

開放境界を用いた磁気リコネクションの 大規模粒子シミュレーション

藤本桂三

(国立天文台 理論研究部)

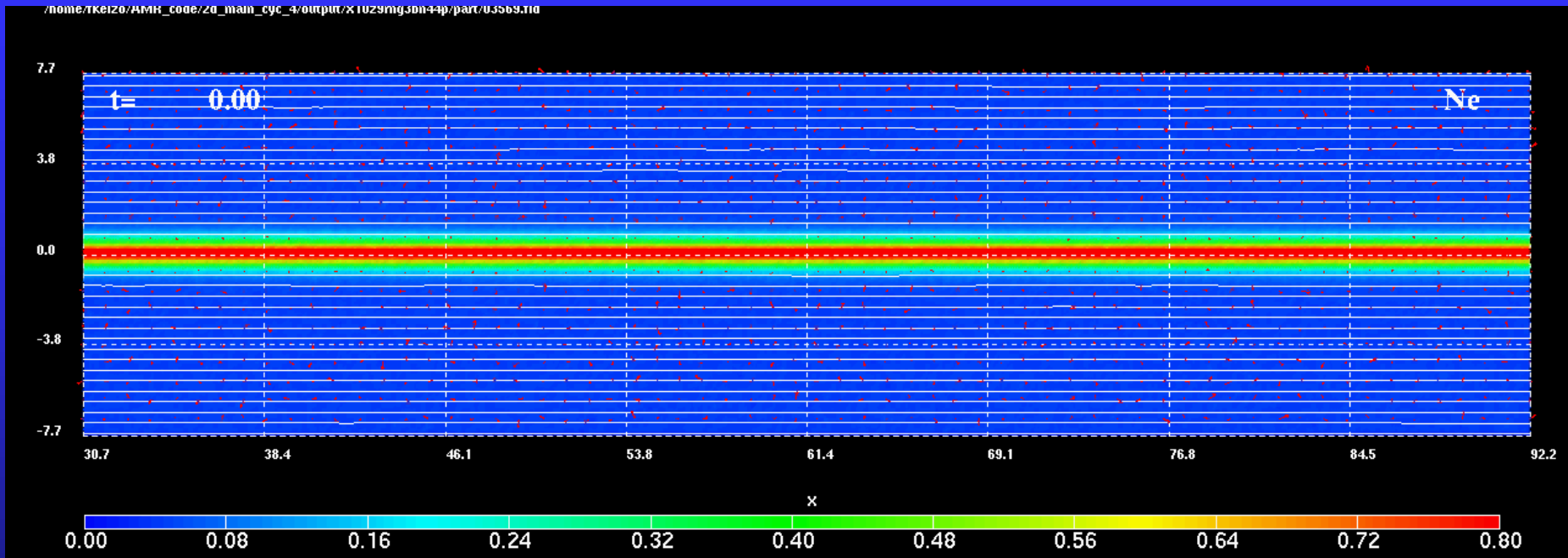
荻野竜樹

(名古屋大学 太陽地球環境研究所)

石井克哉

(名古屋大学 情報基盤センター)

磁気リコネクション現象

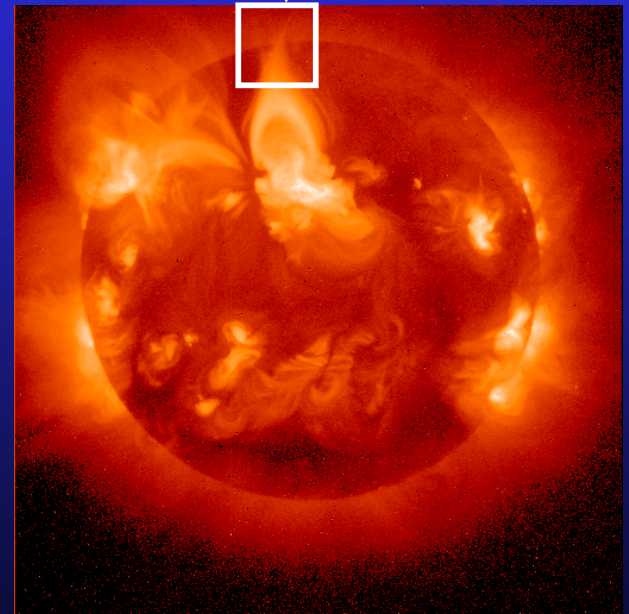
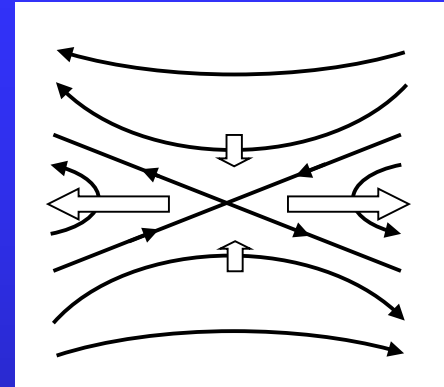
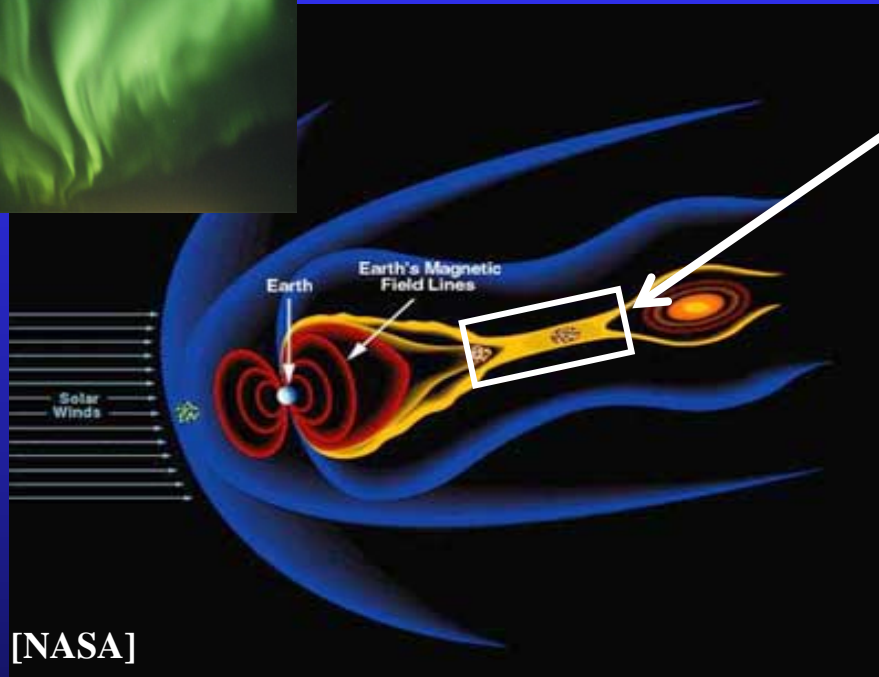


