



GRADUATE
SCHOOL OF
FACULTY OF

SCIENCE

KYOTO UNIVERSITY



シンクロトロン放射冷却を考慮 した磁気リコネクション過程

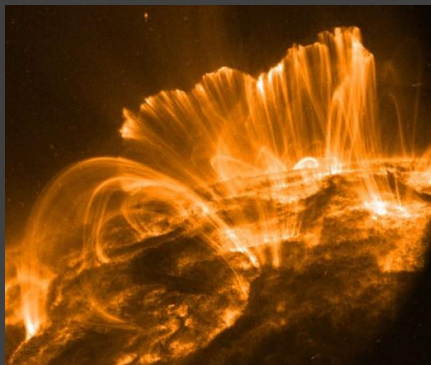
竹重聡史(京都大学理学研究科附属天文台)

高橋博之(NAOJ)、柴田一成(京都大学)

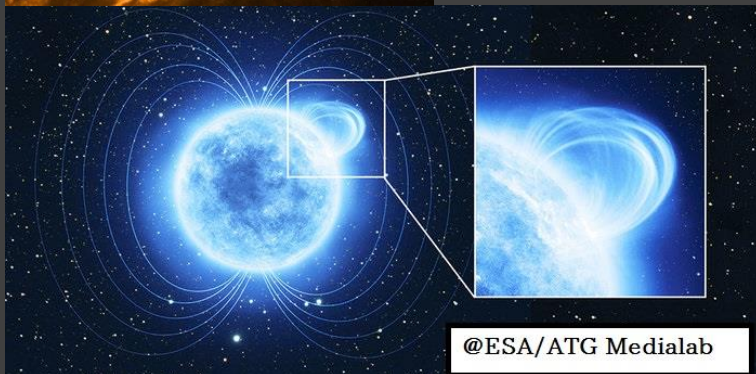
Aug.30, 2017@JAMSTEC、MHD2017

磁気リコネクションで 駆動される高エネルギー天体現象

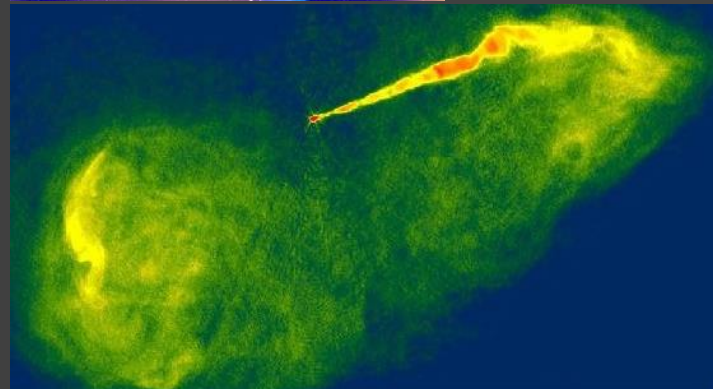
多くの天体で、磁気エネルギーを解放することで駆動されている高エネルギー天体現象が数多く観測されている。



*(above) Solar flares
(below) Magnetars*



*(above) Black hole
accretion discs
(below) Relativistic
jets*



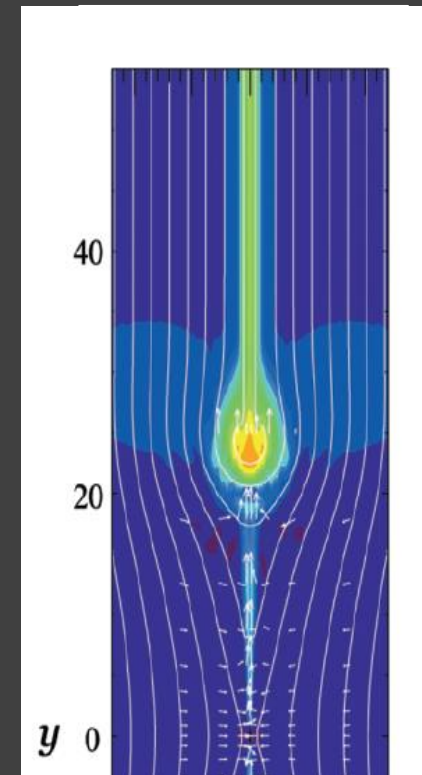
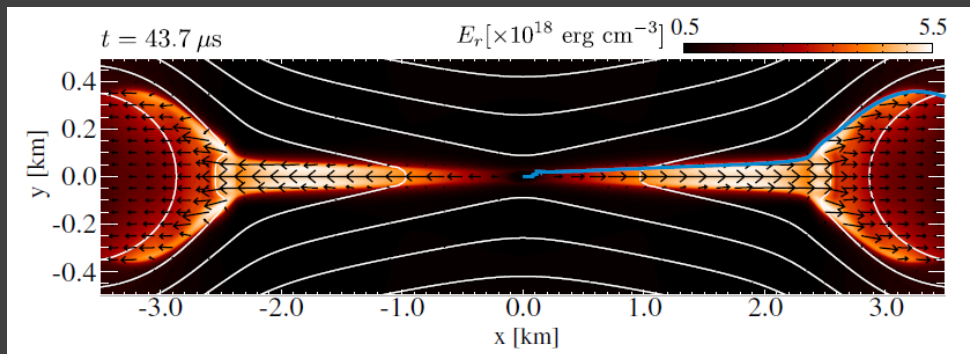
相対論的磁気リコネクションの数値シミュレーション

