相対論的磁気リコネクションにおける相対論的アウトフロー生成の可能性について

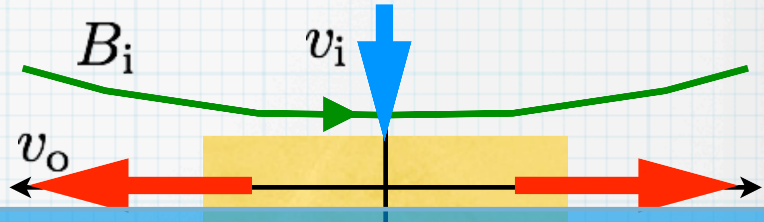
高橋 博之, 花輪 知幸, 松元 亮治
千葉大学

相対論的Sweet-Parker 磁気リコネクションモデル

- 非相対論的磁気リコネクション

  アウトフロー速度〜アルヴェン速度

$$v_o = \frac{B_i}{\sqrt{4\pi\rho_i}}$$



- 相対論的磁気リコネクション

拡散領域内でのエンタルピー変化の効果を含めた場合、速いアウトフローは作れるか？

  - Blackman & Field ('94)
  - Lyutikov & Uzdensky ('03)

    「磁気エネルギー」→「運動エネルギー」と仮定

    large Bで相対論的なアウトフロー

  - Lyubarsky ('05)

