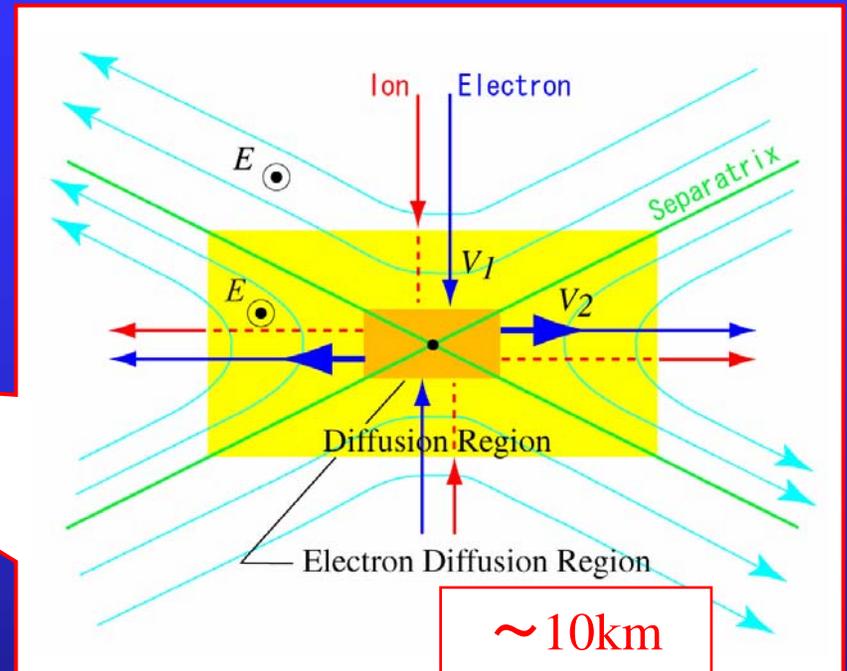
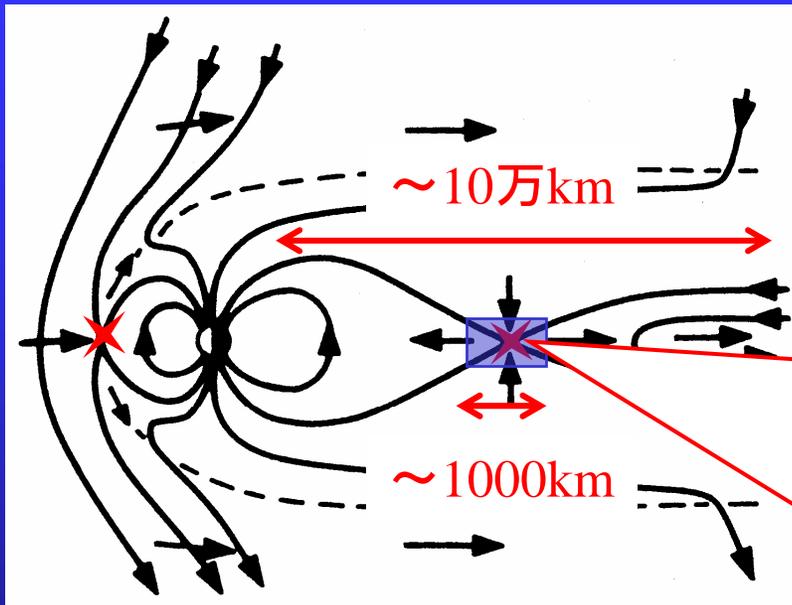


リコネクションにともなう磁気拡散メカニズム  
粒子的側面からみた電気抵抗

藤本 桂三

名古屋大学 太陽地球環境研究所

# 磁気拡散領域



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

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

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

# 電気抵抗とは何か

$$\underline{-en_e E_y} = \underline{m_e n_e (V_e - V_i) \nu} \quad \nu: \text{衝突周波数}$$

電子が得る運動量      電子が失う運動量

$$E_y = \left( \frac{m_e \nu}{e^2 n_e} \right) j_y = \eta j_y$$

## ➤ クーロン衝突 ---- Spitzer resistivity

$$\nu \approx \frac{\omega_{pe} \ln \Lambda}{64\pi \Lambda}$$

$\nu \sim 10^{-9}$  Hz (in the Earth magnetotail)

