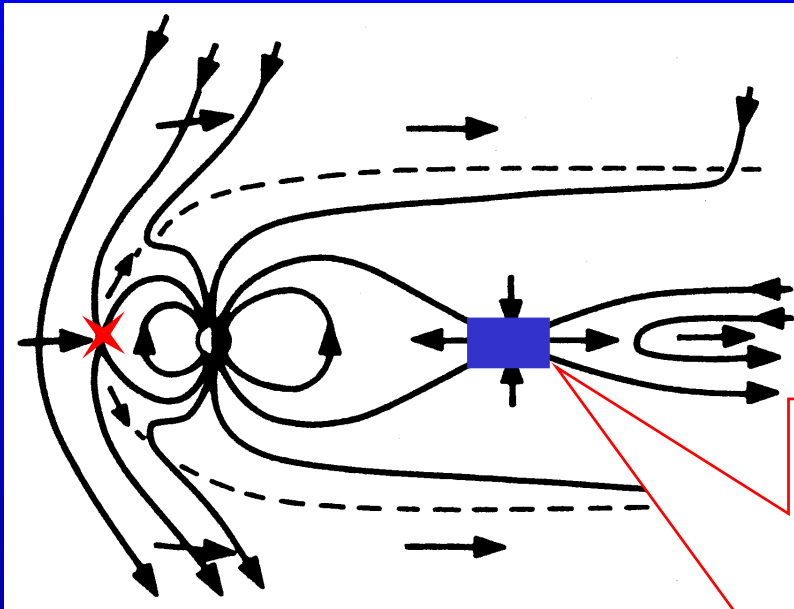


磁気再結合現象の大規模シミュレーション： 電子磁気拡散領域と磁気再結合率の時間変化

藤本桂三^{1,2,3}・島津浩哲²・小原隆博²

1. アルバート大学物理学科
2. 情報通信研究機構
3. 日本学術振興会特別研究員

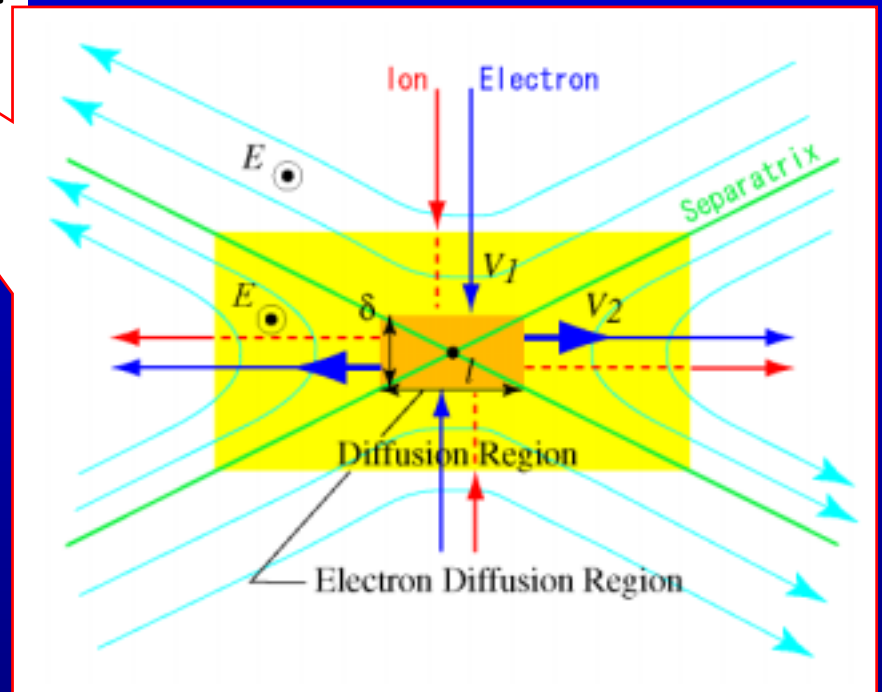
Introduction



(Cowley, 1985)

