

適合細分化格子を用いた超並列粒子コード による磁気リコネクションのシミュレーション

藤本桂三

(理化学研究所 計算宇宙物理研究室)

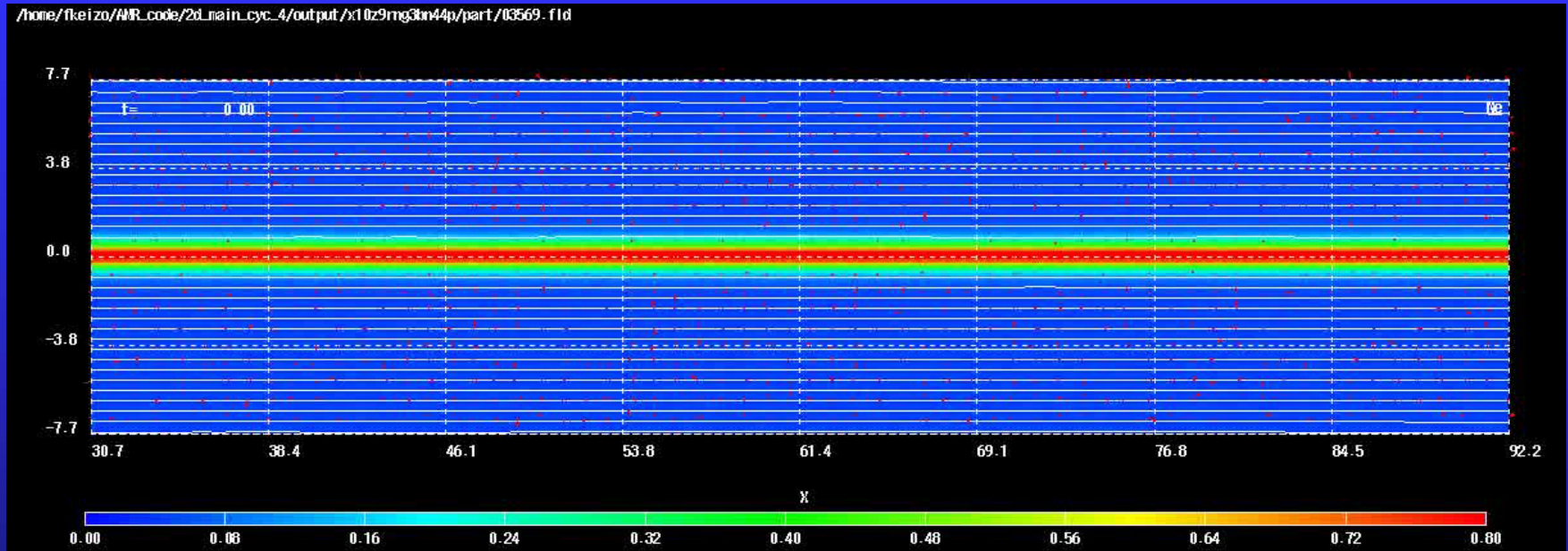
荻野竜樹

(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)

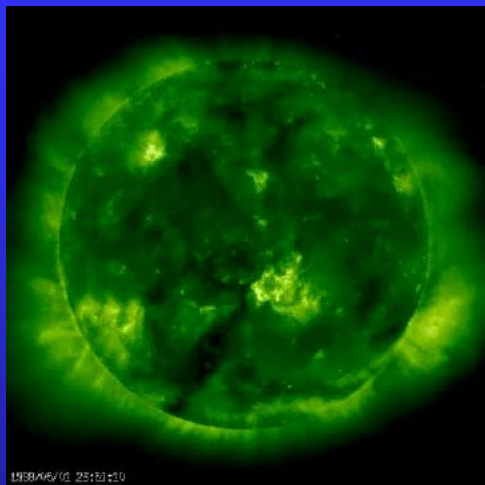
磁気リコネクション



- 磁力線のトポロジーを変える
- プラズマを加速・加熱

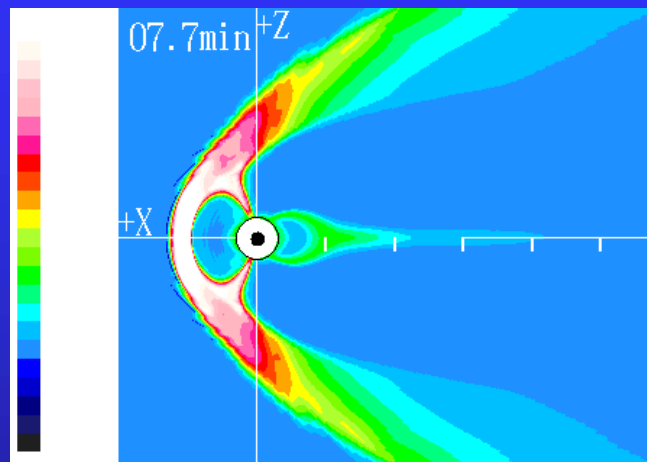
宇宙空間における磁気リコネクション

[太陽フレア]

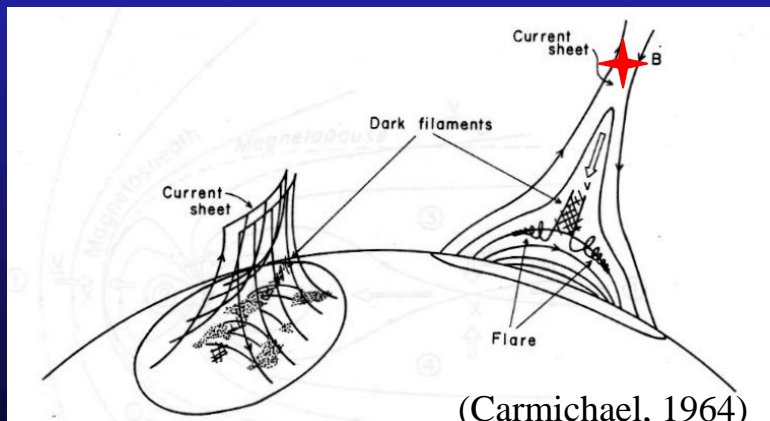


(<http://vestige.lmsal.com/TRACE/>)

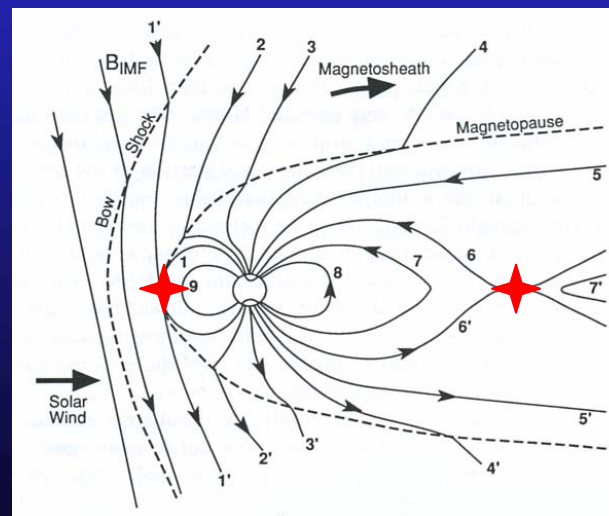
[地球磁気圏サブストーム]



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



(Carmichael, 1964)