$E_R \sim 10^{-13} \ll 10^{-1}$       *Collisionless!!*

## ➤ 波動粒子相互作用 ---- Anomalous resistivity

$$\nu \approx \frac{R_e^{an}}{n_e m_e V_e} \quad (\text{イオン音波、Buneman、LHDI、Kink})$$

$$R_e^{an} = -e \left( \langle \delta n_e \delta \vec{E} \rangle + \langle \delta(n_e \vec{V}_e) \times \delta \vec{B} \rangle \right)_y$$

# 電子慣性による等価電気抵抗(慣性抵抗)

[Speiser, Planet. Space Sci., 1970]

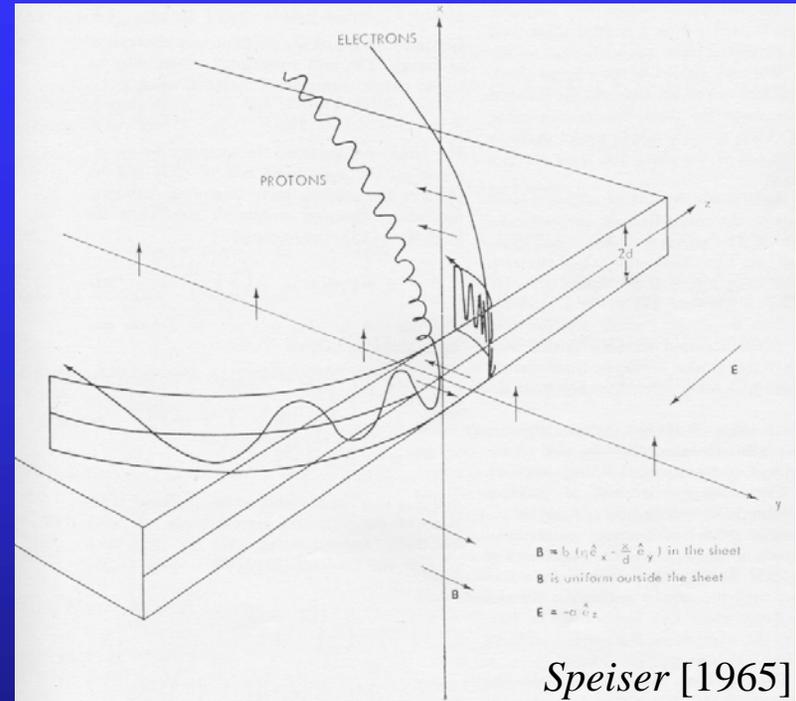
電子が加速領域で有限時間加速



加速領域から流出



加速領域から運動量が消失

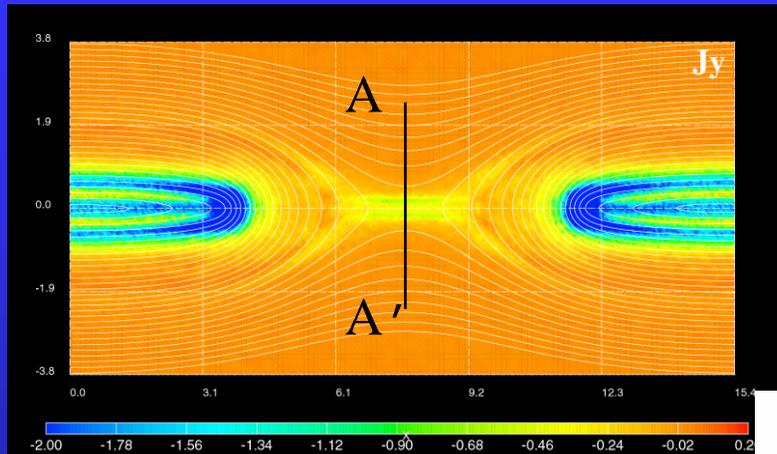


$$\nu \approx \tau_{tr}^{-1}$$

$$\eta = \frac{m_e}{e^2 n_e \tau_{tr}} \approx 6.3 \times 10^3 \Omega m \quad E_y \approx 0.5 \text{ mV/m}$$

