

Full particle plasma simulations using the adaptively refined meshes



Keizo Fujimoto, Richard D. Sydora

Department of Physics, University of Alberta

地球磁気圏尾部における磁気リコネクション

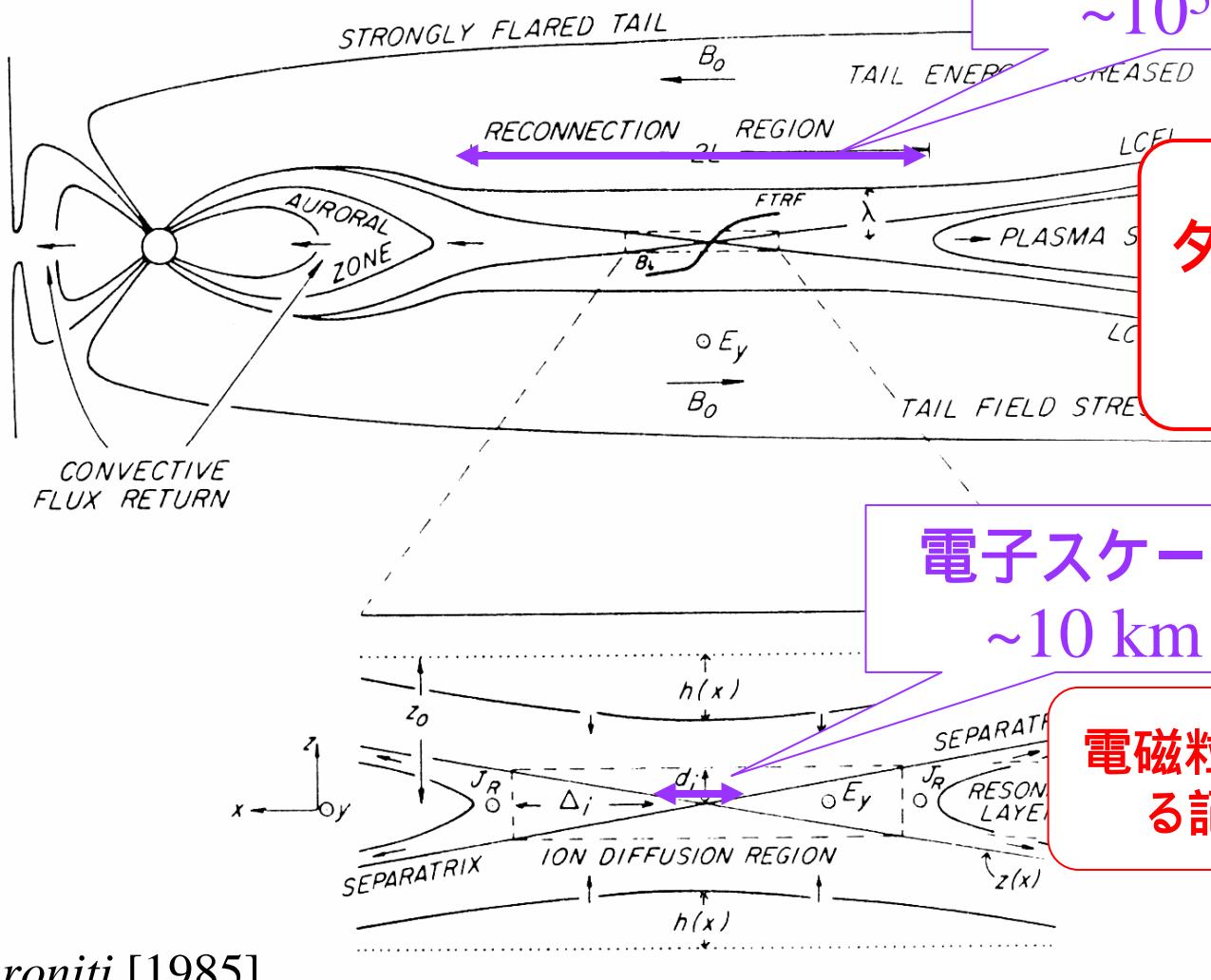
ONSET OF EXPLOSIVE RECONNECTION

MHDスケール
~ 10^5 km

ダイナミックレンジ
~ 10^4

電子スケール
~10 km

電磁粒子コードによる記述が必要



電磁粒子コードにおける数値的制約とAMR法の適用

格子点間隔の制約: $\Delta x \lesssim 3\lambda_{De} \sim 1km$

Magnetotail Lobe

$T_i/T_e \simeq 4.0$, $n \simeq 0.01 \text{ cm}^{-3}$, $\beta_i \simeq 0.1$, $B = 30 \text{ nT}$.
(Baumjohann and Treumann, 1997)