(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次元なのか、2次元なのか？

➤ プラズマはどのように加速・加熱されるか？

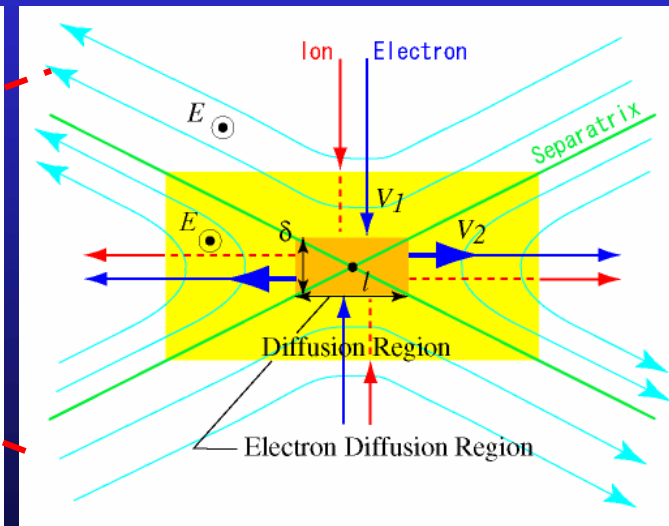
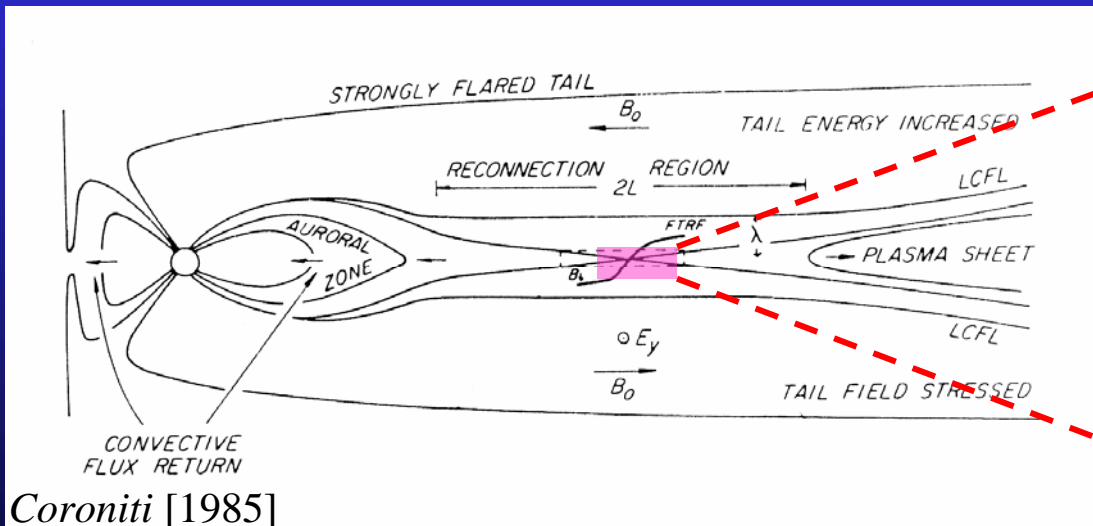
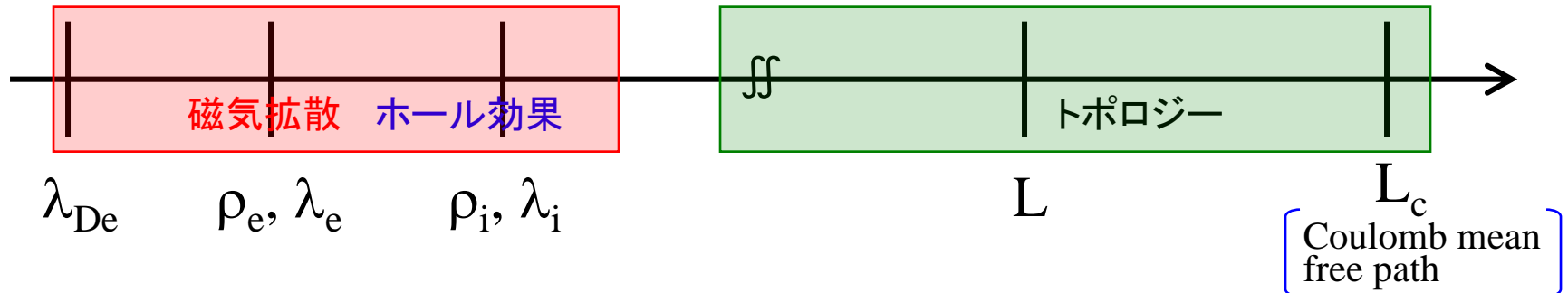
- 非熱的プラズマはどのように生成されるか？
- 最大でどこまで加速され得るか？
- 3次元性の影響は？

磁気リコネクションのマルチスケール性

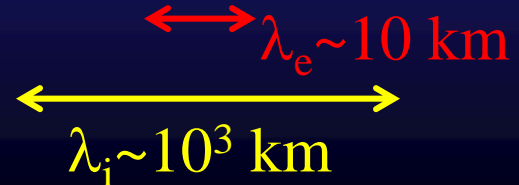
$$\beta_i \sim 1$$

Full PIC (粒子)

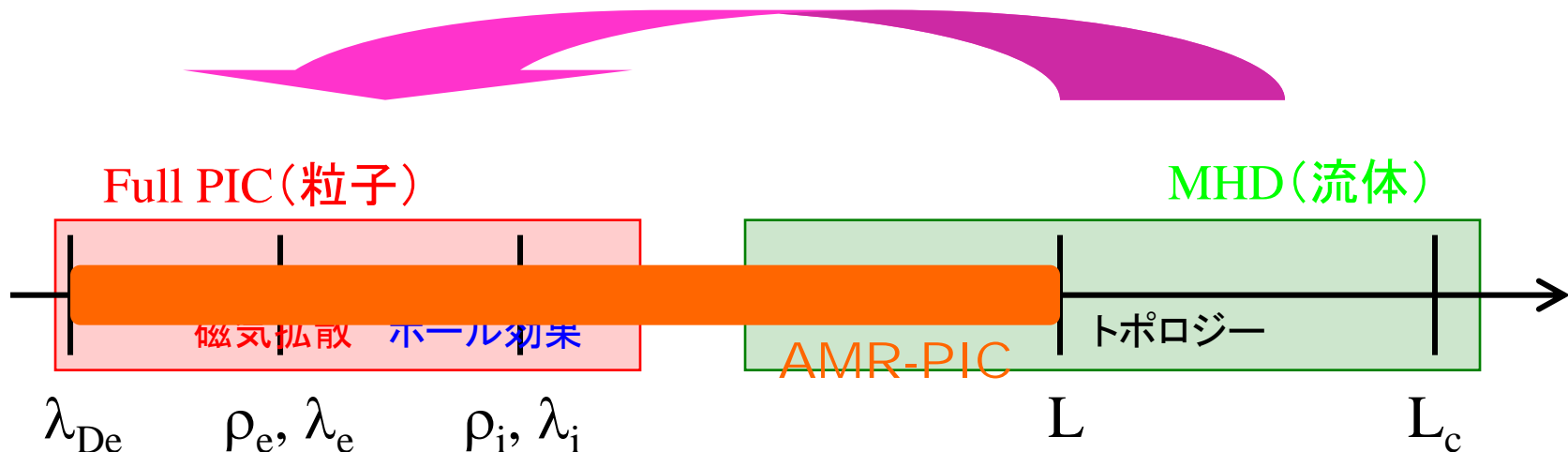
MHD (流体)



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



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

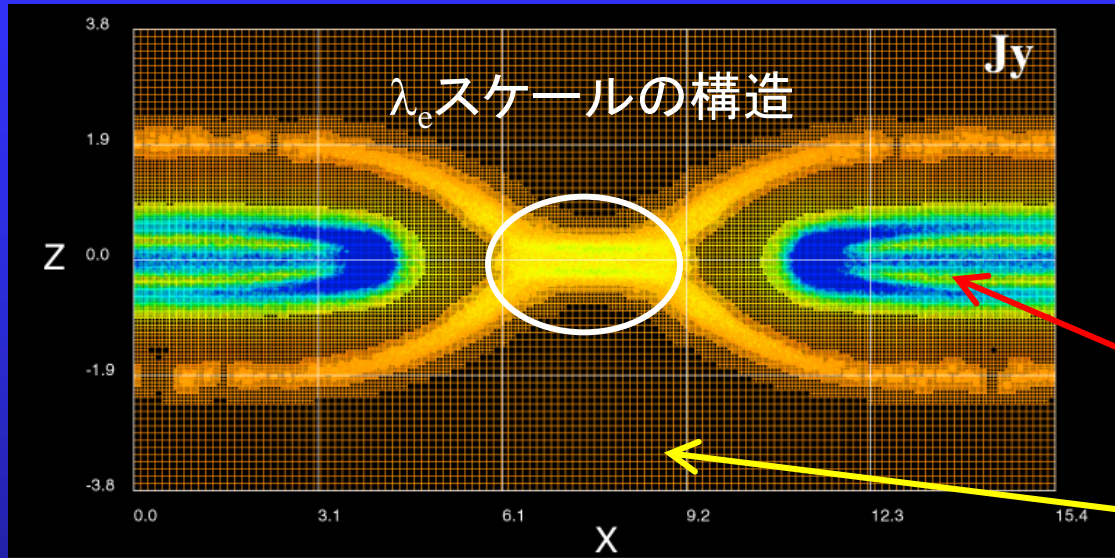
$$\frac{\partial B}{\partial t} = \eta \nabla^2 B$$