非MHD領域の現象がMHD領域の構造に大きな影響を与える。

イオンスケールと電子スケールのプロセスが互いに相互作用しながらMHD的構造を決める。



Introduction

● 磁気再結合過程における未解明問題

1. 磁気再結合をすばやく引き起こすメカニズムは何か？

➡ 磁気再結合がいつ、どこで起こり得るか？

2. 準定常状態を維持する物理機構は何か？

➡ 磁気圏サブストームや太陽フレアに伴うエネルギー解放に磁気再結合現象がどの程度寄与しているのか？

3. エネルギー輸送過程はどうなっているか？プラズマはどこでどのように加速・加熱されるのか？

➡ 磁気再結合で開放されたエネルギーはどこへ行くのか？

Introduction

● 速い磁気再結合の準定常モデル

速い: $E_y \sim 0.1 V_{A0} B_0$, 10分間でローブの磁束が15Re程度繋ぎ変わる。

✓ MHDモデル: $E_y \simeq (\pi/8) [\ln(M_A^2 R_m)]^{-1}$ [Petschek, 1964]

✓ 運動論的モデル (GEM Reconnection Challenge, 2001):

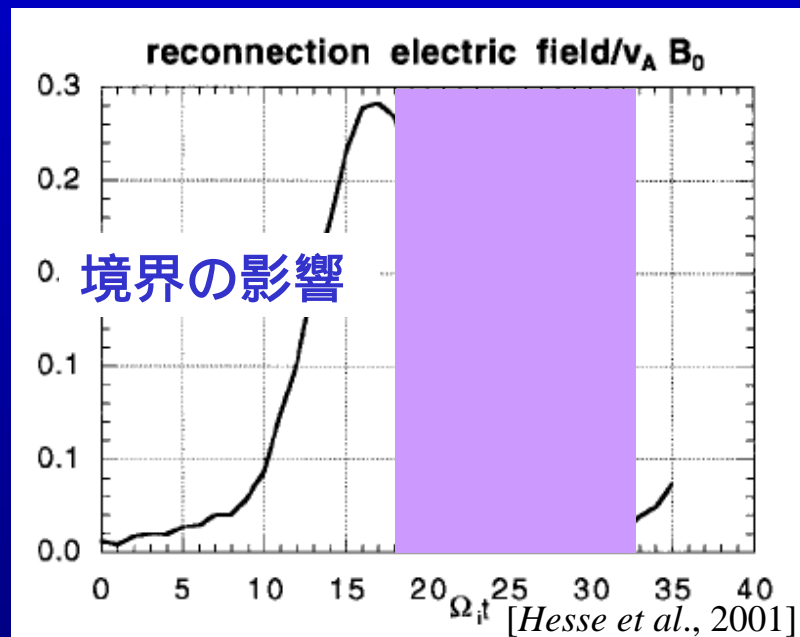
電子磁気拡散領域内

$$E_y \simeq -\frac{1}{n_e e} (\nabla \cdot \mathbf{P}_e)_y - \frac{m_e}{e} (\mathbf{V}_e \cdot \nabla) V_{ey}$$

電子磁気拡散領域外

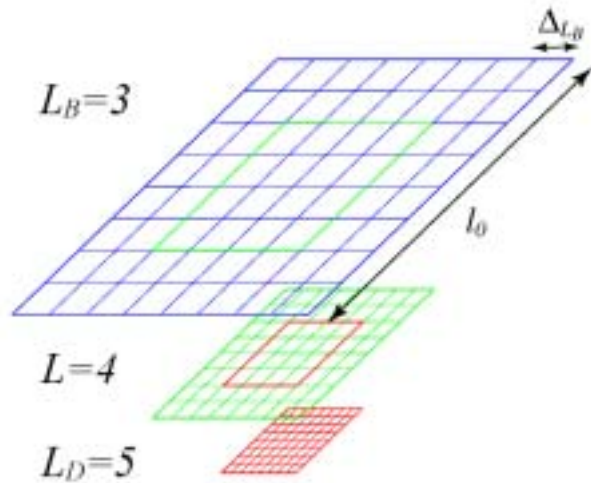
$$E_y \simeq \frac{1}{n_e e} (\mathbf{J} \times \mathbf{B})_y$$

ホール効果さえあれば速い磁気再結合が可能。 [e.g., Birn et al., 2001]



適合格子細分化 (AMR) 法を用いた電磁粒子コード

AMR technique



Particle splitting algorithm

$$\Delta r = \Delta L / N^{1/2}$$

N : Number of particles in the cell.

