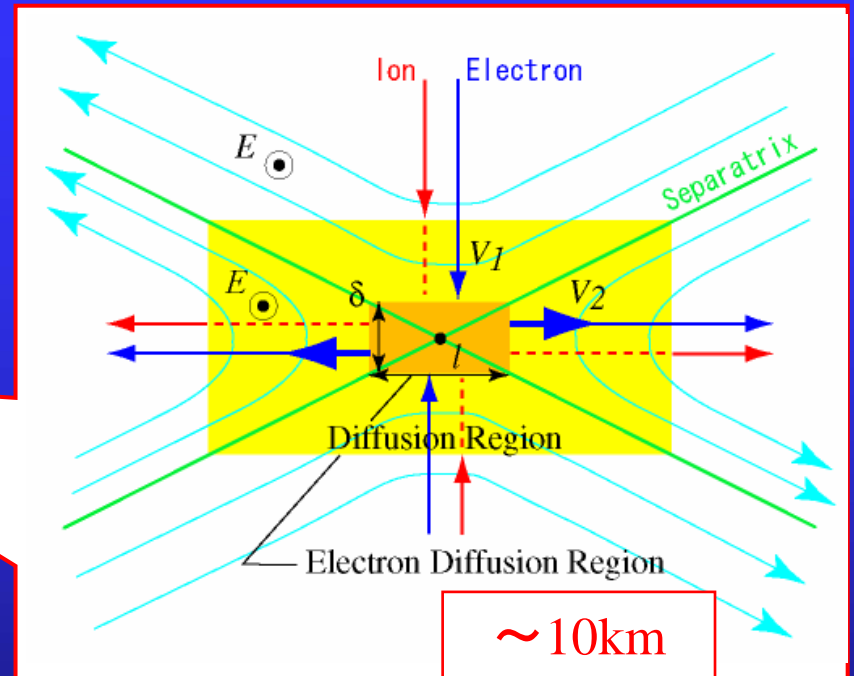
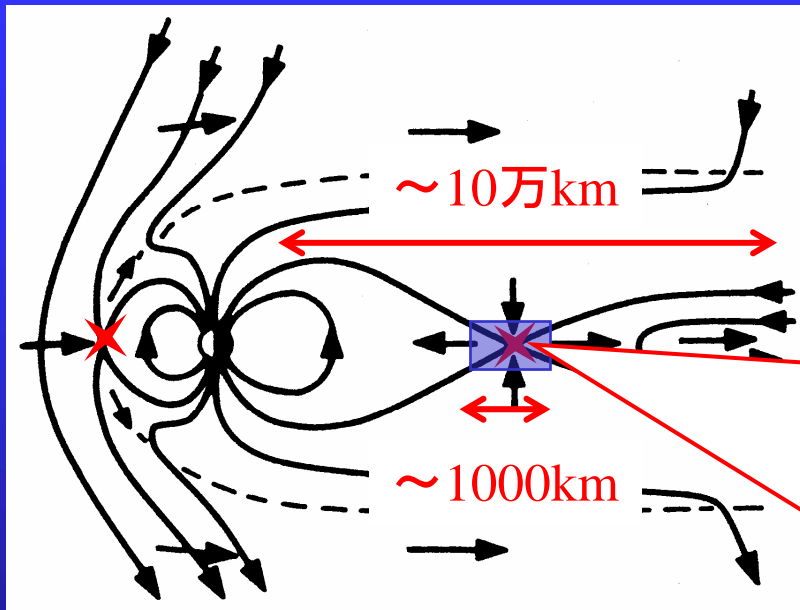


キンクした電流層における磁気リコネクション 電気抵抗の起源をさぐる

藤本 桂三

名古屋大学 太陽地球環境研究所

磁気拡散領域



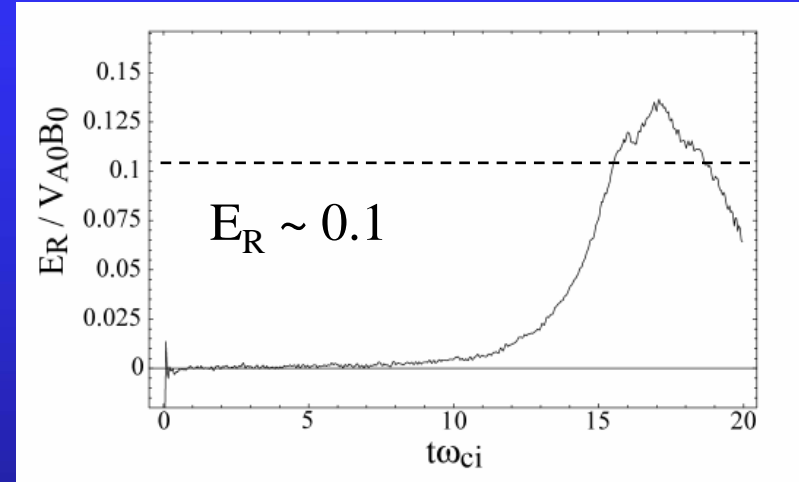
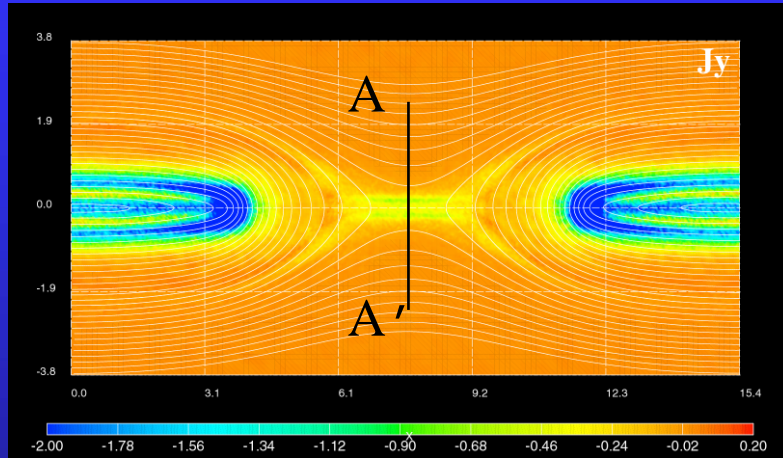
$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = \frac{\eta}{\mu_0} \nabla^2 \vec{B} \quad (\eta: \text{Resistivity}, \vec{E} \neq -\vec{V} \times \vec{B})$$