- 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)



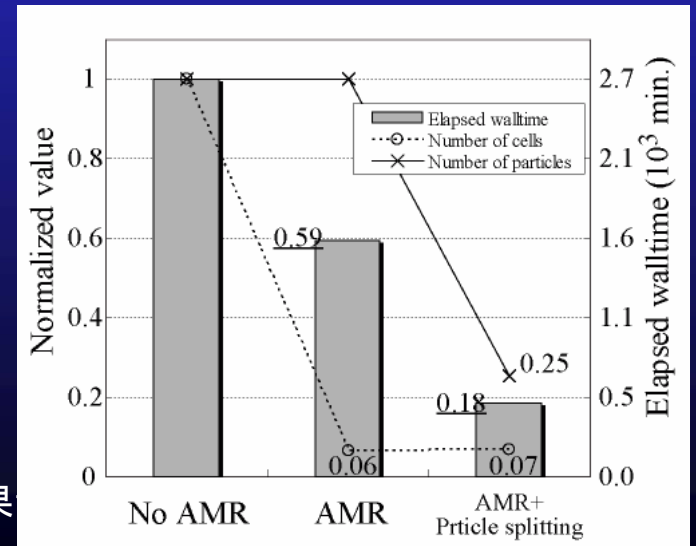
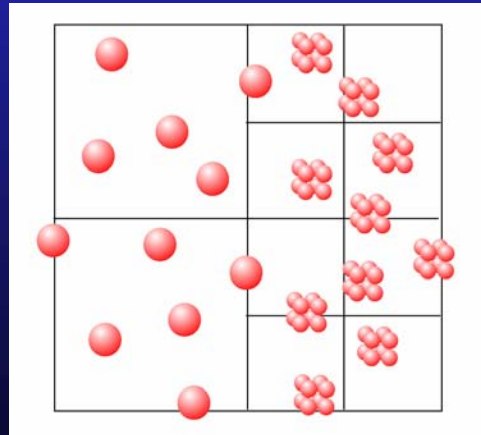
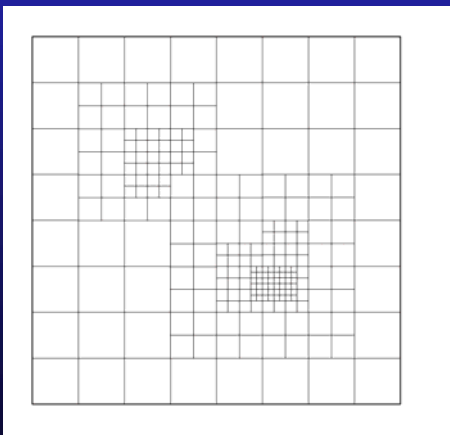
陽解法の制約

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

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

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

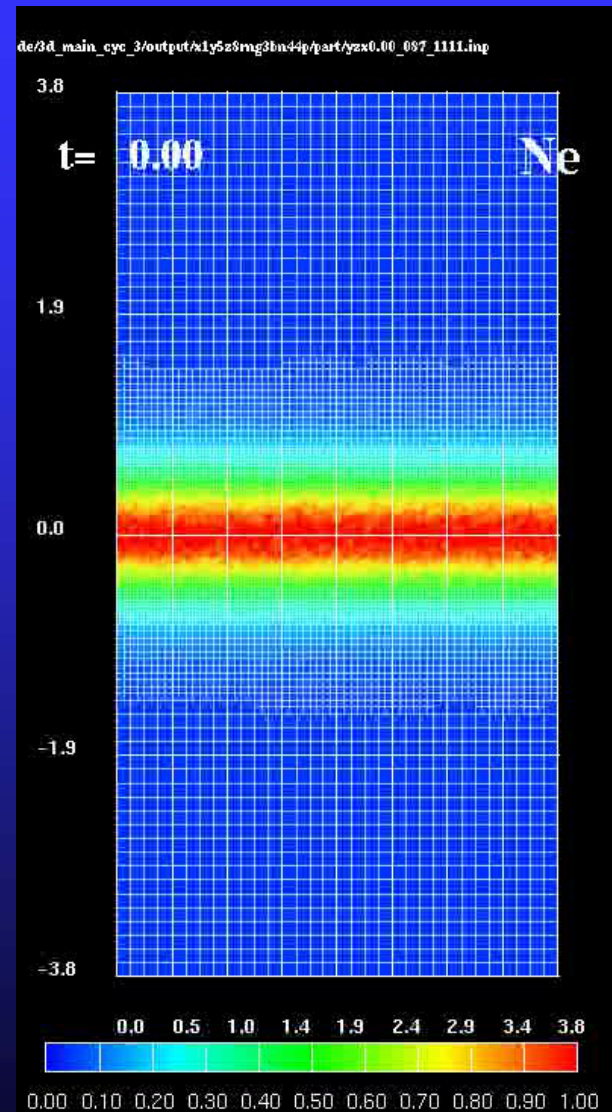
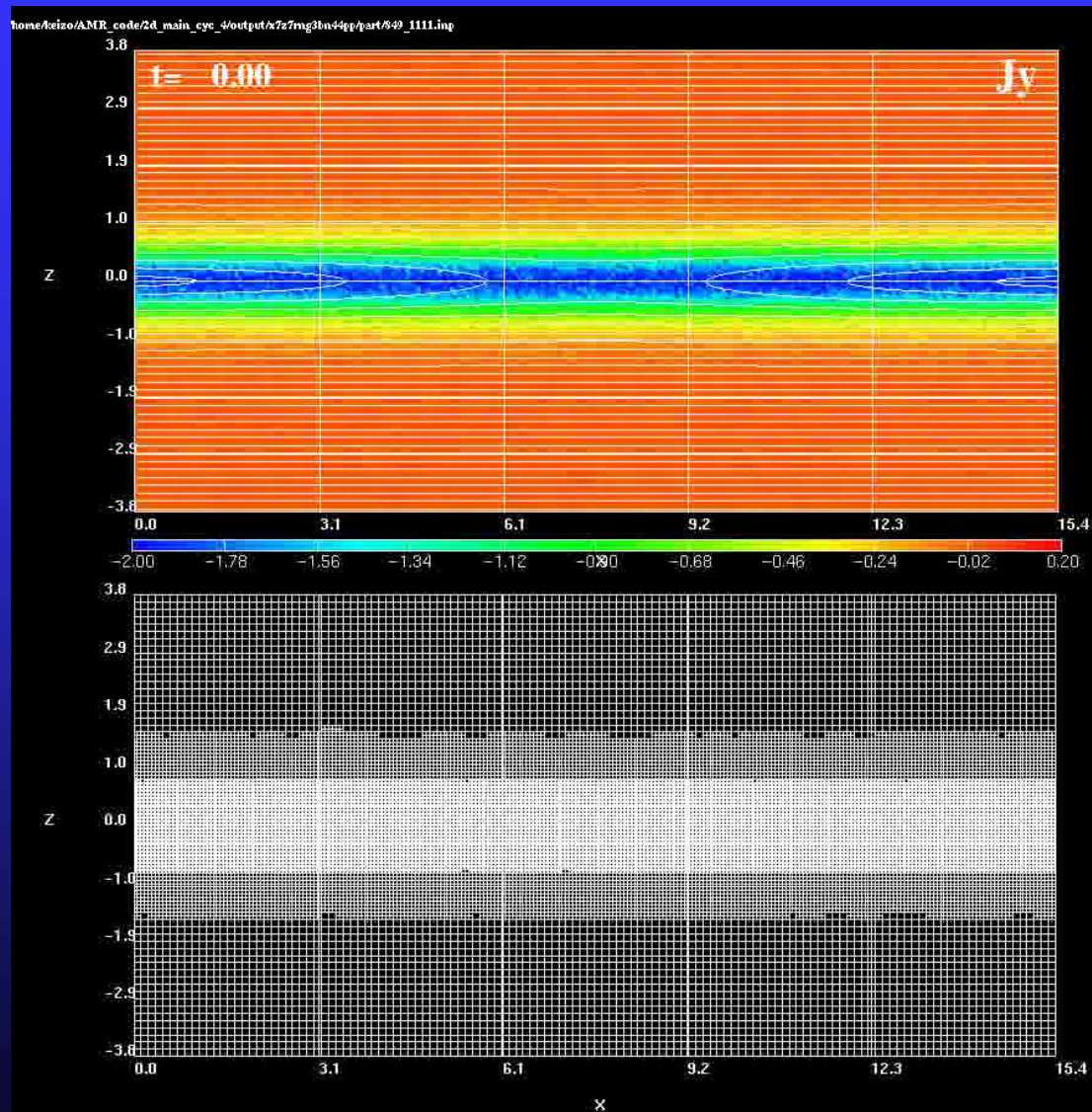
$$\lambda_{De,lobe} \sim 6 \times 10^3 \text{ m}$$



