$

$$y_m \approx 3\pi\lambda_e \left(1 + \frac{3\pi}{2} \frac{\lambda_e}{V_{ey'}\tau} \right)$$

$\approx 9\lambda_i$

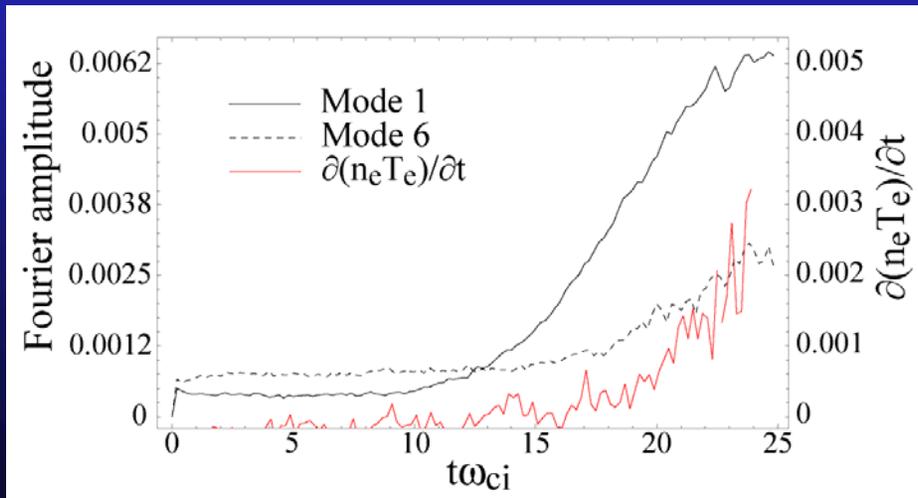
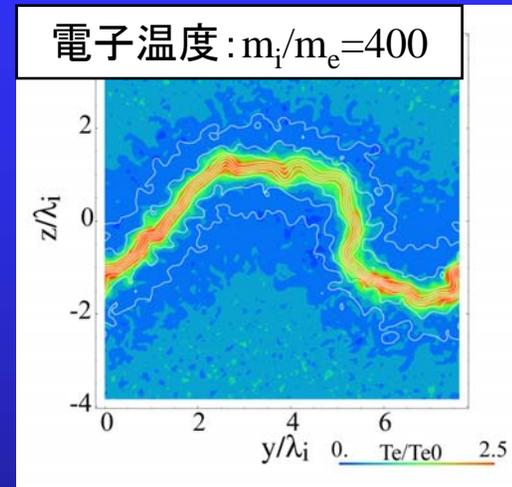
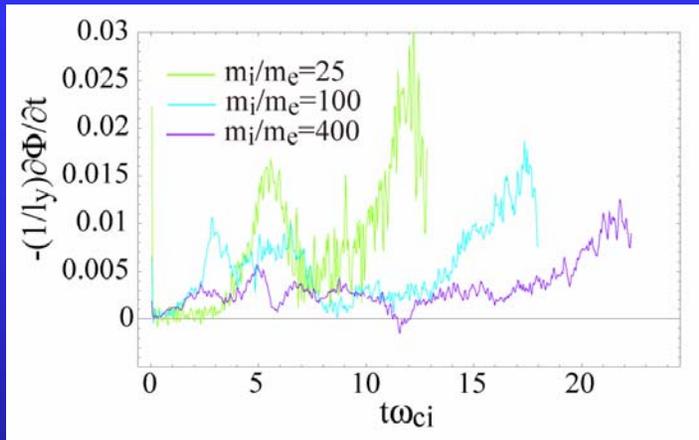


メアンダリングスケール ~ キンクモードの波長

質量比が大きい場合 ($m_i/m_e > 100$)

➤ YZ平面における2Dシミュレーション

$$y_m \approx 3\pi\lambda_e \left(1 + \frac{3\pi}{2} \frac{\lambda_e}{V_{ey}'\tau} \right)$$



Hybrid-scale kink mode

[Shinohara et al., 2001; Daughton, 2003]:

$$\lambda \sim (\lambda_i \lambda_e)^{1/2}$$



電子加熱

まとめ

大規模な3次元電磁粒子シミュレーションを実施することによって、キンクした電流層における磁気リコネクション過程を調べた。

2Dリコネクションとの共通点： リコネクション効率 ($E_R \sim 0.1$)

2Dリコネクションとの相違点： 電流層の厚さ ($\delta_e > \lambda_e$)

➡ 慣性抵抗の減衰、リコネクション効率の低下

電子加熱によって異常抵抗が発生

$$\eta = \eta_{\text{in}} + \eta_{\text{an}}$$

今後の方針・・・より大きな質量比での3Dシミュレーション、観測との比較

Ref. K. Fujimoto, *Physics of Plasmas*, **16**, 042103 (2009).