



## 成果に関連して出版、もしくは印刷、投稿中の論文リスト

### (1) このプロジェクト（同様の過去のプロジェクトも含む）での成果

- N. Asai, N. Fukuda, & R. Matsumoto, Three-dimensional Magnetohydrodynamic Simulations of Cold Fronts in a Magnetically Turbulent ICM, 2007, *ApJ*, in press.
- N. Asai, N. Fukuda, & R. Matsumoto, Three-dimensional MHD Simulations of a Subcluster Plasma Moving in Turbulent ICM, 2007, *Proceeding of IAU XXVIth General Assembly Symposium 235*, in press.
- N. Asai, N. Fukuda, & R. Matsumoto, MHD Simulations of Clusters of Galaxies Including Radiative Cooling, 2007, *Proceeding of Heating vs. Cooling in Galaxies and Clusters of Galaxies*, in press.
- N. Asai, N. Fukuda, & R. Matsumoto, MHD Simulations of Plasma Heating in Clusters of Galaxies, 2006, *Astronomische Nachrichten*, 327, 605-606
- 浅井直樹, 福田尚也, 松元亮治, 乱流磁場中での銀河団プラズマ冷却の3次元磁気流体数値実験, 日本天文学会 2006年秋季年会

### 成果の概要

近年の銀河団の X 線観測から、銀河団中心部のプラズマは従来の理論的予測に比べて冷えていないことが明らかになった。その結果、中心部の放射冷却による温度低下を補う加熱源が必要と考えられており、その候補として、中心部の AGN ジェットや周辺高温プラズマからの熱伝導、磁氣的加熱などが挙げられる。そこで我々は、(1) 磁氣的加熱と (2) 熱伝導に注目した。

(1) 磁場がプラズマ加熱に寄与するためには、中心部でのプラズマ  $\beta (= P_{\text{gas}}/P_{\text{mag}})$  の値が 1 程度まで小さくなり、そのエネルギーが磁気リコネクション等により解放される必要がある。磁化された銀河団プラズマ (ICM) が、放射冷却により球対称に収縮すると仮定し、プラズマに凍結した磁場の磁束が保存すれば、その強度は  $B \propto R^{-2}$  に従うため、磁気圧 ( $P_{\text{mag}} = B^2/8\pi$ ) は  $R^{-4}$  に従って増加する。また、放射冷却による ICM の温度低下と質量保存 ( $\rho \propto R^{-3}$ ) を考慮すると、ガス圧 ( $P_{\text{gas}} \propto \rho T$ ) は  $R^{-3}$  よりもゆるやかに増加するはずである。そのため、プラズマ  $\beta$  は  $\beta \propto R' > R$  に従い、放射冷却により収縮すればするほど、プラズマ  $\beta$  は小さくなると期待される。

(2) ICM は熱伝導が良く効く系であり、銀河団コアの周囲にある高温プラズマからの熱流入により、コアプラズマの冷却を補う可能性がある。しかし、熱伝導は磁場方向に強く依存するため、非等方な振る舞いを考慮する必要があり、コアと周辺プラズマを繋ぐ磁場が存在すれば、その磁力線に沿って熱は流入できるはずである。

そこで我々は、放射冷却と熱伝導を含む 2 次元、3 次元 MHD シミュレーションにより、銀河団コアの熱的進化を調べた。初期に等温  $\beta$  モデルの密度分布を与え、磁場分布は乱流を仮定する。3 次元モデルの平均磁場強度は、 $0.03 \mu\text{G}$  (プラズマ  $\beta \sim 7.5 \times 10^4$ )、2 次元モデルの中心部 ( $300 \text{ kpc} \times 300 \text{ kpc}$ ) の平均磁場強度は、 $0.07 \mu\text{G}$  (プラズマ  $\beta \sim 1.0 \times 10^4$ ) とする。3 次元の計算領域とメッシュ数は、それぞれ  $(150 \text{ kpc})^3$  と  $192^3$ 、2 次元のそれらは、 $(900 \text{ kpc})^2$  と  $1024^2$  である。

まず、放射冷却のみを含む 3 次元 MHD シミュレーションの結果を示す。図 1(a) には、 $t = 1.4 \text{ Gyr}$  後の磁場強度分布を示した。色の白い部分は磁場が強いことを表す。中心部のプラズマは、放射