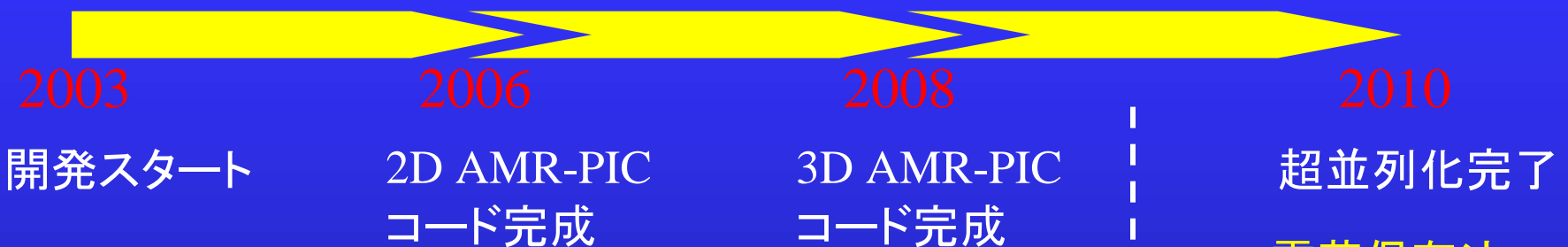
名大HPCプロジェクト 成果

AMR-PICコード

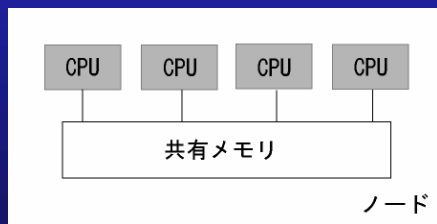
[Fujimoto & Machida, JCP, 2006;
Fujimoto & Sydora, CPC, 2008]



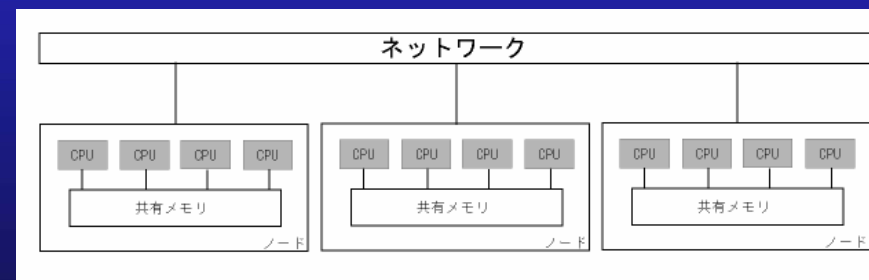
超並列AMR-PICコードまでの道のり



ポアソン方程式
ノード内並列



CPU数、メモリ容量
の制約



より多くの計算機資源が利
用可能！

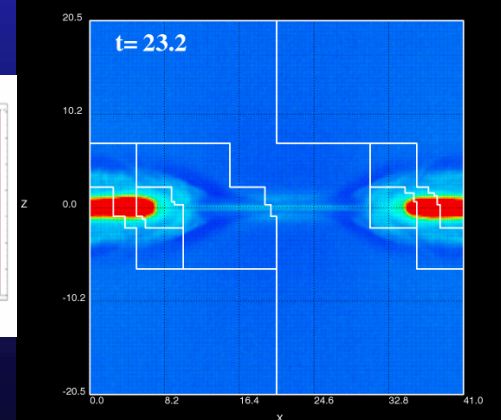
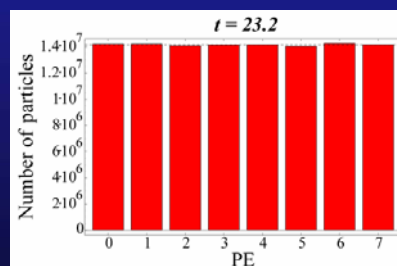
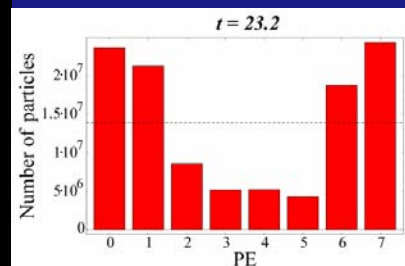
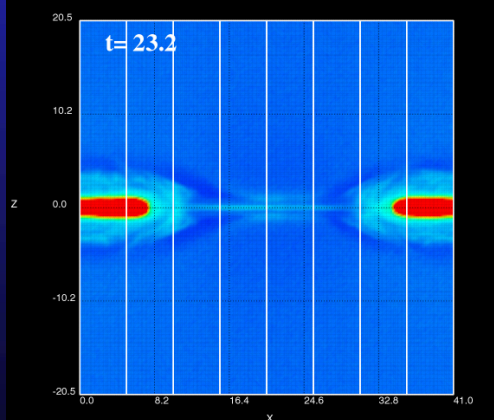
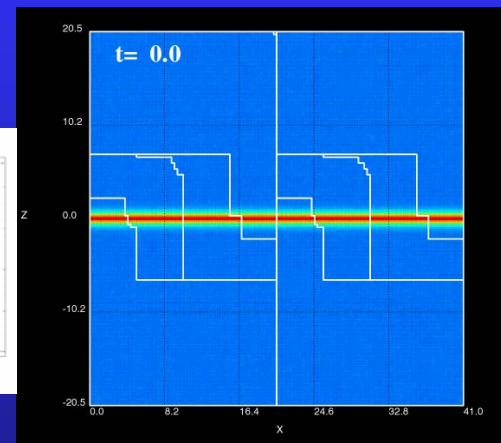
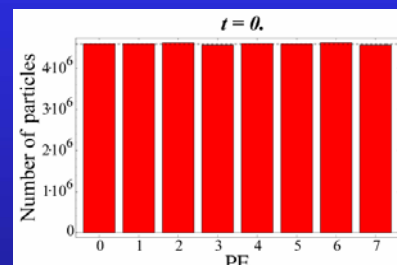
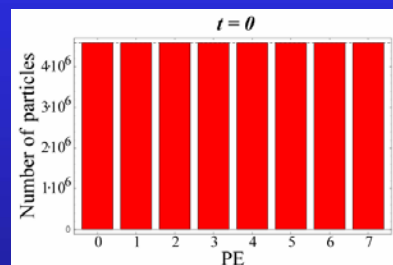
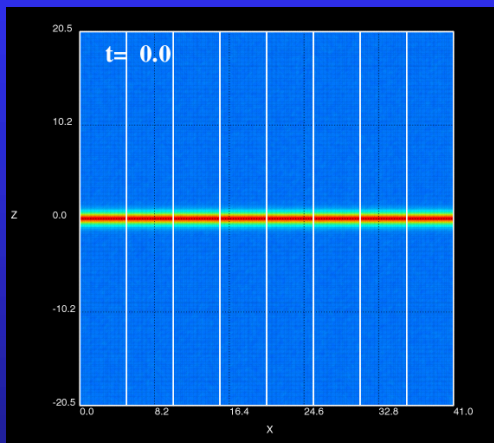
- 電荷保存法
- 適合ブロック法