相対論的磁気リコネクション($V_A \sim c$)の数値シミュレーションが可能となり、速いリコネクションが実現することが確かめられた(Watanabe&Yokoyama 2006)。

Watanabe & Yokoyama 2006

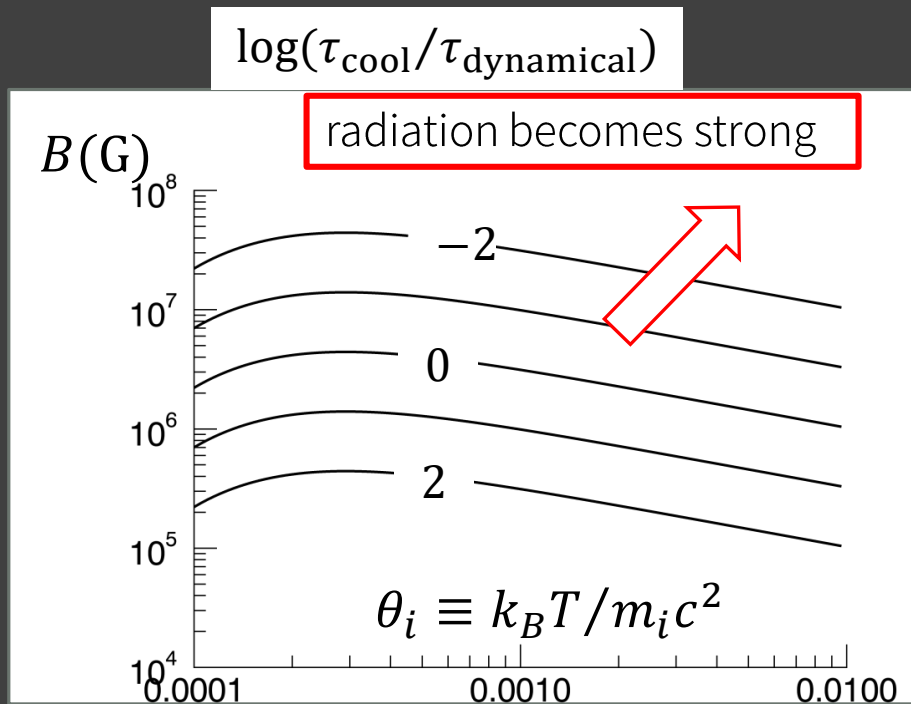
近年では輻射を考慮した相対論的MHD数値計算も行われている(Takahashi+ 2013)。

Takahashi+2013



シンクロトロン放射冷却を考慮したリコネクション過程

磁気エネルギー密度が静止質量エネルギー密度と同程度となるような磁気優勢なプラズマでは、シンクロトロン放射が重要な放射過程となる。
(Jaroschek&Hoshino 2009, Uzdensky 2015).