    「磁気エネルギー」→「熱エネルギー」を考慮

    large Bでも非/準相対論的なアウトフロー

    ただし、拡散領域内でエンタルピーの変化を無視

モデル化

インフロー領域

インフロー速度: β_i

プラズマ密度: ρ_i

磁場: B_i

加熱領域

プラズマ密度: $\rho_N = \rho_i$

ガス圧: $p_N = \dfrac{B_i^2}{8\pi}$

加速領域

$$\frac{p_N}{\rho_N^\Gamma} = \frac{p_o}{\rho_o^\Gamma}$$

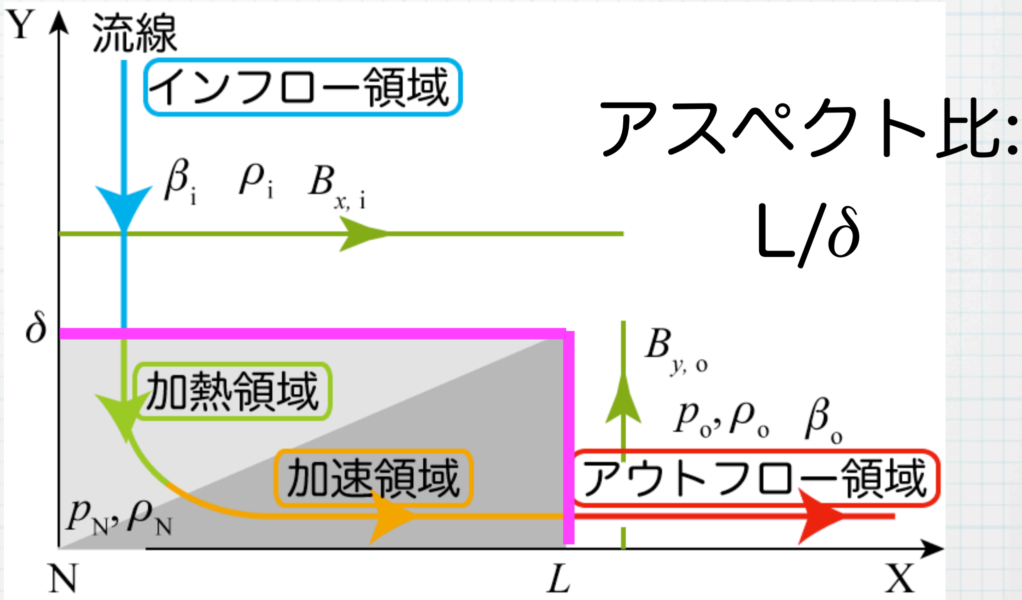
アウトフロー領域

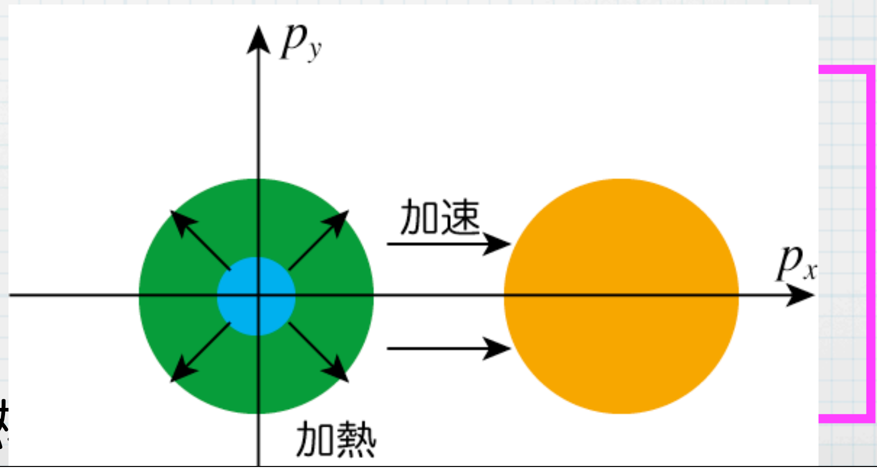
アウトフロー速度: β_o

プラズマ密度: ρ_o

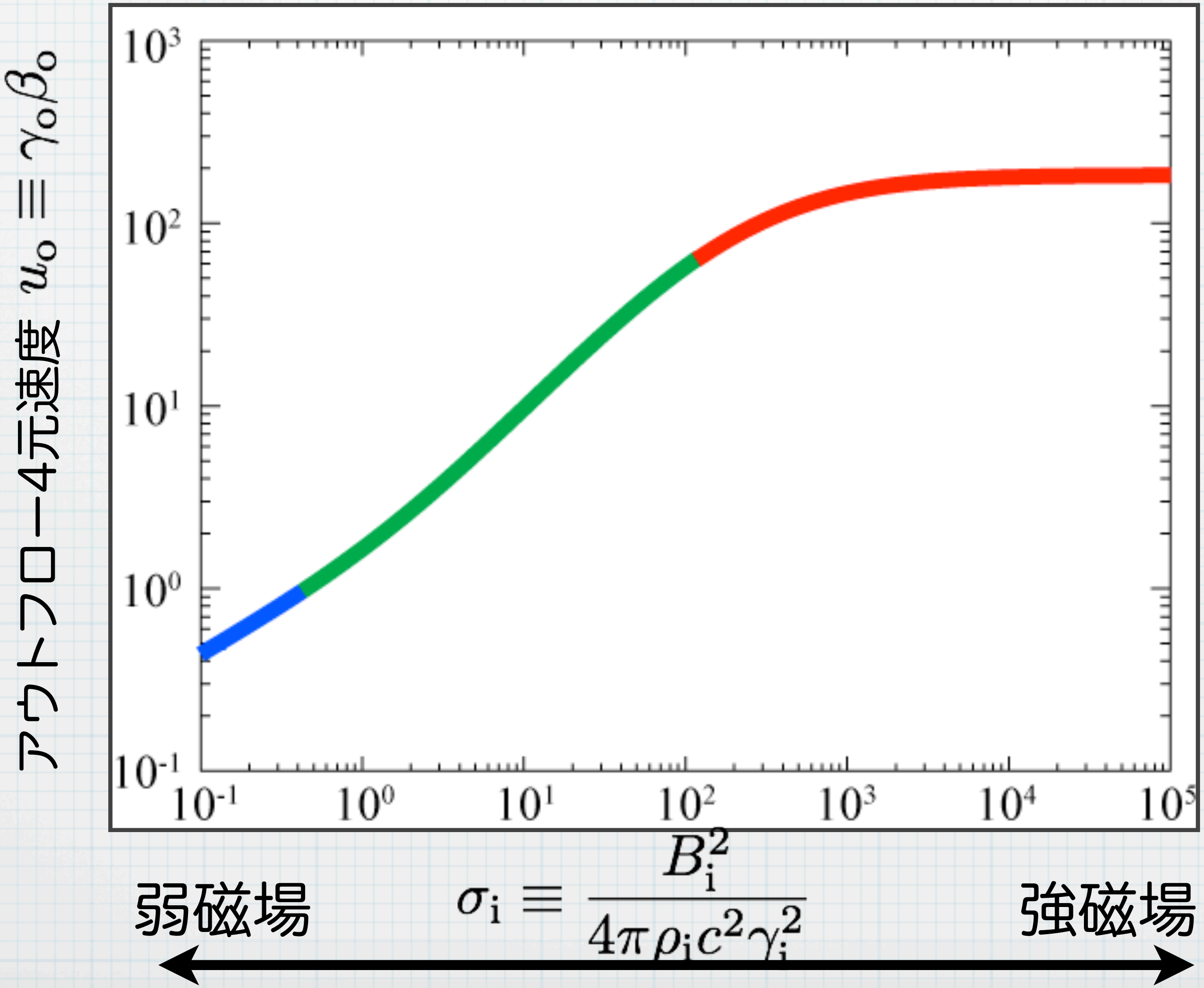
磁場: B_o

Γ:比熱

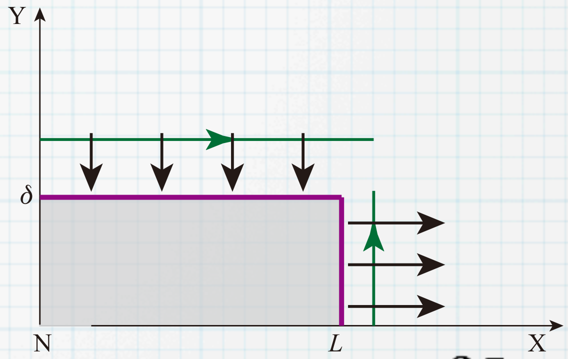




アウトフロー速度の磁場強度依存性



ベルヌーイの式



連続の式

$$\rho_{\rm i} u_{\rm i} L = \rho_{\rm o} u_{\rm o} \delta$$

エネルギー保存

