

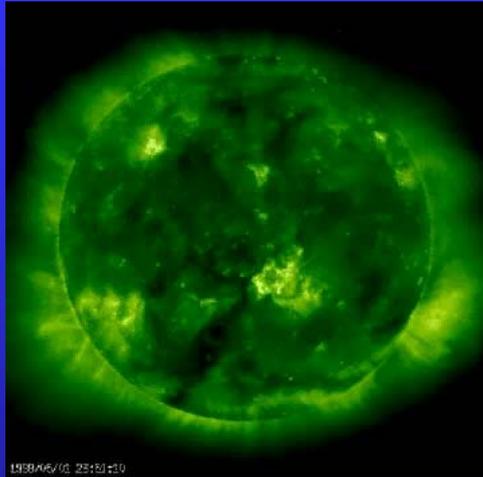
高速磁気リコネクション時に形成される 薄い電流層の3次元特性

藤本 桂三

理化学研究所 計算宇宙物理研究室

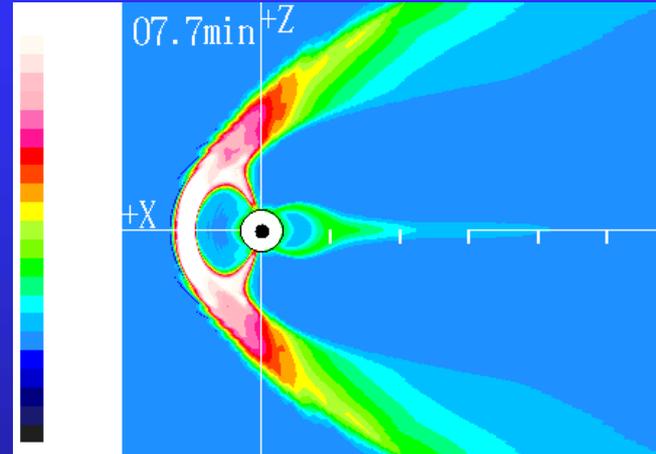
宇宙空間における磁気リコネクション

[太陽フレア]

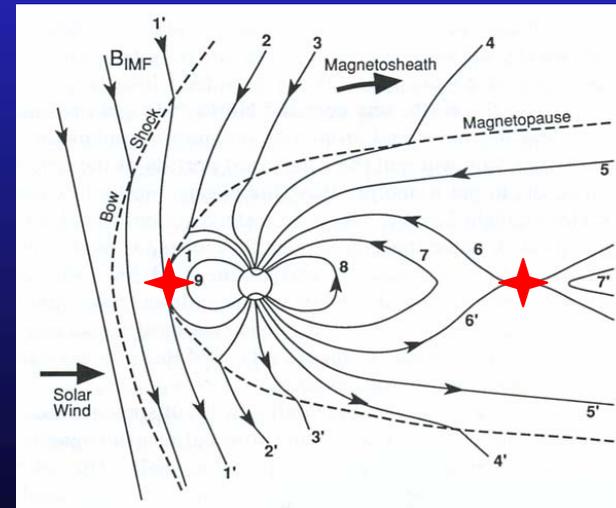
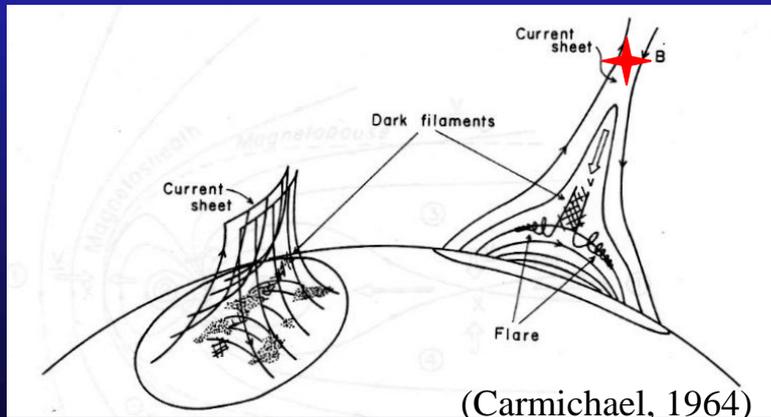


(<http://vestige.lmsal.com/TRACE/>)

[地球磁気圏サブストーム]



(<http://www2.nict.go.jp/dk/c232/>)



(Kivelson and Russel, 1995)