本研究ではMHD数値計算にシンクロトロン放射の効果を取り入れ、リコネクション過程に及ぼす影響を調べた。

放射冷却を考慮した基礎方程式系と数値計算の初期条件

基礎方程式系

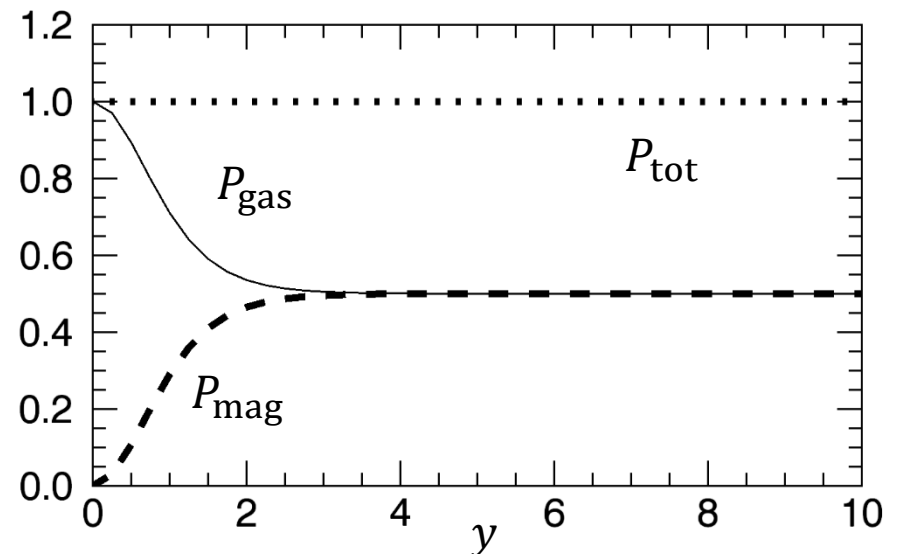
$$\begin{aligned}\partial_t(\rho\gamma) + \nabla \cdot (\rho\gamma\mathbf{v}) &= 0, \\ \partial_t e + \nabla \cdot \mathbf{m} &= q(\rho, T, B), \\ \partial_t m_i + \nabla_j \cdot \Pi_{ij} &= 0, \\ \partial_t \mathbf{B} + \nabla \times \mathbf{E} &= 0, \\ \partial_t \mathbf{E} - \nabla \times \mathbf{B} &= \mathbf{j}.\end{aligned}$$

The radiation emissivity, $q = q(\rho, T, B)$ (Esin+ 1996).

単純のために本研究では optically-thin な放射のみを考えている。

初期条件

- Isothermal MHD equilibrium.
- Spatially localized resistivity.
- $[x, y] = [0: 180, 0: 45]$, 3600×900 grid points.



