

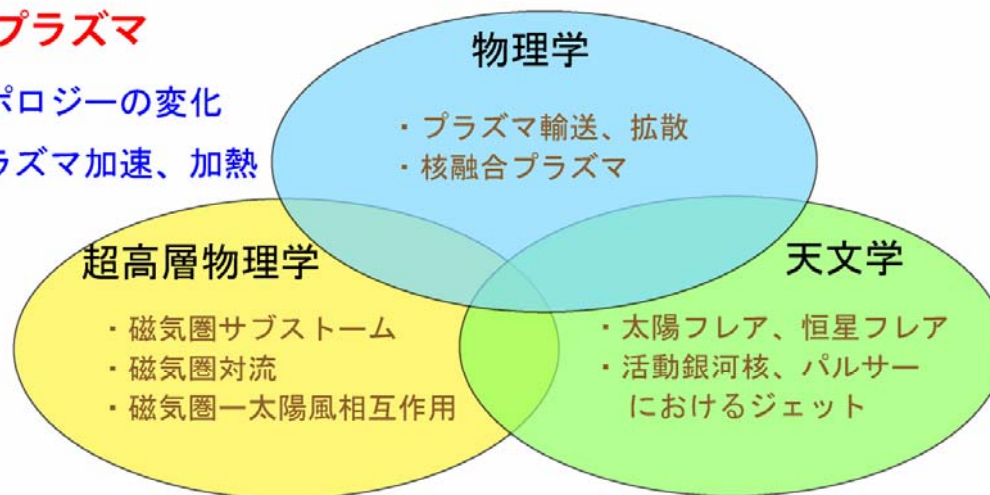
Particle Description of the Dissipation Processes in Collisionless Magnetic Reconnection

Keizo Fujimoto¹ & Richard Sydora²

1. *Computational Astrophysics Laboratory, RIKEN*
2. *Department of Physics, University of Alberta*

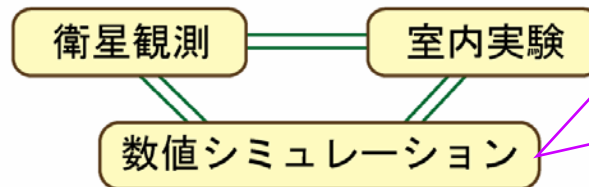
磁化プラズマ

- ・トポロジーの変化
- ・プラズマ加速、加熱



磁気リコネクション

物理モデルの改善



利点

- ・再現性
- ・さまざまな初期、境界設定
- ・低コスト



物理モデル提案

未解明問題

- 高速リコネクションの引金機構
- 高速で持続的なリコネクションを可能にする物理条件
 - 支配しているのはマクロ ($L \gg \lambda_i$) かミクロ ($L < \lambda_i$) か？
 - X-lineでの磁気拡散機構？ (慣性抵抗、異常抵抗？)
 - 定常か非定常か？
 - 流体系の中に運動論効果を正しく埋め込むことは可能か？
- リコネクションにともなうプラズマ加速・加熱