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

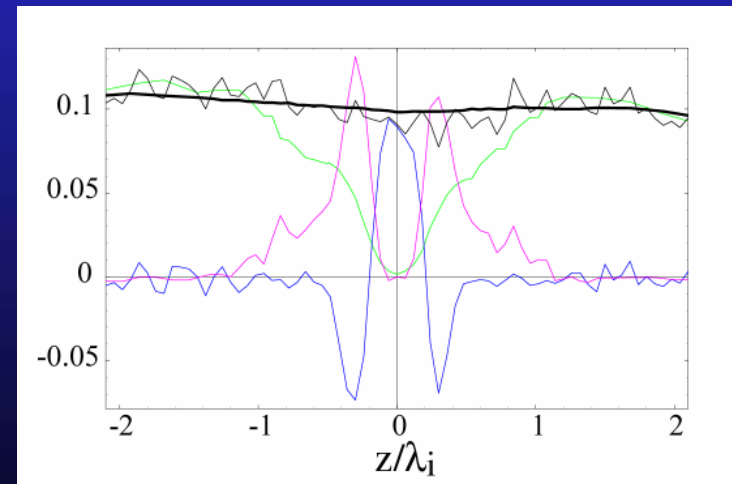
$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{B^2}{2\mu_0} + \frac{\varepsilon_0 E^2}{2} \right) = -\vec{j} \cdot \vec{E}, \quad \vec{j} \cdot \vec{E} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{2} \rho V^2 + \frac{1}{\gamma - 1} p \right)$$

2Dリコネクション

➤ 2次元電磁粒子シミュレーション



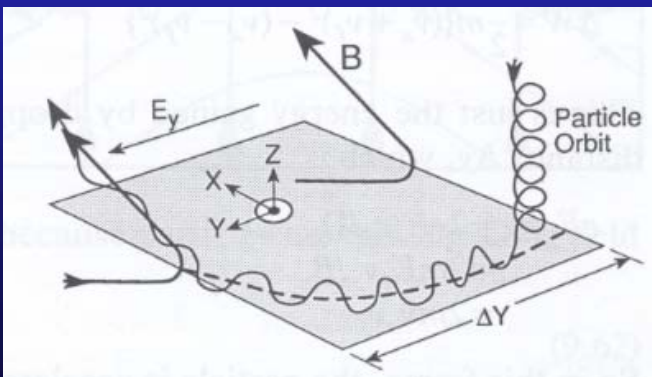
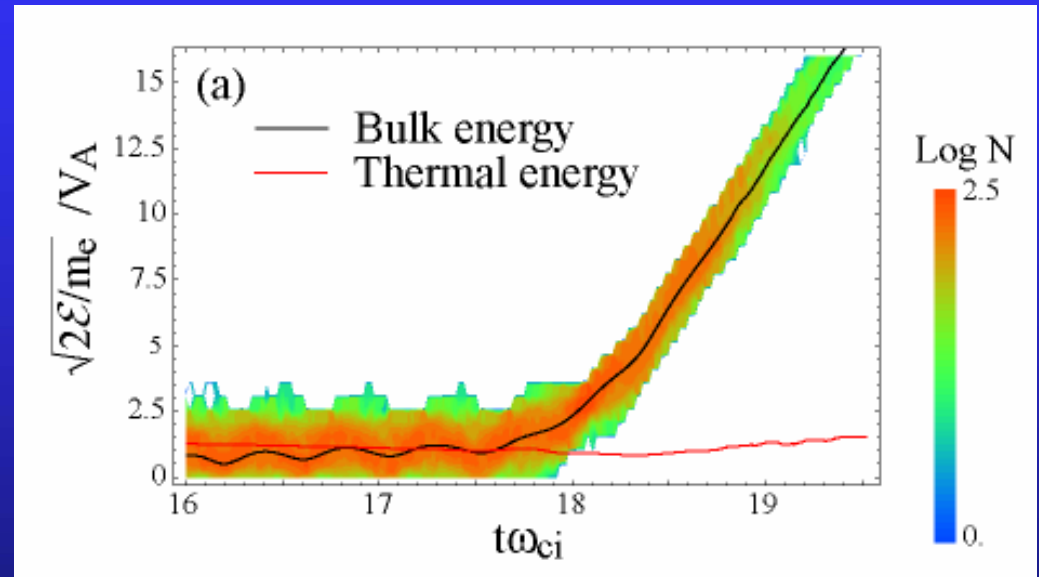
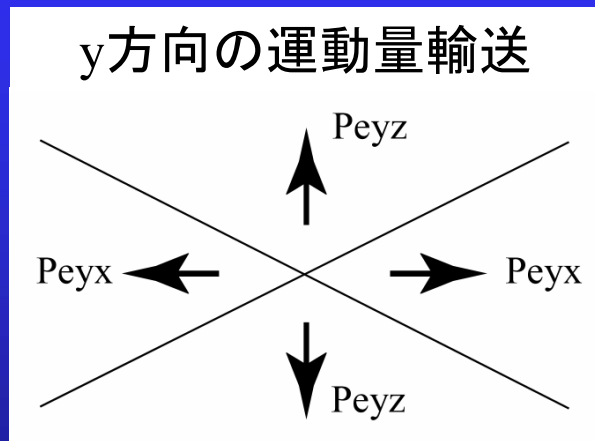
$$\begin{aligned} -E_y &= (\vec{V}_e \times \vec{B})_y \\ &+ \frac{1}{en_e} (\nabla \cdot \vec{P}_e)_y \\ &+ \frac{m_e}{en_e} \left(\frac{\partial V_{ey}}{\partial t} + \vec{V}_e \cdot \nabla V_{ey} \right) \end{aligned}$$