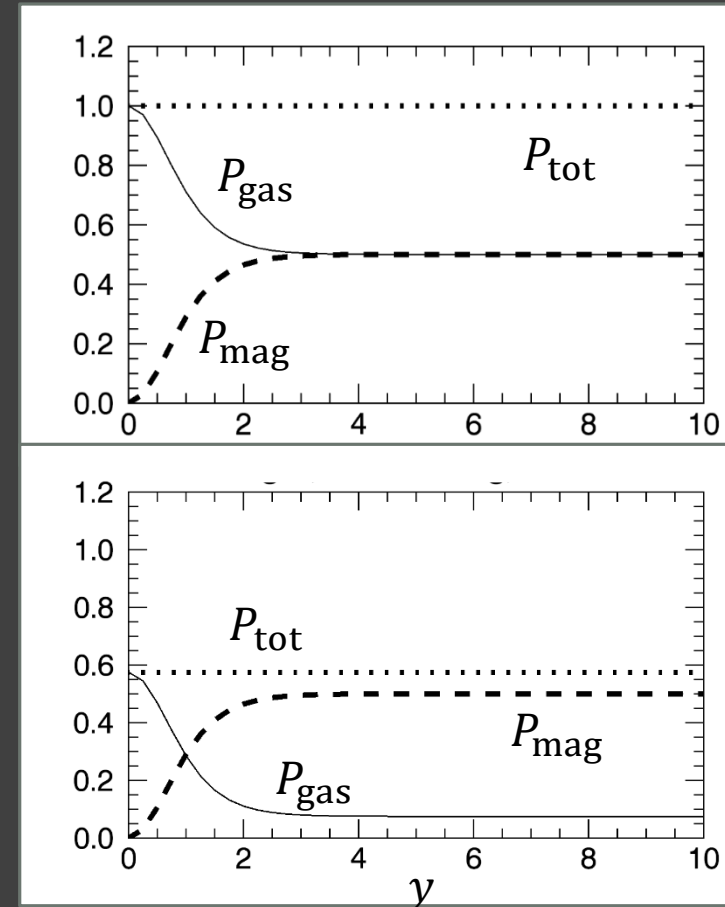
数値計算モデルの初期条件

次の三つのモデルを用いて数値計算を行い、冷却の効果を調べた。

1. Model A: 冷却なし, $\beta_0 = 1$, model A & B
2. Model B: $\tau_{cool}/\tau_A=100$, $\beta_0 = 1$,
3. Model C: 冷却なし, $\beta_0 = \beta(t/\tau_A = 200) < 1$

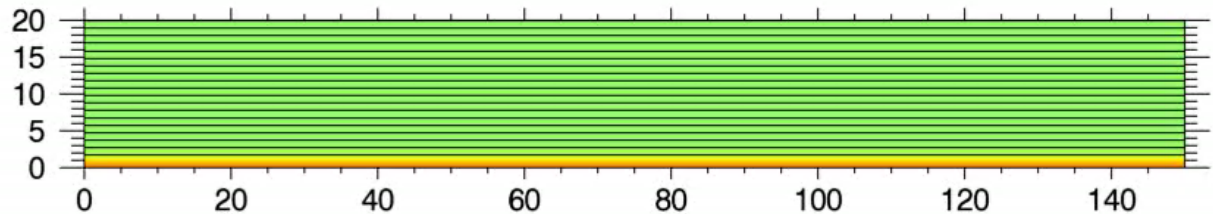
これらのモデルでは $V_A/c \sim 0.1$ のパラメータで計算を行った。

model C

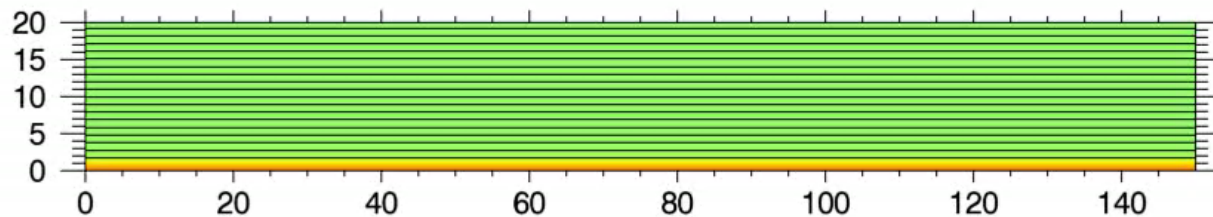


Petschek reconnection の 数値計算の結果：密度の時間発展

Model A
(without radiation)



Model B
(with radiation)