冷却により冷えるため、速度ベクトルが示すように、周辺プラズマが中心部に向かって落ち込む。同時に、初期にランダムであった磁場は、プラズマの収縮とともに中心部に蓄積され強まっている。図 1(b) には、中心部の磁気エネルギーの時間進化を示した。磁気エネルギーは、指数関数的に増加し、1.4 Gyr 後には、初期の 2 倍まで増加する。しかし、このモデルでは初期磁場強度が小さく、1.4 Gyr 後でも磁気エネルギーはまだ小さく、コアプラズマの加熱には寄与しない。

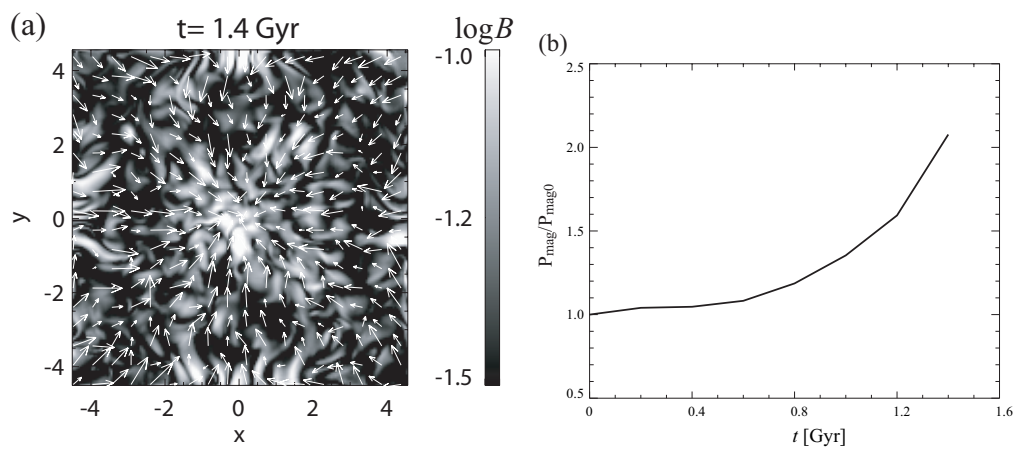


図 1: 放射冷却を含む 3 次元計算の結果。(a)  $t = 1.4$  Gyr 後の  $z = 0$  面での磁場強度分布。矢印は、速度ベクトルを表す。(b) 中心部分 ( $[30 \text{ kpc}]^3$ ) での磁気エネルギーの時間発展。

次に、放射冷却と熱伝導を含む 2 次元 MHD シミュレーションの結果を示す。図 2 には、 $t = 1.2$  Gyr 後の中心部分 ( $300 \text{ kpc} \times 300 \text{ kpc}$ ) の温度分布を示した。色の黒い部分は温度が低いことを表す。磁場ベクトルが示すように、磁場はループ状の構造を作っている。放射冷却の効果により、中心部の温度は低下している。この磁場はコアと周辺プラズマを繋いでいないため、熱伝導による周辺プラズマからの熱流入は小さく、コアプラズマを十分加熱できない。また、その中心付近の低温プラズマの分布は、磁場の方向に沿って分布していることがわかる。この磁場のループ構造とそれに沿った温度分布は、観測から予測されている低温と高温プラズマの 2 温度共存を説明できるかもしれない。

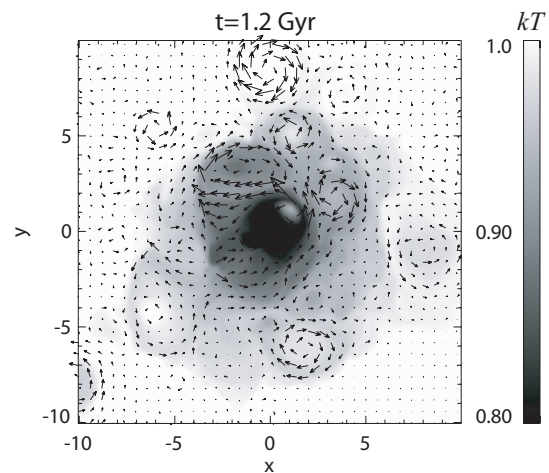


図 2: 放射冷却と熱伝導を含む 2 次元計算の結果。 $t = 1.2$  Gyr 後の中心部分 ( $300 \text{ kpc} \times 300 \text{ kpc}$ ) の温度分布。矢印は、磁場ベクトルを表す。