磁気リコネクション過程における問題点

➤ 高速磁気リコネクションを可能にする物理は何か？

- 何がリコネクション効率を決めるのか？
- 磁気拡散過程はどうなっているのか？
- 本質的に3次元的吗、2次元的吗？

➤ プラズマはどのように加速・加熱されるか？

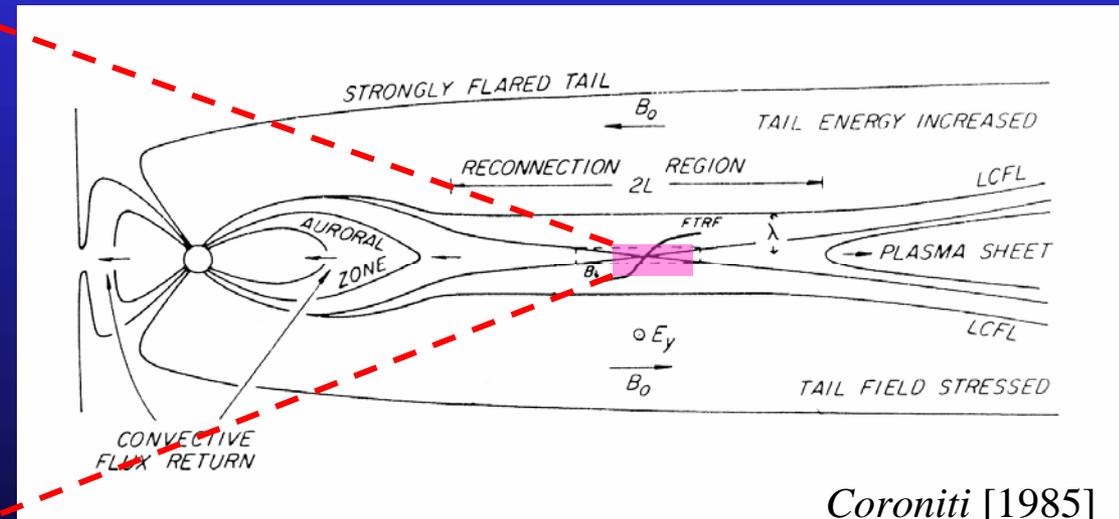
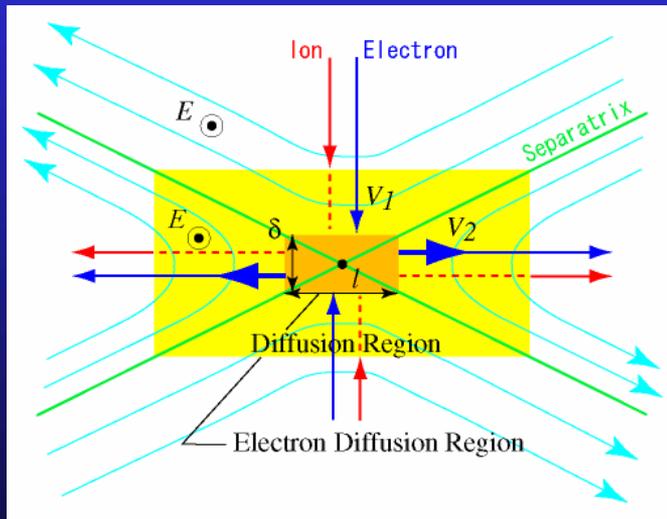
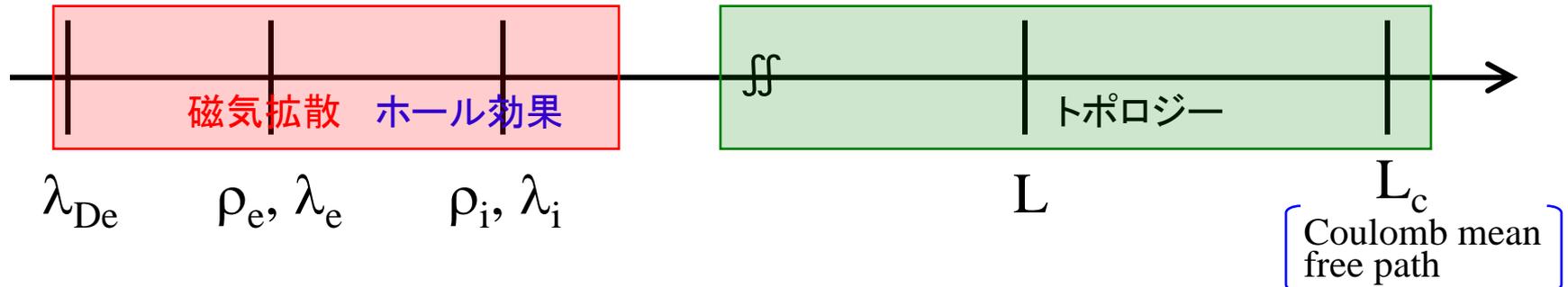
- 非熱的プラズマはどのように生成されるか？
- 最大でどこまで加速され得るか？
- 3次元性の影響は？

磁気リコネクションのマルチスケール性

$$\beta_i \sim 1$$

Full PIC (粒子)

MHD (流体)

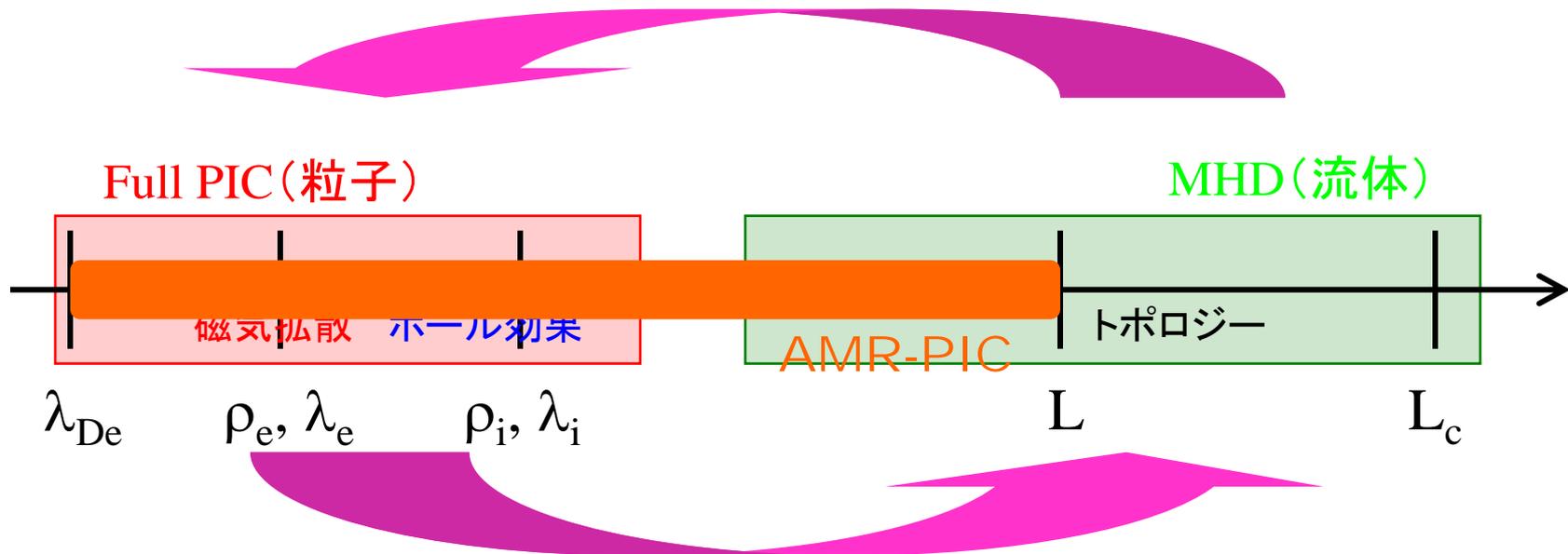


Coroniti [1985]