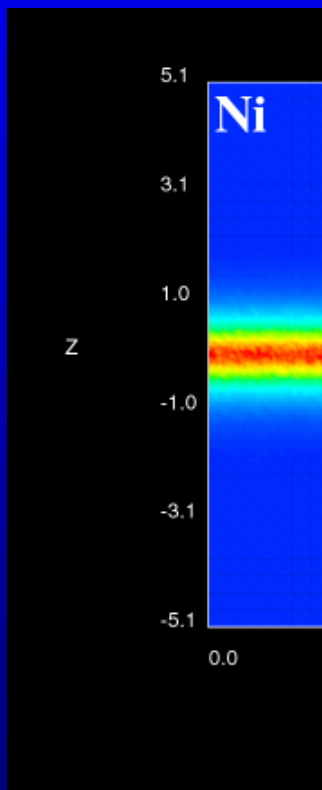
$$\lambda_{De} = 5.6 \times 10^3 \text{ [m]}$$

ローブではプラズマシート
ほど格子を細かく切る
必要はない

Central Plasma Sheet

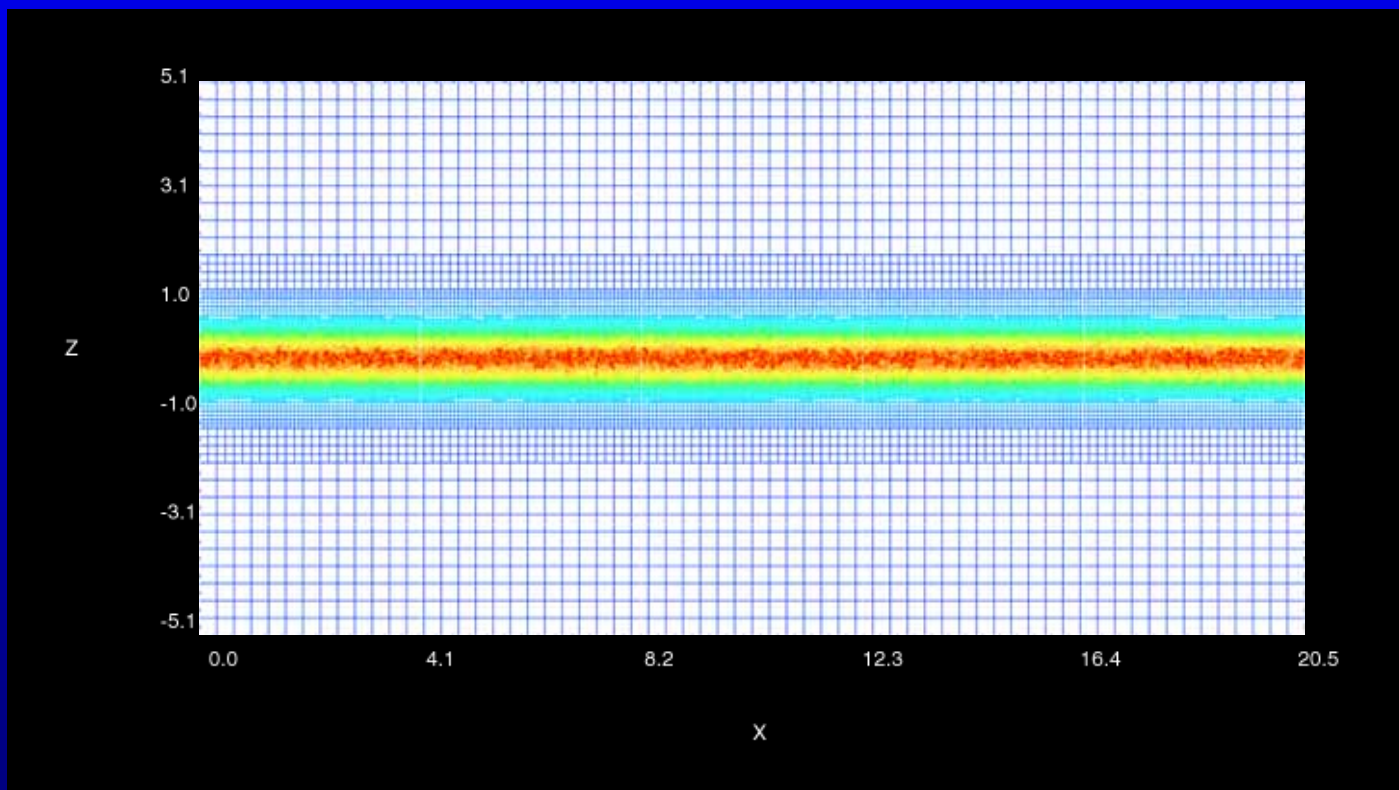
$T_i/T_e \simeq 8.0$, $n \simeq 0.3 \text{ cm}^{-3}$, $\beta_i \simeq 20$, $B = 5 \text{ nT}$.
(Baumjohann and Paschmann, 1989)

