

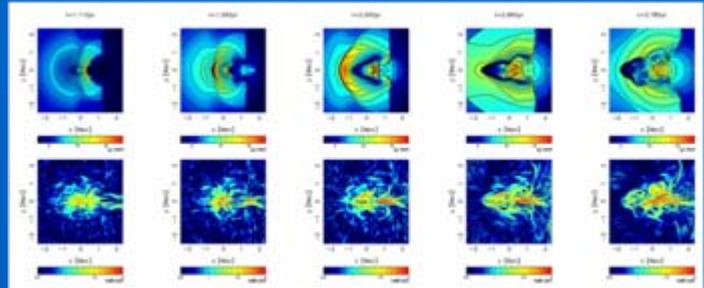
# N-body + Magnetohydrodynamical Simulations of Merging Clusters of Galaxies: Characteristic Magnetic Field Structures Generated by Bulk Flow Motion

滝沢元和 (山形大学理学部物理学科)

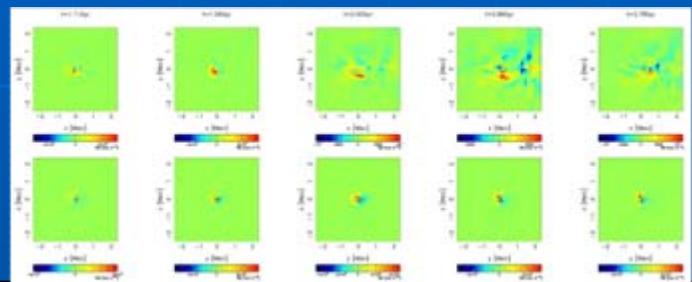
## (Abstract)

衝突銀河団での磁場構造の進化についてN体+電磁流体シミュレーションを行った。銀河団衝突によってひきおこされる大局的なガスの流れによって、特徴的な磁場構造が生じることがわかった。運動するサブストラクチャーは磁場に囲まれた低温領域となり、観測的には磁化したコールドフロントと認識されるであろう。またその背後には比較的整った磁場構造があらわれる。Kelvin-Helmholtz不安定性による渦状の磁場構造も見られる。以上のような磁場構造はoff-centerな衝突でもほぼ同様にあらわれる。また、Faraday rotation measure map にも上にあげた構造に伴う特徴が部分的にであるが認められる。また、rotation measureの絶対値は衝突軸方向から見ると大きめに出る傾向がある。例えば、CMBの偏光観測などによって銀河団全体をおおうようなrotation measure mapが得られれば、磁場構造のみならずガスの力学状態についても情報を得られる可能性がある。

## Results for 1:4 Head-on Merger



上段は衝突軸に対して垂直方向からみた中心面での密度(等高線)と温度(カラー)。下段は同じものの磁場強度分布。磁場に囲まれた低温領域、substructure後方の整った磁場構造、KH不安定性による渦状の磁場構造などが見える。



上段は衝突軸に垂直な方向からみたFaraday Rotation measure ( $\int n_e B_{\parallel} dl$ )。上の図にある強磁場領域に対応したものが見えていない。下段は衝突軸と平行な方向から見た場合のもの。Faraday rotationの絶対値自体はこちらのほうが大きめに出る。

## Introduction

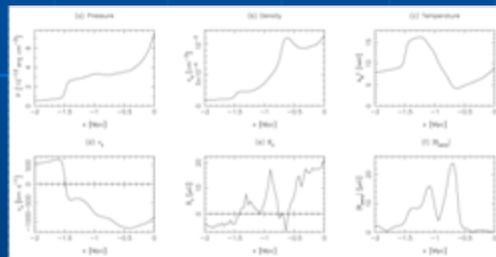
ファラデー回転の観測やシンクロトロン非熱的電波ハロー(あるいはレリック)の存在から、銀河団ガス(ICM)中には $\mu G$ 程度の乱れた磁場が存在していることが知られている。この磁場のエネルギー密度はガスの熱エネルギー密度に比べると数%程度であることから、一見するとそれほど重要な役割を果たしていないかのように思えるかもしれない。しかしながら、電波ローブとの相互作用領域やサブストラクチャー周囲の境界面などでは、境界面に平行な磁場成分が流体力学的不安定性や熱伝導の抑制に重要な役割を果たしているかもしれない。また、磁気乱流の構造や衝撃波近傍での磁場構造は粒子加速にたいして重大な影響を及ぼすであろう。

