

銀河間磁場について

滝沢元和

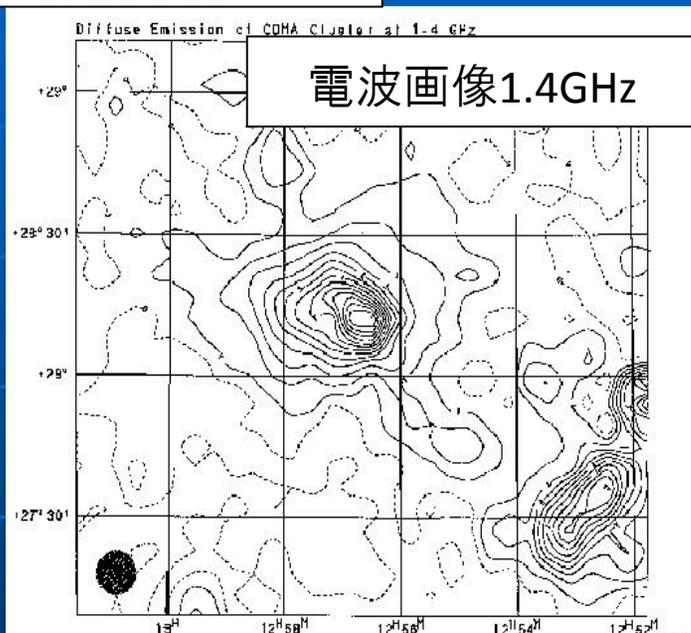
2009.6.19
研究室談話会

お品書き

- 銀河間磁場の観測的証拠
- 銀河間磁場の観測的決定方法
 - Faraday Rotation
 - シンクロトロン+逆コンプトン
- 銀河間磁場に関する数値シミュレーション
(Takizawa 2008, ApJ, 687, 951)
- まとめ