$$\lambda_{De} = 3.1 \times 10^2 \text{ [m]}$$

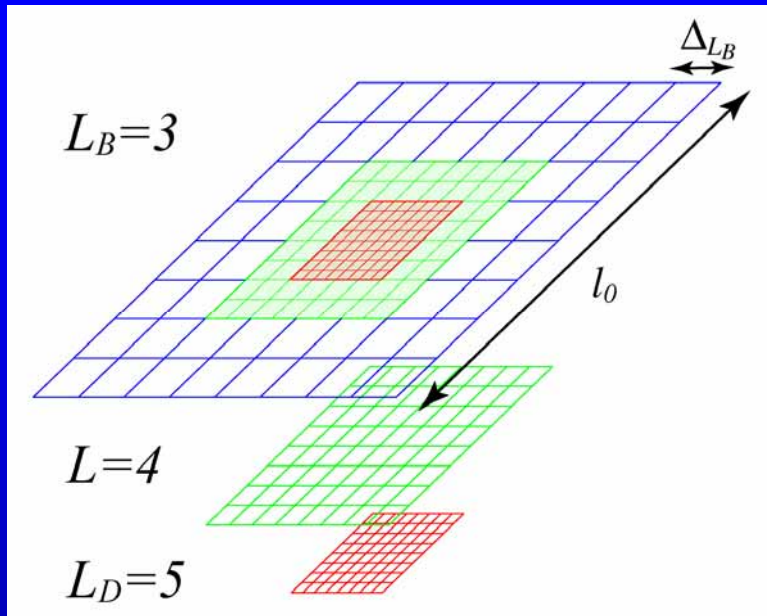


電磁粒子コードにおける数値的制約とAMR法の適用

格子点間隔の制約: $\Delta x \lesssim 3\lambda_{De} \sim 1km$

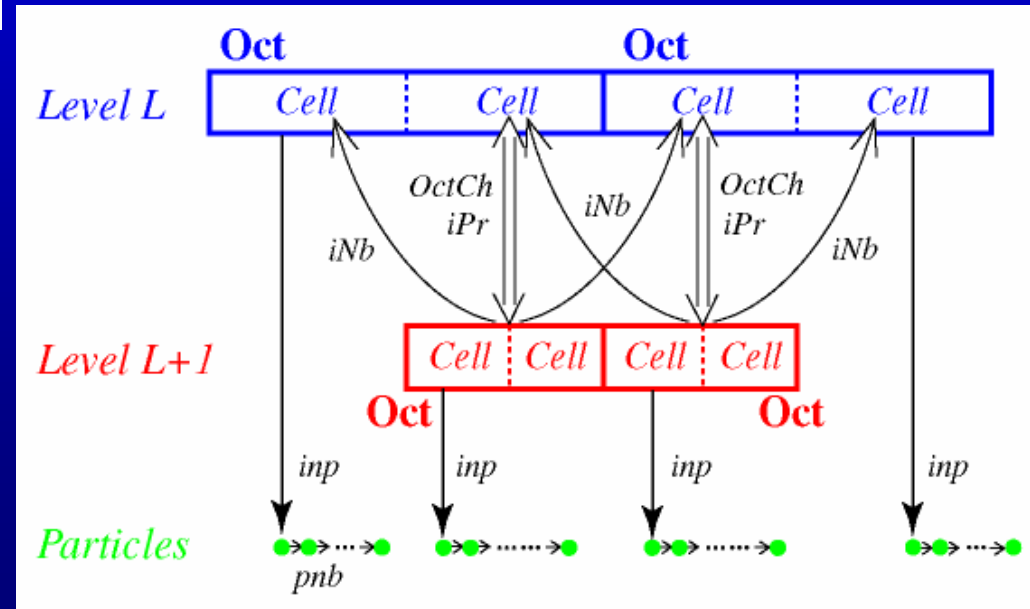