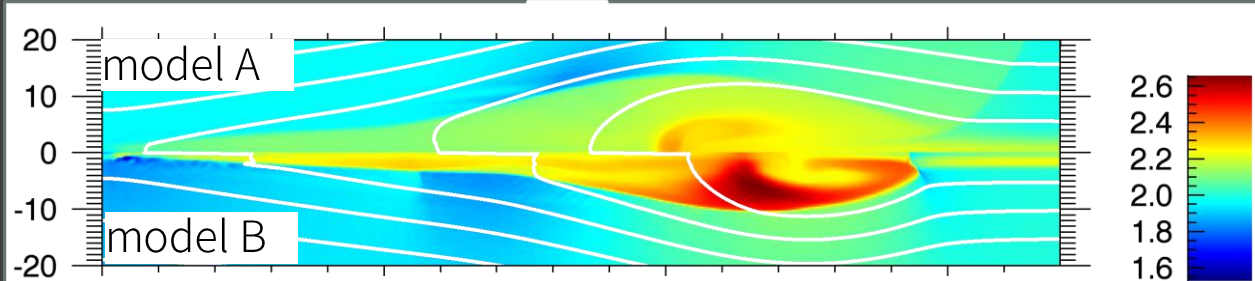


冷却を考慮した model B では

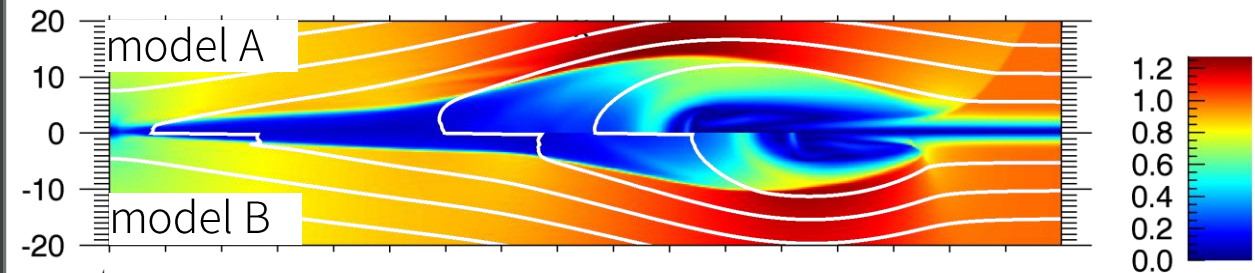
- アウトフロー中の密度が大きい
- リコネクションアウトフローの開き角が小さくなる。

ペチエック型リコネクションの数値計算の結果：各物理量の $t/\tau_A \sim 200$ における分布

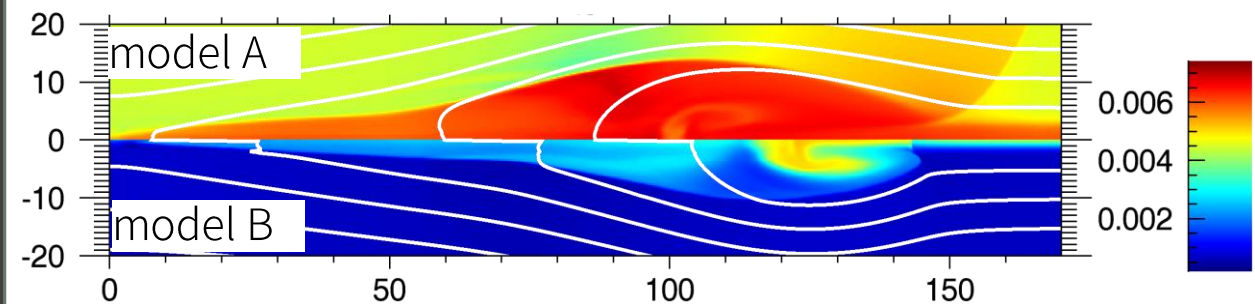
密度



磁場強度

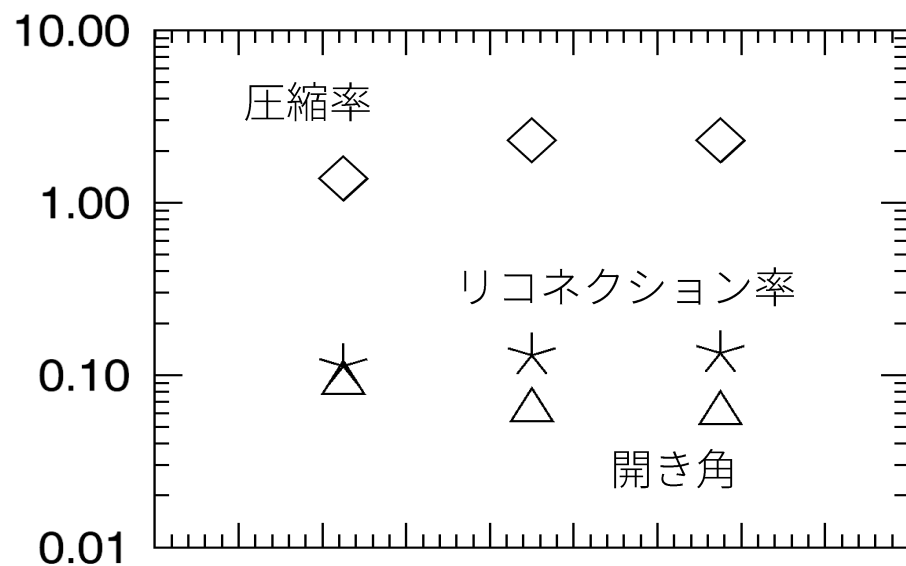
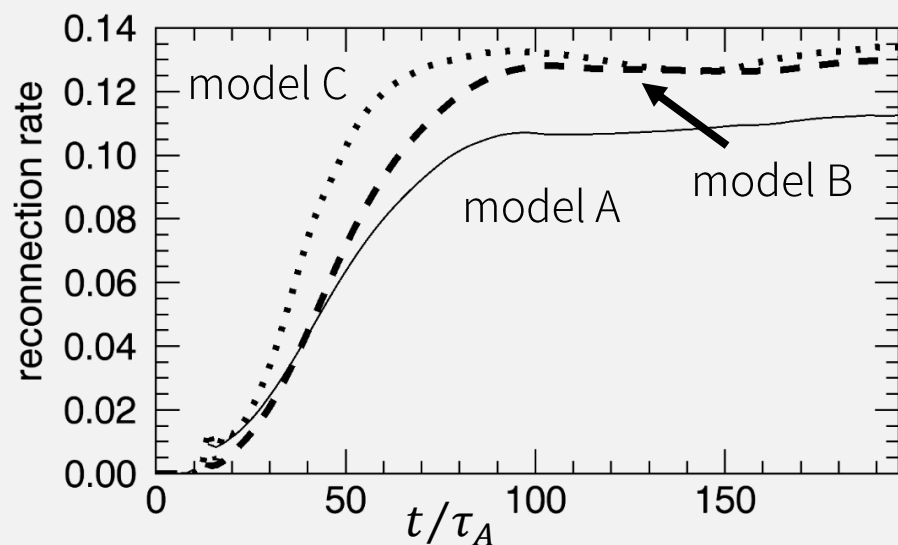