$$\left[\rho_{\rm i} c^2 \gamma_{\rm i}^2 \beta_{\rm i} + \frac{\beta_{\rm i} B_{\rm i}^2}{4\pi}\right] L = \left[(\rho_{\rm o} c^2 + 4p_{\rm o})\gamma_{\rm o}^2 \beta_{\rm o} + \frac{\beta_{\rm o} B_{\rm o}^2}{4\pi}\right] \delta$$

$$\sigma = \frac{B^2}{4\pi \rho c^2 \gamma^2}$$

ベルヌーイの式

$$\boxed{(1+\sigma_{\rm i})\gamma_{\rm i}} = \boxed{\left(1 + \frac{4p_{\rm o}}{\rho_{\rm o} c^2} + \sigma_{\rm o}\right)\gamma_{\rm o}}$$

(拡散領域に入るエンタルピーフラックス)

=(アウトフローとして出て行くエンタルピーフラックス)

=(プラズマの慣性)×(プラズマのバルクのローレンツ因子)

ベルヌーイの式

$$(1+\sigma_{\rm i})\gamma_{\rm i} = \left(1 + \cancel{\frac{4p_{\rm o}}{\rho_{\rm o}c^2}} + \cancel{\sigma_{\rm o}}\right)\gamma_{\rm o}$$