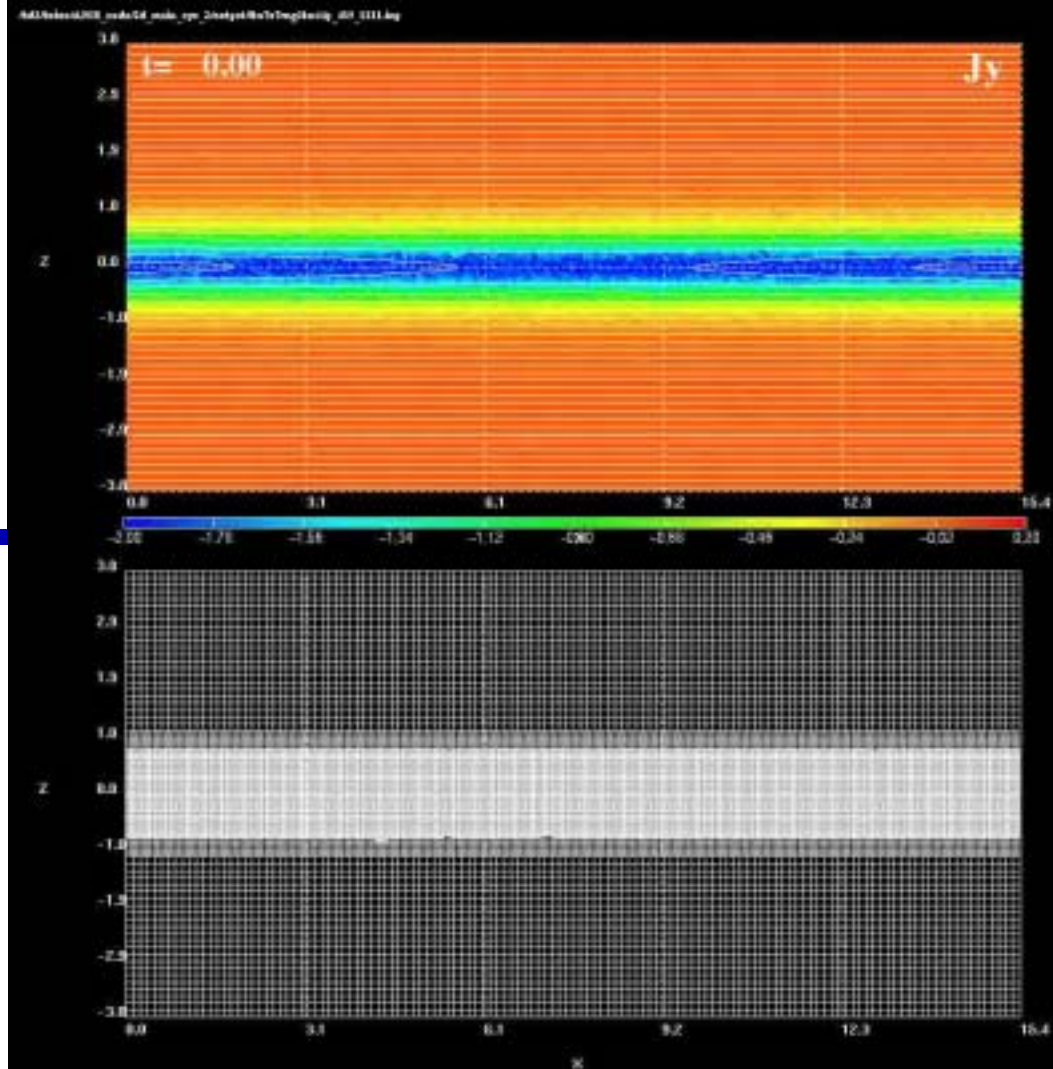
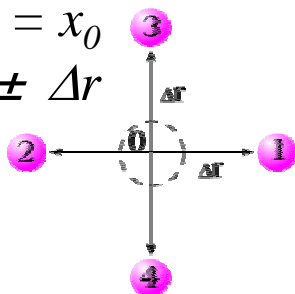
$$x_{1,2} = x_0 \pm \Delta r; \quad x_{3,4} = x_0$$