AMR法における格子の階層構造



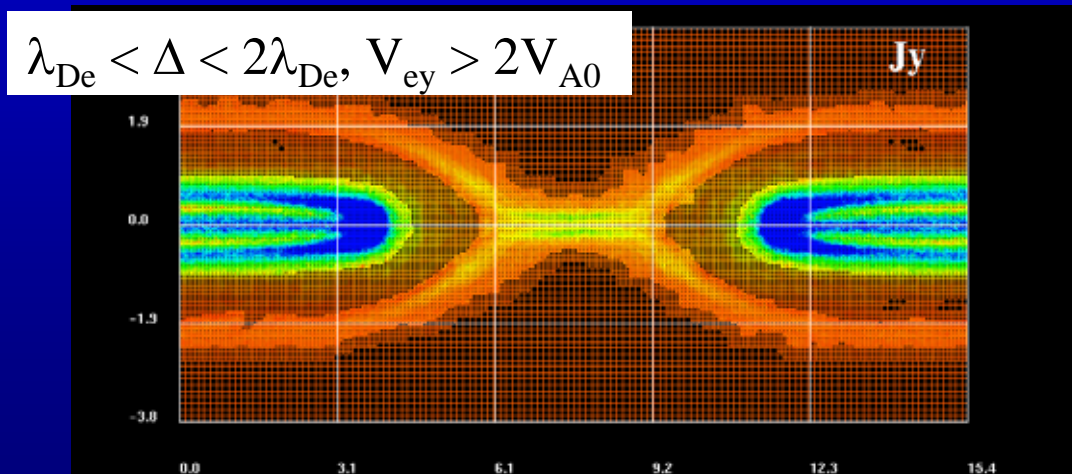
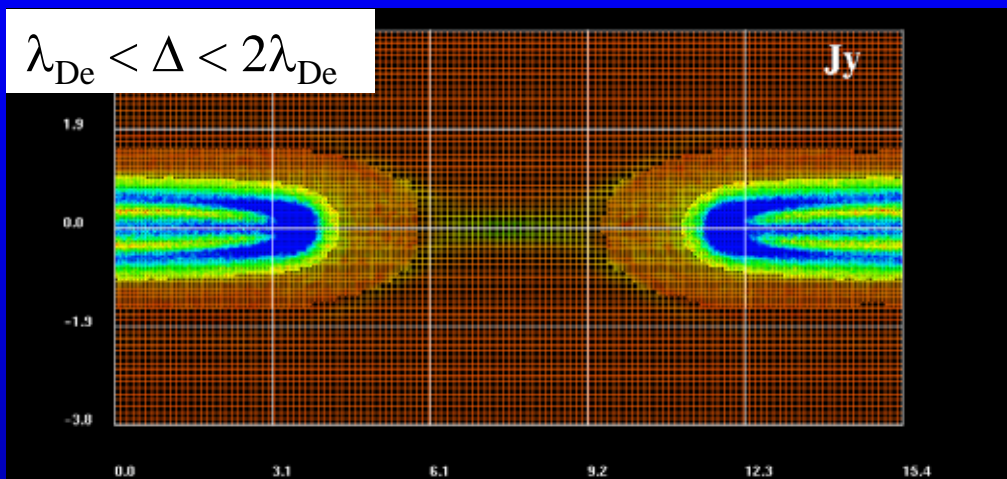
計算格子は階層構造を形成している。
各格子は階層構造の中で独立に取り扱われるので、配列要素として扱われる構造格子とは異なり、柔軟な配置換えが可能である。