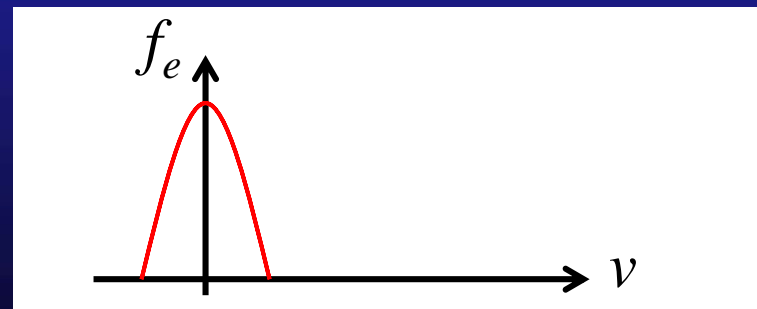
2Dリコネクション

大きな磁気拡散
= 効率的な運動量輸送

$$E_R = \frac{1}{en_e} (\nabla \cdot \vec{P}_e) = \frac{1}{en_e} \left(\frac{\partial P_{eyx}}{\partial x} + \frac{\partial P_{eyz}}{\partial z} \right)$$



[Cowley, 1985]



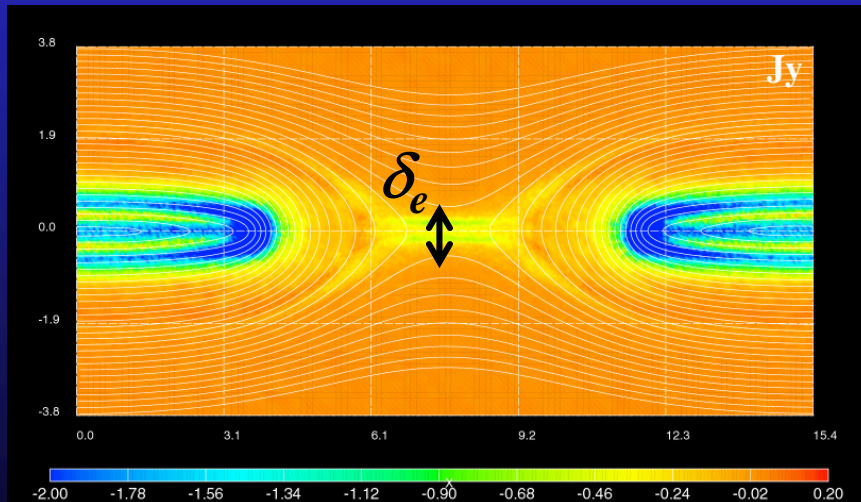
2Dリコネクション

➤ 電子による慣性抵抗 [Speiser, 1970; Tanaka, 1995]