$$y_{1,2} = y_0; \quad y_{3,4} = y_0 \pm \Delta r$$

$$\mathbf{V}_{1,2,3,4} = \mathbf{V}_0;$$

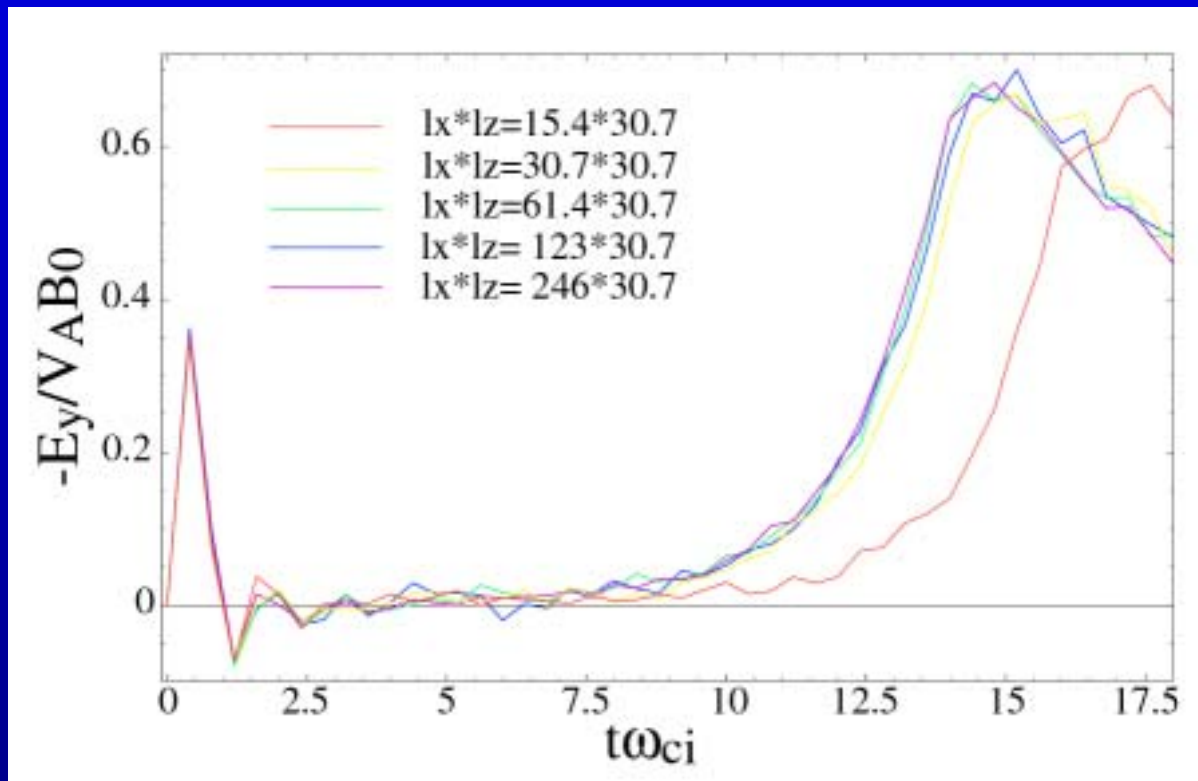
$$q_{1,2,3,4} = q_0/4;$$

$$m_{1,2,3,4} = m_0/4$$

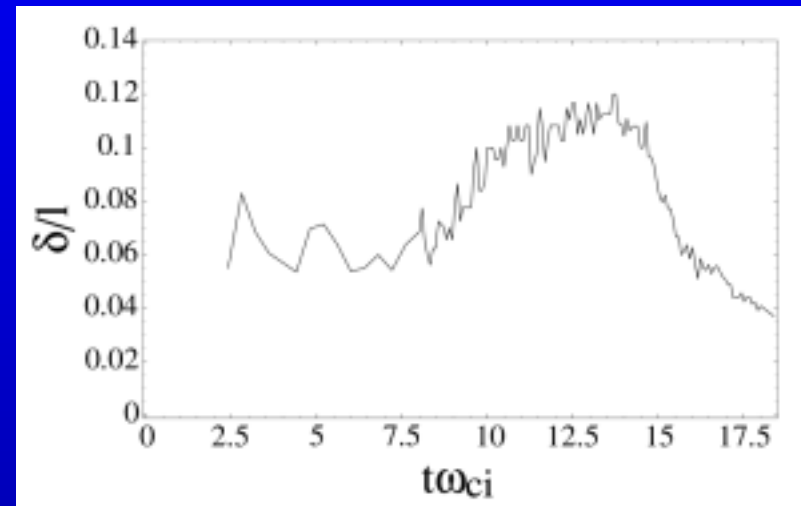
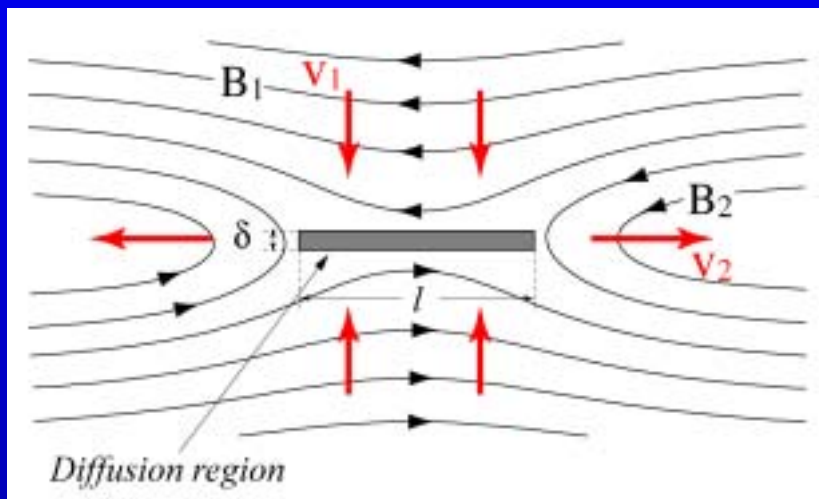