- 磁力線のトポロジーを変える
- プラズマを加速・加熱

宇宙における磁気リコネクション

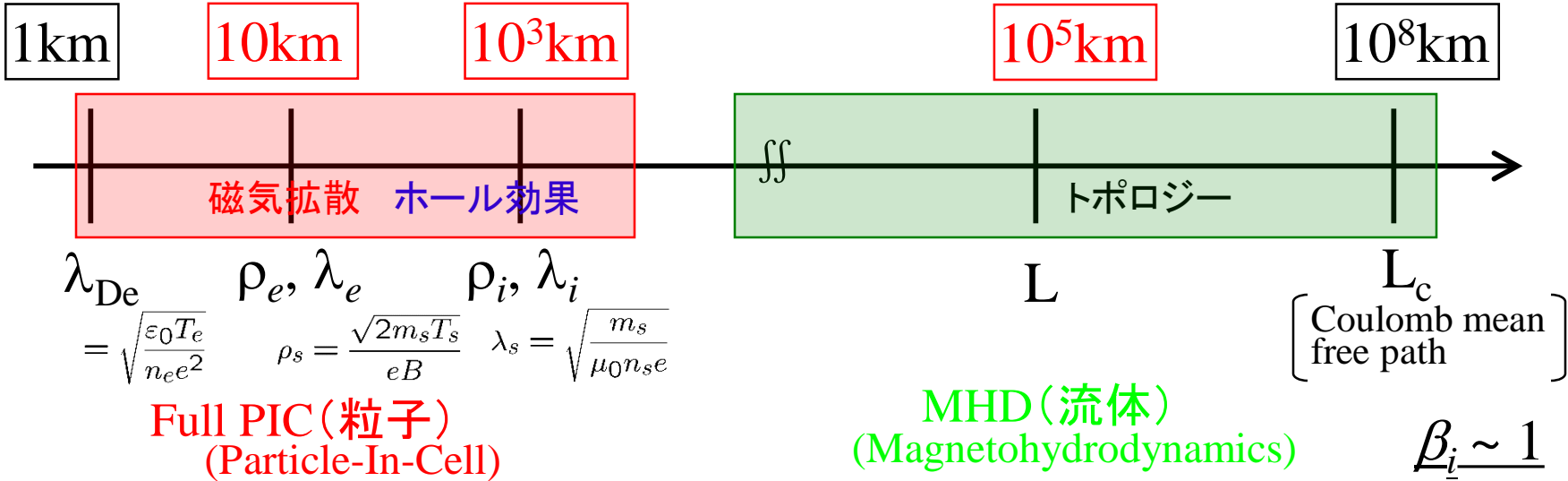
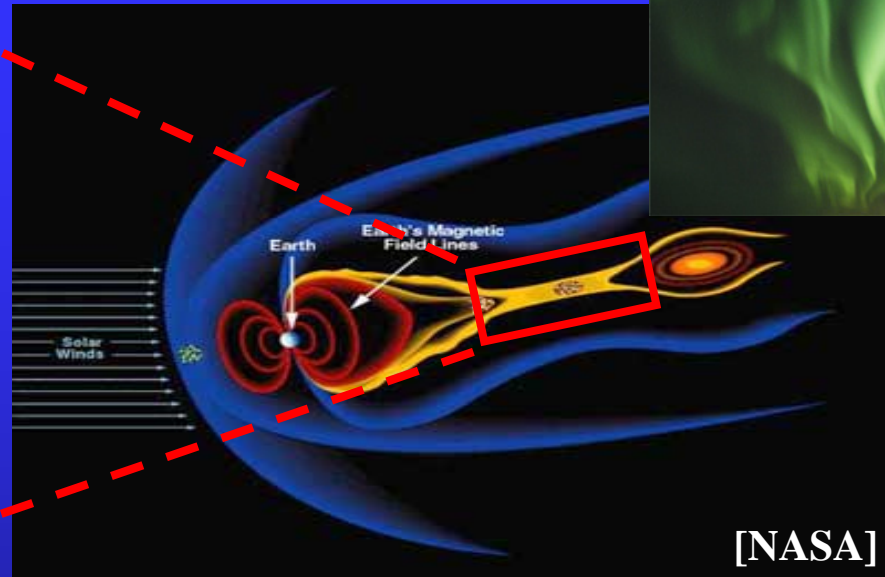
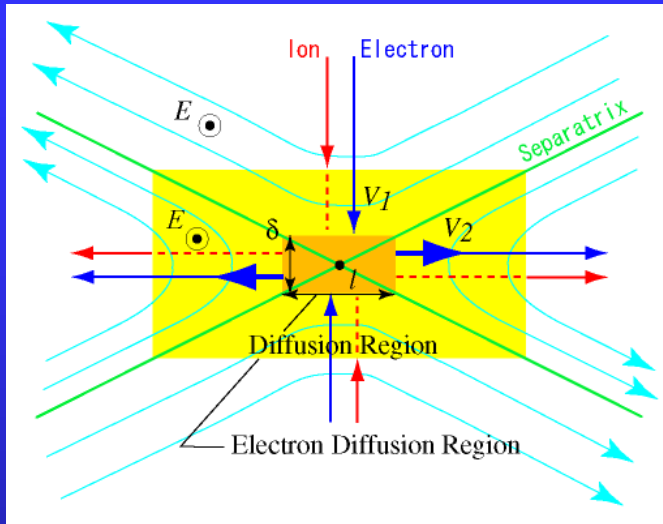