温度



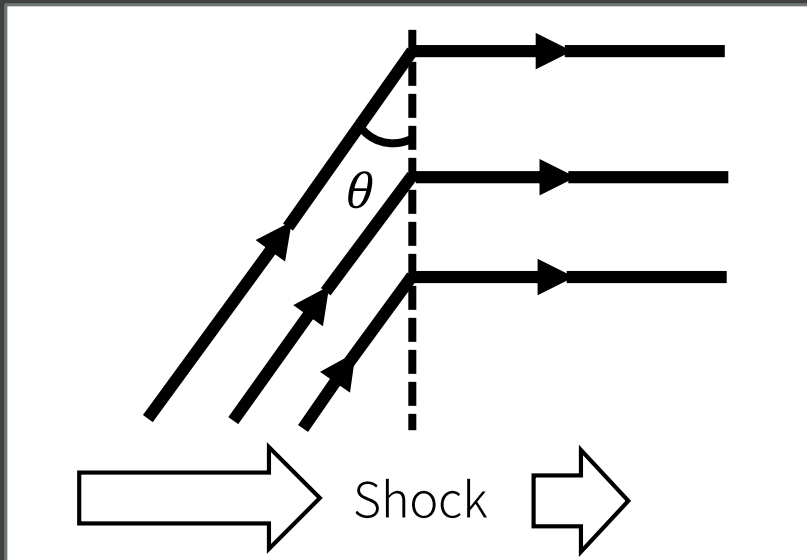
放射冷却によるリコネクション率への影響

- 時間発展に伴って、model B の結果は model A から model C へ近づく。
圧縮率の寄与でリコネクション率 $v_{in}/v_{out} \sim \delta/L \times \rho_{out}/\rho_{in}$ が上昇

