

国立天文台 天文学データ解析計算センター
成果報告書 (平成 16 年度)

提出期限：平成 17 年 3 月 14 日 (月)17:00 必着

応募カテゴリ（いずれかを選択） B

システム（いずれかを選択） VPP

プロジェクト ID: rna13b

研究代表者（現在のユーザ ID : asaink）

氏名	浅井 直樹	
所属機関名	千葉大学大学院自然科学研究科	
連絡先住所	〒 263-8522 千葉市稲毛区弥生町 1-33 千葉大学理学部物理学科宇宙物理学研究室	
電話番号	043(290)3720	
E-mail	043(290)3721	
職または学年	博士後期課程 1 年	
研究代表者が学生の場合には指導教官の氏名	松元 亮治	

研究課題名

(和文)	銀河団 X 線放射プラズマ加熱の 3 次元磁気流体数値実験
(英文)	Three-Dimensional MHD Simulations of Heating of X-ray Emitting Plasmas in Cluster of Galaxies

研究分担者

[illegible]

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

- “Global Resistive MHD Simulations of a Moving Clump in Cluster of Galaxies”
Asai, N., Fukuda, N., and Matsumoto, R. East-Asia Numerical Astrophysics Meeting, Mitaka, Japan, 2004.
- “MHD Simulations of a Moving Subclump with Heat Conduction”,
Asai, N., Fukuda, N., and Matsumoto, R. *JKAS*, 37 (2004), pp. 575-578. (Proceedings of the “International conference on Cosmic Rays and Magnetic Fields in Large Scale Structure”, Busan, Korea, 2004.) (astro-ph/0412359)
- “熱伝導を含めた銀河団プラズマ加熱の磁気流体数値実験”,
浅井直樹、福田尚也、松元亮治、日本天文学会 2004 年秋季年会

(2) これまでのプロジェクトの今年度中の成果

- “Magnetohydrodynamic Simulations of Formation of Cold Fronts in Cluster of Galaxies Including Heat Conduction” ,
Asai, N., Fukuda, N., and Matsumoto, R. *ApJ*, 606 (2004), pp. L105-L108.
- “Three-dimensional MHD Simulations of X-ray Emitting Subcluster Plasmas in Cluster of Galaxies”,
Asai, N., Fukuda, N., and Matsumoto, R. 2005, *Adv. Space Res.*, in press. (Proceedings of the 35th COSPAR Assembly 2004.)

成果の概要

1 はじめに

本研究の目的は、銀河団中におけるダークマター塊の運動が、銀河団中心領域のプラズマ加熱にどの程度寄与するかを明らかにすることである。磁場がない場合は、ダークマターの重力に捕捉されたプラズマの運動に伴うエネルギー散逸が加熱源になる。磁場がある場合は、ダークマターの運動エネルギーの一部が磁気エネルギーとして蓄積され、磁気リコネクションによって熱エネルギーに変換される。他方、磁場は、ケルビン・ヘルムホルツ不安定性による低温プラズマと高温プラズマの混合を抑えたり、熱伝導による中心領域加熱をコントロールする働きがある。銀河団プラズマの熱的バランスに磁場がどのように影響しているのか？我々はこれを明らかにすることを目指している。

2 シミュレーションモデル

cD 銀河のポテンシャル中を動くサブクランプと銀河団磁場の相互作用を熱伝導を含む 2 次元散逸性 MHD コードを用いてシミュレートした。座標系はカーテシアン座標とし、長さ、速度、密度、時間のユニットは、 $r_0 = 15 \text{ kpc}$ 、 $v_0 = 790 \text{ km s}^{-1}$ 、 $\rho_0 = 5 \times 10^{-27} \text{ g cm}^{-3}$ 、 $t_0 = r_0/v_0 = 2 \times 10^7 \text{ year}$ とした。計算領域は、 $900 \text{ kpc} \times 900 \text{ kpc}$ 、メッシュ数は、 1024×1024 である。

cD 銀河とサブクランプの重力相互作用は、2 体問題として扱う。質量比は、 $M_{\text{cD}}/M_{\text{clump}} = 5$ とする。初期状態として、温度の高い ICM($kT_0 = 2 \text{ keV}$) 中の cD 銀河とサブクランプは、共に低温 ($kT_0 = 1 \text{ keV}$) で、ダークマターの重力ポテンシャルに捕捉された密度分布を持つ。cD 銀河・サブクランプと ICM の境界は温度、密度共に不連続とする。モデル M(磁場あり) と MC(磁場あり、熱伝導あり) では、初期に一樣磁場 ($1 \mu\text{G}$, プラズマ $\beta_0 \sim 500$) を仮定する。電気抵抗モデルには、太陽フレアの計算で採用されている異常抵抗モデルを用いている。熱伝導は、Yokoyama & Shibata (1997) による磁力線方向にのみ伝わる非等方熱伝導を用いている。熱伝導率は、Spitzer value を採用し、 $\kappa_{\parallel} = 5 \times 10^{-7} T^{5/2}$ (cgs unit)、 $\kappa_{\perp} = 0$ とした。磁場なしのモデル H では、熱伝導は含まない。また、サブクランプは初期に亜音速の速度を持つ。境界では、周期境界条件を課す。

3 シミュレーション結果

サブクランプはダークマターのポテンシャルに捕われながら cD 銀河の周りを亜音速で回る。図 1 は、2.4 Gyr 後の各モデルの温度分布の比較である。左からモデル H(磁場なし)、モデル M(磁場あり)、モデル MC(磁場あり、熱伝導あり) の結果を示す。モデル H では、サブクランプは動圧を受け低温ガスが剥ぎ取られ、後方にカルマン渦が生じている。モデル M、MC では、サブクランプを磁場が覆い、前方で強まるためサブクランプのガスの剥ぎ取りが抑制される。また、サブクランプは磁場を引き伸ばしたり捻ったりするので、サブクランプ後方と前方では、磁気リコネクションが生じている。モデル MC では、磁力線に沿って熱が伝わる様子がわかる。