一般化されたオームの法則

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

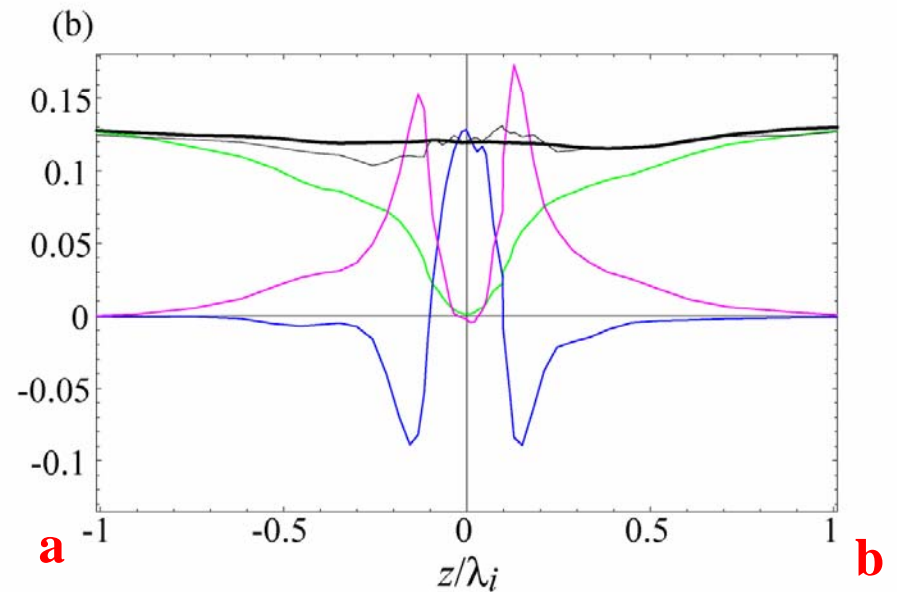
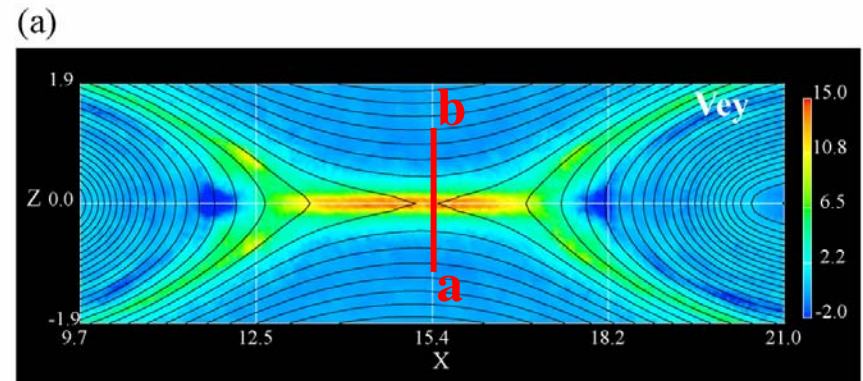
X-line近傍では、、、

$$-E_y \approx \frac{1}{en_e} \left(\frac{\partial P_{eyx}}{\partial x} + \frac{\partial P_{eyz}}{\partial z} \right)$$

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

電子粘性

(電子の運動量輸送)



X-line付近における電子の運動

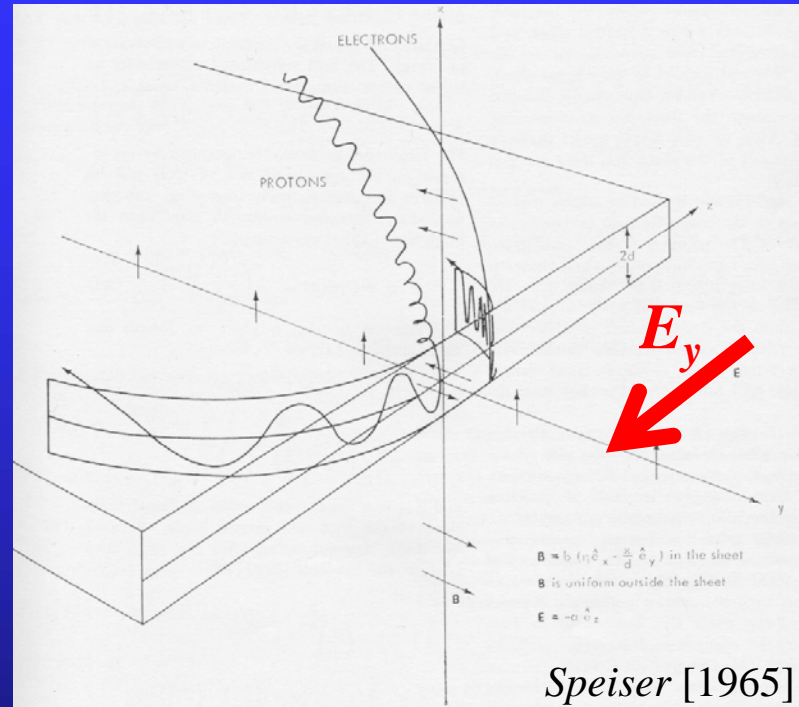
電子が加速領域で有限時間(τ_{tr})加速



加速領域から流出



加速領域から運動量が消失



$$-E_y = \eta_{in} j_y$$

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

Speiser [1970]