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

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

- 短時間に加速
- 強く加速



$$\delta_e \approx \lambda_e$$

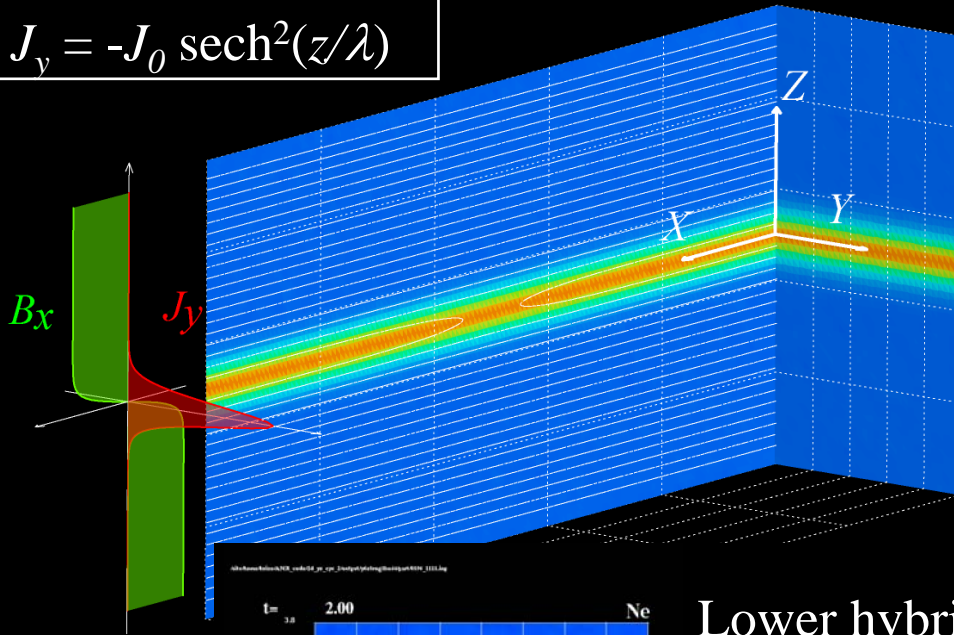
磁気圏尾部: $\sim 10\text{km}$ ($\Leftrightarrow 10^5\text{km}$)

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

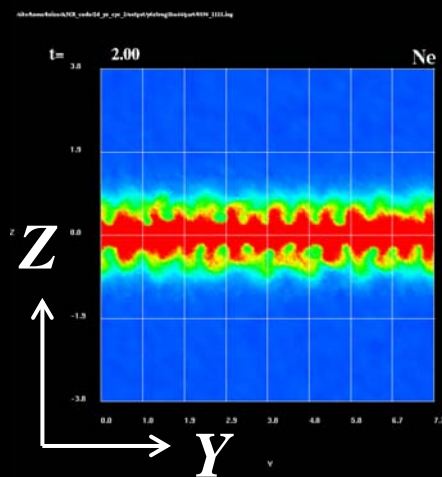
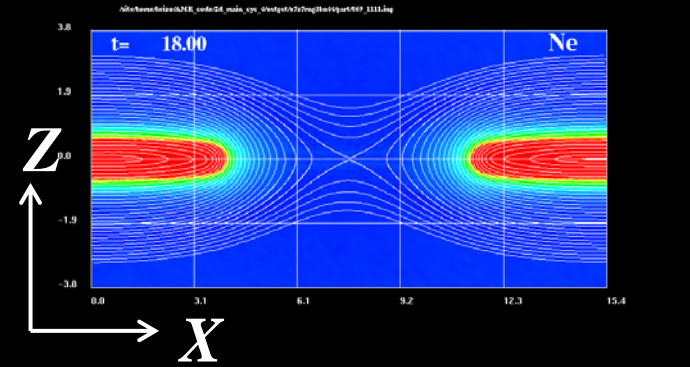
ハリス電流層における不安定モード

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

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



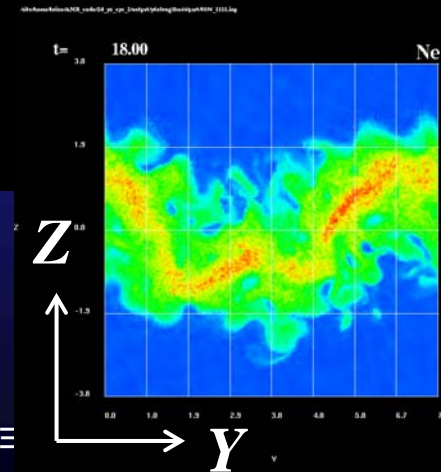
Tearing instability



Lower hybrid drift instability (LHDI)