*Consistent with observations*

# 2次元電磁粒子シミュレーション

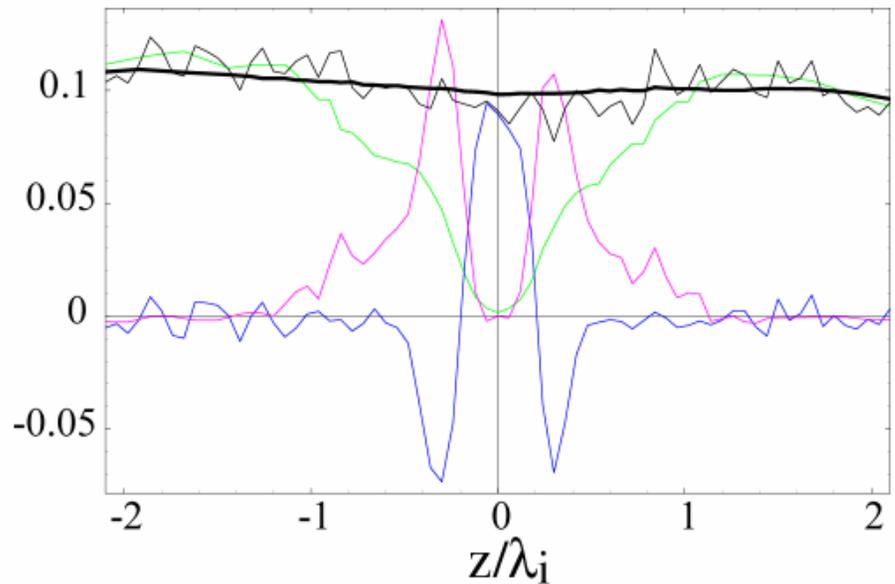


$$\begin{aligned}
 -E_y &= (\vec{V}_e \times \vec{B})_y \\
 &+ \frac{1}{en_e} (\nabla \cdot \vec{P}_e)_y \\
 &+ \frac{m_e}{en_e} \left( \frac{\partial V_{ey}}{\partial t} + \vec{V}_e \cdot \nabla V_{ey} \right)
 \end{aligned}$$

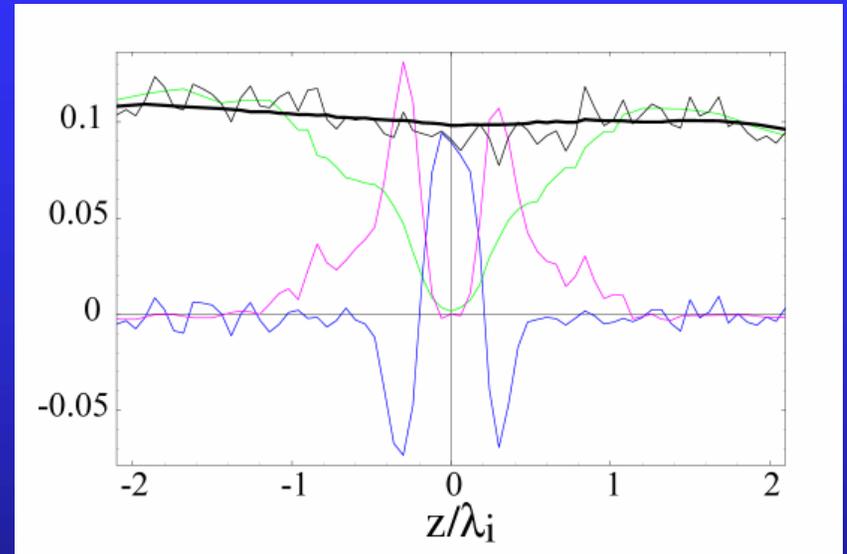
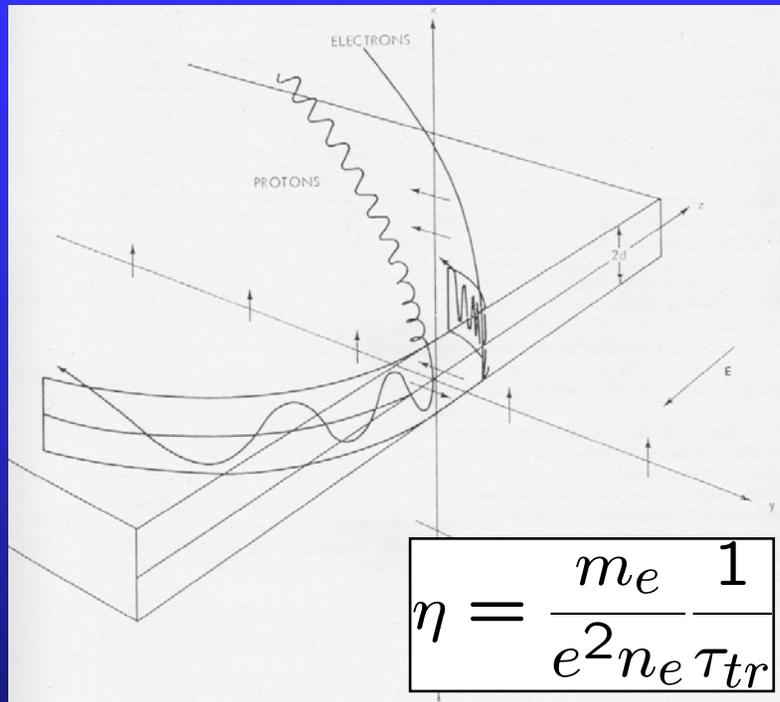
X-lineでは電子粘性が卓越