電子による慣性抵抗

粒子運動に基づいたモデル

滞在時間が長い

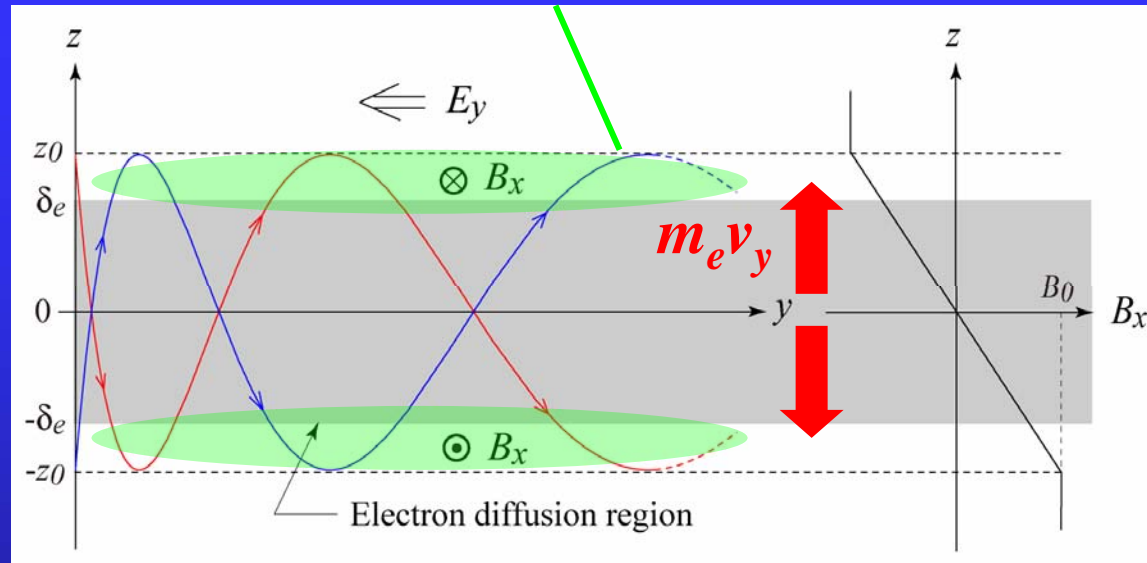
$$v_{zu}(t) = -v_0 \sin \omega t$$

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

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

➤ Cold plasma

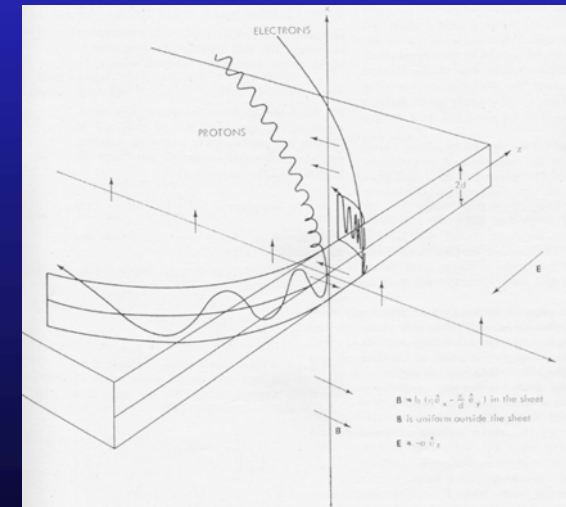
➤ $|z| = z_0$ から流出



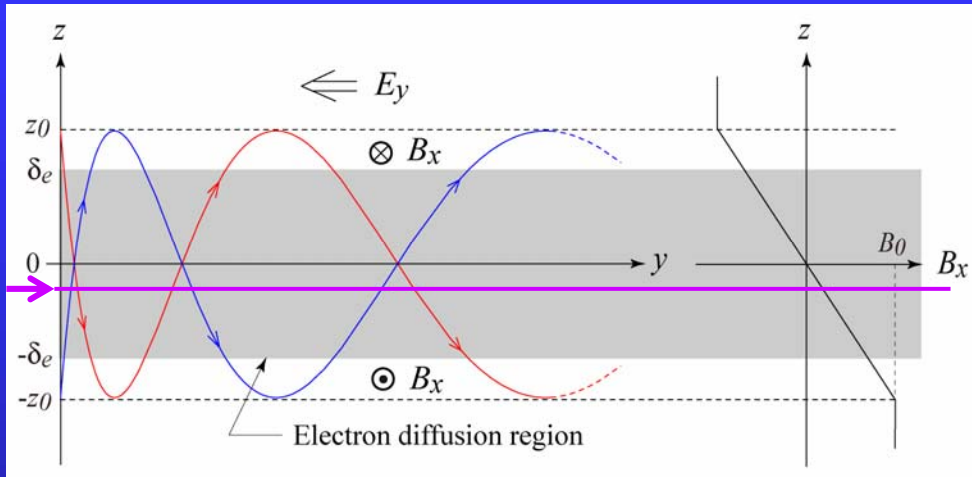