ノード間負荷バランスを維持する方法

8ノード並列の例

固定ブロック

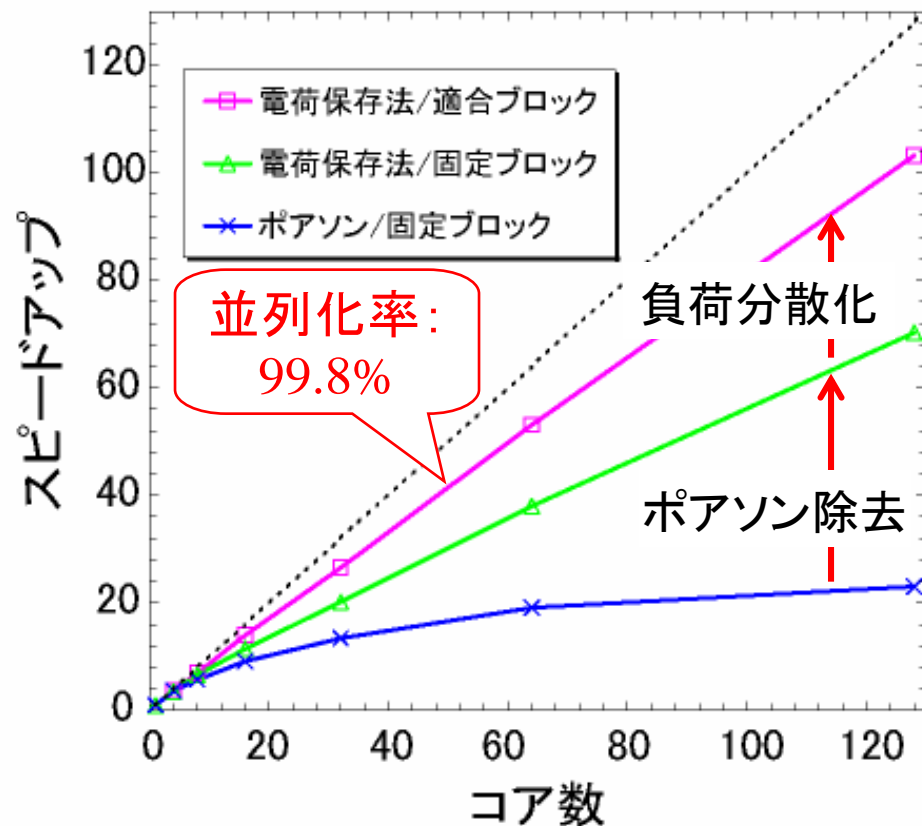
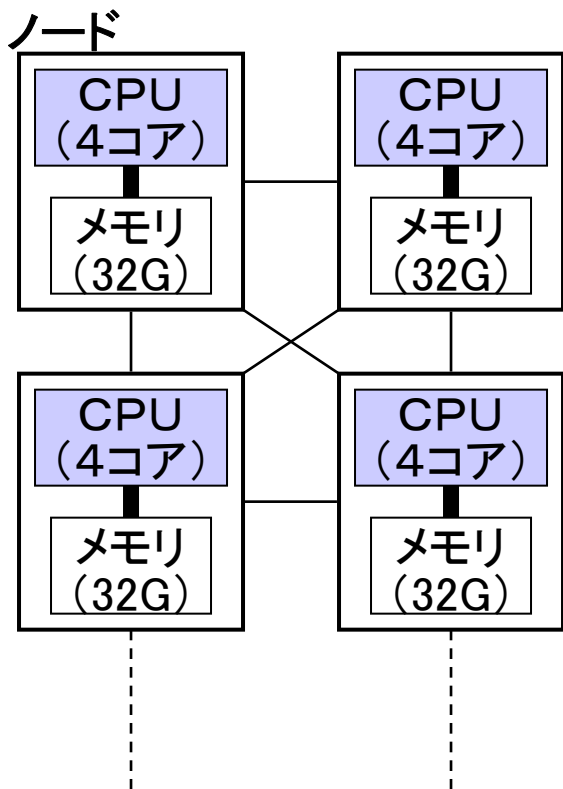
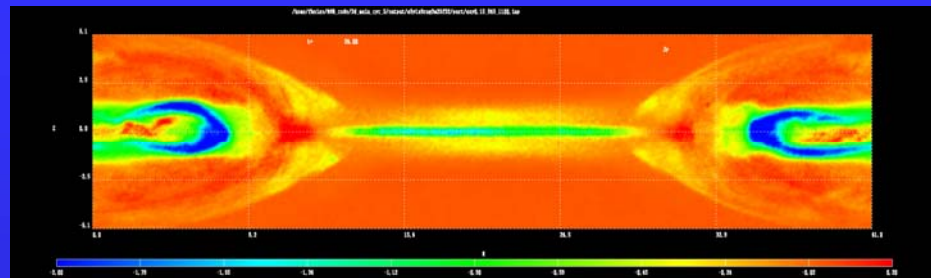
適合ブロック



超並列AMR-PICコードの性能

Fujitsu FX1

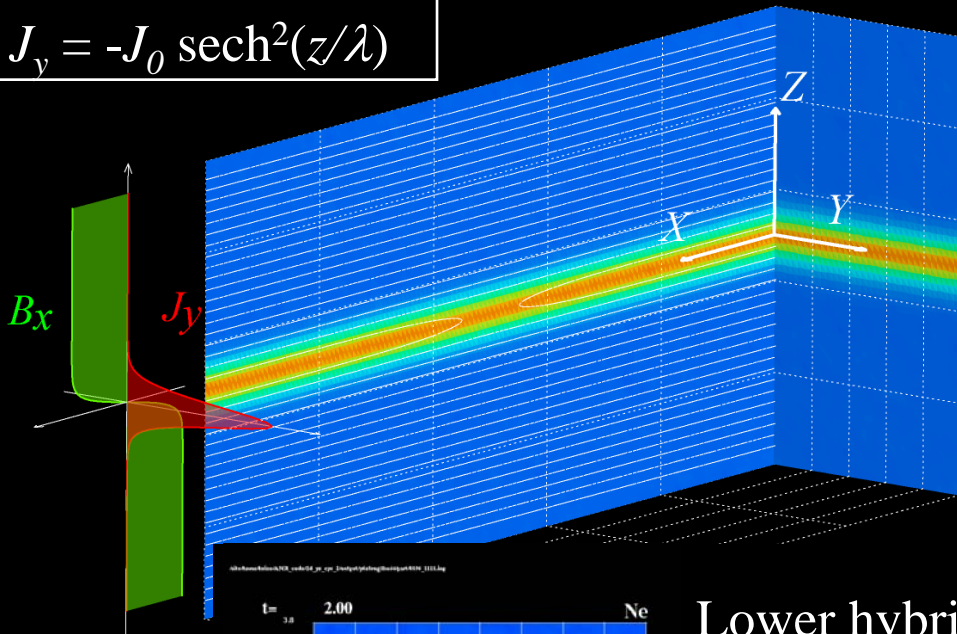
(名大情報基盤センター)