$$-E_y = \frac{1}{en_e} (\nabla \cdot \vec{P}_e)_y$$

[Cai and Lee, 1997; Hesse et al., 1999; 2001; Ricci et al. 2002;...; Fujimoto, 2009]



# 粒子的モデル vs. 流体的モデル



$$\eta = \frac{(\nabla \cdot \vec{P}_e)_y}{e^2 n_e^2 V_{ey}}$$

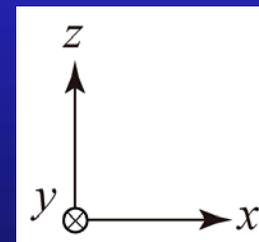
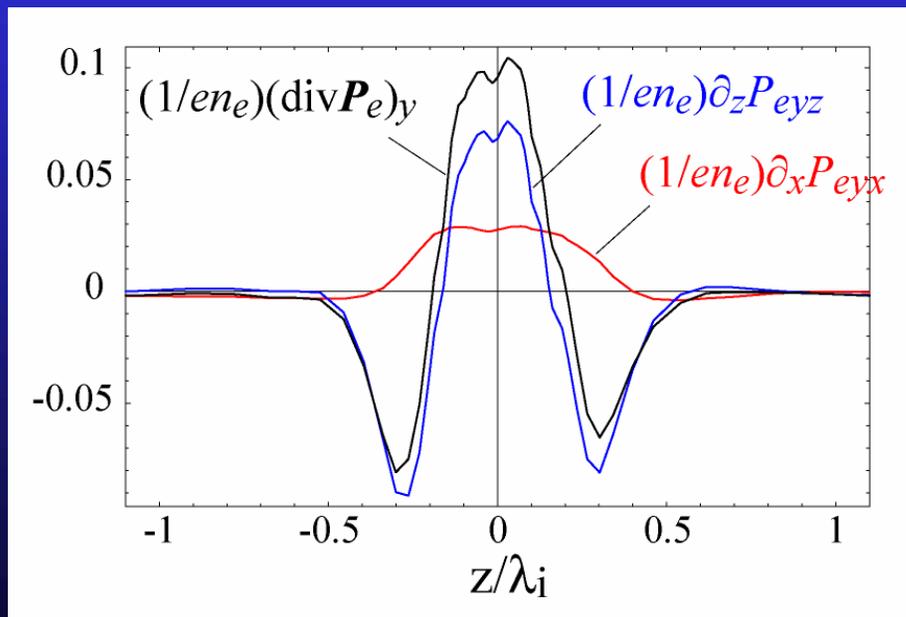
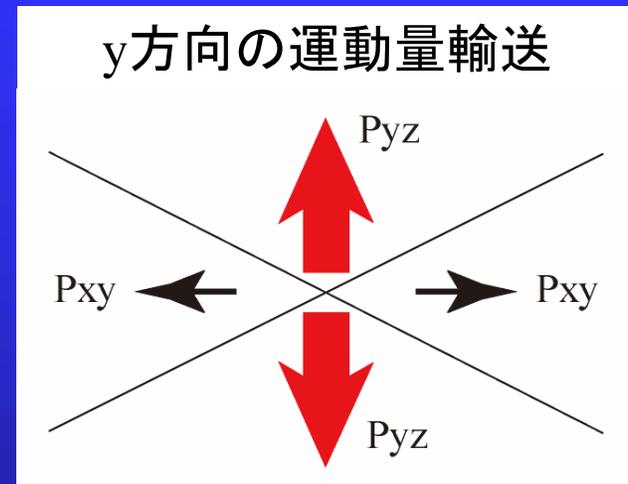
同じ物理プロセスを違う角度から見ているだけ？