$$f_e(z, v_y, v_z) = f_e^u(z, v_y, v_z) + f_e^l(z, v_y, v_z)$$

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

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



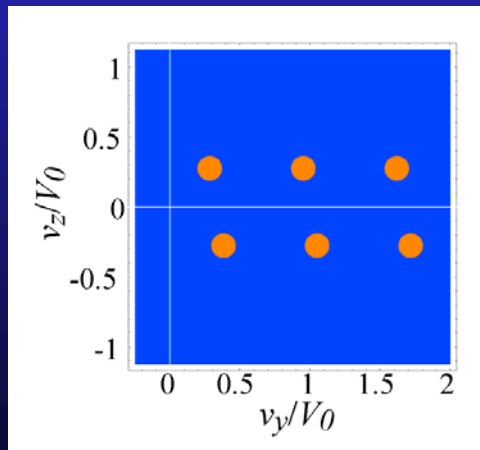
分布関数の例



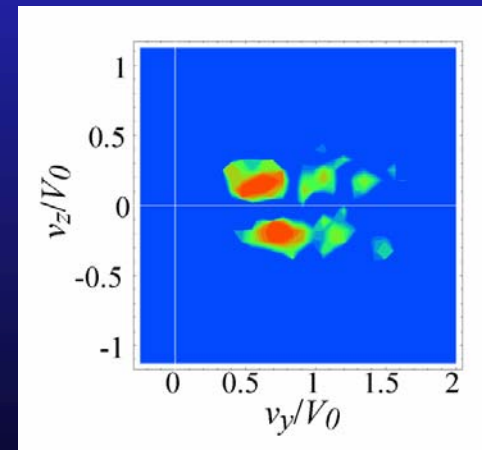
- 不連続な構造
- $v_z < 0$ の粒子が $v_z > 0$ の粒子より加速