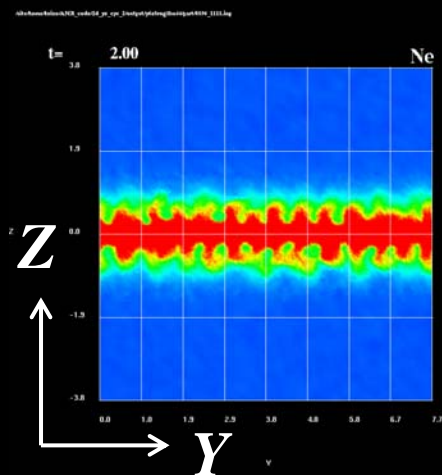
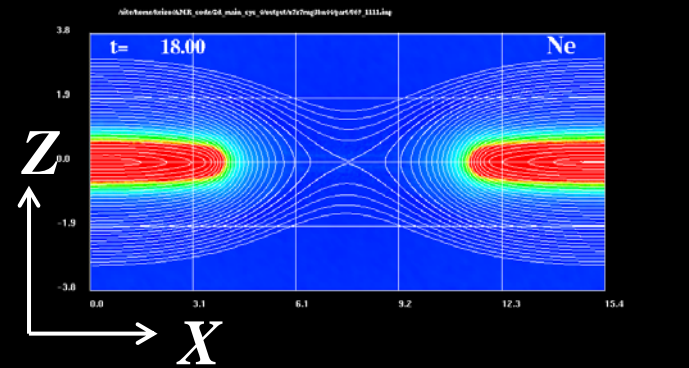
3次元電流層における不安定モード

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

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



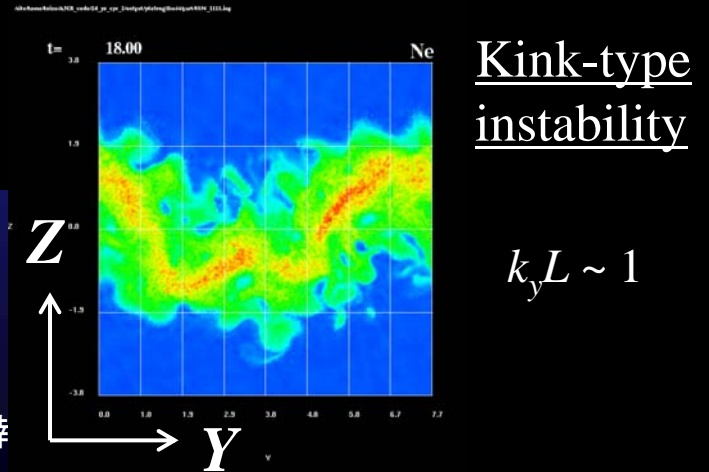
Tearing instability



Lower hybrid drift instability (LHDI)

$$k_y \rho_e \sim 1$$

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

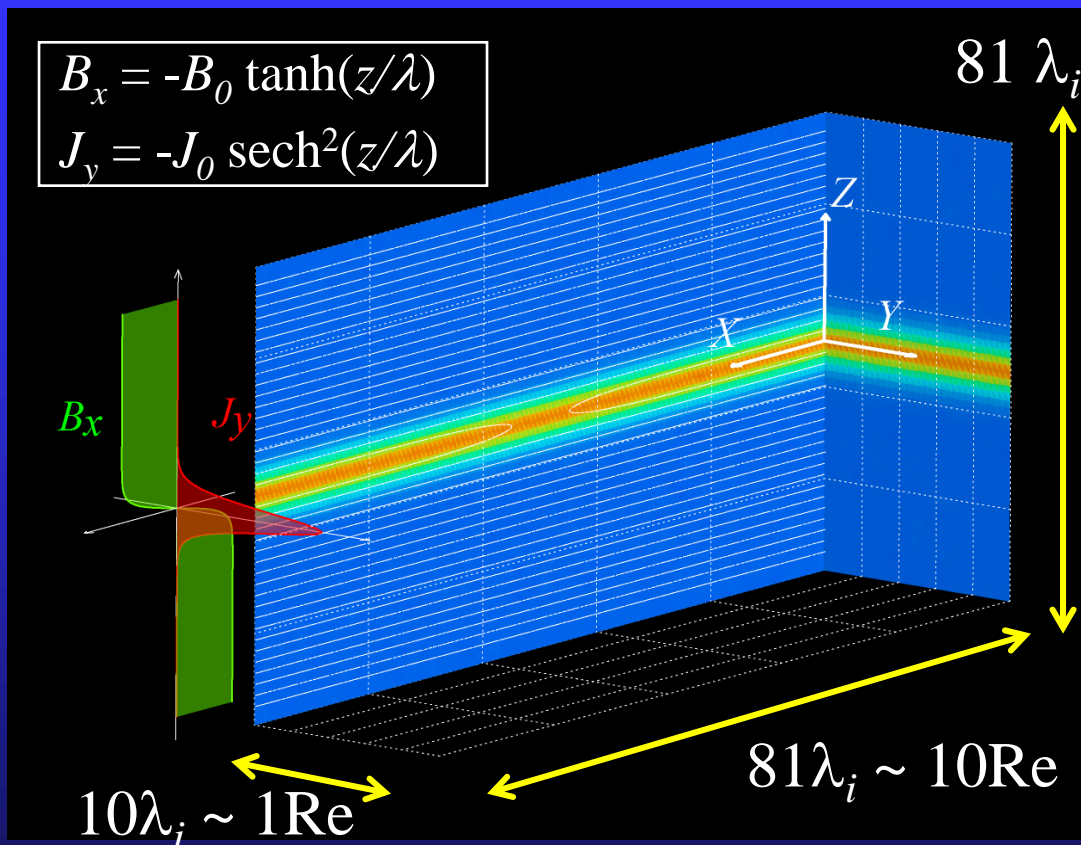


Kink-type instability

$$k_y L \sim 1$$

平成22年度名古屋大学HPC計算科学連携プロジェクト

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:

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

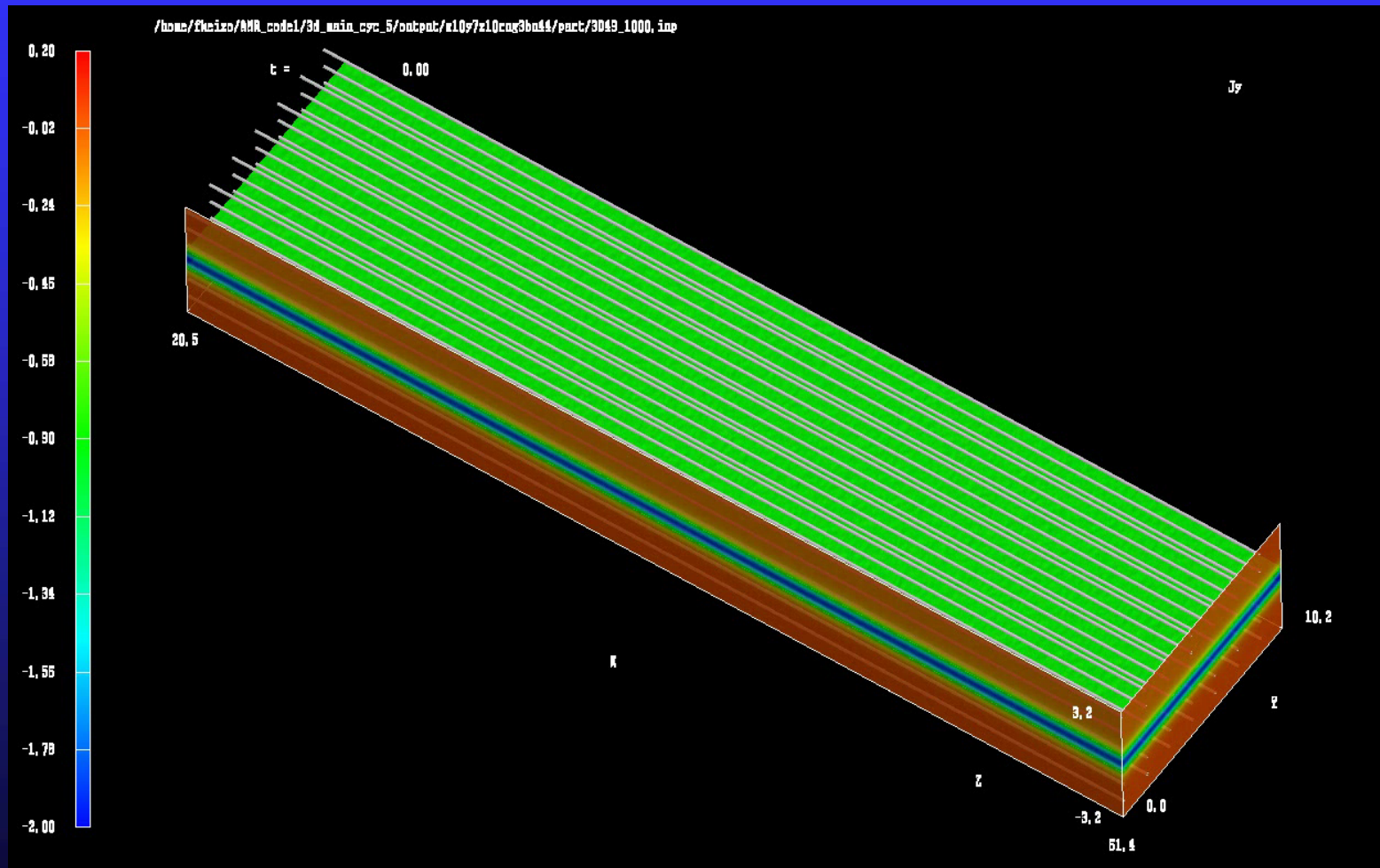
最大メモリ $\sim 5\text{TB}$

予算額: 200万円

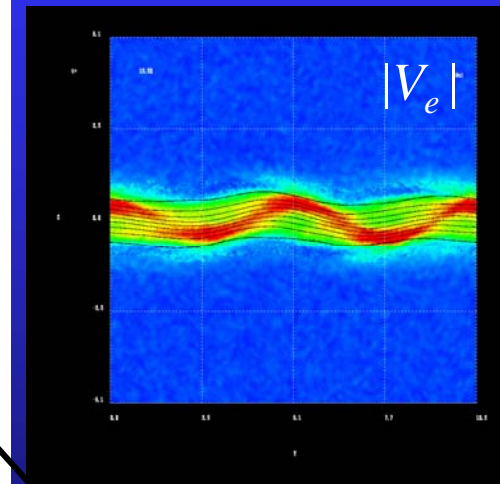
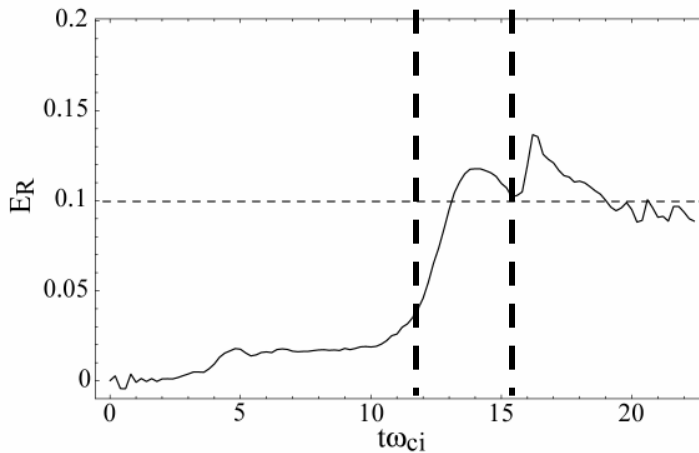
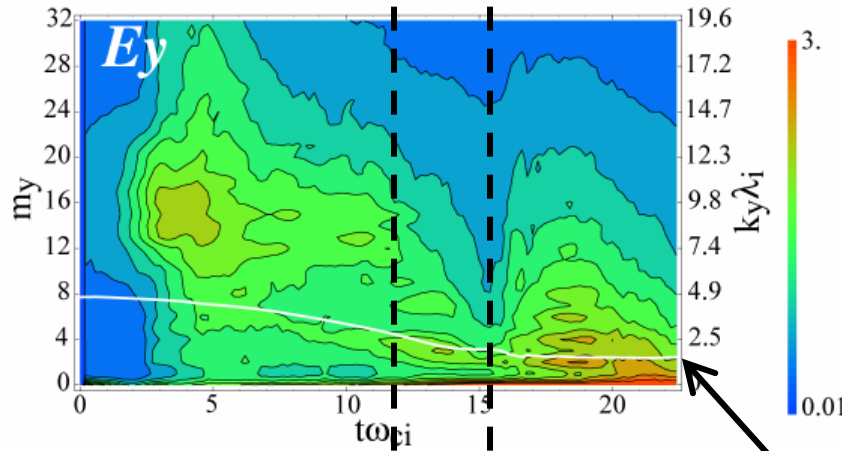
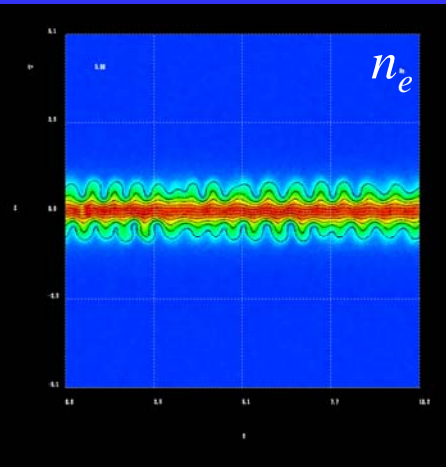
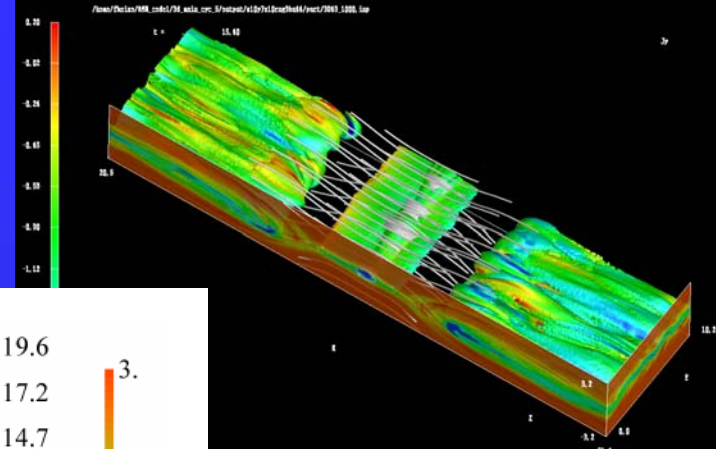
利用額: 10万円/日 (FX1, 256ノード) \times 20日間 = 200万円