# 電子粘性効果による磁気拡散

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

$$P_{eyz} = m_e \int (v_y - V_{ey})(v_z - V_{ez}) f_e(\vec{v}) d^3v$$

$$\approx m_e \int v_y v_z f_e(\vec{v}) d^3v \quad \because V_{ez} \approx 0$$



# 粒子モデル

$$v_{zu}(t) = -v_0 \sin \omega t$$

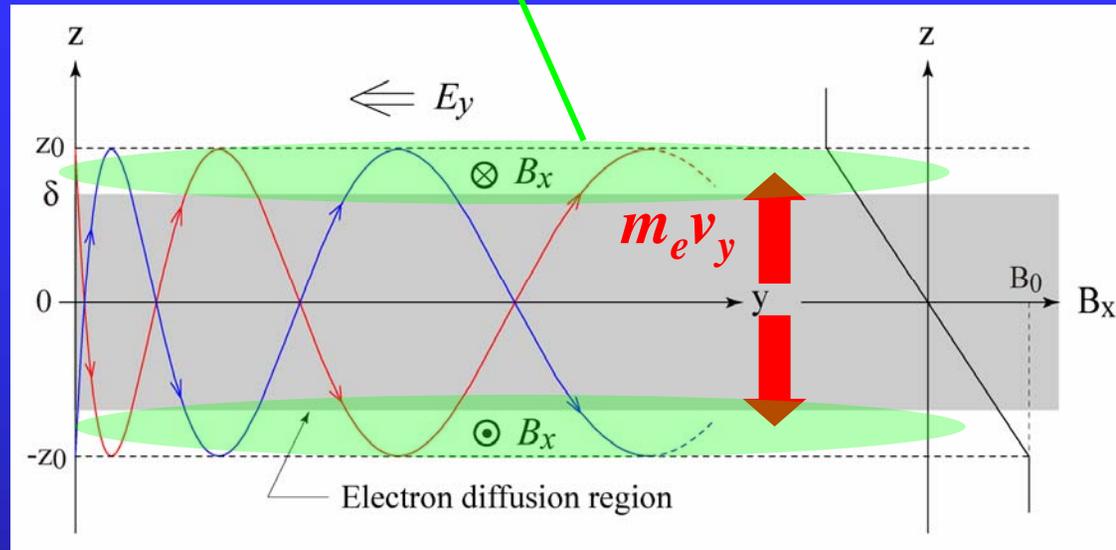
$$v_{zl}(t) = v_0 \sin \omega t$$

$$v_y(t) = -(eE_y/m_e)t$$

➤ Cold plasma

➤  $|z| = z_0$ から流出

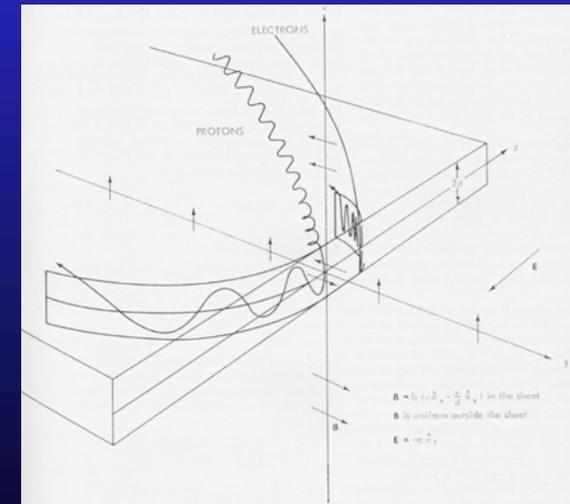
滞在時間が長い



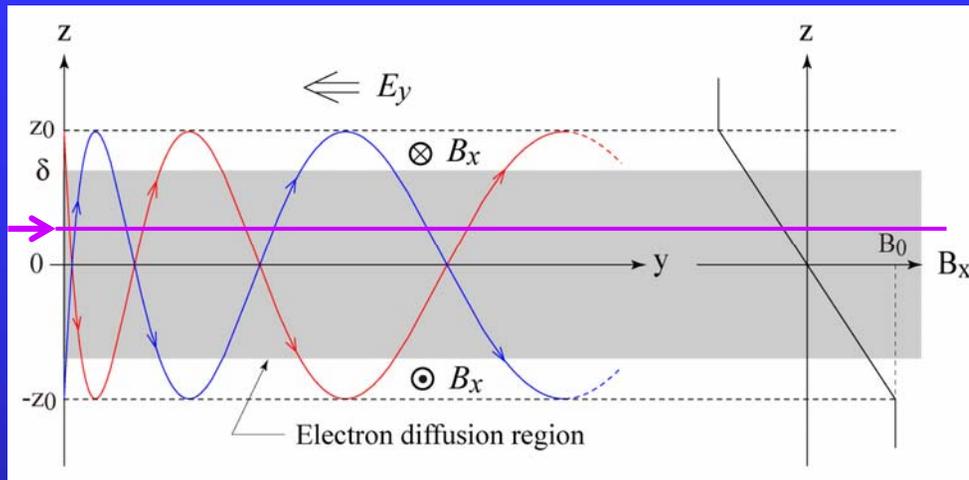
$$f_e(z, v_y, v_z) = f_e^u(z, v_y, v_z) + f_e^l(z, v_y, v_z)$$