$z = -0.2 z_0$

理論モデル



シミュレーション



圧力テンソルとその発散成分

$$P_{eyx} = 0$$

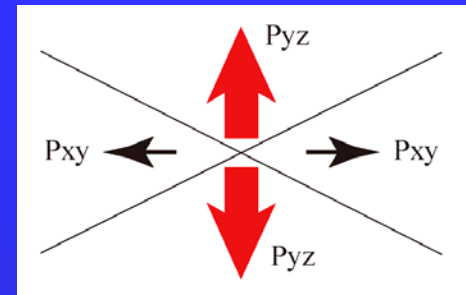
$$\begin{aligned} P_{eyz}(z) &= m_e \int (v_y - V_{ey}(z))(v_z - V_{ez}(z)) f_e(z, v_y, v_z) dv_y dv_z \\ &= n_e(z) v_{ez}(z) \Delta p_{ey}(z) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} -E_{yp}(z) &= \frac{1}{en_e(z)} (\nabla \cdot \vec{P}_e)_y = \frac{1}{en_e(z)} \frac{dP_{eyz}}{dz} \\ &= \frac{1}{e} v_{ez}(z) \left[\frac{d\Delta p_{ey}}{dz} + \Delta p_{ey} \frac{d}{dz} \ln(n_e v_{ez}) \right] \end{aligned}$$

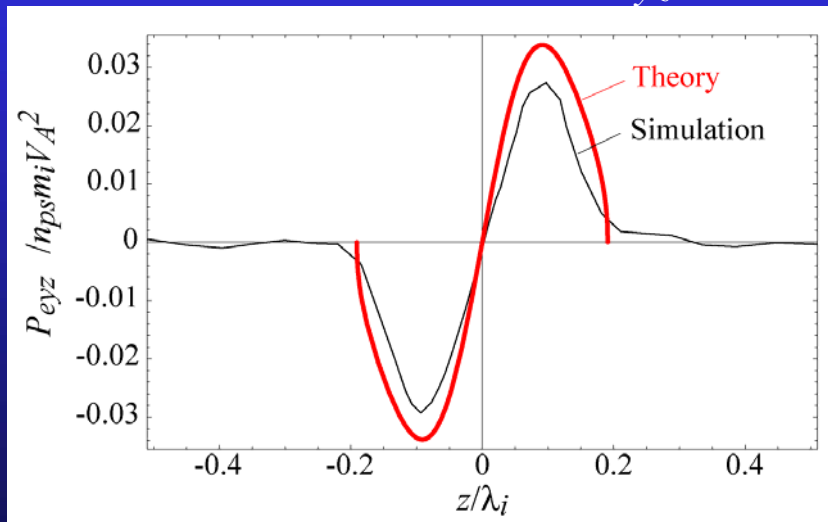
$$\left[\begin{array}{l} n_e(z) = n_0 \operatorname{sech}^2(z/\delta_e) \\ v_{ez}(z) = v_0 \sqrt{1 - (z/z_0)^2} \\ \Delta p_{ey}(z) = (1/2)m_e(v_{yl}(z) - v_{yu}(z)) \end{array} \right]$$

シミュレーションとの比較

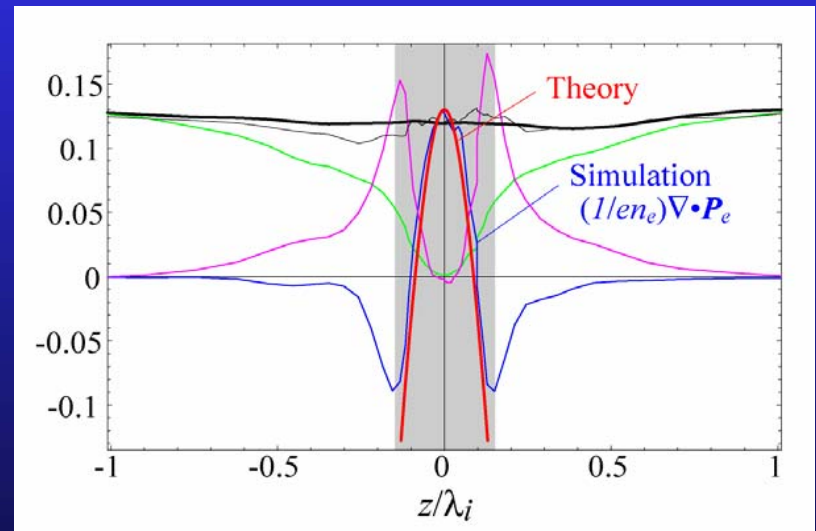
$$E_R = -\frac{E_y}{V_{A0}B_0} \approx 0.13, \quad \delta_e \approx \sqrt{\frac{n_{in}}{n_0}} \lambda_e$$