磁気再結合率の時間変化

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} = -E_{y,xline}$$



磁気再結合率の減衰メカニズム

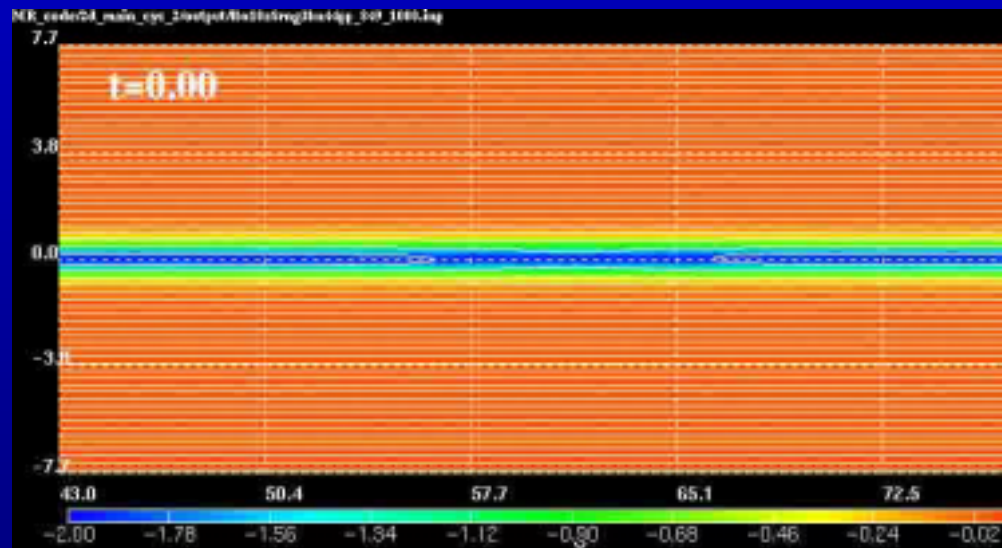


$$B_1^2 / 2\mu_0 \simeq nm_e V_2^2 / 2$$

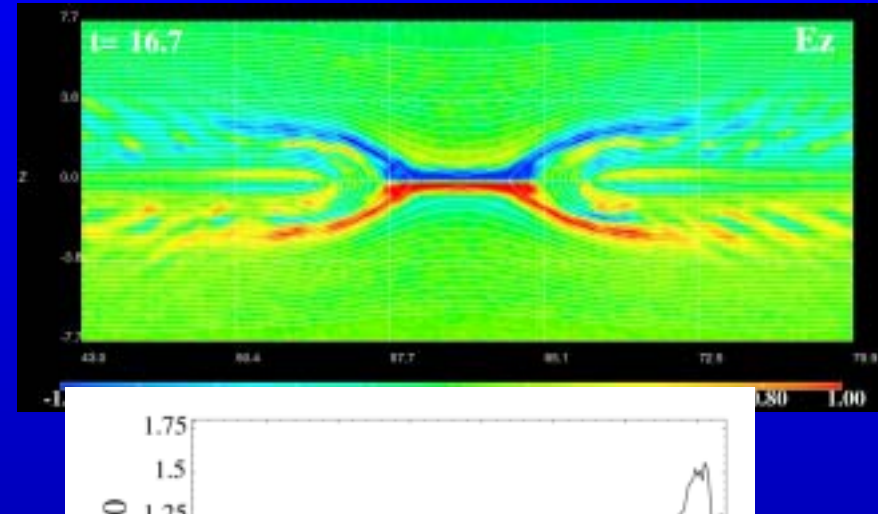