$$f_e^u(z, v_y, v_z) = \bar{n} \left[ \sum_{n=0}^{m_+} \delta(v_y - k\{2n\pi + \cos^{-1}(z/z_0)\}) \delta(v_z + v_z(z)) \right. \\ \left. + \sum_{n=1}^{m_-} \delta(v_y - k\{2n\pi - \cos^{-1}(z/z_0)\}) \delta(v_z - v_z(z)) \right]$$

$$f_e^l(z, v_y, v_z) = f_e^u(-z, v_y, -v_z) \quad \left[ \begin{array}{l} k = e|E_y|/m_e\omega \\ v_z(z) = v_0 \sqrt{1 - (z/z_0)^2} \end{array} \right]$$



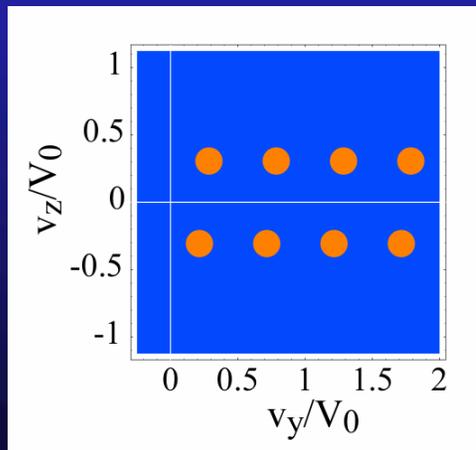
# 粒子モデル --- 分布関数の例



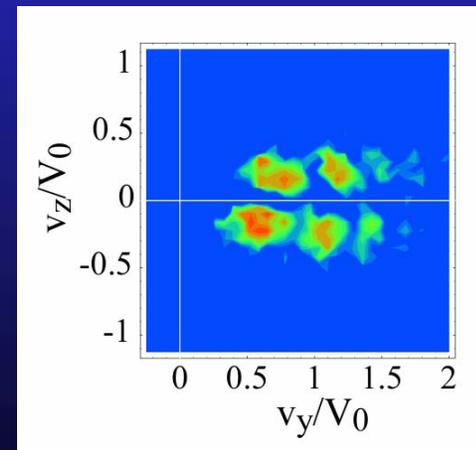
- 不連続な構造
- $v_z > 0$  の粒子が  $v_z < 0$  の粒子より加速