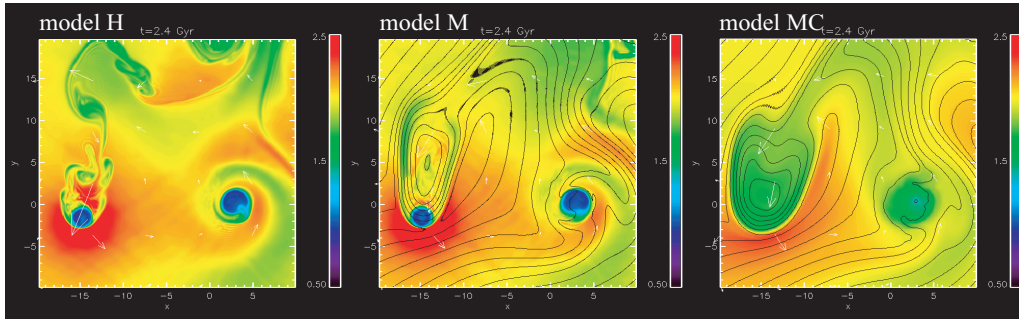


図 1: 2.4Gyr 後の温度分布の比較。左：モデル H (磁場なし、熱伝導なし)、中央：モデル M (磁場あり、熱伝導なし)、右：モデル MC (磁場あり、熱伝導あり) 矢印は速度、実線は磁力線を表す。

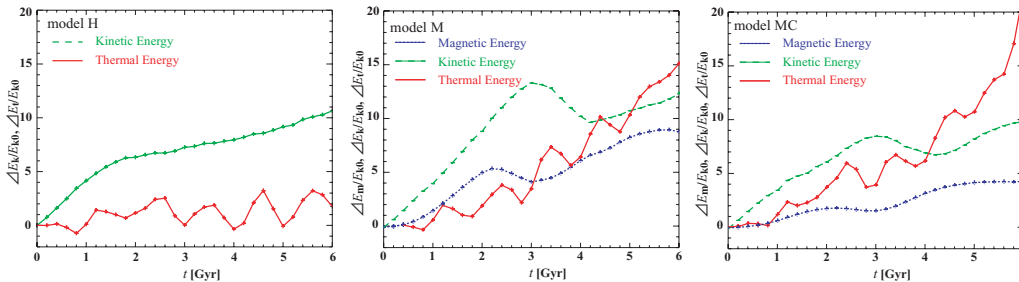


図 2: エネルギーの時間変化の比較。左：モデル H (磁場なし、熱伝導なし)、中央：モデル M (磁場あり、熱伝導なし)、右：モデル MC (磁場あり、熱伝導あり) 実線 (赤) は内部エネルギー、破線 (緑) は運動エネルギー、点線 (青) は磁気エネルギーを示す。各エネルギーは初期の運動エネルギーで規格化している。

図2は、各モデルの全計算領域での運動エネルギーと磁気エネルギー、内部エネルギーの時間変化を示す。銀河団プラズマは、ダークマターの運動エネルギーを得るためガスの運動エネルギーは増加する。モデルHでは、サブクランプの運動によるガスの圧縮以外に加熱源がないため、内部エネルギーの増加は小さい。一方、モデルM、MCでは、磁場が引き伸ばされたり捻られたりすることにより磁場が強まる。つまり、増加した運動エネルギーが磁気エネルギーを増加させる。

4 考察

ここで、サブクランプの運動による加熱効率を評価する。サブクランプの全運動エネルギーの1割がサブクランプに捕捉されたガスの運動エネルギーと仮定する、 $E_{\text{gas}} = 0.1E_{\text{clump}} = 2.5 \times 10^{59} (M_{\text{clump}}/10^{12} M_{\odot}) (v_{\text{clump}}/500 \text{ kpc})^2 \text{ erg}$ 。ここで、シミュレーション結果(図2、中央)より、5 Gyr後に内部エネルギーが運動エネルギーと同程度になった($E_{\text{thermal}} \sim E_{\text{gas}}$)ことより、サブクランプ1つの運動による加熱効率は、 $dE_{\text{thermal}}/dt = 2.5 \times 10^{59} \text{ erg}/5 \text{ Gyr} \sim 1.6 \times 10^{42} \text{ erg s}^{-1}$ となる。サブクランプの数を100と仮定すると、 $dE_{\text{thermal}}/dt \sim 10^{44} \text{ erg s}^{-1} \sim$ 銀河団コアの放射率(e.g., Makishima et al. 2001)、となる。但し、これは、周期境界や一様磁場、放射冷却の効果なしという効率の良い条件下での結果であり、また、加熱は銀河団中心ではなくその周囲で生じているので、この結果はクーリングフロー問題を解決することにはならない。銀河団コアを加熱するためには、cD銀河に落ち込むサブクランプによるショック加熱に加え磁場の影響を考慮する必要がある。

このシミュレーション結果より、磁場を媒介にすることで、効率よく運動エネルギーを内部エネルギーに変換できることがわかった。また、磁力線に沿う非等方熱伝導の効果により、銀河団コアの2温度共存(Ikebe et al. 1999)も再現できると思われる。今後は、銀河団中心を高解像度で計算することで磁気エネルギーの数値散逸をより抑えて、効率良く磁気エネルギーを磁気リコネクションにより解放させてプラズマ加熱に及ぼす影響を調べたい。