非対角圧力 P_{eyz}

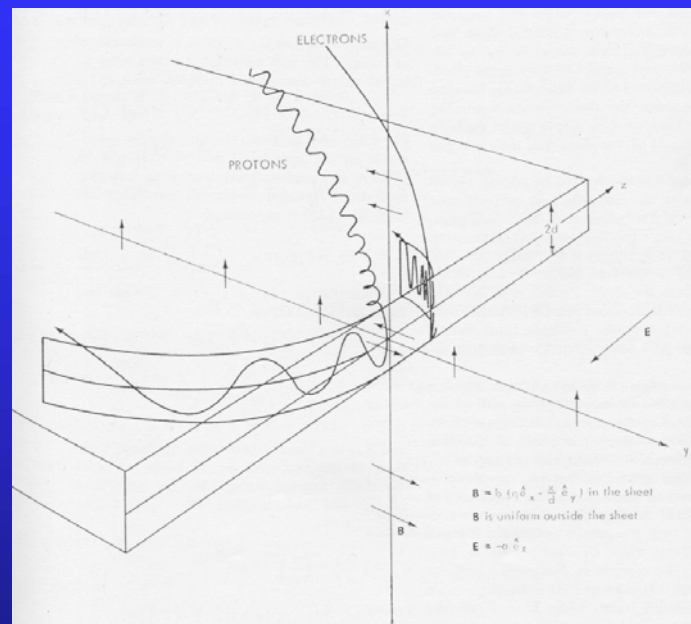
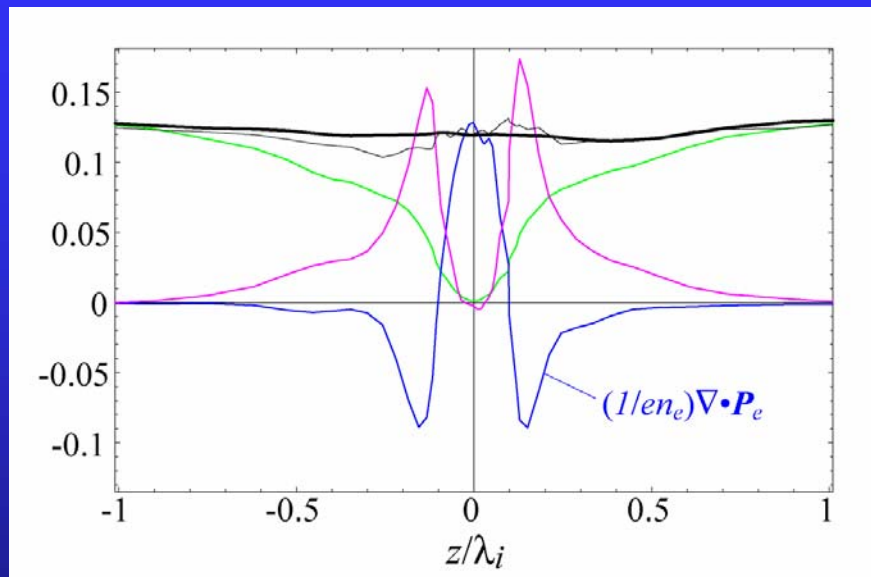


一般化されたオームの法則



結論

2次元リコネクションでは、、、



流体的描像

電子粘性による磁気拡散

$$-E_y = \frac{1}{en_e} \left(\frac{\partial P_{eyx}}{\partial x} + \frac{\partial P_{eyz}}{\partial z} \right)$$