Auroral Substorms



Solar Flares

磁気リコネクションと磁気圏サブストーム



$$\frac{\partial B}{\partial t} = \eta \nabla^2 B / \mu_0$$

Numerical resistivity only

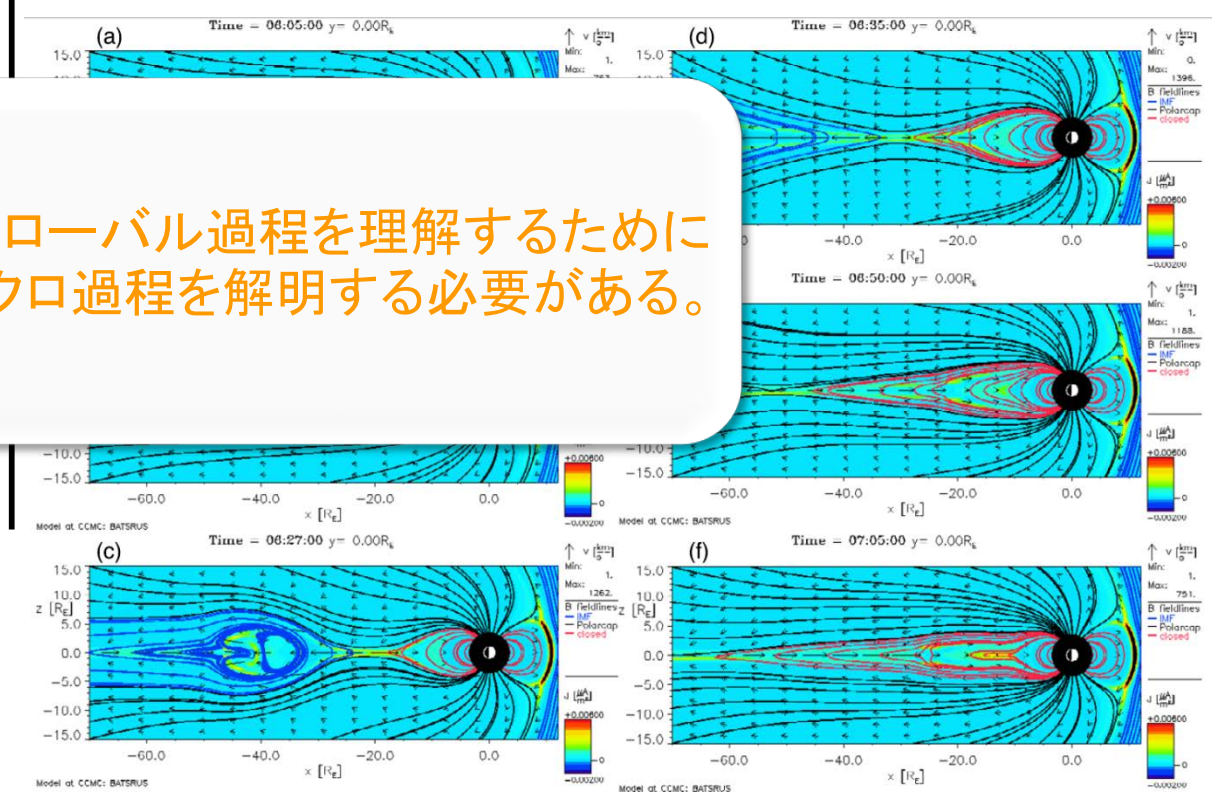
Nongyrotropic correction case

$$E^{ng} = \frac{1}{ne} \left(\frac{\partial P_{ixy}}{\partial x} + \frac{\partial P_{ixz}}{\partial z} \right) = \frac{m_i}{e} \sqrt{\frac{2P}{\rho}} \frac{\partial v_x}{\partial x}$$

グローバル過程を理解するために
ミクロ過程を解明する必要がある。

- Slow reconnection
- Quasi-steady configuration

- Fast reconnection
- Quasi-periodic process



将来的な戦略

磁気リコネクションのマクロシステムへの適用

MHD(流体)コード

- スケールフリー
- 自由な境界条件・初期設定

グローバル構造のモデリング

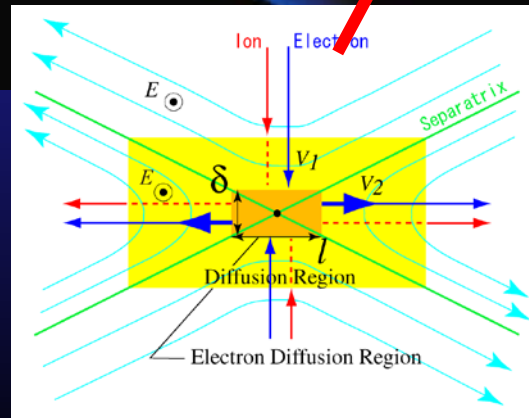
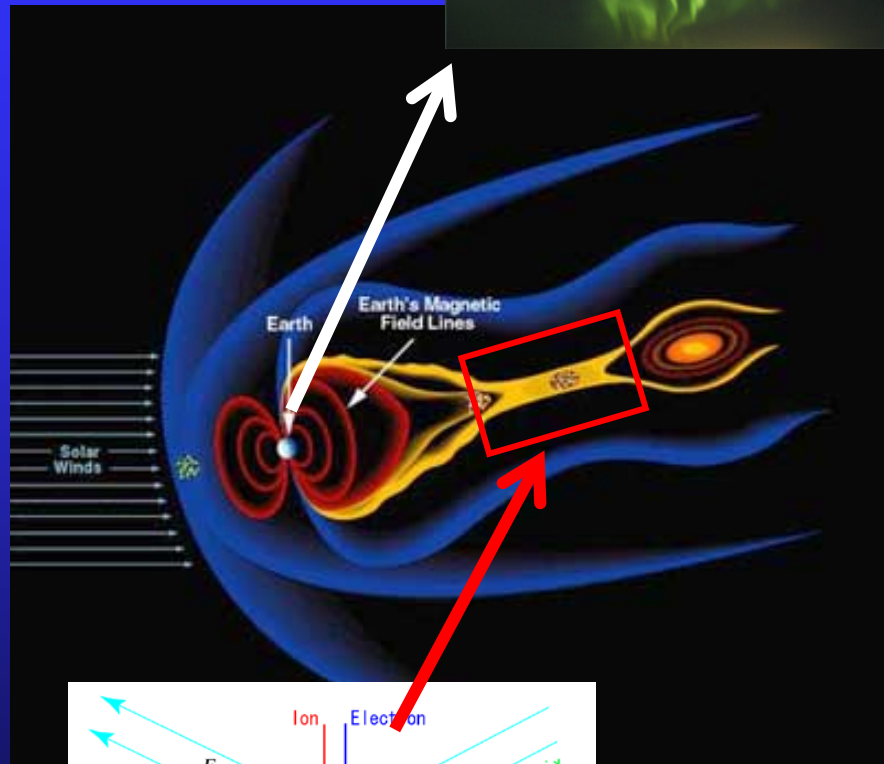
$$E + V \times B = \eta J$$