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

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

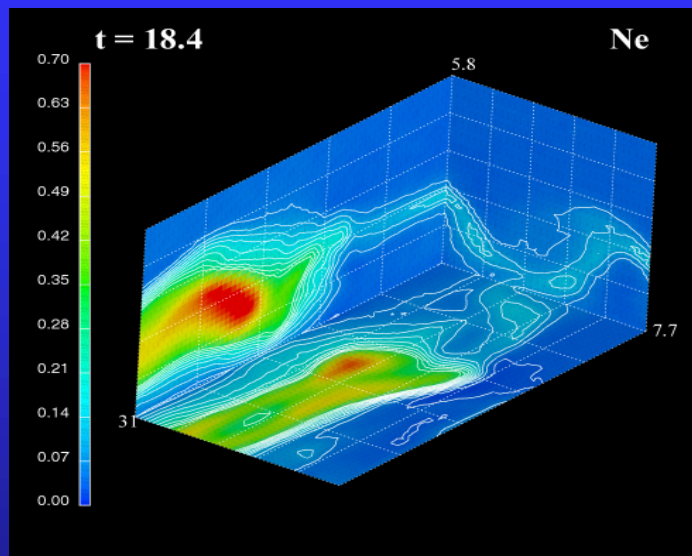


Kink-type instability

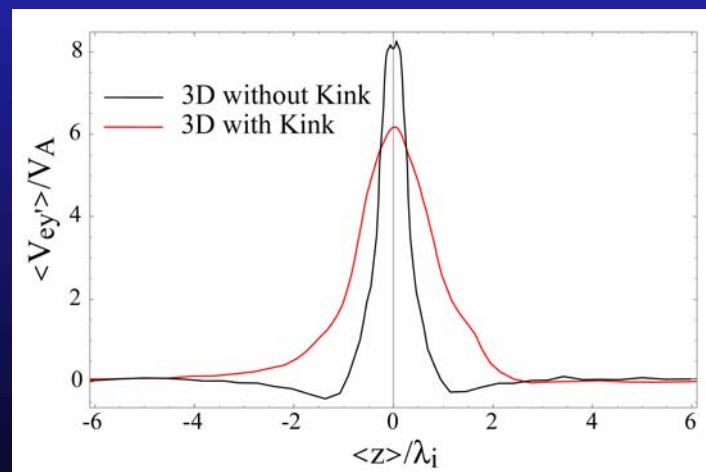
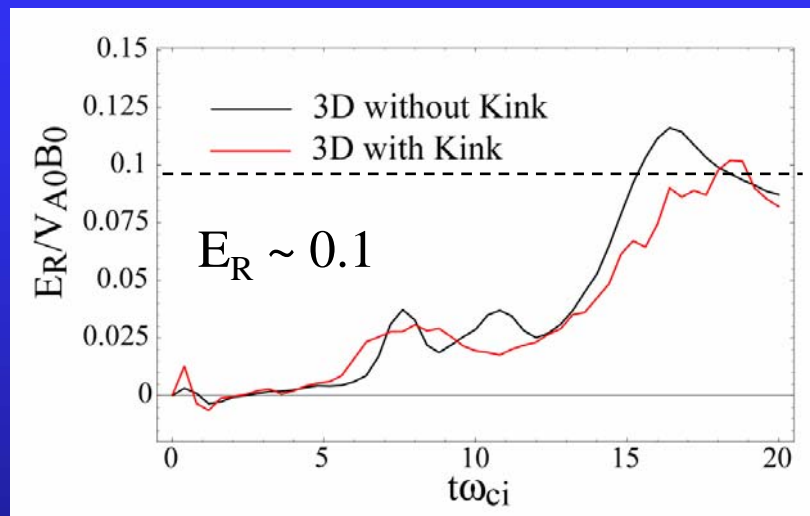
$$k_y L \sim 1$$

3Dリコネクション

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

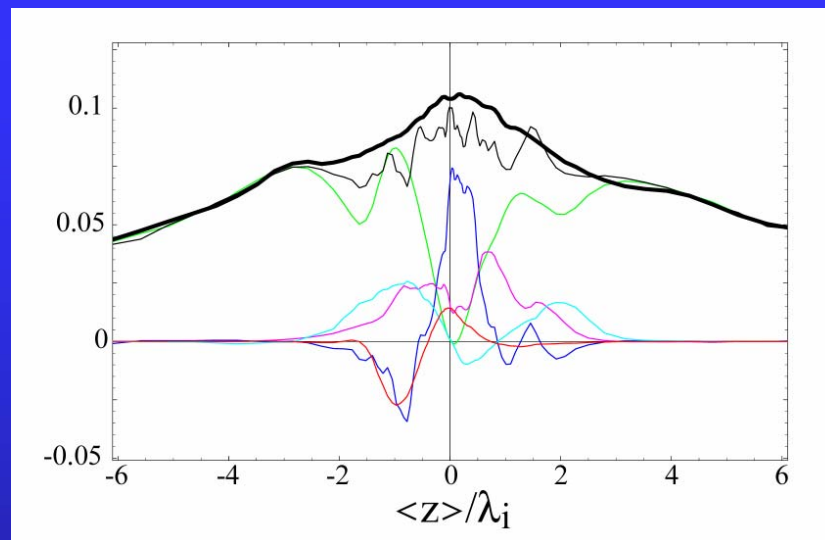
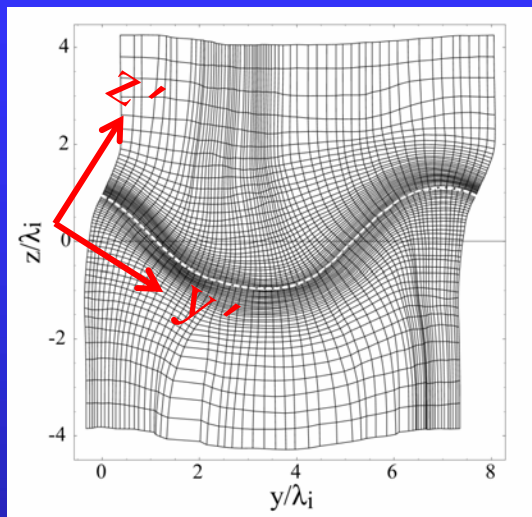