銀河団の衝突は銀河団ガスの磁場構造に大きな影響をあたえたと考えられている。例えば、サブストラクチャーの運動に伴うバウショックや接触不連続面周辺での磁場構造の変化や、乱流によるダイナモでの磁場増幅などである。上記のような問題を解明するためにはN体+電磁流体シミュレーションが必要不可欠である。

我々は、N体計算にPM法を、流体部分にRoe法に似たRiemann解法を基にしたTVD法を用いたN体+電磁流体コードを新たに作成し、これらの問題にとりかかりはじめている。

## Numerical Method

- N体: Particle Mesh (PM) 法
- 電磁流体: Roe-like TVD法 (Brio & Wu 1988)
- 自己重力: FFT with isolated boundary conditions
- Simulation Box  $(9.4\text{Mpc})^3$  メッシュ数 (256)<sup>3</sup>
- 粒子数  $N=(128)^3$  (約200万)
- VPP5000@国立天文台



$t=2.0\text{Gyr}$ でのx軸に沿った各物理量のプロファイル。x $\sim-1.5$ にバウショックが、x $\sim-1$ に接触不連続面が見え、その付近でx軸に垂直な磁場が強められていることがわかる。

## Virialized Cluster Model

- DMの密度分布はNFWプロファイル、ICMの密度分布は $\beta$ モデルを仮定(ただし、 $r_c=r_s/2$ とする)

$$\rho_{DM}(r) = \frac{\delta_r \rho_{c,0}}{(r/r_s)(1+r/r_s)^2}, \quad \rho_g(r) = \rho_{g,0} \left\{ 1 + \left( \frac{r}{r_s} \right)^2 \right\}^{-\beta}$$

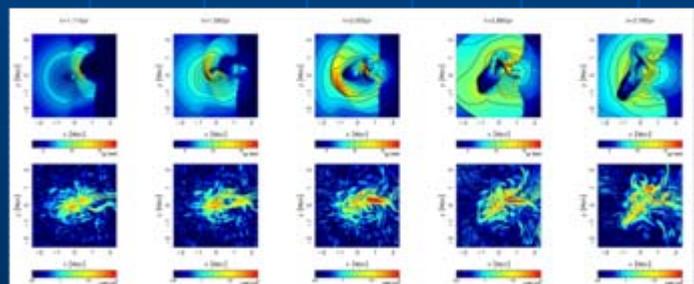
- $r \geq r_s$ では $\rho_{DM}=0$ 、 $\rho_{gas}$ は一定
- DMの速度分布は等方的なガウス分布。半径ごとの速度分散はJeans eq.より、静水圧平衡になるように定める。
- ICMの温度分布は静水圧平衡の式より定める。

$$\frac{d}{dr}(\rho_{DM} \sigma^2) = -\frac{GM_r}{r^2} \rho_{DM}, \quad \frac{dP}{dr} = -\frac{GM_r}{r^2} \rho_g$$

## Initial Magnetic Field

- ベクトルポテンシャルを $A(k) \propto k^{(5/3)}$ のランダムガウシアンとしてk空間でrealizeする。
- $A(k_x, k_y, k_z)$ を逆FFTして $A(x, y, z)$ にする。
- $A(x, y, z)$ を各位置で $\rho_g(x, y, z)^{(2/3)}$ 倍する。
- $B = \nabla \times A$  からBベクトルを求める。
- 銀河団内全体での磁気エネルギーが熱エネルギーの1%になるようにBを再規格化する。

## Results for 1:4 Off-center Merger ( $\lambda = |J|E|^{1/2}G^{-1}M^{-5/2}=0.05$ )



Off-center衝突の場合の密度・温度分布(上段)と磁場強度(下段)。特にcore crossing後の低温領域はやはり磁場に囲まれているが、衝突相手に近い側がより強磁場である。また小銀河団後方の強磁場の領域も真後ろではなく衝突相手に近い側にずれる。

## Summary

- ◆ PM+Roe-like TVD法のN体+電磁流体コードを用いて衝突銀河団での磁場構造の進化を調べた。
- ◆ 小銀河団の運動によって、磁場に囲まれた低温領域が衝突の後期にみられる。低温領域の境界面では温度勾配と磁場が直行する構造が自然に作られる。この構造は熱伝導を抑制して低温領域を守る方向に働くであろう。またこの磁場構造はFaraday Rotation measureの大きな領域として見えるかもしれない
- ◆ 小銀河団後方にガスの運動によって集められた強磁場領域が見れる。正面衝突でない場合でも、同様な構造が衝突相手に近い側にずれてあらわれる。
- ◆ CMBの偏光観測などによって銀河団全体をカバーするようなFaraday rotation mapが得られれば、磁場構造のみならずガスの運動についても情報が得られる可能性がある。