プラズマ運動論効果

PICコード

- 完全な運動論効果
- 詳細なミクロ構造

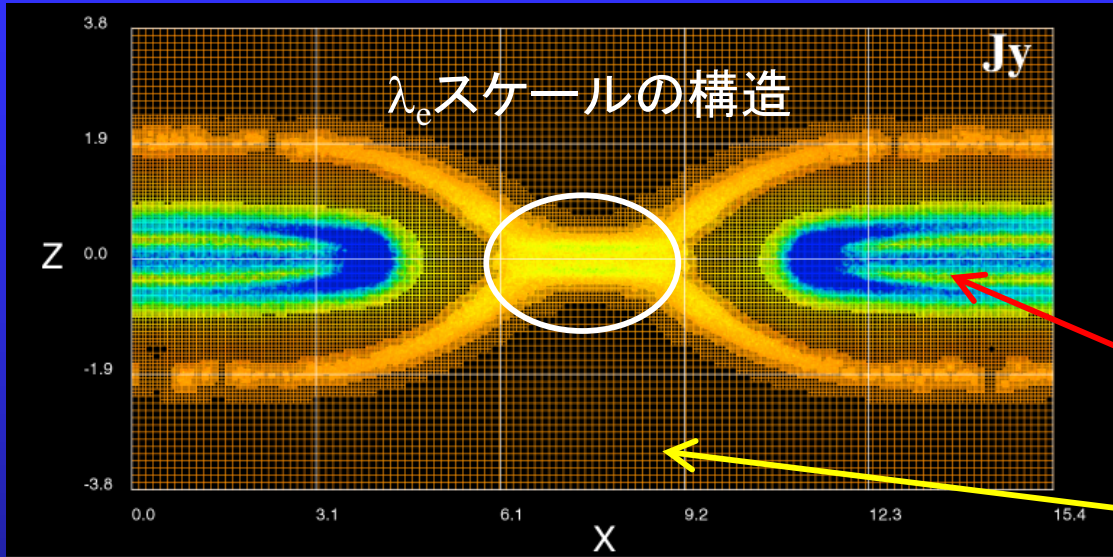
物理的
考察



AMR-PICコード

[Fujimoto & Machida, JCP, 2006;
Fujimoto, JCP, 2011]

(Adaptive Mesh Refinement – Particle-in-Cell)



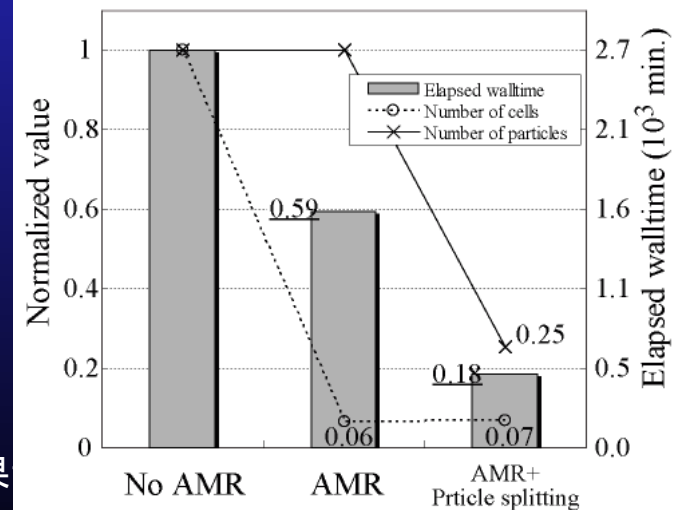
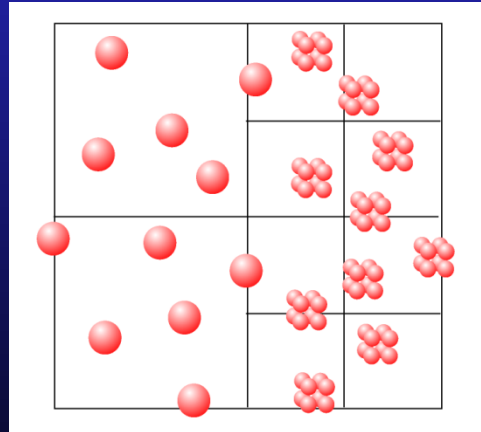
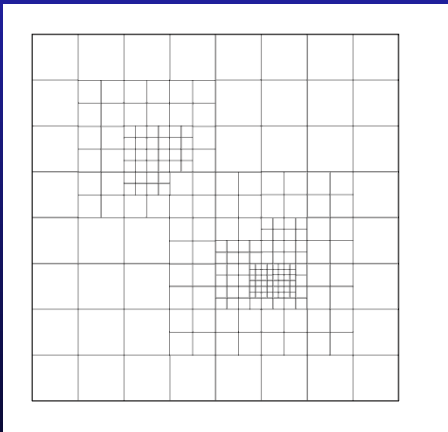
陽解法の制約