冷たいプラズマ $p_{\rm o} \ll \rho_{\rm o}c^2$

$$\gamma_{\rm o} = (1+\sigma_{\rm i})\gamma_{\rm i}$$

非相対論的

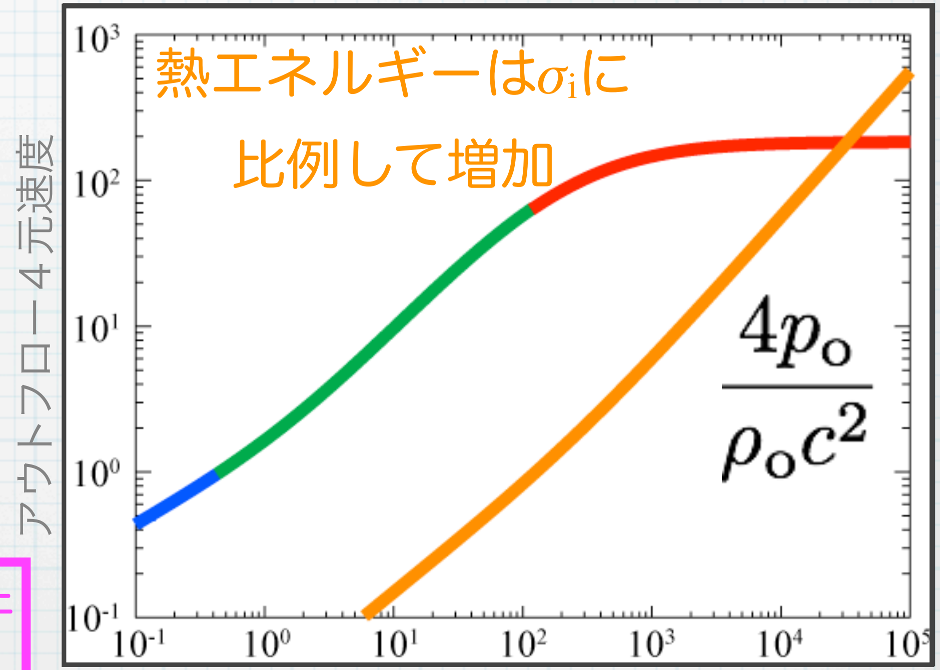
$$v_{\rm o} \simeq \sqrt{2}v_{\rm A,i}$$

熱いプラズマ $p_{\rm o} \gg \rho_{\rm o}c^2$

$$u_{\rm o} \sim \sqrt{\frac{1}{8}\frac{\delta}{L}\frac{1}{\beta_{\rm i}}}$$

超相対論的アウトフロー生成の条件

$$\beta_{\rm i} \ll \frac{\delta}{L}$$



弱磁場 $\sigma_{\rm i} = \frac{\text{磁気エネルギー密度}}{\text{静止質量エネルギー密度}}$ 強磁場

MHD解析のまとめ

- 磁気リコネクションから相対論的アウトフローが出る可能性を探った。
- 拡散領域とアウトフロー領域の間でのエンタルピー変化を考慮。

速いアウトフロー条件は満たされるのか？

2.5次元Particle-In-Cell simulation

$$\sigma_i = \frac{B_i^2}{4\pi \rho_i c^2 \gamma_i^2} = \frac{\text{磁気エネルギー密度}}{\text{静止質量エネルギー密度}}$$