銀河間磁場の観測的証拠： シンクロトロン電波ハロー／レリック

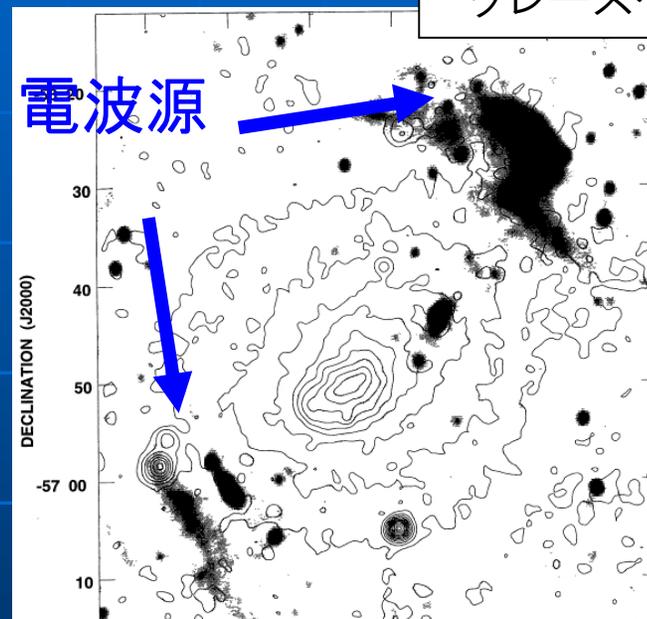
Coma Cluster



電波ハロー

◆ 中心から銀河団スケールにひろがる

Abell 3667



電波レリック

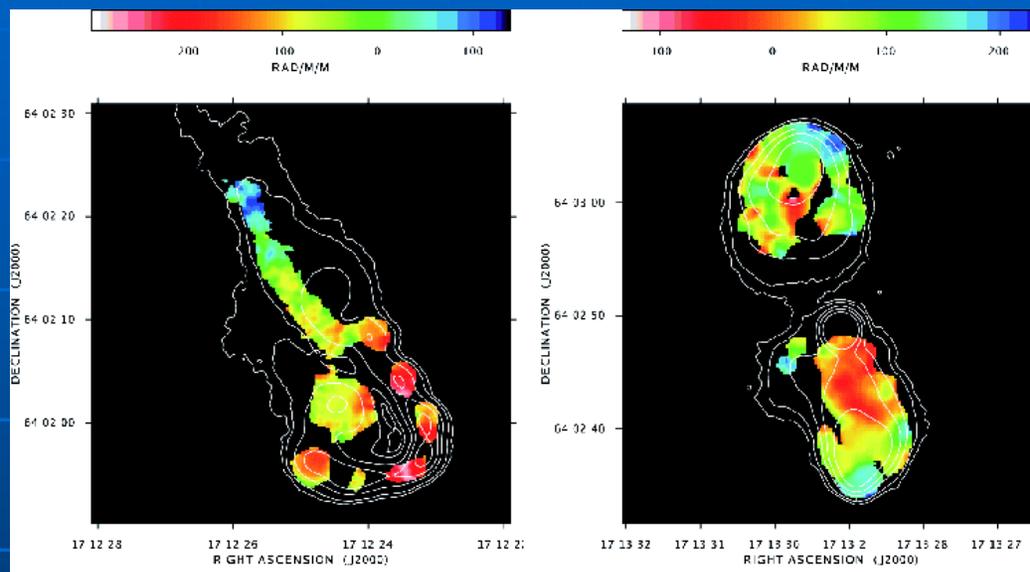
◆ 銀河団外縁部に位置する

コントア：X線
グレースケール：電波

$E_e \sim \text{GeV}$ の電子がおよそ $1\mu\text{G}$ の磁場中をシンクロトロン放射しているもの

銀河間磁場の観測的証拠： Faraday rotation

- 磁化したプラズマの中を電磁波が伝播すると、偏光面が回転。
- 回転の仕方は伝播方向に平行な磁場成分に依存
- さらに波長にも依存
→ 多波長観測
- 乱れた磁場構造

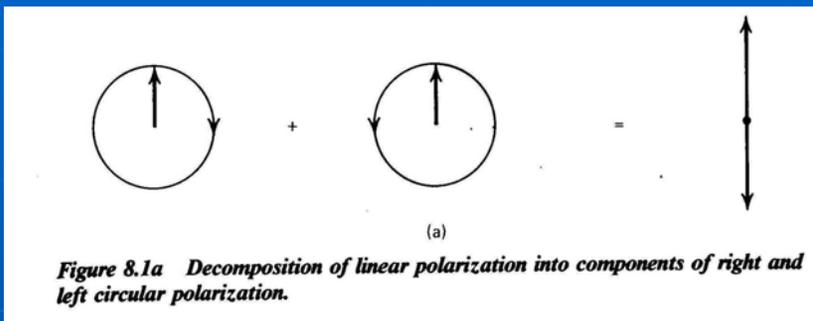


A2255中の電波源のFaraday rotation
measure map
カラー:FRM
等高線:3.6cm 電波
Govoni et al. 2006

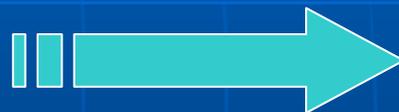
銀河間空間の磁場について

- 銀河団内には数 μ G 程度の乱れた磁場が存在
 - ◆ シンクロトロン電波ハロー(レリック)
 - ◆ Faraday rotation measure
- $P_B \sim 0.01 P_{th}$ 重要じゃないのか？そんなことはない。
 - ◆ 流体不安定性の抑制
 - ◆ 熱伝導の抑制
 - ◆ 粒子加速(磁気乱流、衝撃波)
- 磁場強度だけでなく構造も重要

磁場決定方法: Faraday Rotation(1)



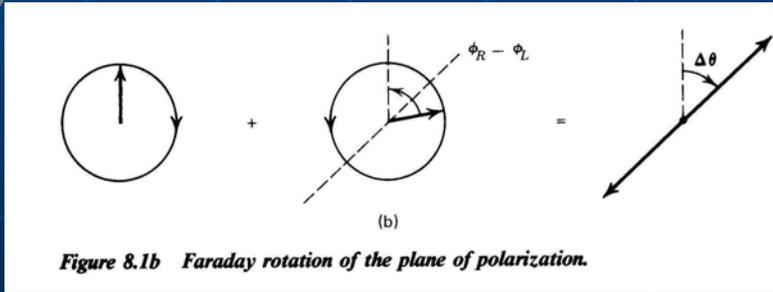
直線偏光した電磁波



偏光面が回転

$$\Delta\theta = \frac{2\pi e^3}{m^2 c^2 \omega^2} \int_0^d n B_{\parallel} ds.$$

波長(振動数)依存あり
多波長観測で nB_{\parallel} がわかる



磁場決定方法: Faraday Rotation(2)

偏光源



天体での偏光

磁化したプラズマ
 B, n
磁場はランダム
 B_{\parallel} は+になったり
-になったり、



観測される偏光

$$\Delta\theta = \frac{2\pi e^3}{m^2 c^2 \omega^2} \int_0^d n B_{\parallel} ds.$$

磁場決定方法: Faraday Rotation(3)

天体の長さ L

磁場は長さごとに向きが変わる
l: 磁場の反転長

磁化した
プラズマ
 B, n
磁場はランダム

偏光面の回転角 $\Delta \theta$ はrandom walkすると考えて、

$$\Delta \theta \sim \lambda^2 n B_{\parallel} (lL)^{0.5}$$

より精密な議論をするにはもっと精密な磁場構造モデルが必要

磁場決定方法： シンクロトロンvs逆コンプトン

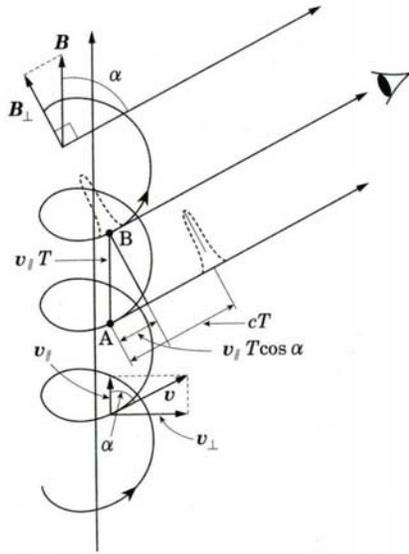


図 3.12 磁場中の相対論的電子の軌道とその電子からの放射.