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

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

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

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



名大HPCプロジェクト 成果

Time Evolution of the Current Sheet

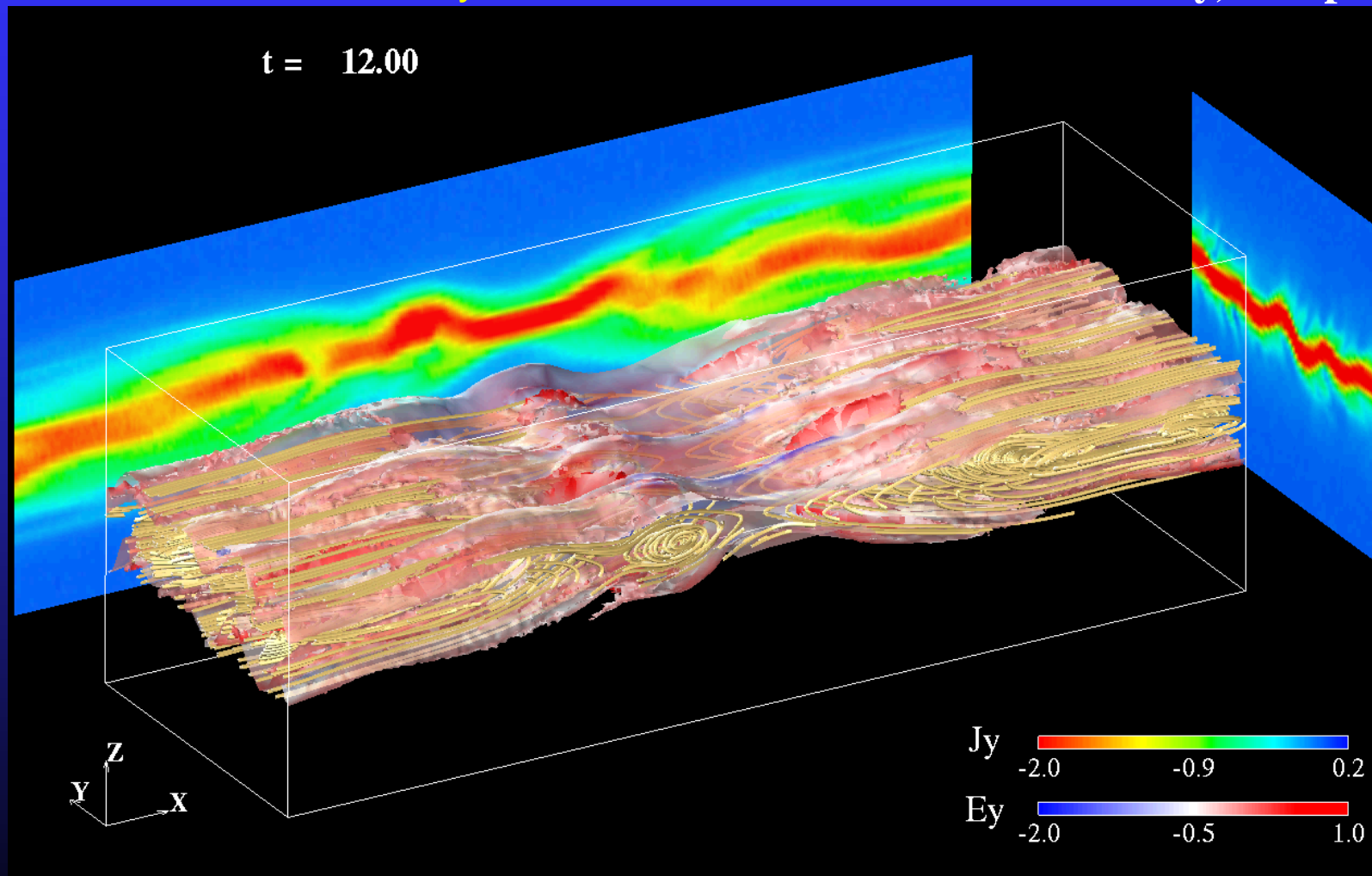
[Fujimoto & Sydora, PRL, 2012]

~ 10^{11} particles

~ 6 TB memory @ FX1

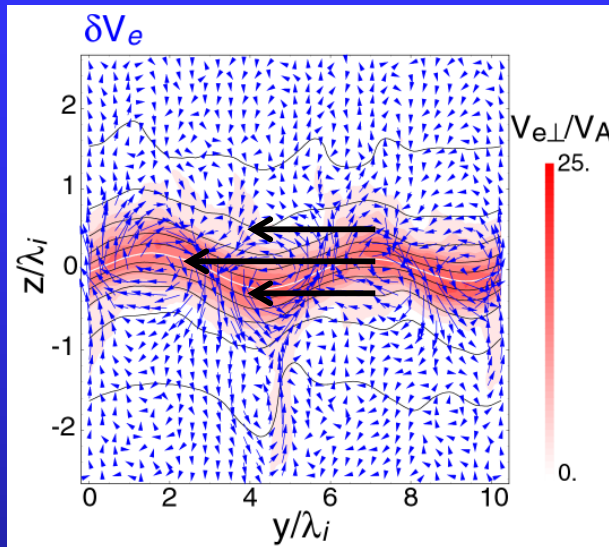
Surface: $|\mathbf{J}|$, Line: Field line

Color on the surface: E_y , Cut plane: J_y



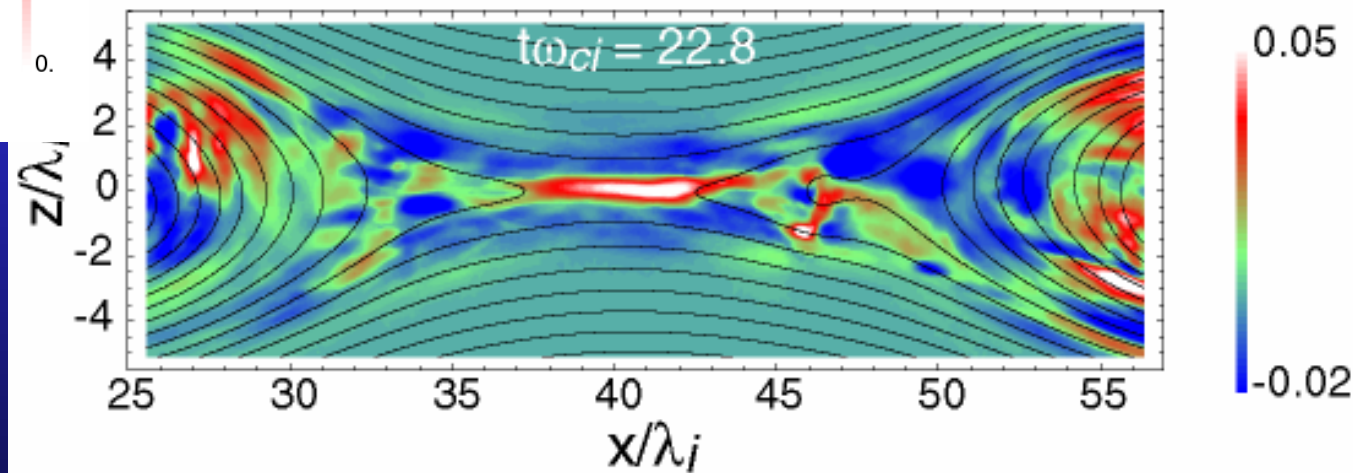
電磁波動による異常磁気散逸

[Fujimoto & Sydora, PRL, 2012]