- 厚い電流層
- 弱い電流



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

3Dリコネクション

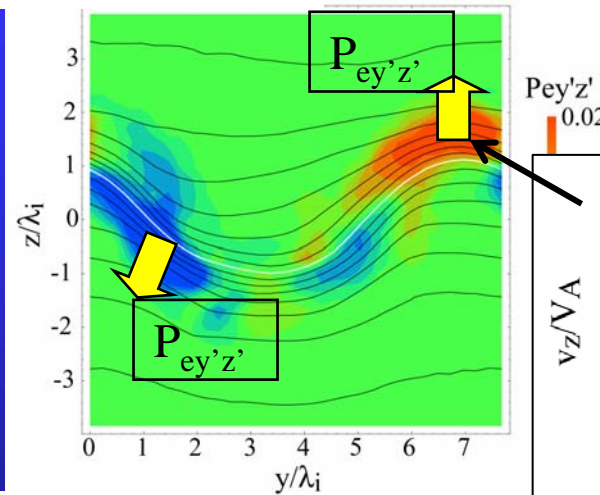
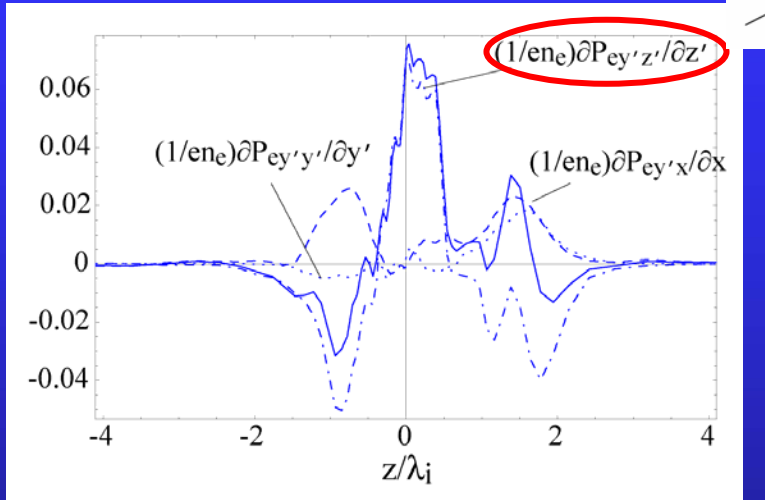
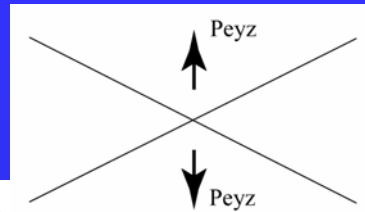


$$\begin{aligned}
 \langle -E_{y'} \rangle &= \frac{1}{\langle n_e \rangle} \left(\langle n_e \vec{V}_e \rangle \times \langle \vec{B} \rangle \right)_{y'} & \langle \cdot \rangle &= \frac{1}{l_y} \int_0^{l_{y'}} \cdot dy' \\
 &+ \frac{1}{e \langle n_e \rangle} \langle (\nabla \cdot \vec{P}_e)_{y'} \rangle \\
 &+ \frac{m_e}{e \langle n_e \rangle} \left\langle \frac{\partial V_{ey'}}{\partial t} + \vec{V}_e \cdot \nabla V_{ey'} \right\rangle \\
 &+ \frac{1}{\langle n_e \rangle} \langle \delta n_e \delta E_{y'} \rangle \\
 &+ \frac{1}{\langle n_e \rangle} \langle -\delta(n_e V_{ex}) \delta B_{z'} \rangle \quad (\delta B_x = 0)
 \end{aligned}$$