階層構造は、それぞれの格子(もしくはオクト)および超粒子に与えられるポインタによって維持されている。

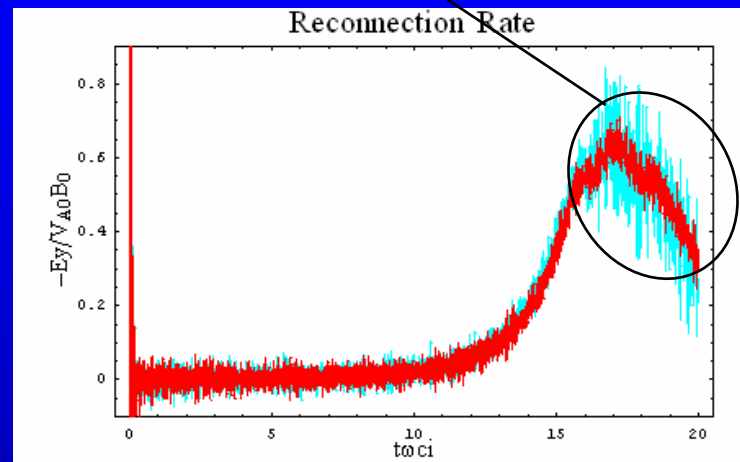


格子の分割条件

電子のデバイ長だけでよいか？



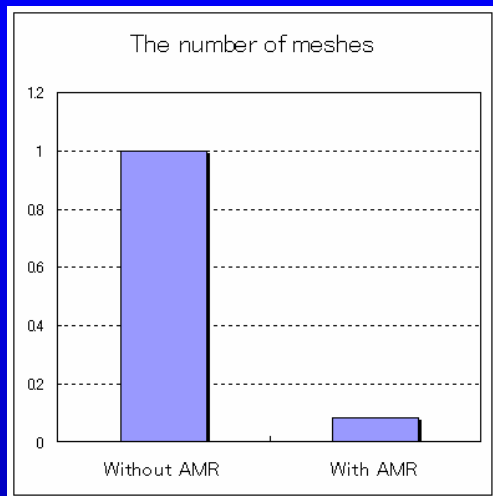
エイリアシング



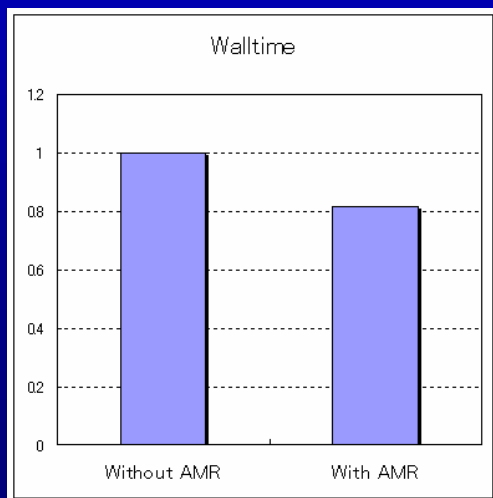
電子スケールの構造、物理過程が重要となる領域では、細分化格子を割り当てる必要がある。