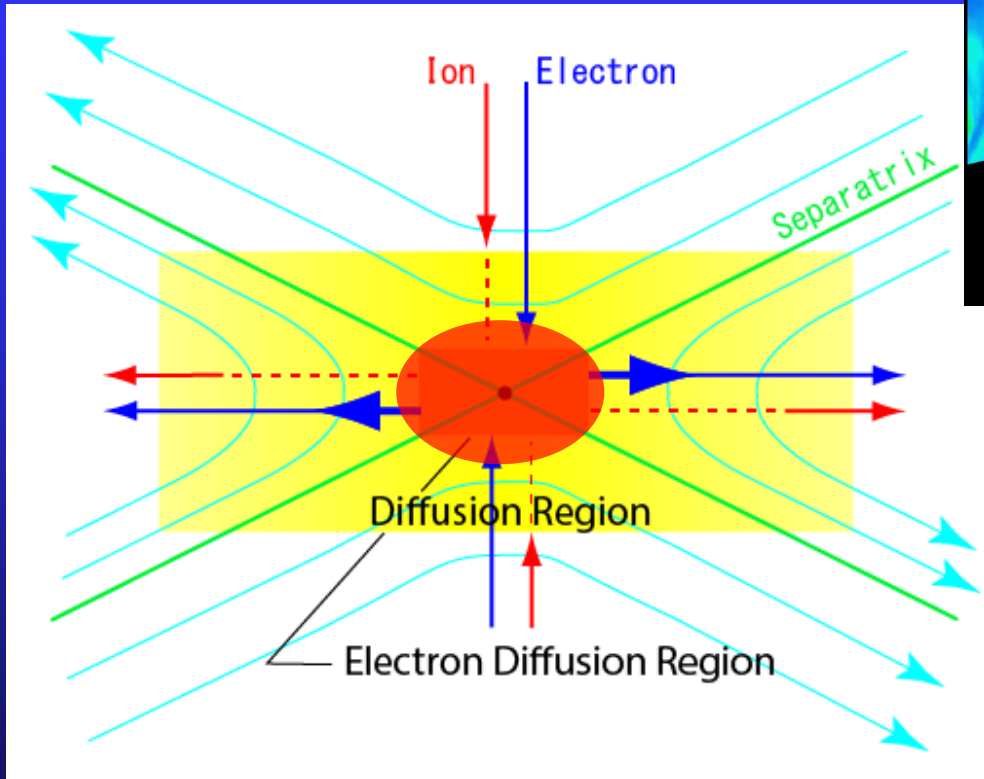
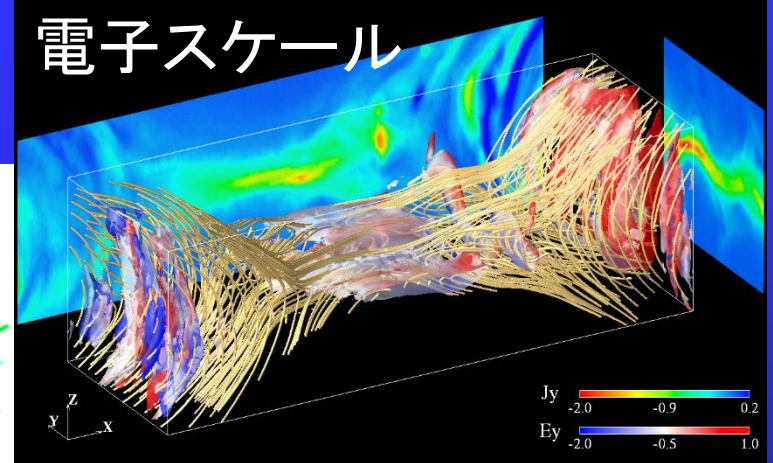
Shear driven mode

$$\langle -E_y \rangle = 1 / \langle n_e \rangle \langle \delta(n_e \vec{V}_e) \times \delta \vec{B} \rangle$$