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

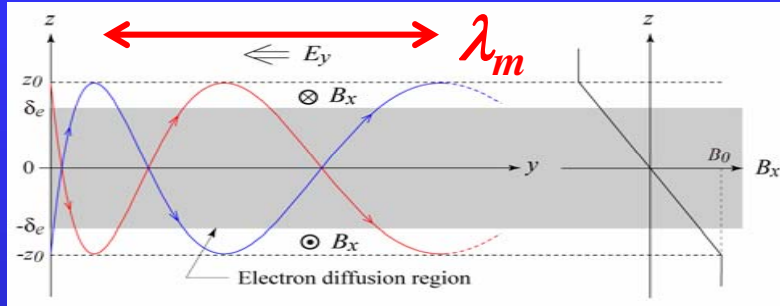
$$k_y \rho_e \sim 1$$

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

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

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

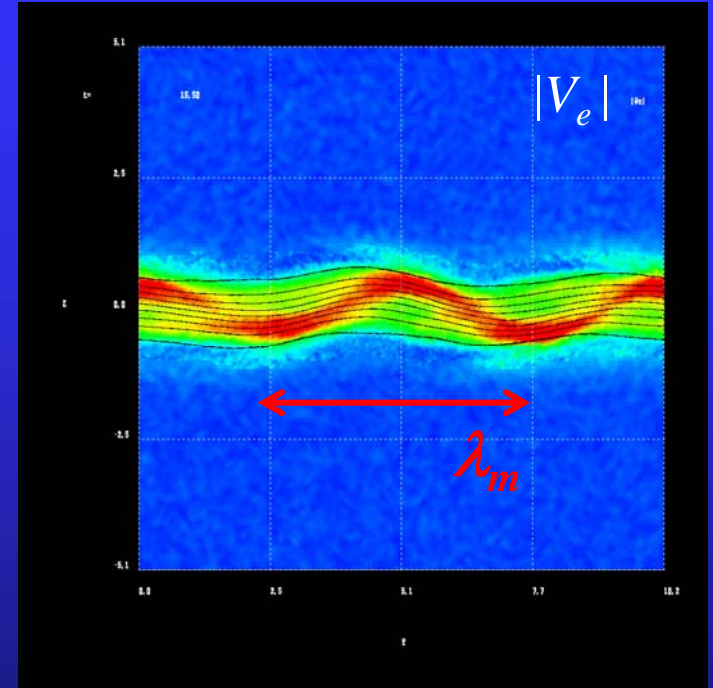
電子のメアンダリングスケール



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

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

[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

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

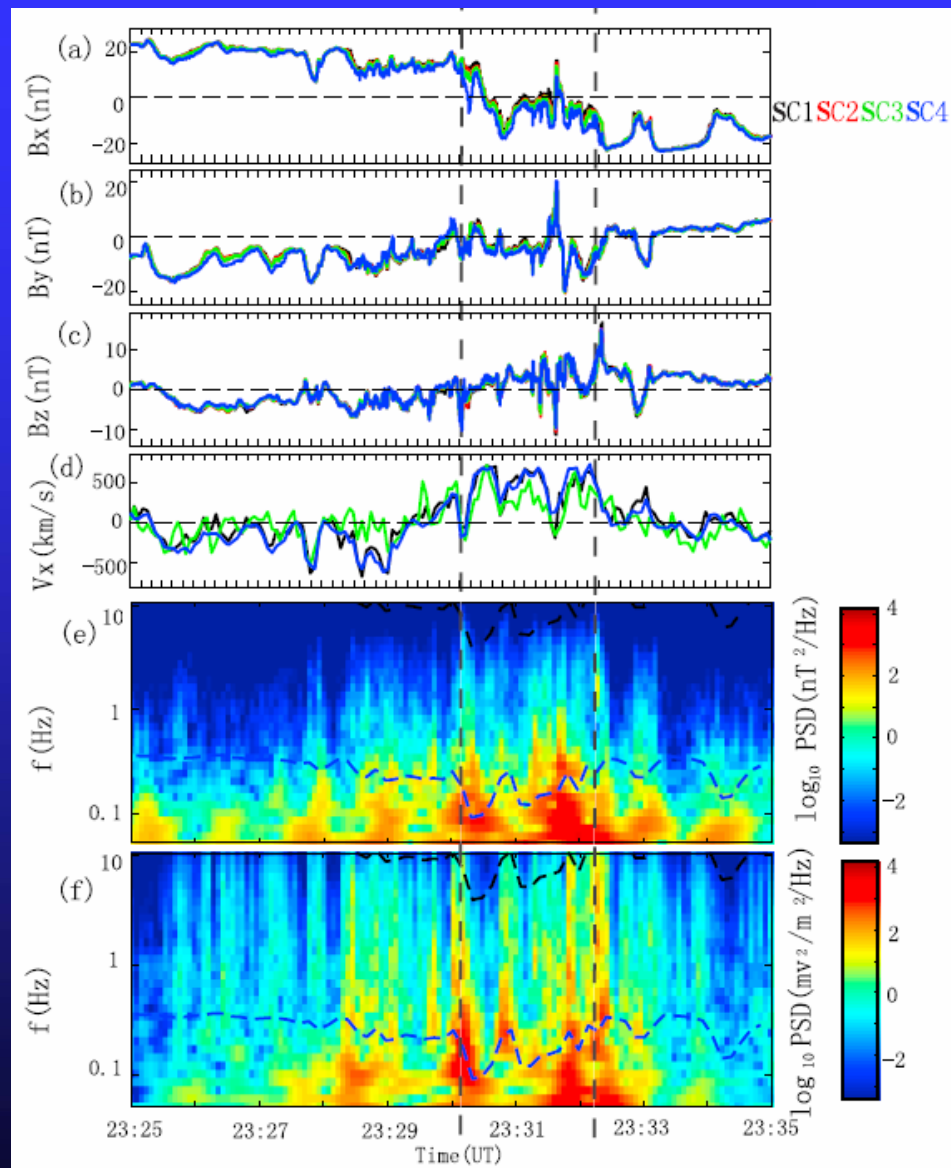
$$V_{ph} = \frac{m_i V_{iy} + m_e V_{ey}}{m_i + m_e} \approx V_A$$

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

● 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

電磁粒子コード(PICコード)に適合細分化格子(AMR)を適用した新しいコード(AMR-PICコード)を用いて、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、**異常電気抵抗を生む**。
- 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。

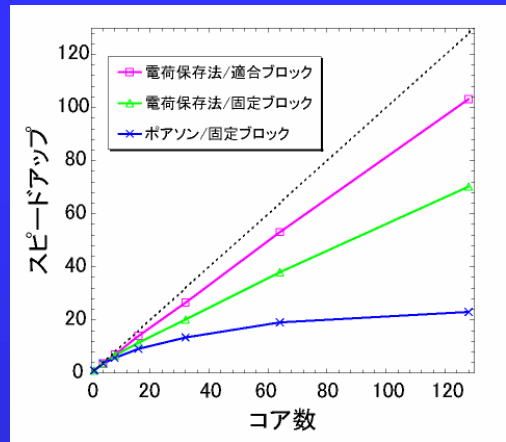
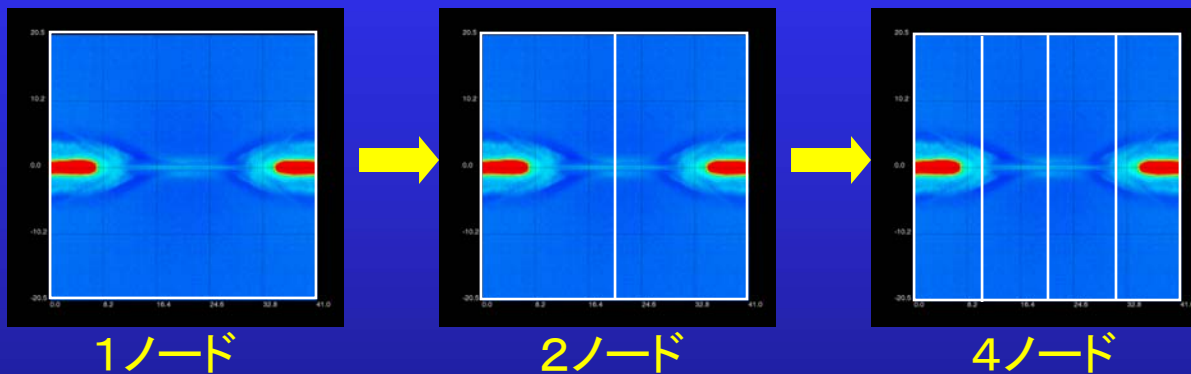
今後の課題1 (理学的側面)

- 不安定波動の性質を調べる。⇒ 線形解析。
- 波動粒子相互作用、異常抵抗発生過程を調べる。
- パラメータ依存性、できれば質量比をもう少し上げたい...

今後の課題2(計算科学的側面)

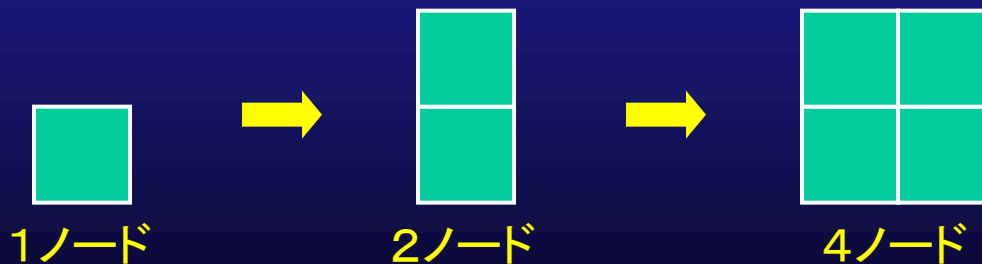
スケーラビリティの評価方法を改善する。

- 計算領域を分割していく(Strong Scaling)



高並列時に1ノード当たりのデータ量が極端に小さくなる。

- 計算領域を追加していく(Weak Scaling)



非一様なシステムを扱いにくい。