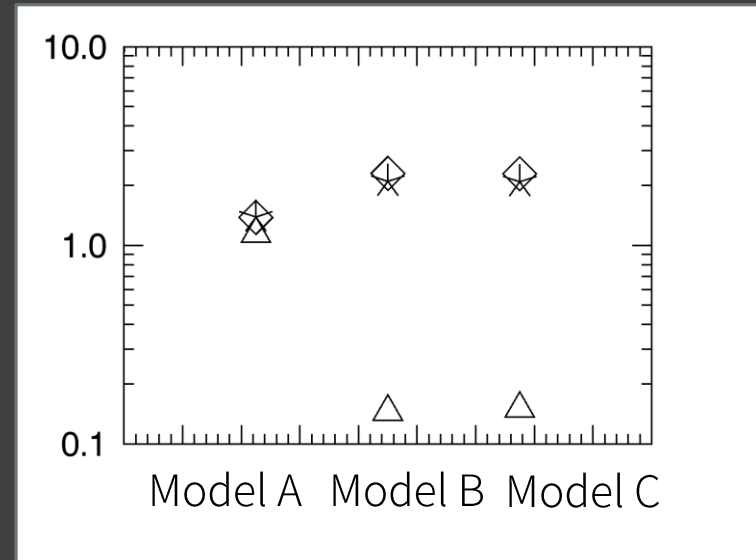


model A model B model C

プラズマの圧縮率と Switch-off shock の関係式



Slow shock を switch-off shock と考えると、圧縮率は $1 + (2 C_{s,1}^2 / V_{A,1}^2 +$



Triangles: β_1 ,

Diamonds: ρ_2/ρ_1 ,

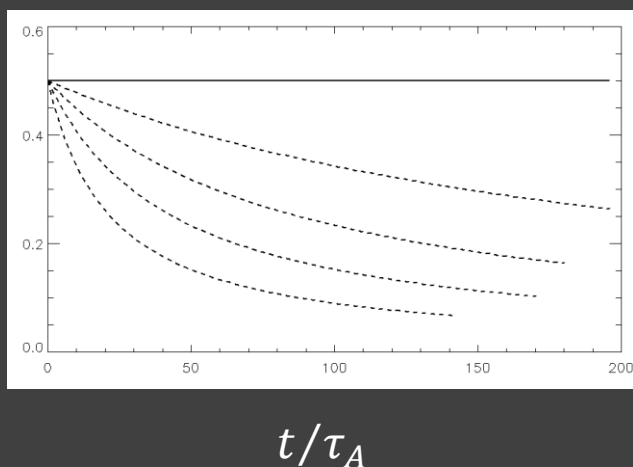
Stars: $1 + (2 C_{s,1}^2 / V_{A,1}^2 + \gamma - 1)^{-1}$

相対論的なパラメータでの冷却を考慮したリコネクション過程

$\sigma \equiv B^2 / 8\pi m_e c^2 = 3$, プラズマ
マベータ $1/3$ で Alfvén
velocity $\frac{v_A}{c} \sim 0.707, \gamma = 1.41$
の計算を行った。