格子数と計算時間

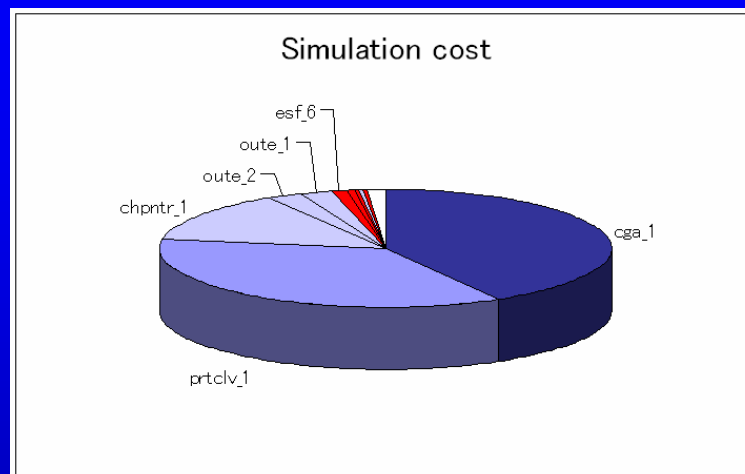
➤ 格子数の比較



➤ 計算時間の比較



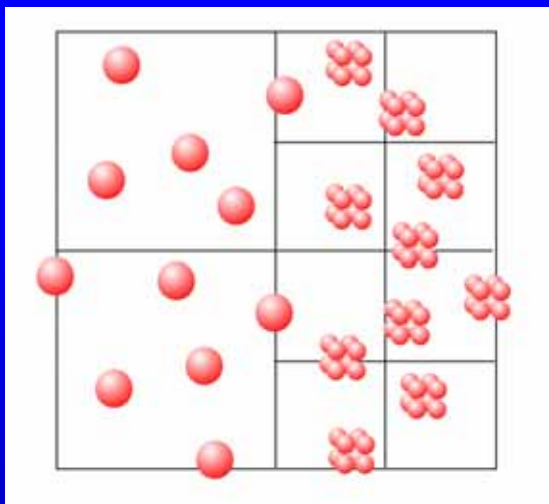
➤ 計算コストの割合



粒子に関する計算が全計算時間の96%以上を占める。

効率の良い計算を行なうためには、超粒子の数を減らすことが必要不可欠である。

超粒子の分割

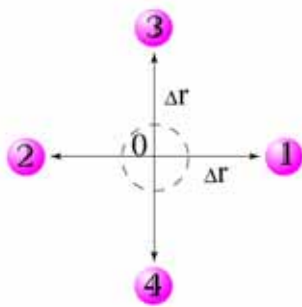


$$\frac{d\vec{v}_s}{dt} = \frac{q_s}{m_s} (\vec{E} + \vec{v}_s \times \vec{B})$$

分割前後で保存させる

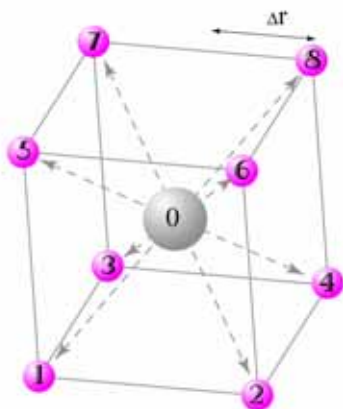
格子点上のモーメント (ρ_c, J)、全電荷・質量 ($\Sigma\rho_c, \Sigma m$)、粒子の全エネルギー ($\Sigma mv^2/2$)、粒子の分布関数 ($f(v)$)