$\lambda_e \sim 10 \text{ km}$
 $\lambda_i \sim 10^3 \text{ km}$

$L \sim 10^5 \text{ km}$

磁気リコネクションのマルチスケール性



MHDシミュレーション

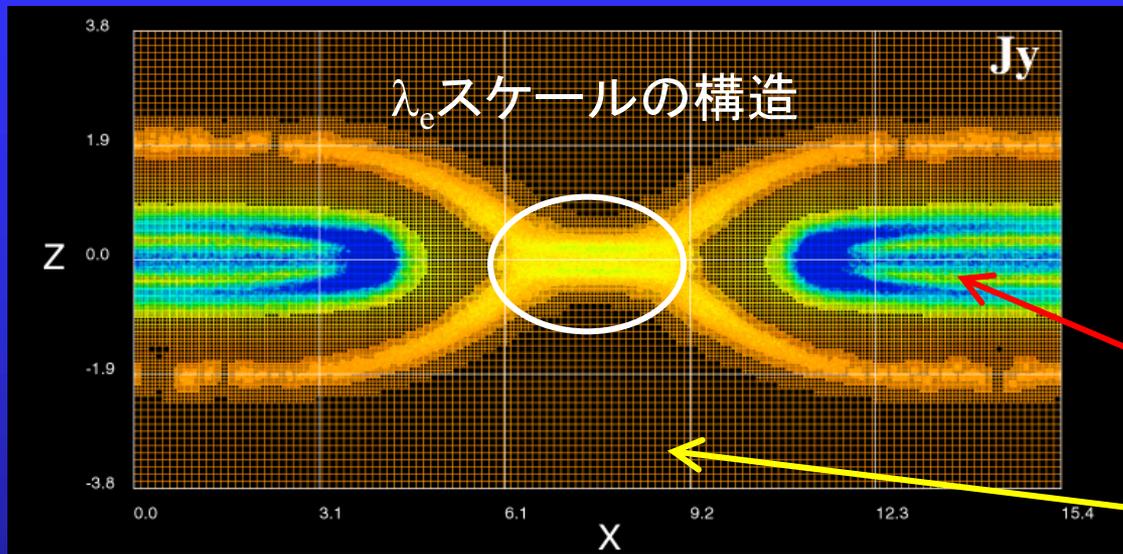
$$\frac{\partial B}{\partial t} = \eta \nabla^2 B$$

- リコネクション率は電気抵抗モデルに依存する。(Biskamp, 1986; Ugai, 1995)
- サブストームにおけるグローバル応答は電気抵抗のパラメータによって敏感に変化する。(Raeder et al., 2001; Kuznetsova et al., 2007)

AMR-PICコード

[Fujimoto & Machida, JCP, 2006;
Fujimoto & Sydora, CPC, 2008]

(Adaptive Mesh Refinement – Particle-in-Cell)



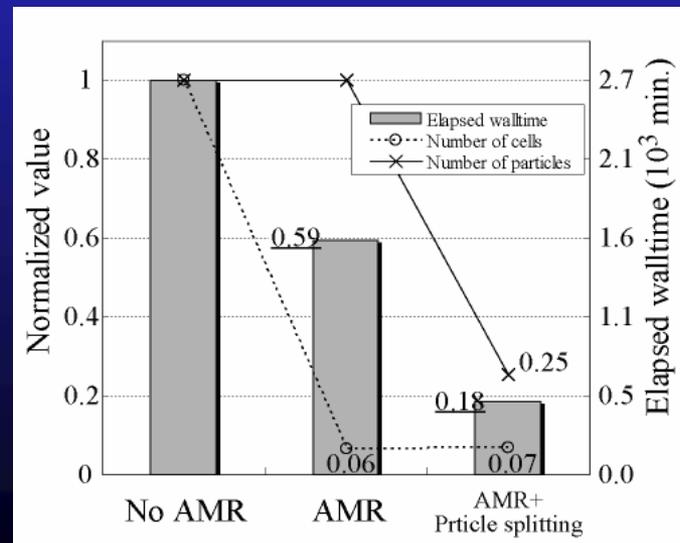
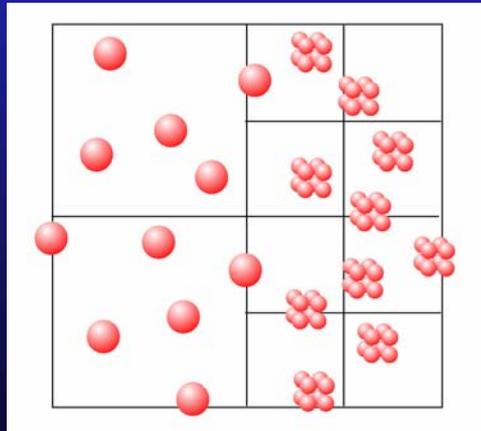
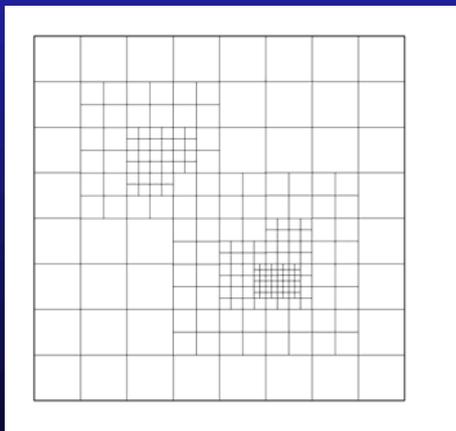
陽解法の制約