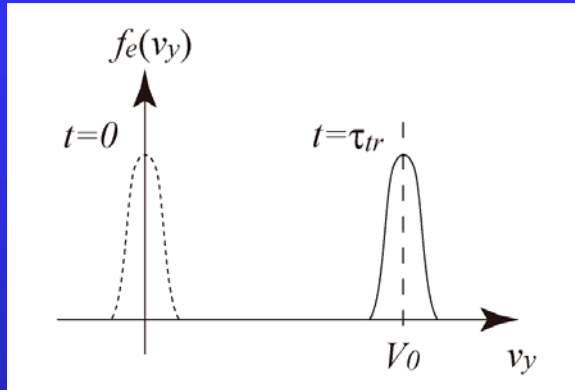
粒子の描像

電子慣性抵抗による磁気拡散

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

電流層の厚さ(δ_e)

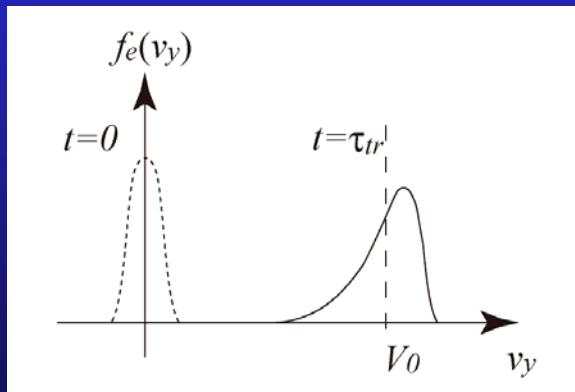
2D case



$$\frac{e|E_y|}{m_e} \tau_{tr} = V_0 \quad \tau_{tr} \sim \frac{\delta_e}{V_{in}}$$

→ $\delta_e \sim \lambda_e$

3D case



$$\frac{e|E_y|}{m_e} \tau_{tr} > V_0 \quad \tau_{tr} \sim \frac{\delta_e}{V_{in}}$$

→ $\delta_e > \lambda_e$

異常抵抗発生メカニズムの解明へ

電子慣性長 (λ_e) より分厚い電流層 \rightarrow 異常電気抵抗

➤ 衛星観測 (磁気圏尾部)

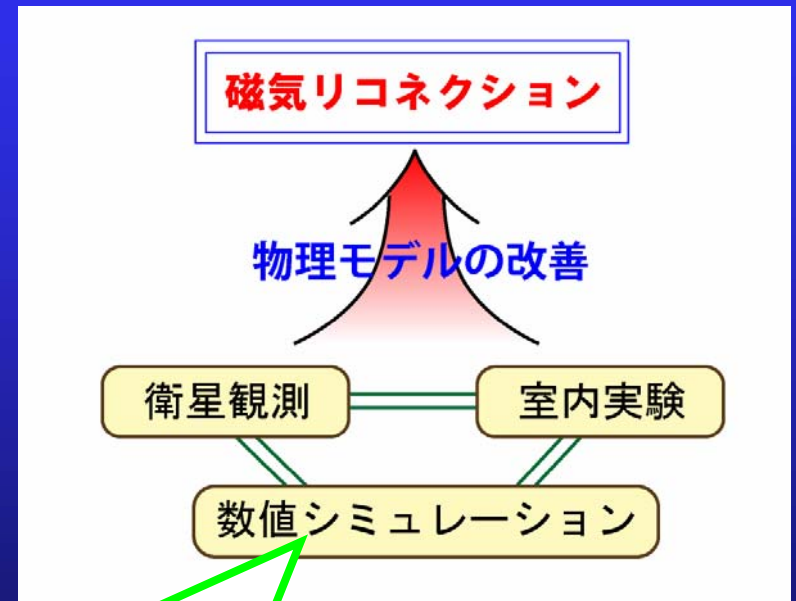
$\delta_e \sim 3-5 \lambda_e$ (Wygant *et al.*, 2005
Chen *et al.*, 2008)

➤ 室内実験

$\delta_e \sim 8 \lambda_e$ (Ji *et al.*, 2008
Ren *et al.*, 2008)

➤ 数値シミュレーション

$\delta_e \sim 2 \lambda_e > \delta_{e,2D}$
(Fujimoto, 2009)



より大きな質量比
(m_i/m_e) で3D大規模シ
ミュレーション