2次元の場合

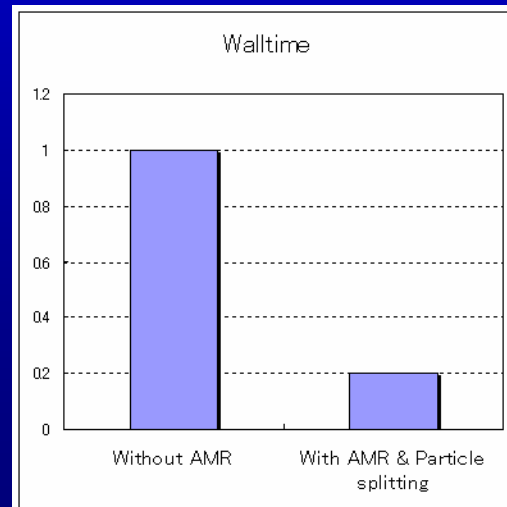


$$\vec{v}_j = \vec{v}_0 \quad (j = 1, 2, \dots, 8)$$

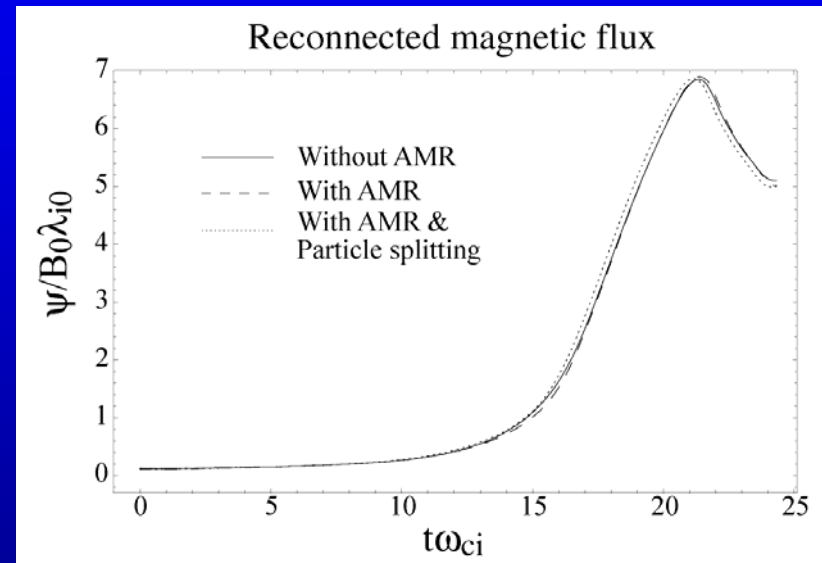
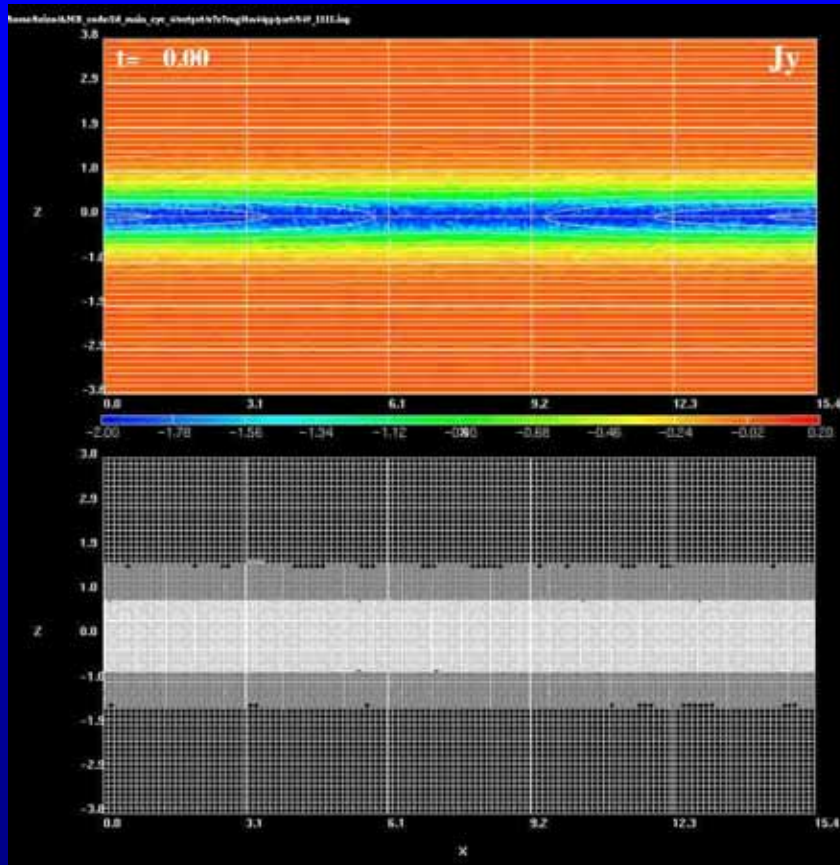
3次元の場合