$$\Delta x < \lambda_{De}, \quad \omega_{pe} \Delta t < 1$$

$$\Delta x / \Delta t > c$$

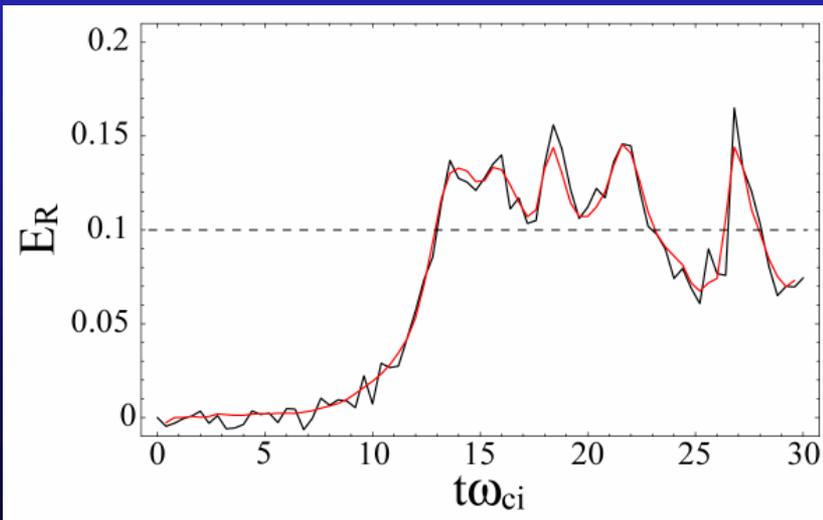
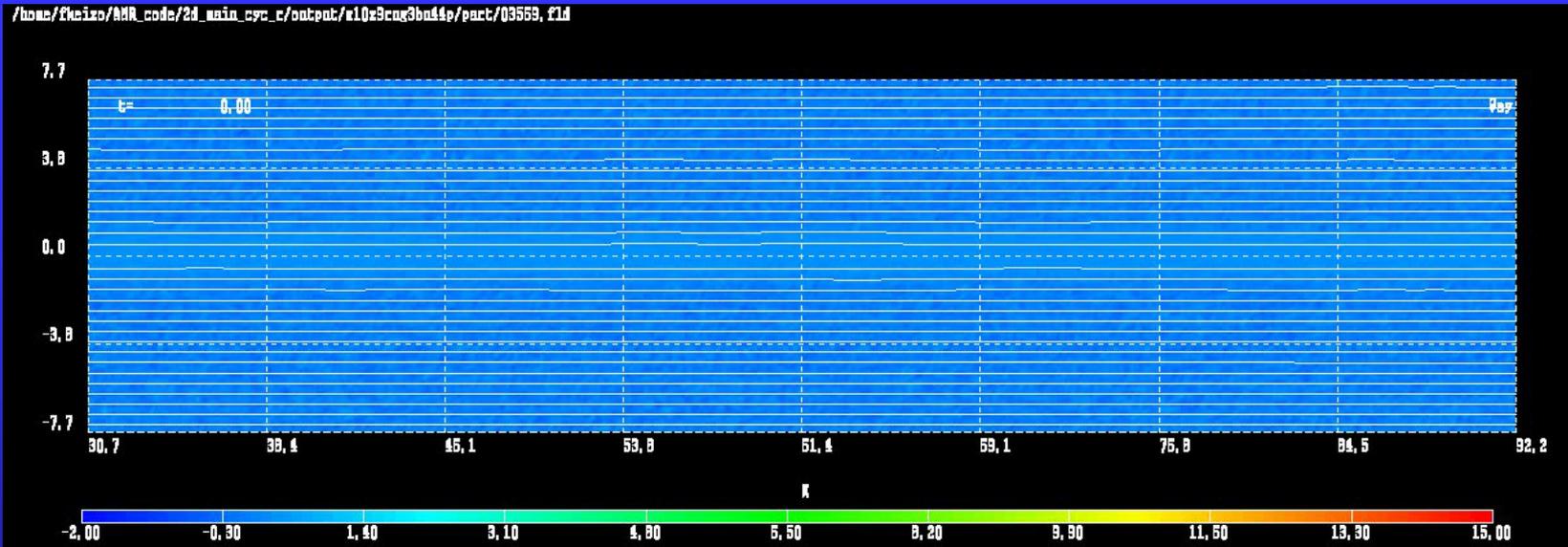
$$\lambda_{De,ps} \sim 3 \times 10^2 \text{ m}$$

$$\lambda_{De,lobe} \sim 6 \times 10^3 \text{ m}$$



2次元磁気リコネクション

[Fujimoto, POP, 2006;
Klimas et al., POP, 2008]