$\sigma_i \ll 1$　　$\sigma_i \sim 1$　　$\sigma_i \gg 1$

非相対論的アウトフロー

$$v_o \simeq \sqrt{2} v_{A,i}$$

冷たいアウトフロー

$$\gamma_o = (1 + \sigma_i)\gamma_i$$

熱いアウトフロー

$$u_o \sim \sqrt{\frac{1}{8}\frac{\delta}{L}\frac{1}{\beta_i}}$$

超相対論的アウトフロー生成の条件

$$\boxed{\beta_i \ll \frac{\delta}{L}}$$

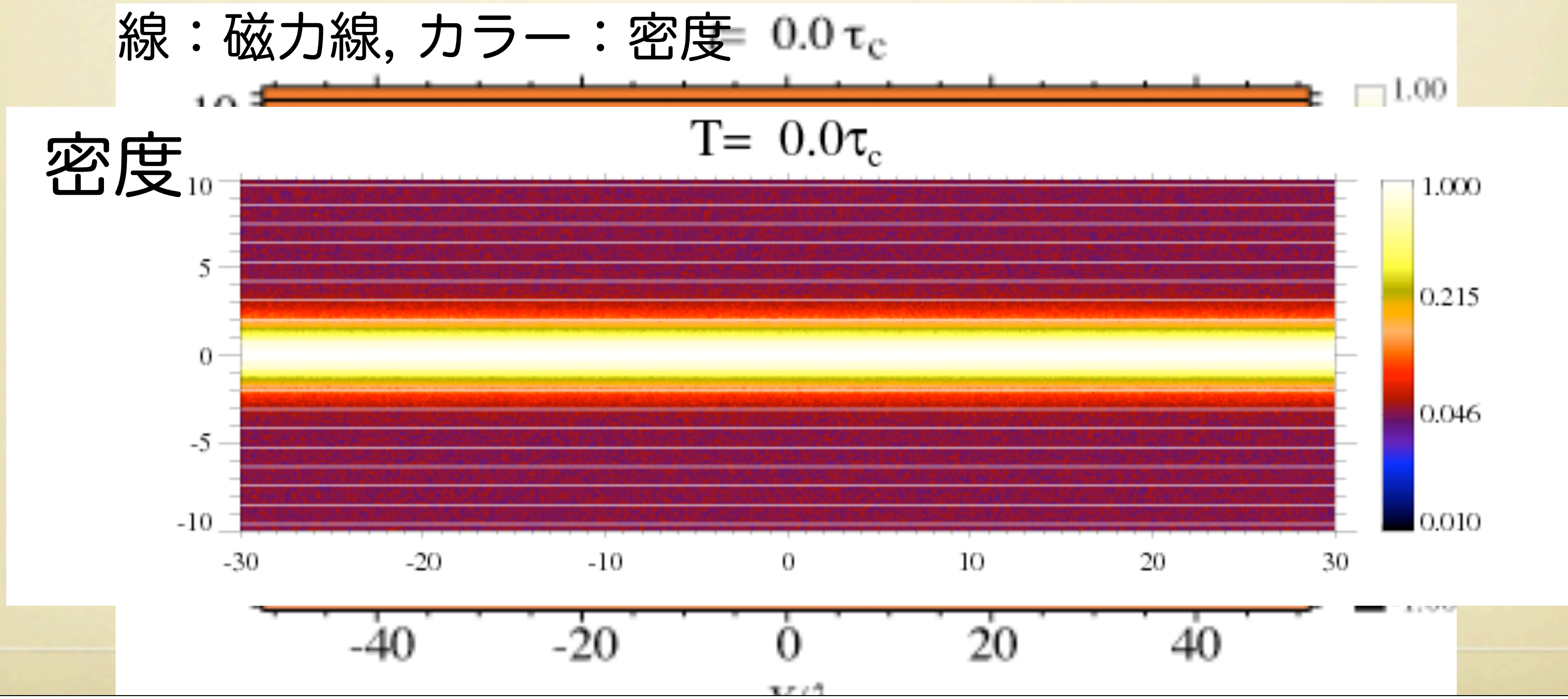
MHD解析からβ_i, δ/Lを決めることが出来ない!!