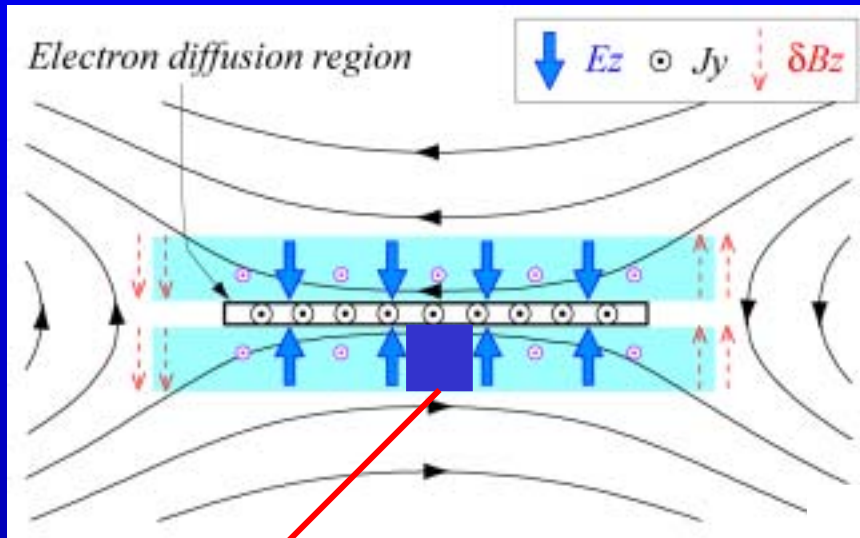
$$V_2 \simeq B_1 / \sqrt{\mu_0 n m_e} = V_{Ae}$$

$$lV_1 \simeq \delta V_2, E_y = V_1 B_1$$

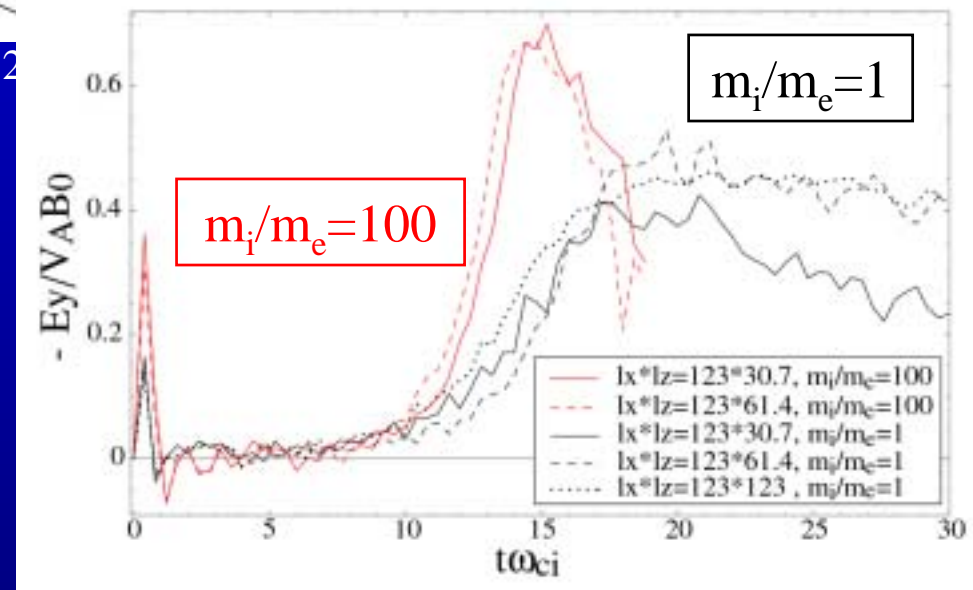
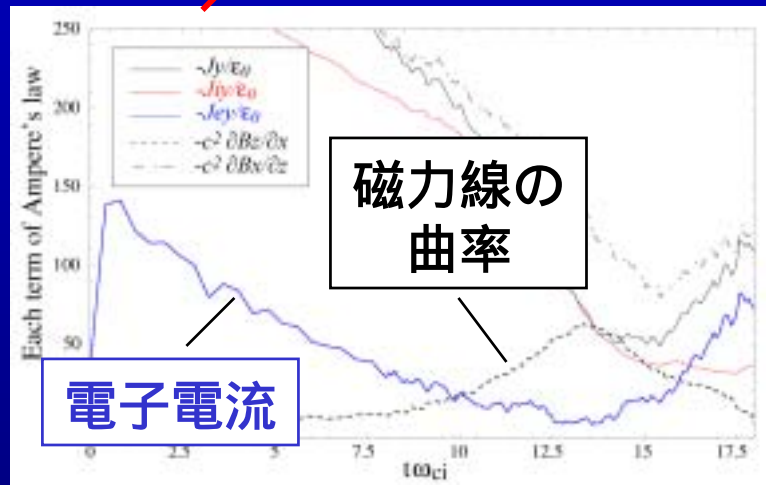
$$E_y \sim (\sigma/l) V_A B_1$$