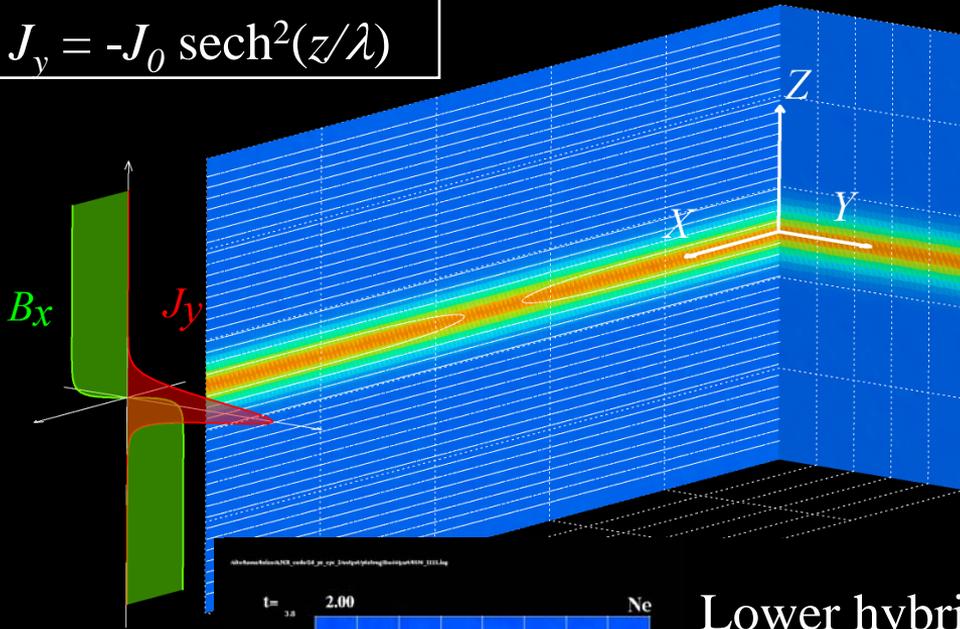
電子磁気拡散領域



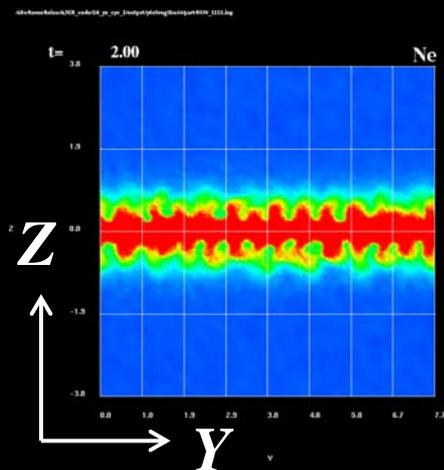
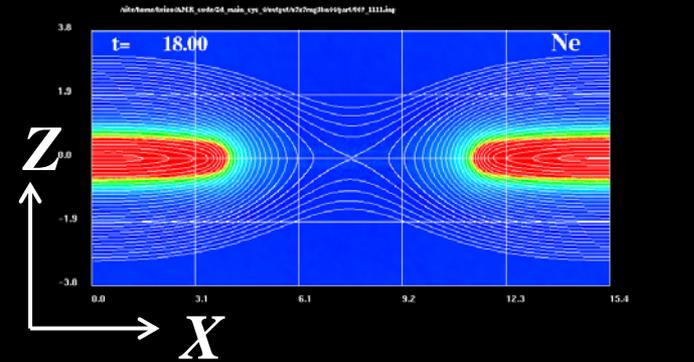
3次元電流層における不安定モード

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

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



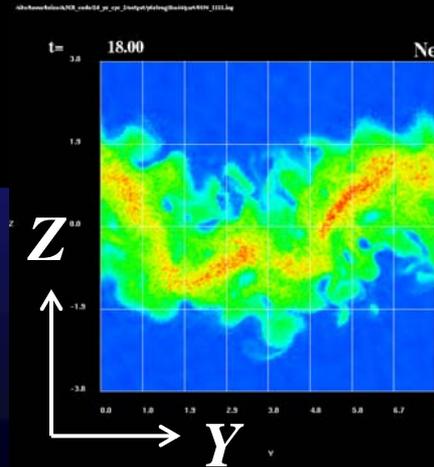
Tearing instability



Lower hybrid drift instability (LHDI)

$$k_y \rho_e \sim 1$$

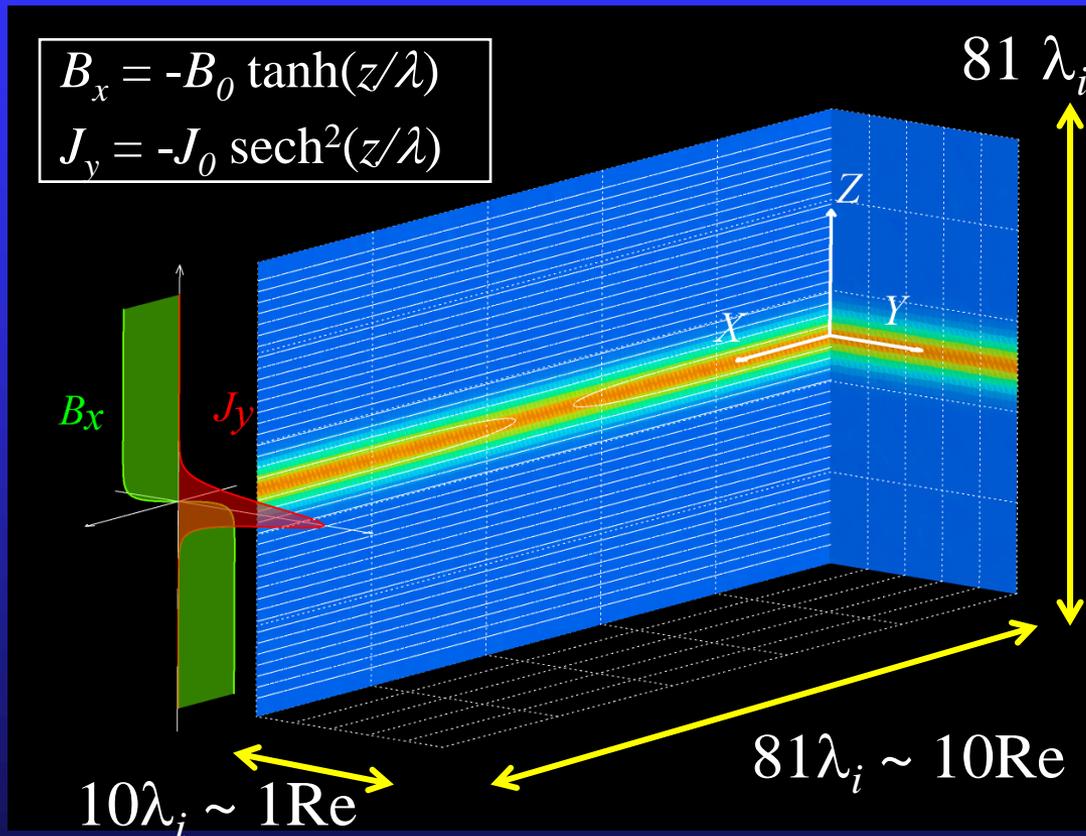
$$\gamma \sim \omega_{lh}$$



Kink-type instability

$$k_y L \sim 1$$

3次元大規模粒子シミュレーション



$$m_i/m_e = 100$$

最大解像度:

$$4096 \times 512 \times 4096 \sim 10^{10}$$

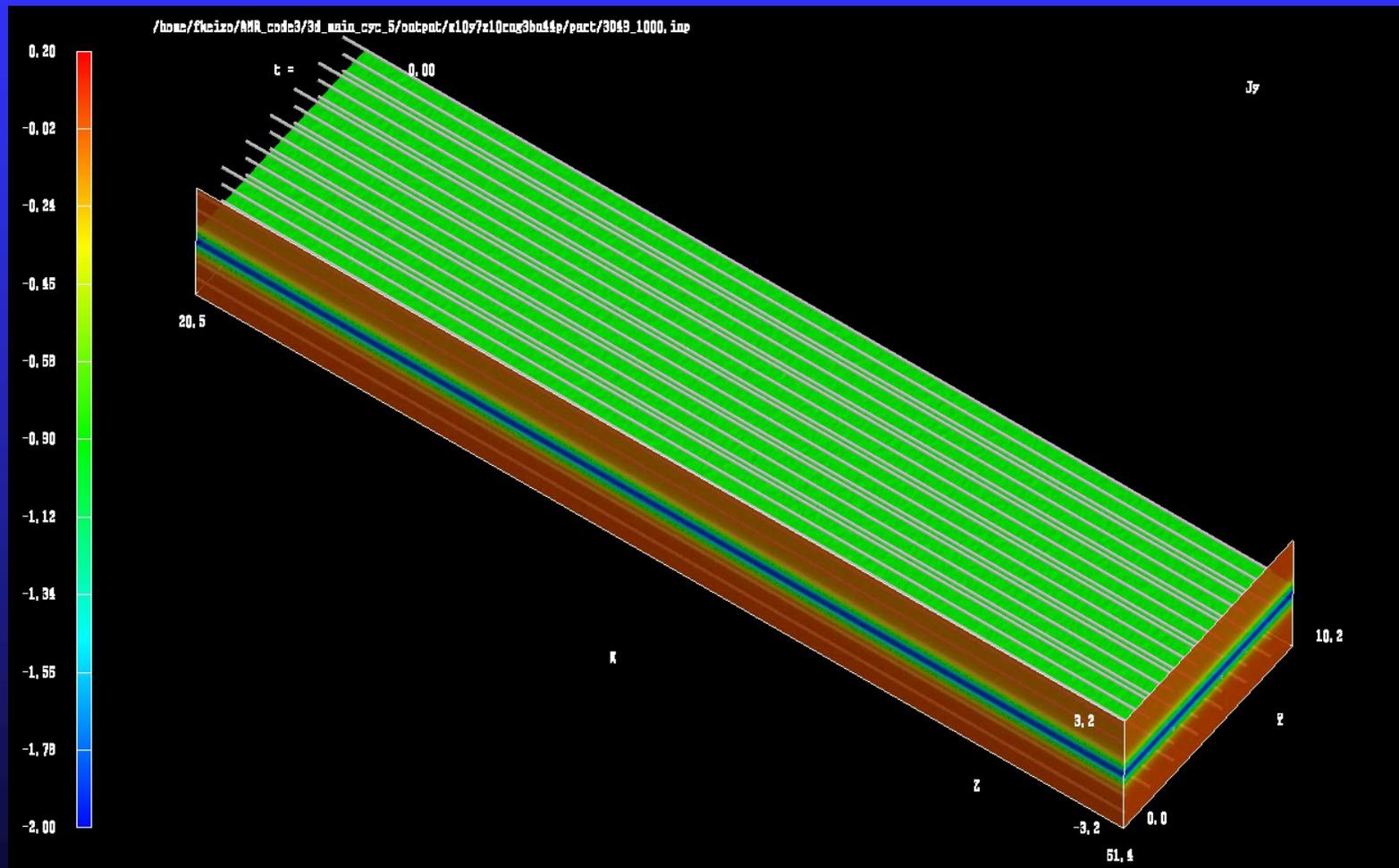
最大粒子数:

$$\text{イオン} + \text{電子} \sim 10^{11}$$

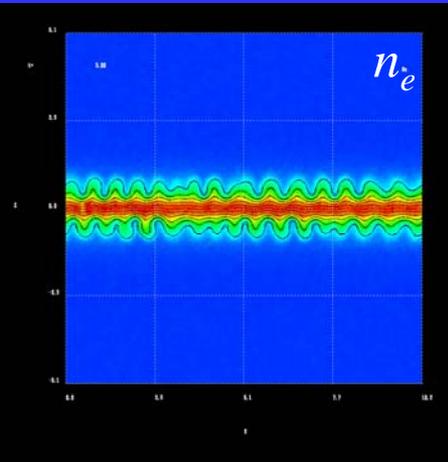
最大メモリ $\sim 5\text{TB}$

3次元大規模粒子シミュレーション

側面: J_y 等値面: $|J|$ 実線: 磁力線



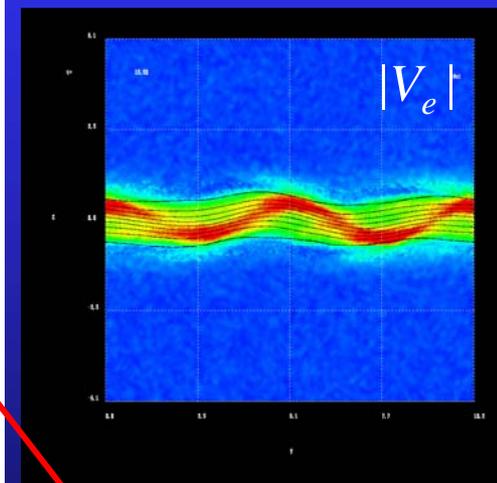
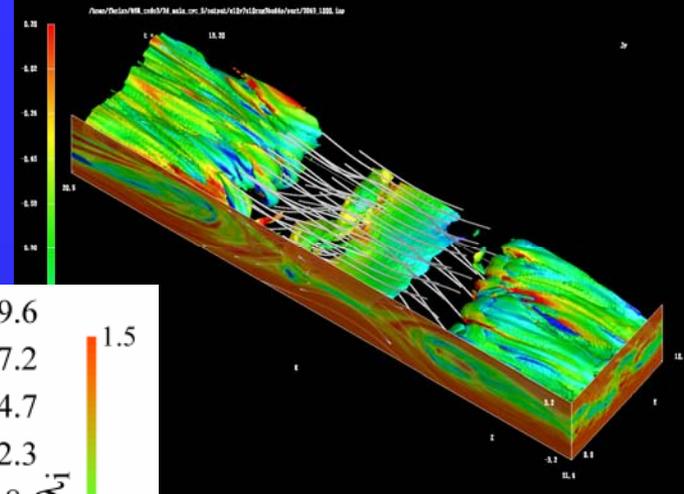
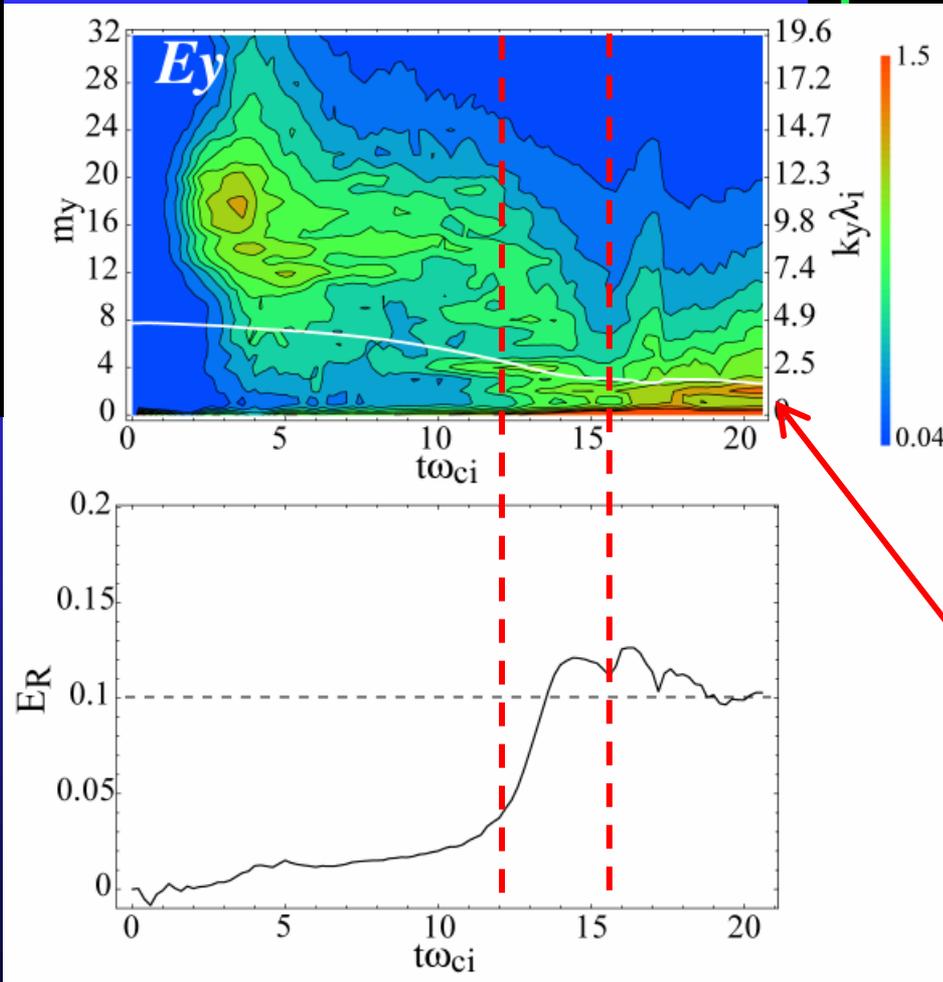
電流方向に励起する波動