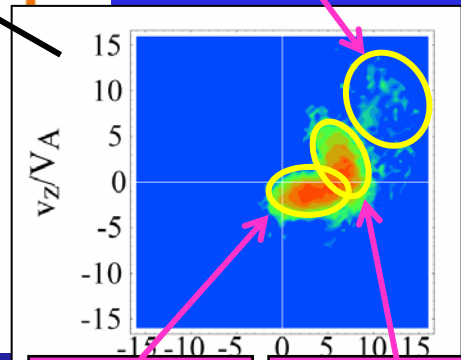
電子の圧カテンソル
による運動量輸送

3Dリコネクション

➤ 運動量輸送過程

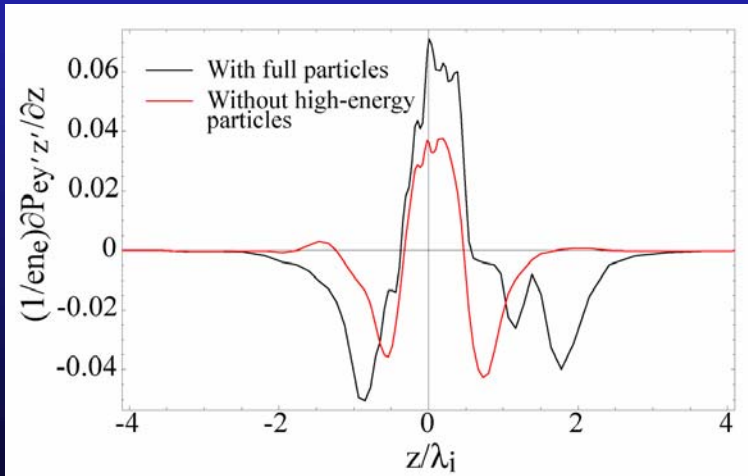


Scattering



Inflow

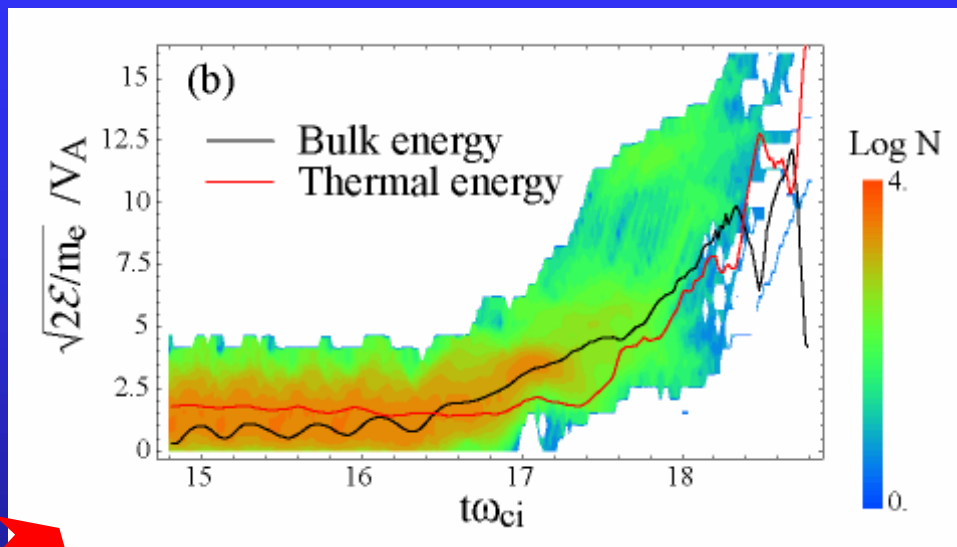
Outflow



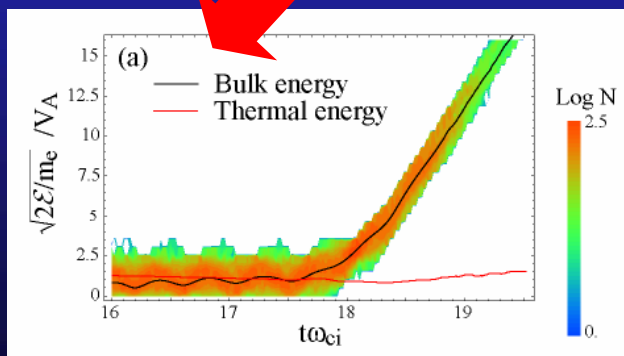
- z' 方向への運動量輸送
- 一部の電子が熱化

3Dリコネクション

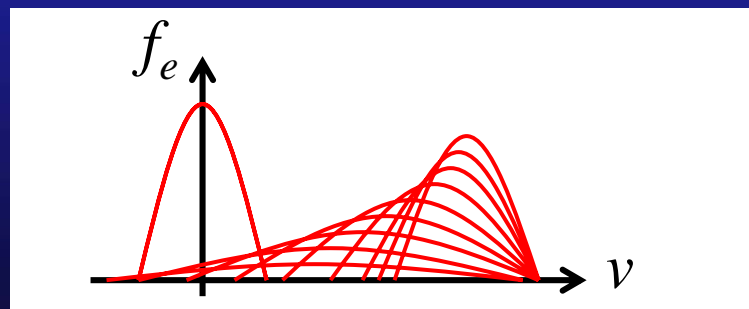
➤ 流体要素のエネルギー時間発展



電子加速
+
電子異常加熱



(キंकモードがない場合)