電子スケールから流体スケールへ

電子スケール



イオンスケールの構造？

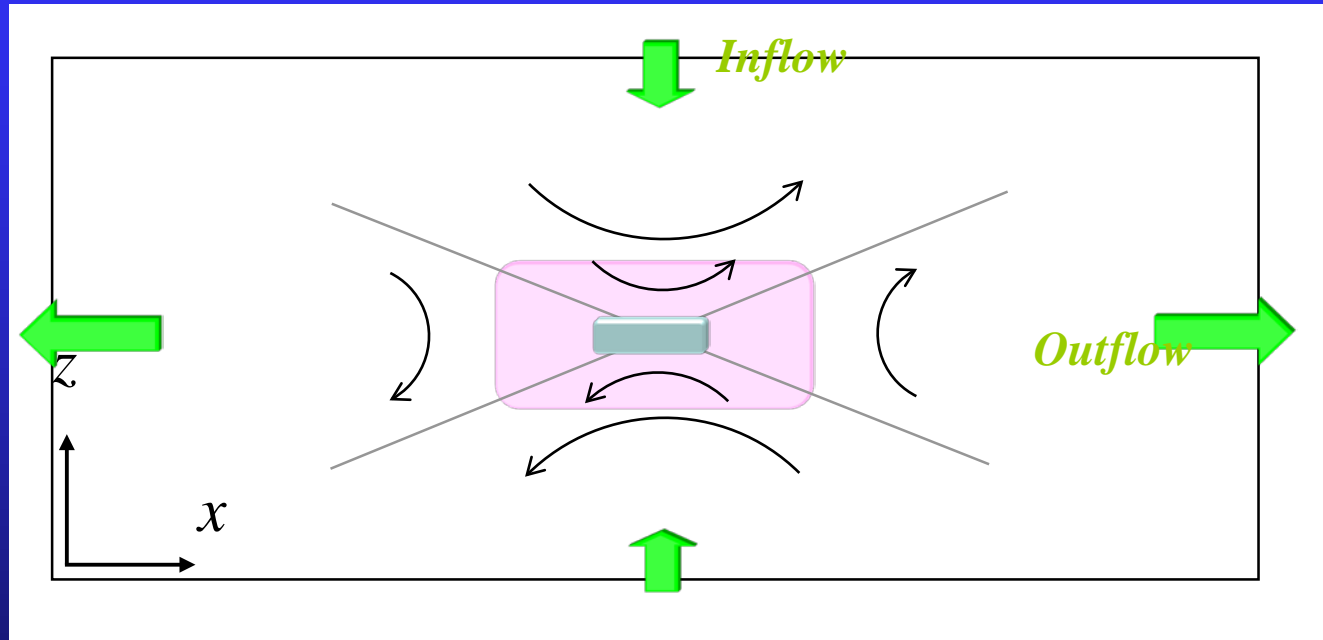
どの程度加速されるか？
加熱されるか？

下流方向の境界は？

ホール領域／メソ領域の物理過程の解明へ

Toward Long-Time Simulations

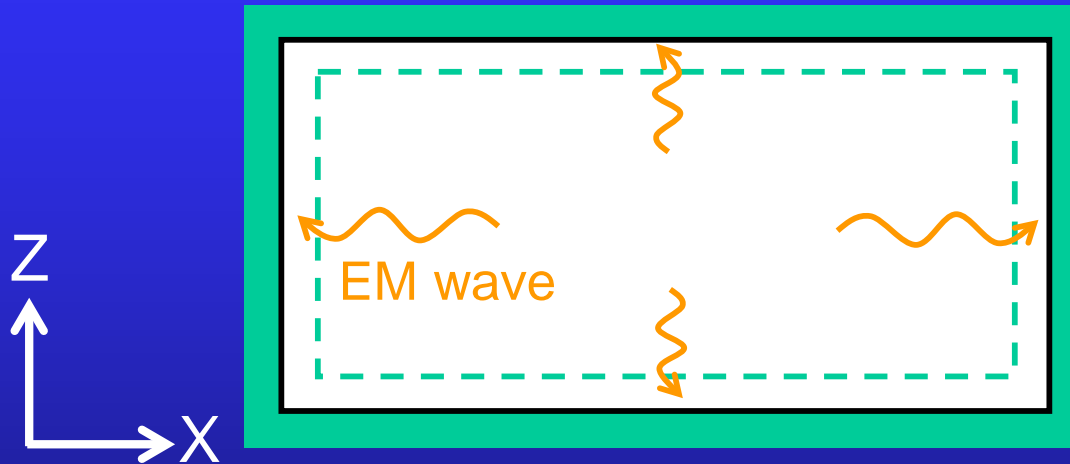
開放境界 ⇒ アウトフロープラズマを領域外へ ⇒ 長時間計算



An Open Boundary Condition

粒子情報のコピー
($\partial f / \partial n = 0$)

Birdsall & Langdon, IOP, 1995



$$E_y = \pm c B_z$$

$$E_z = \mp c B_y$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial t} = -c^2 \frac{\partial B_z}{\partial x}$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial t} = -c^2 \frac{\partial B_y}{\partial x} - \underline{c^2 j_z}$$

$$E_x = \pm c B_y$$

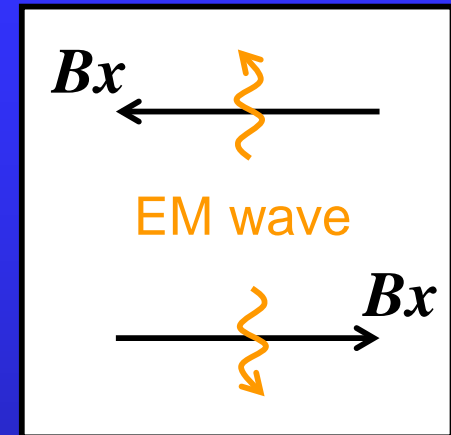
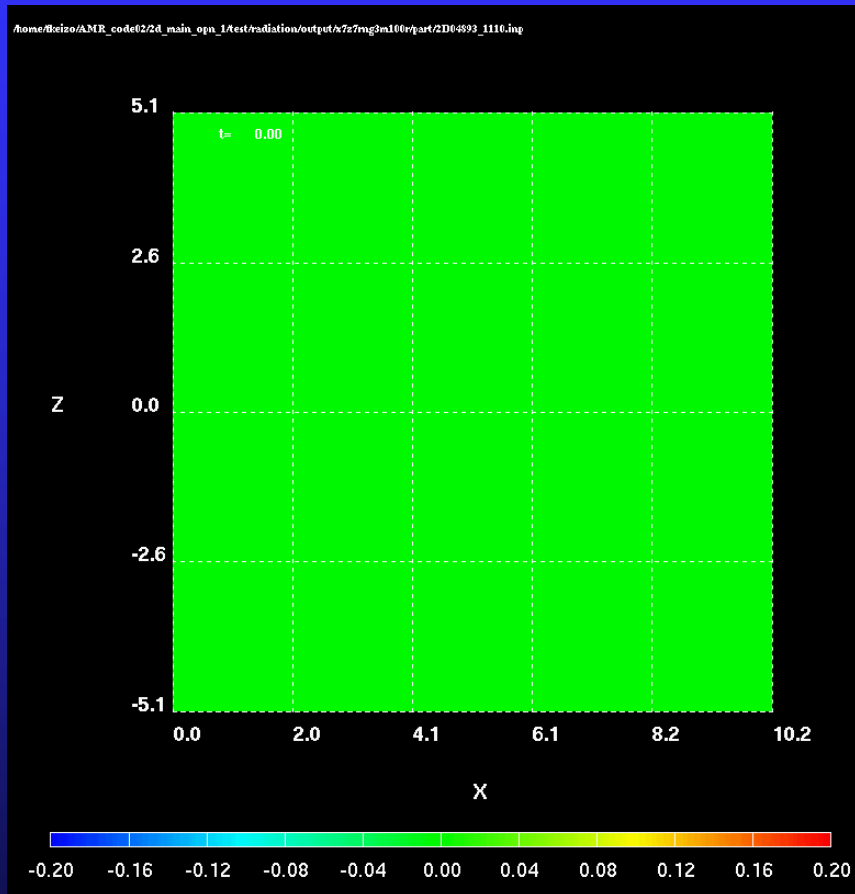
$$E_y = \mp c B_x$$

$$\frac{\partial E_x}{\partial t} = -c^2 \frac{\partial B_y}{\partial z} - \underline{c^2 j_x}$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial t} = c^2 \frac{\partial B_x}{\partial z}$$