➤ 計算時間の比較

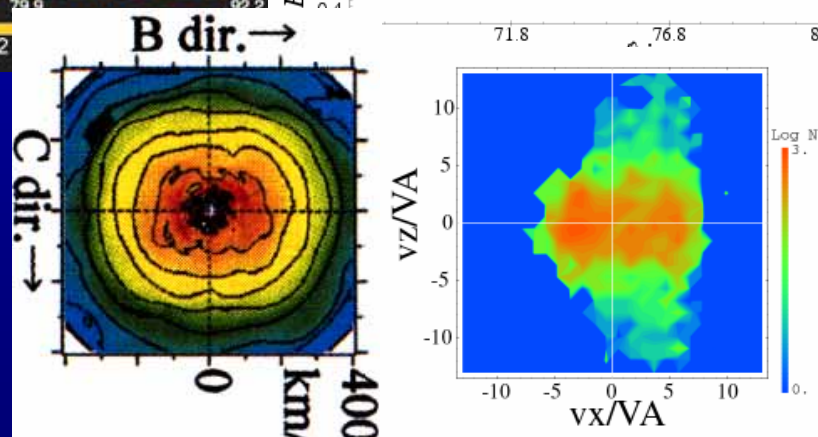
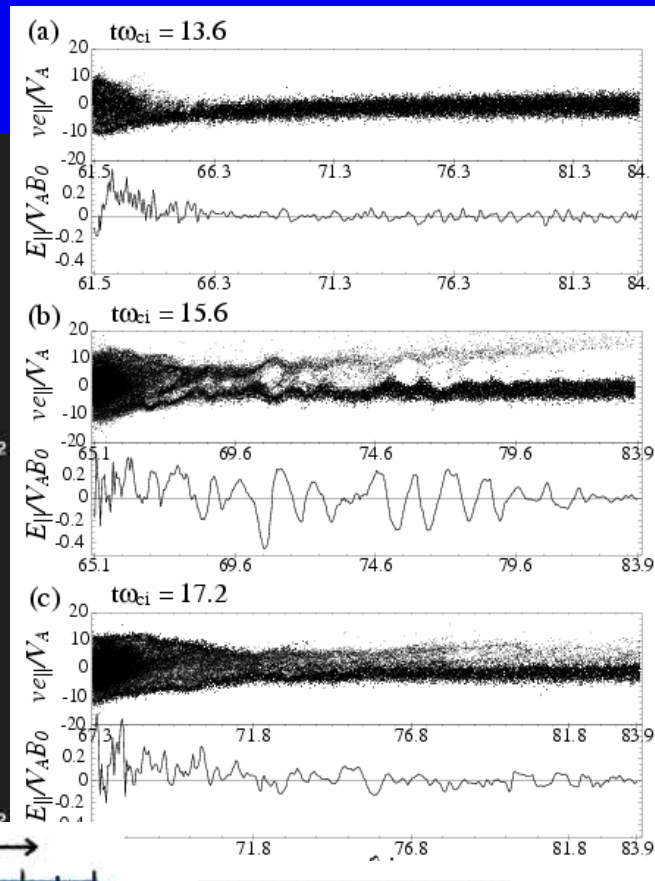
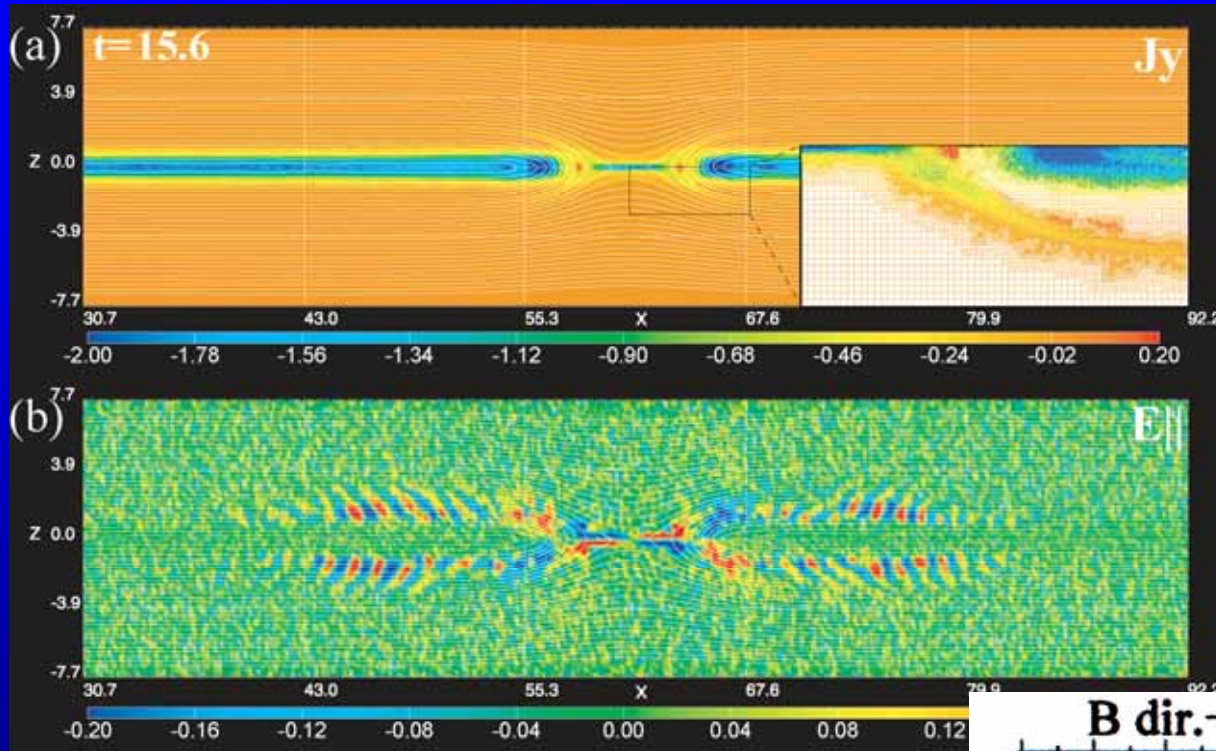


電流層と細分化格子の時間発展



大規模シミュレーション

最大解像度: $N_x \times N_z = 8192 \times 2048$



[Shinohara et al.,
1998]

まとめ

PIC (Particle-In-Cell) 法を用いたプラズマ電磁粒子コードにAMR (Adaptive Mesh Refinement) 法を適用することに成功した。

➤ 格子の分割条件

電子のデバイ長が小さくなるところだけではなく、電子スケールの構造が顕著になるところでも、細分化格子を割り当てる必要がある。

➤ 計算効率

格子数を減らすだけでは、実質的な計算効率の向上にはならない。AMR法と併せて、粒子分割(統合)法を適用することによってはじめて効率的な粒子シミュレーションが実現できる。