$$z = 0.2 z_0$$

理論モデル



シミュレーション



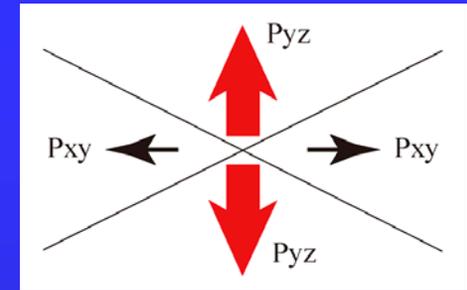
# 圧力テンソルとリコネクション電場

$$\begin{aligned} P_{eyz}(z) &= m_e \int (v_y - V_{ey}(z))(v_z - V_{ez}(z)) f_e(z, v_y, v_z) dv_y dv_z \\ &= \frac{n_e(z) T_{ez}(z) \Delta v_y(z)}{\sqrt{2} v_{th,z}(z)} \\ &\approx en_0 E_y z \quad (\text{where } z \ll z_0) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E_{yp}(z) &= \frac{1}{en_e(z)} \frac{dP_{eyz}}{dz} \\ &= E_y \left[ 1 + \frac{T_{ez}(z) \Delta v_y(z) d}{\sqrt{2} e E_y v_{th,z}(z) dz} \left\{ \ln(n_e v_{th,z}) \right\} \right] \\ &\approx E_y [1 - (z/z_0)^2] \quad (\text{where } z \ll z_0) \end{aligned}$$

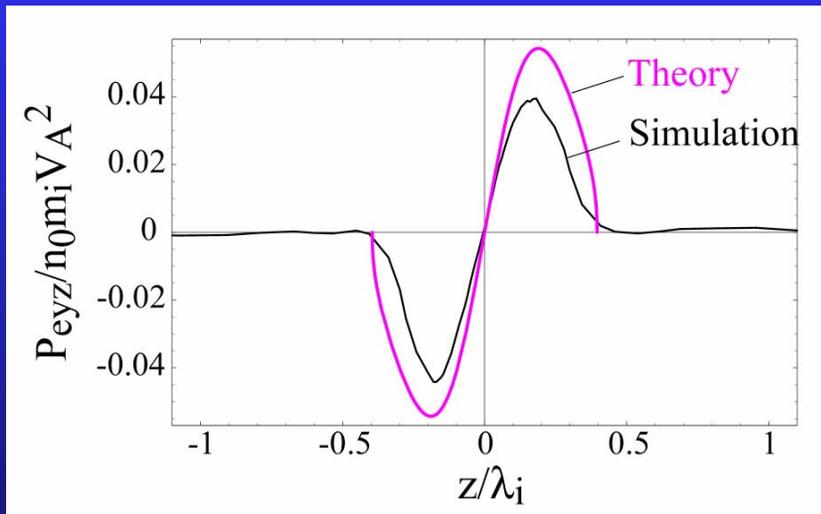
$$\left[ \begin{array}{l} n_e(z) = n_0 \operatorname{sech}^2(z/\delta) \\ \Delta v_y(z) = v_{yl}(z) - v_{yu}(z) \end{array} \right]$$