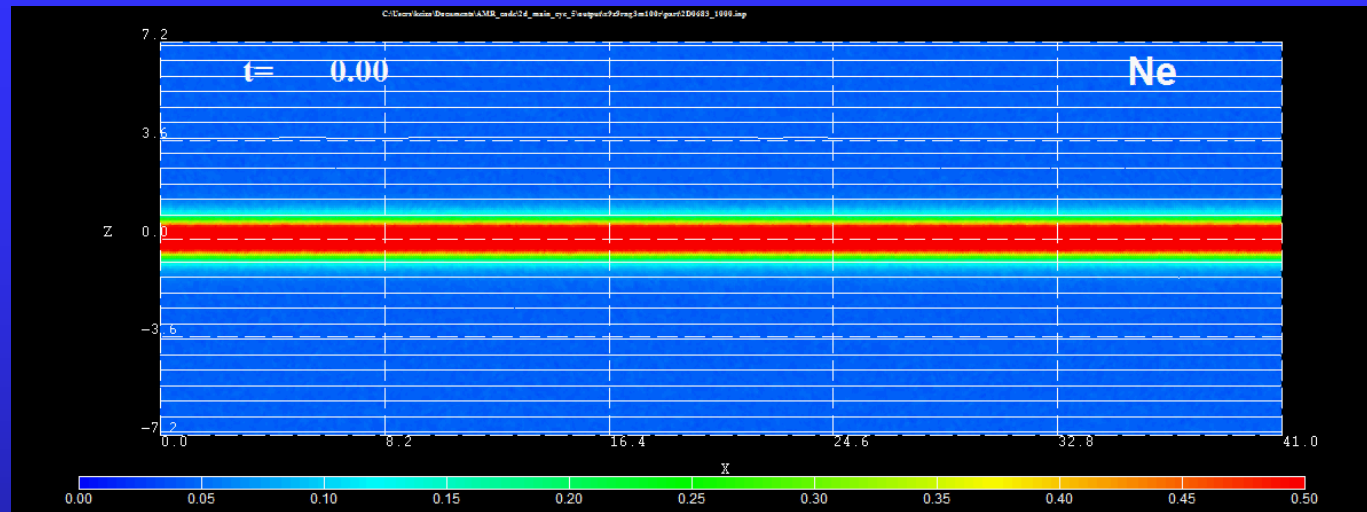
境界に沿った静電場

Test Simulation – Radiation emission

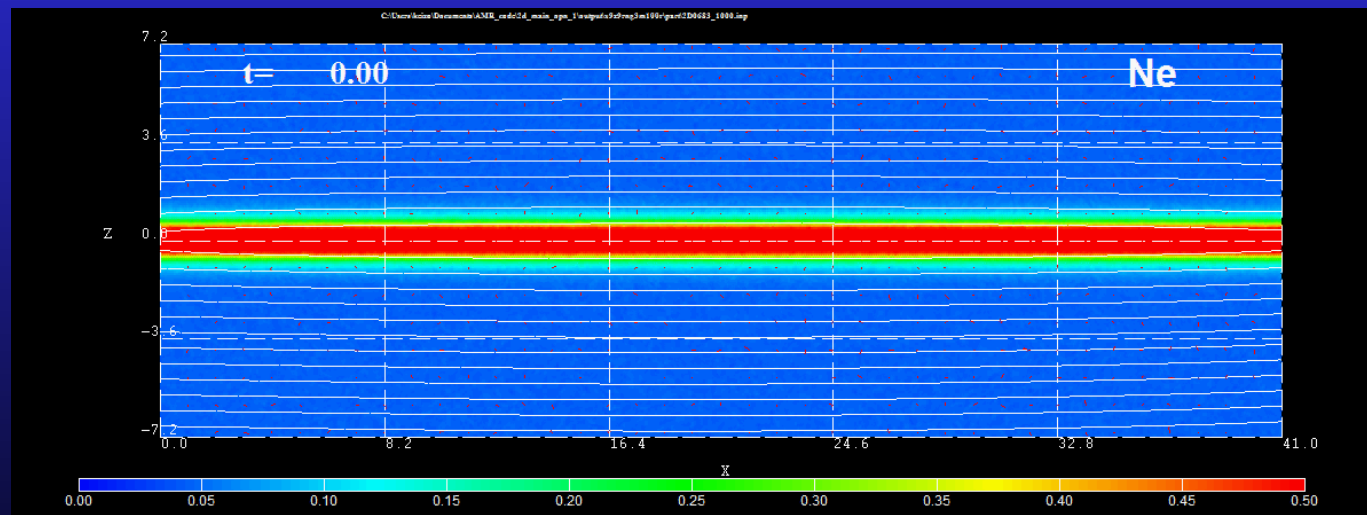


Test Simulation – Current sheet evolution

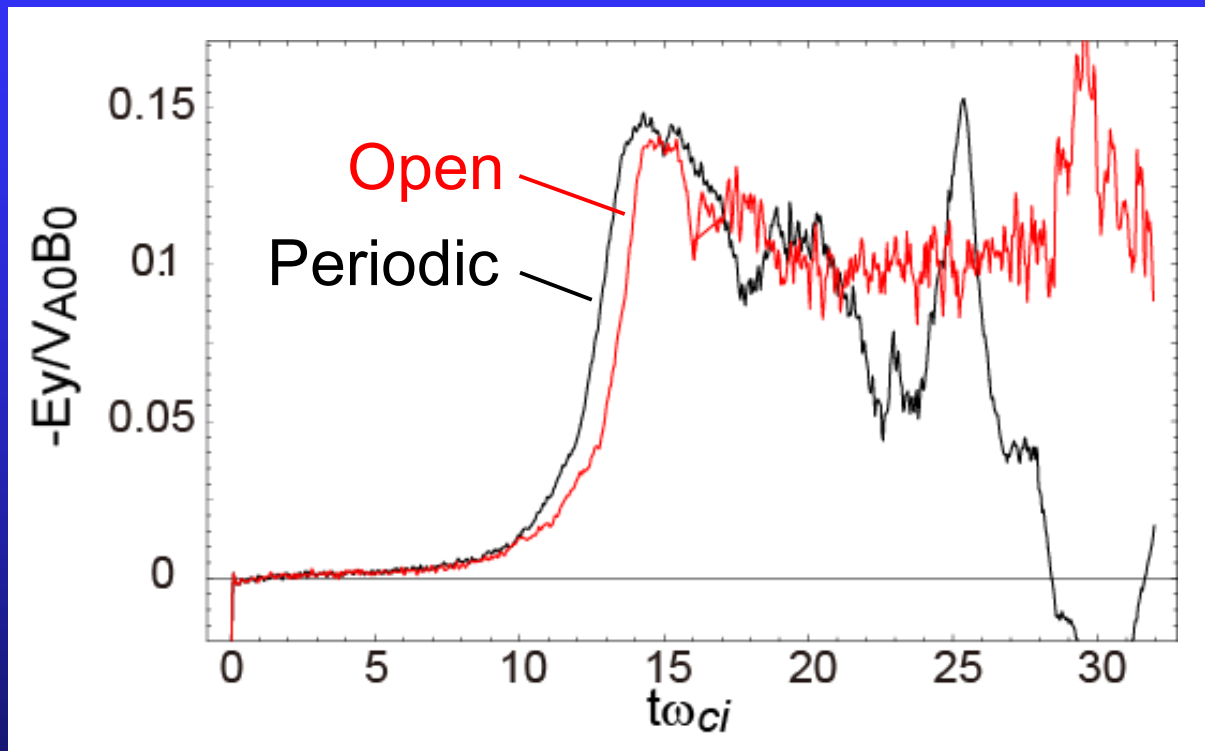
Periodic
Boundary



Open
Boundary



Test Simulation – Reconnection rate



まとめ

電子スケールと流体スケールをつなぐホール領域(メソ領域)における物理過程を解明することを目指して、開放型プラズマ粒子シミュレーションの開発を進めている。

- 電磁波(光)の伝播 ○
- 磁気リコネクション 上流方向 ○
- 磁気リコネクション 下流方向 △