電子磁気拡散領域の伸長メカニズム



[Fujimoto, Phys. Plasmas, 2005]



観測との比較

$$E_{y,max} \sim 0.7 V_A B_0 \quad (\text{シミュレーション})$$

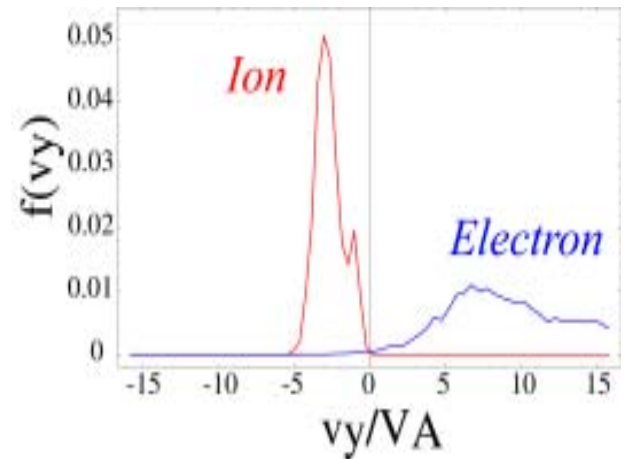
$$B_0 \sim 10 \text{ nT}, n_{ps} \sim 0.5 \text{ cm}^{-3} \Rightarrow E_y \sim 2.2 \text{ mV/m}$$

非現実的な値ではない (e.g., Asano et al., 2004)

Eyの減衰を抑えるプロセス

$V_d > v_{e,th}$ Buneman不安定性が励起され得る。

$$E_y = \underbrace{-\frac{1}{en_e}(\nabla \cdot \vec{P}_e)_y}_{\text{圧力テンソル非対角成分}} - \underbrace{\frac{m_e}{e} \frac{dv_{ey}}{dt}}_{\text{電子の慣性項}} + \underbrace{\eta^{an} j_y}_{\text{異常抵抗}}$$



まとめ

AMR法を用いた新しい電磁粒子コードを使って磁気再結合現象の大規模粒子シミュレーションを行い、磁気拡散領域と磁気再結合率の時間発展を調べた。

1. Hall効果さえあれば準定常的な速い磁気再結合は可能か？ **NO!**

イオンと電子の慣性の違いによって生じる分極電場のために、電子磁気拡散領域が伸びるので、準定常的な磁気再結合は実現されず、磁気再結合率は減衰する。

2. 速い磁気再結合を実現するためにHall効果は必要か？ **NO!**

Hall効果がない系 ($m_i/m_e = 1$) でも速い磁気再結合は起こりうる。



既存のモデルを修正する必要がある。

まとめ

磁気拡散を上げるメカニズムとしては、Bunemanタイプの不安定性による異常抵抗が考えられるが、定量的にどの程度影響を与えるかはわからない。

今後は、現在の2次元コードを3次元に拡張することによって、y方向の擾乱が磁気再結合率に与える影響について考える必要がある。