初期条件

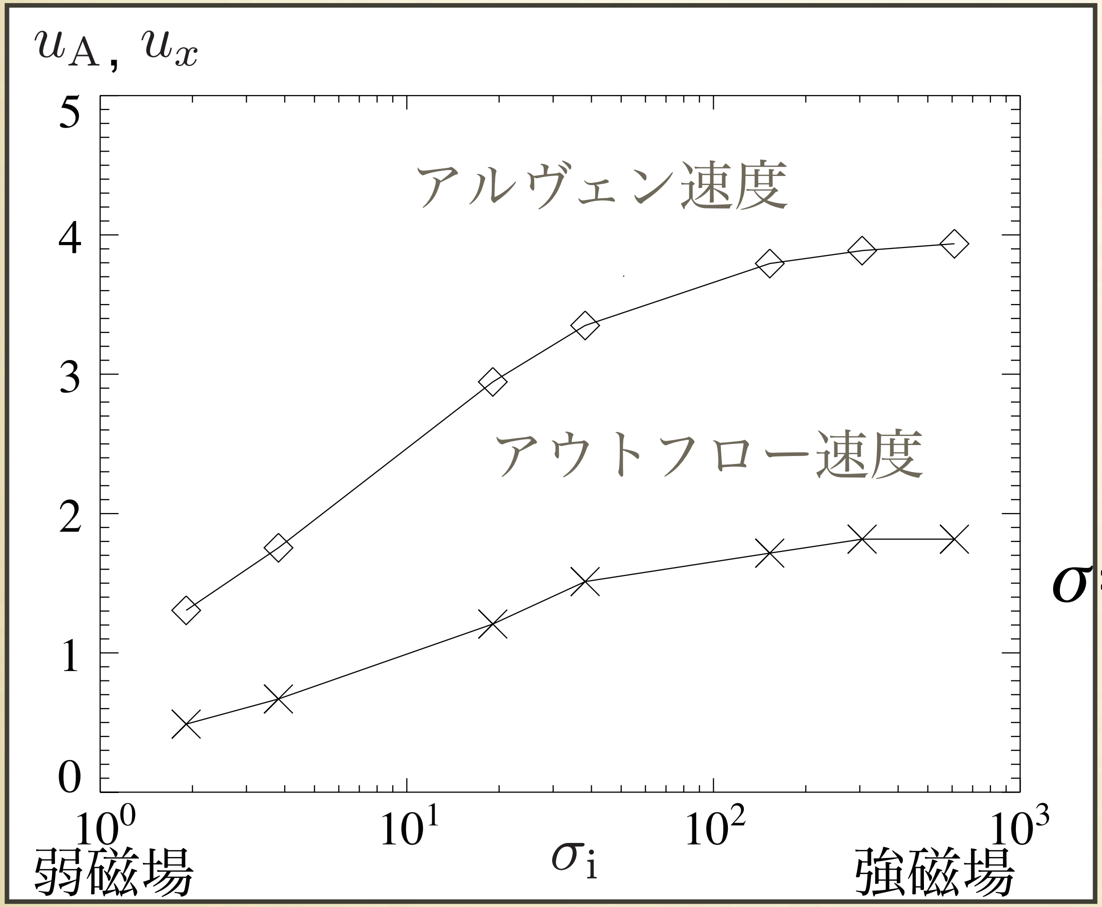
- 2次元1024×512 grids
- pair plasma ~10^8 pair
- 周期境界条件
- 初期条件は1次元平衡解
- 運動方程式 (Buneman-Borris法)
- Maxwell 方程式 (陰解法)