# シミュレーションとの比較

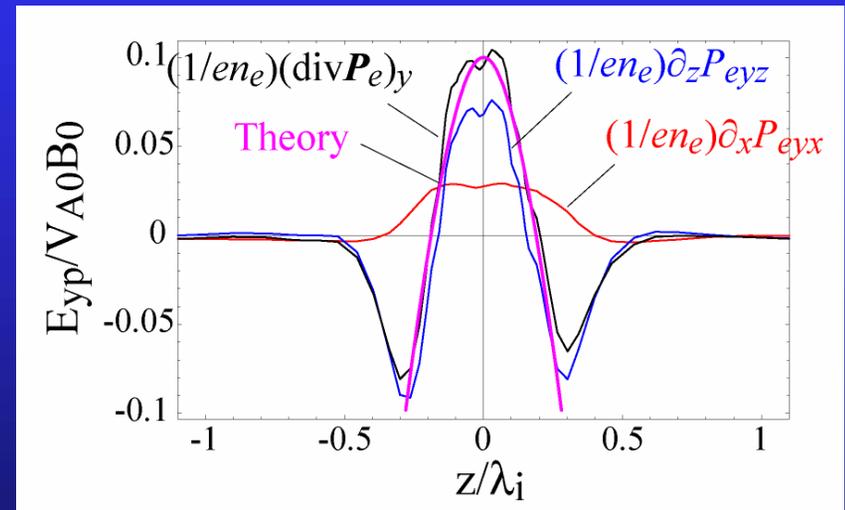


$$E_R = -\frac{E_y}{V_{A0}B_0} = 0.1, \quad z_0 = \frac{\lambda_e}{\sqrt{2}}$$

## 圧力テンソル



## 電子粘性による電場



粒子的描像 = 流体的描像

粒子間衝突無し。電子加熱無し。

# 電流層の厚さ(2δ)

Ampere's law

$$\frac{B_I}{z_0} \approx \mu_0 e n_0 V_0$$

Flow velocity

$$V_0 = \frac{1}{n_e(z)} \int v_y f_e(z, v_y, v_z) dv_y dv_z \left[ \begin{array}{l} M = 1, 2, \dots \\ E_R = -\frac{E_y}{B_I V_{Ae}}, \quad V_{Ae} = \frac{B_I}{\sqrt{\mu_0 m_e n_I}} \end{array} \right]$$

$$\approx \frac{9M}{4} \left( \frac{V_{Ae}}{V_0} \right) E_R V_{Ae}$$

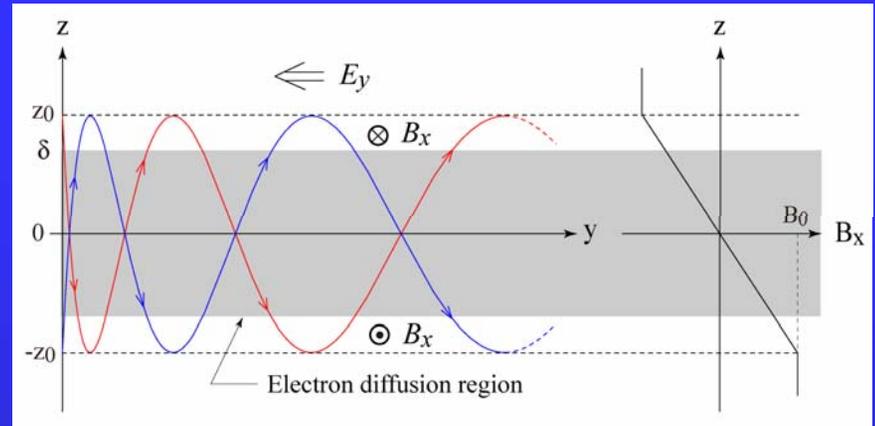
電子磁気拡散領域

$$\delta = \rho_e(z = \delta) \Rightarrow \delta \approx z_0 / \sqrt{2} \quad [ \rho_e(z) = v_{th,z} / \omega_{ce} ]$$

$$\delta \approx \frac{2\sqrt{2}}{3\pi\sqrt{M}} E_R^{-1/2} \lambda_e$$

$$V_0 = V_{Ae}, \quad E_R = 0.1$$

$$\rightarrow M \approx 4, \quad \delta \approx 0.5\lambda_e$$



# まとめ

2Dリコネクションにおける磁気拡散プロセスを説明するモデルを提案した。

粒子的描像(電子慣性抵抗)と流体的描像(電子粘性による電気抵抗)が全く等価であることを証明した。

$2\delta \approx \lambda_e$  → 電子慣性抵抗

$2\delta \gg \lambda_e$  → 異常抵抗、乱流抵抗

(参考) 電子慣性長の大きさ

地球磁気圏尾部     $\sim 10$  km

太陽フレア         $\sim 10^{-5}$  km