LHDI

$$k_y \rho_e \sim 1$$

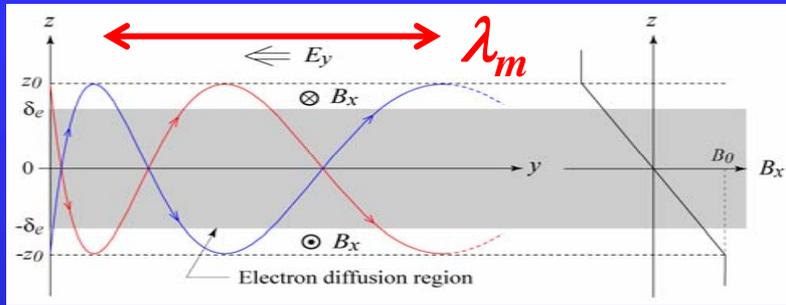
$$\gamma \sim \omega_{lh}$$



$$k_m = \frac{2\pi}{\lambda_m}$$

$$\lambda_m = 3\pi\lambda_e$$

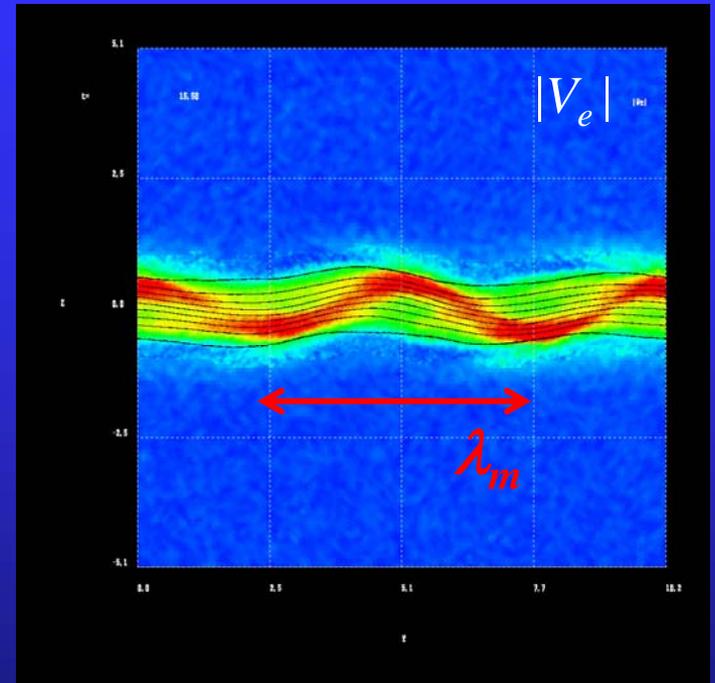
電子のメアンダリングスケール



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

$$\lambda_m \approx V_{ey} \frac{2\pi}{\omega_m} = 3\pi \lambda_e$$

[Fujimoto, 2009]



電磁波動の波長 ~ 電子のメアンダリングスケール

➡ 波による電子の散乱、異常電気抵抗

観測との比較

● 周波数帯

$$\lambda \approx 3\pi\lambda_e \sim \text{数}100\text{km}$$

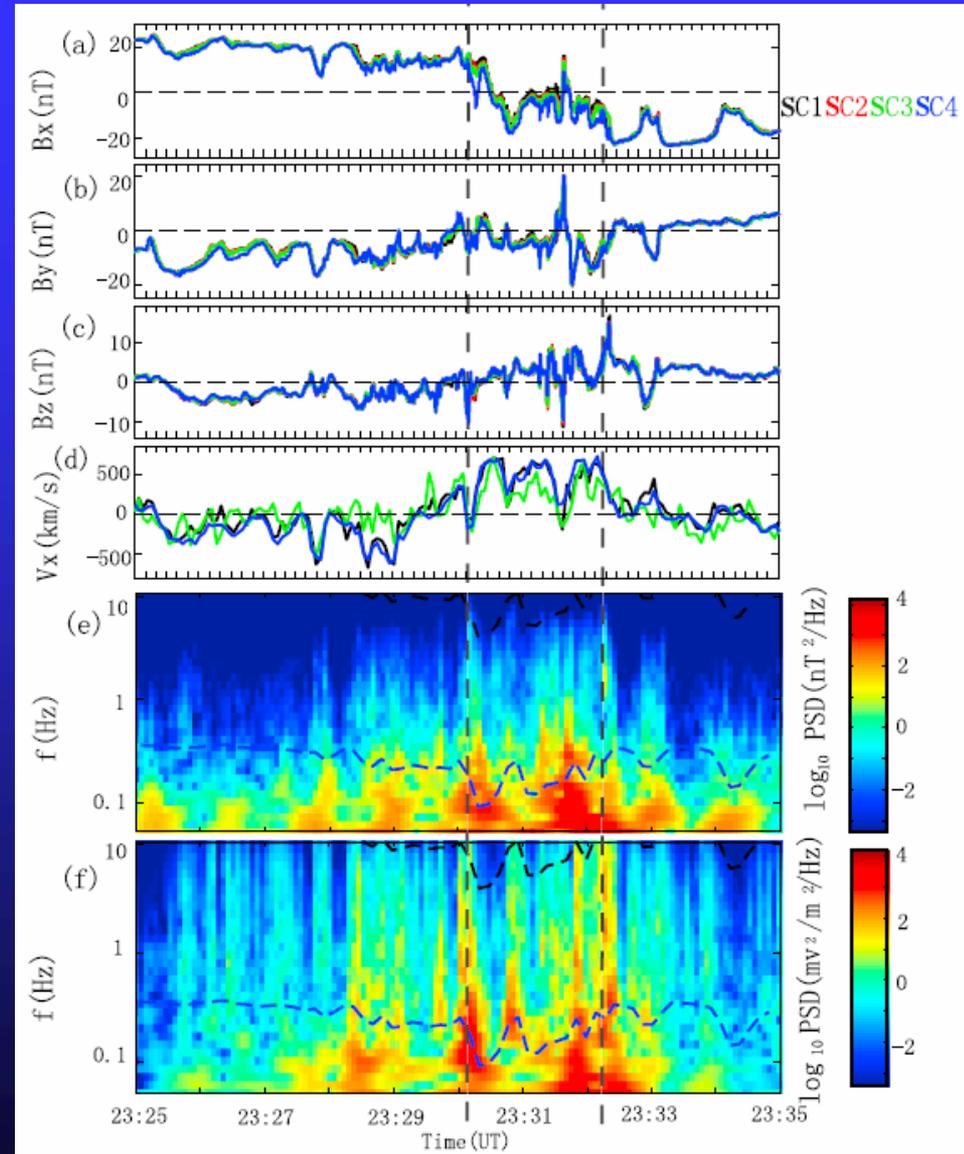
$$V_{ph} = \frac{m_i V_{iy} + m_e V_{ey}}{m_i + m_e} \approx V_A$$

$$\omega = kV_{ph} \approx \frac{2}{3}\sqrt{\omega_{ci}\omega_{ce}} \sim \omega_{lh}$$

● Cluster衛星による観測

[Zhou et al., JGR, 2009]

- ✓ 電流層中心付近で ω_{lh} 帯の電磁波
- ✓ 波長 $\lambda \sim 352\text{km}$



まとめ

磁気リコネクションの大規模な3次元粒子シミュレーションを実施し、電流層の3次元構造を調べた。

- X-lineに沿って**電磁波動が発生**。電子磁気拡散領域の分裂にともなって大きく増幅される。リコネクション効率は2次元の場合と大きな変化は無い。
- 波長が電子のメアンダリングスケールであるため、**電子が熱化される**。⇒ **異常電気抵抗の発生**。
- **周波数は低域混成 (Lower Hybrid) 周波数帯**。観測事実とも整合的である。

今後の課題

- 不安定波動の特定 (線形解析)。
- どの程度異常電気抵抗が寄与しているのかを調べる。