- T_{bg}=0.2T
- $(v_+ - v_-)/c$=0.3
- $n_{bg}/(n_{cs}\ \gamma_{cs})$=0.05

CRAY XT4
cpu数:128
計算時間:10時間
並列化率:63%



アウトフロー速度

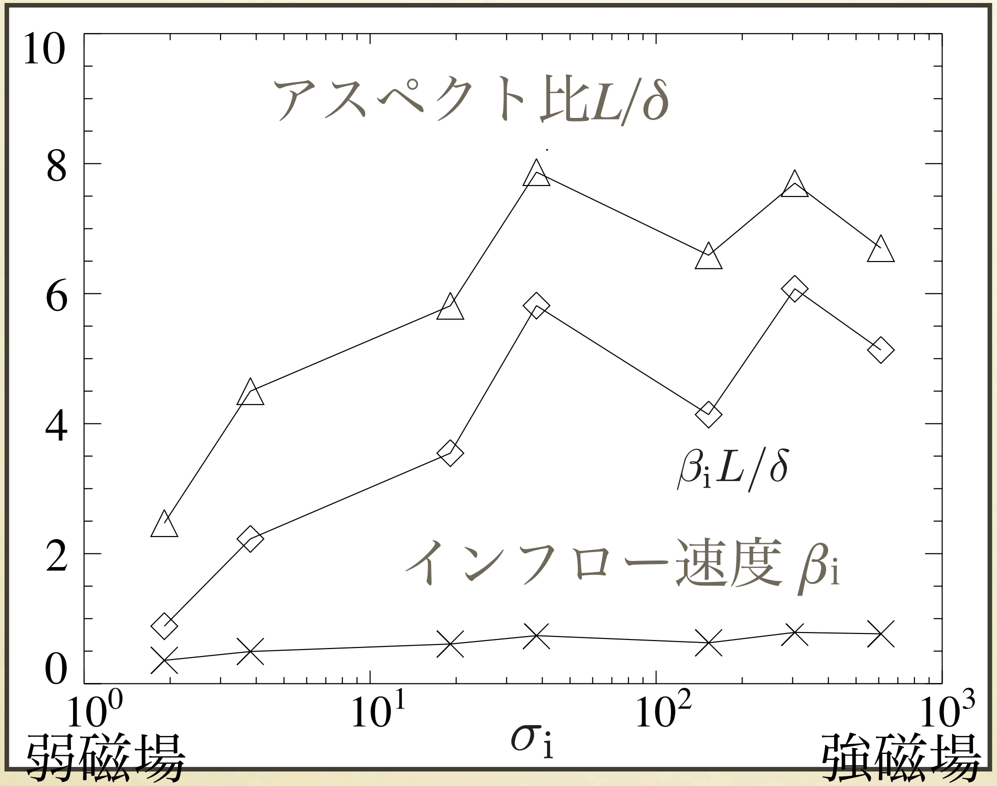


$$\sigma = \frac{\text{磁気エネルギー密度}}{\text{静止質量エネルギー密度}}$$

アウトフロー速度はσ_i~100で一定値に近づく
アルヴェン速度に比べて遅いアウトフロー

速いアウトフローの条件

超相対論的アウトフロー生成の条件 $\beta L/\delta \ll 1$



最大インフロー速度

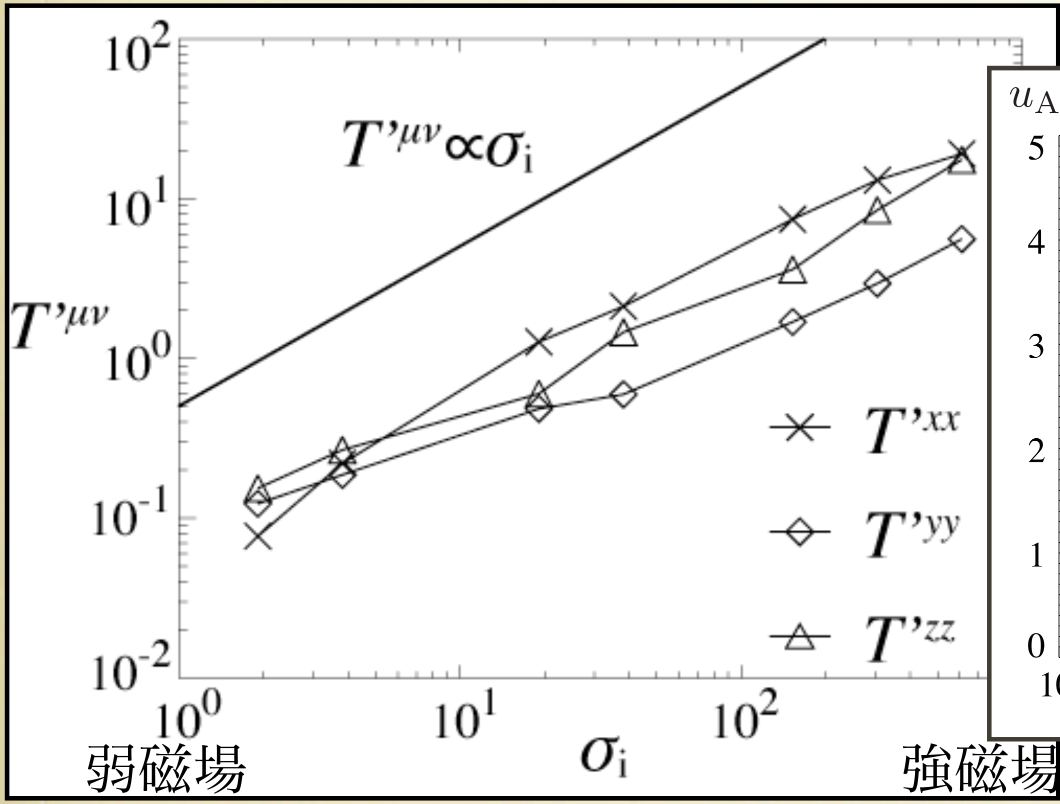
β_i~0.2-0.7