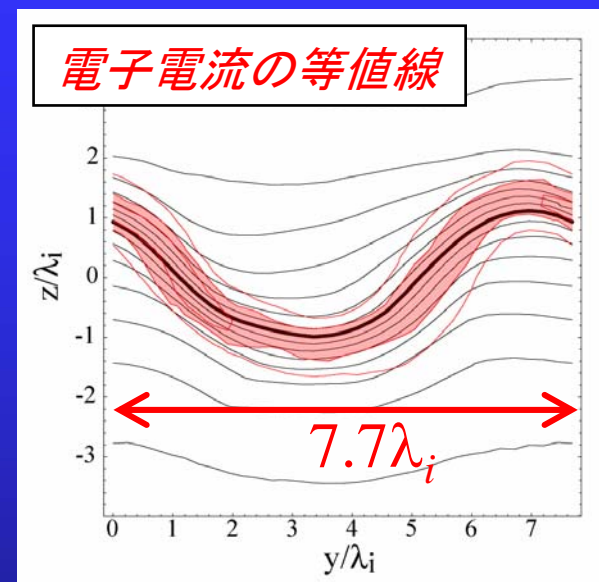
3Dリコネクション

➤ 電子のメアンダリングスケール

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

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

$$\approx 9\lambda_i$$

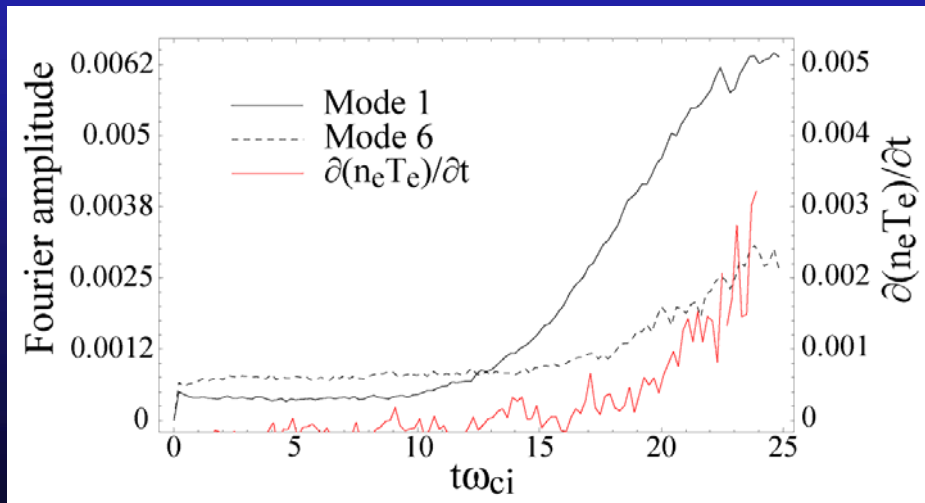
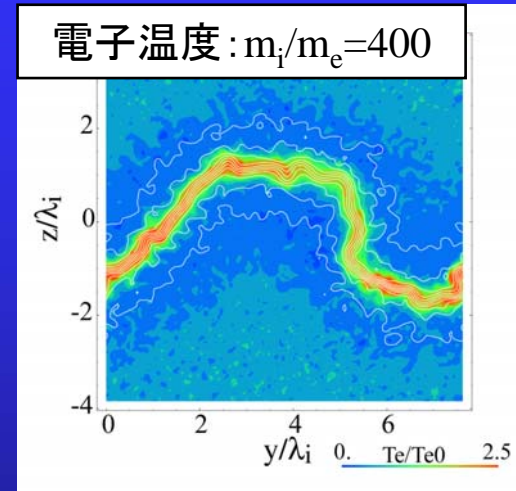
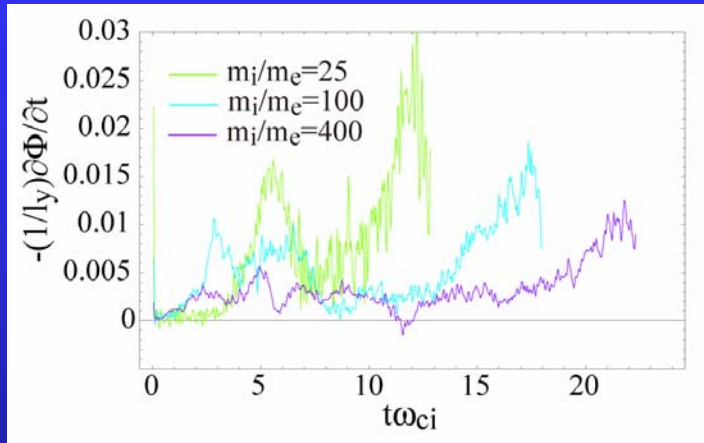


メアンダリングスケール ~ キンクモードの波長

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

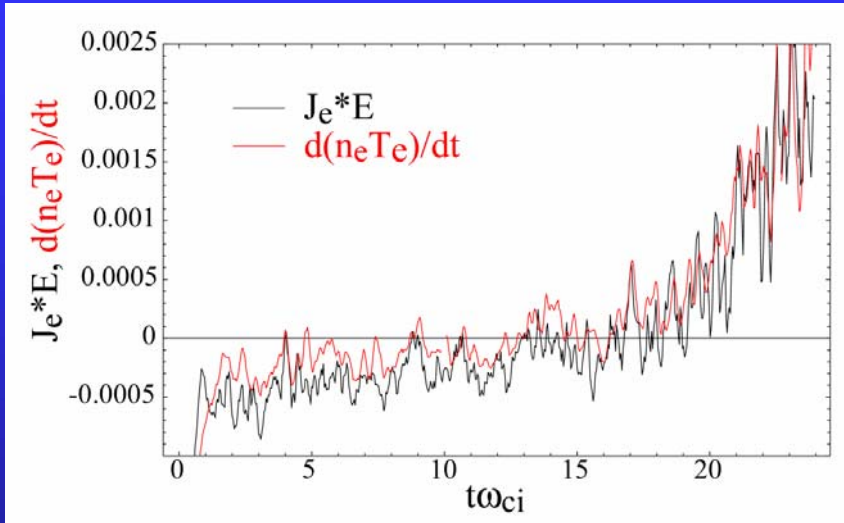
[Shinohara et al., 2001; Daughton, 2003]:

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



電子加熱

質量比が大きい場合 ($m_i/m_e > 100$, 2D-YZ plane)



$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{B^2}{2\mu_0} + \frac{\varepsilon_0 E^2}{2} \right) \approx -\vec{J}_e \cdot \vec{E}$$
$$\approx -\frac{\partial(n_e T_e)}{\partial t}$$

磁気エネルギー

Hybrid-scale kink mode

プラズマ熱エネルギー

まとめ

キンクモードと磁気リコネクションの結合過程を調べることによって、高速磁気リコネクションにともなう磁気拡散過程を議論した。

- キンクモードがない場合(2Dリコネクション)では、磁気拡散は電子による慣性抵抗のみで維持されている。
- キンクモードが励起すると、電流層の幅が広がるため慣性抵抗は小さくなる。そのかわり、キンクモードによって電子の一部が強く熱化されるため異常抵抗が発生し、高いリコネクション効率が維持される。
- リコネクション効率は、大規模なイオンスケールの構造によって決定され、電子の運動はその構造に合うように調節されているのかもしれない。