それぞれ $t/\tau_A = 100$ における
密度の分布を表している。

温度



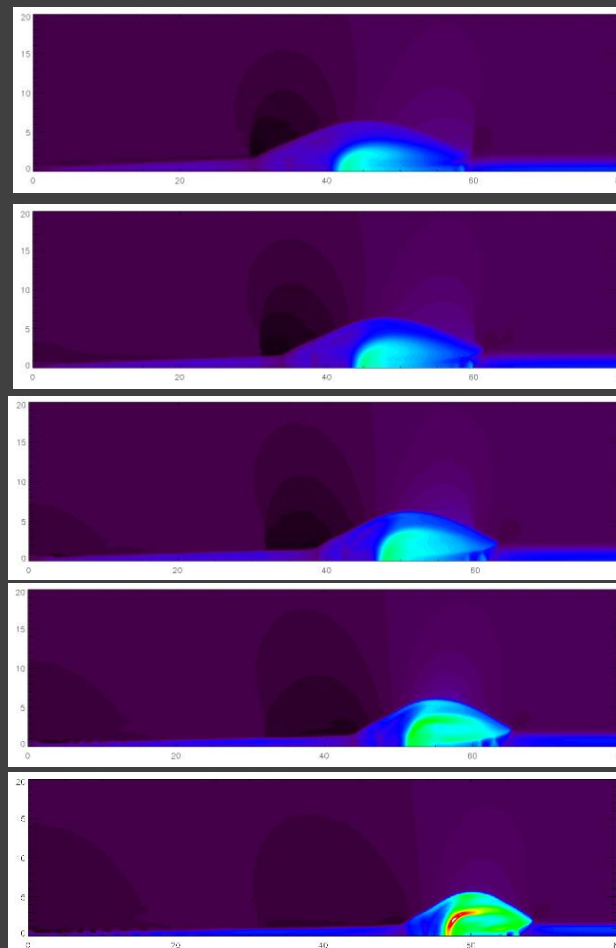
冷却なし

$\tau_{cool}/\tau_A = 73$

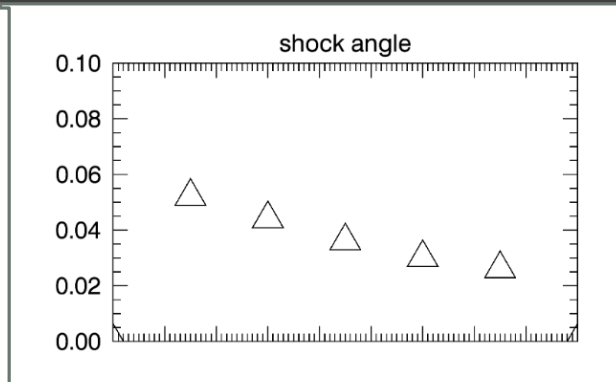
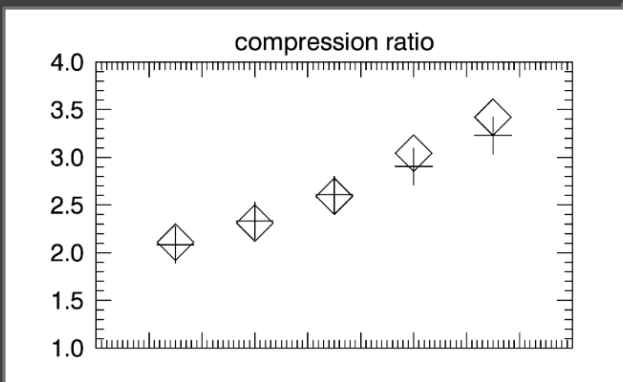
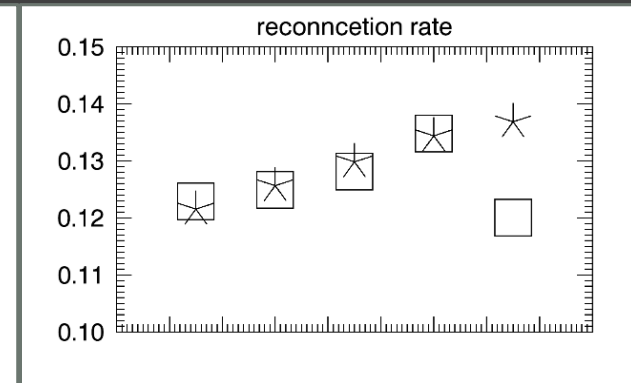
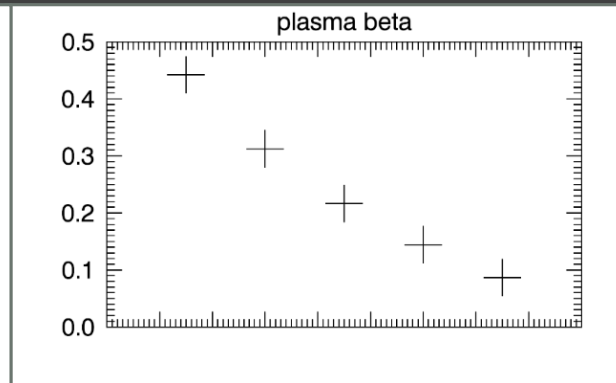
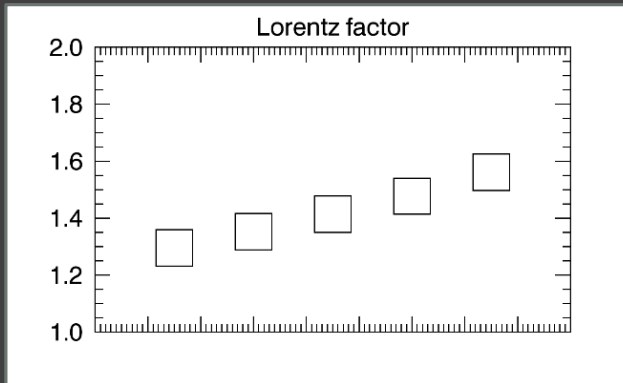
$\tau_{cool}/\tau_A = 29$

$\tau_{cool}/\tau_A = 15$

$\tau_{cool}/\tau_A = 7$



相対論的パラメータでの リコネクション率への影響



それぞれの図は左端が冷却を考慮しないモデルの結果で、左から順に冷却の強いモデルの結果を表す

まとめ

- 二次元 Petschek reconnection の数値計算を用いて、シンクロトロン放射過程が及ぼす影響を調べた。
- 冷却によって電流シート外側でのプラズマベータが減少することで圧縮性が効くようになりリコネクション率が上昇する。
- optically-thick な放射冷却の場合 & Sweet-Parker reconnection の計算