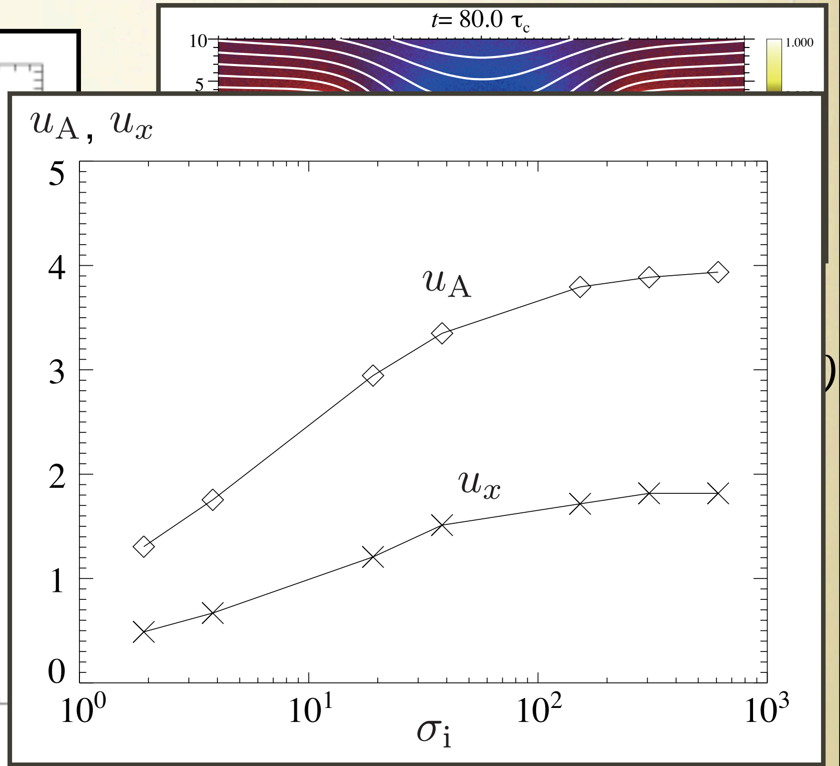
(大きい)

速いアウトフローの条件は満たされない!!

リコネクションレートは大きい(加熱率が高い)

電子の熱エネルギー





$$\sigma = \frac{\text{磁気エネルギー密度}}{\text{静止質量エネルギー密度}}$$

- 熱エネルギーはσ_iに比例して増加
  ->MHD解析とコンシステント
- σ_i~100 で(熱エネルギー) > (静止質量エネルギー)

まとめ

- 2.5次元粒子シミュレーションを行った
- σ_i~100でアウトフロー速度は一定値へ(γ~2)
- 熱エネルギーはσ_iに比例して増加
- σ_i~100で(熱エネルギー)>(静止質量エネルギー)
- 流入速度が大きいために加熱率が大きくなる
- 熱エネルギーが大きくなり慣性が増えるため、超相対論的アウトフローの条件は満たされない。