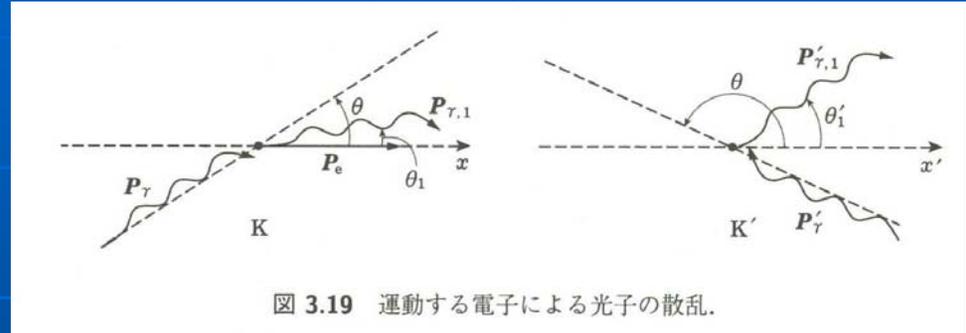


図 3.19 運動する電子による光子の散乱.

高エネルギー電子 + 低エネルギー光子 (例えばCMB)
 → 逆コンプトン散乱 (硬X線—ガンマ線)

高エネルギー電子 + 磁場
 → シンクロトロン放射
 (電波—X線)

$$\frac{F_{\text{IC}}}{F_{\text{syn}}} = \frac{U_{\text{CMB}}}{U_{\text{mag}}} = \frac{U_{\text{CMB}}}{B^2 / 8\pi},$$

磁場決定方法に関するコメント

■ Faraday Rotation

- 磁場構造についてのモデルが必要
- プラズマの密度で重みをかけた磁場強度
- 偏光電波源(主にAGN,Jet)がないとできない(CMBを使えばどこでもできる?)。

■ シンクロトロンvs逆コンプトン

- 磁場強度の体積平均(ただし高エネルギー電子があるところでの)
- 逆コンプトンの観測はまだ難しい。上限値のみがほとんど。(磁場だと下限値)

Introduction(2): 磁場構造とmerger

- 銀河団衝突や、その結果生じた運動するサブストラクチャー

--->

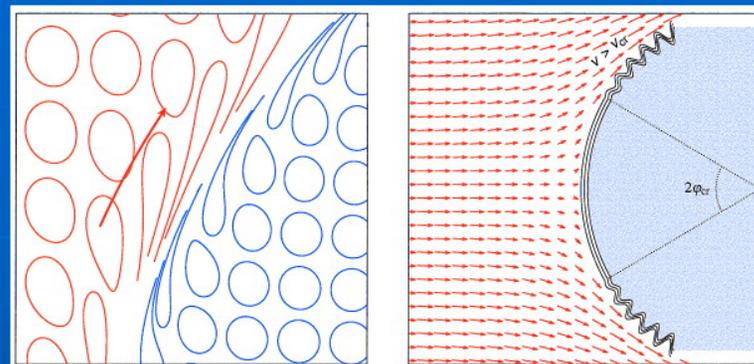
ガスのbulk flow, 乱流

--->

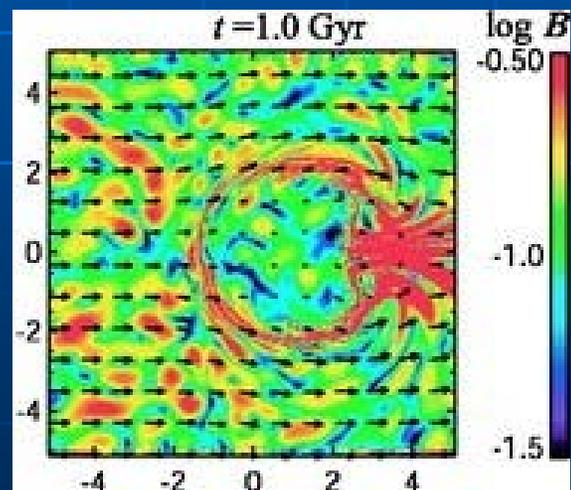
磁場構造に多大なるインパクト

- 接触不連続面に平行な磁場構造が自然にできる??
- 整った磁場構造??

- random磁場をもった銀河団同士の衝突を調べる。



サブストラクチャーの運動による接触不連続面での磁場進化の模式図
Vikhlinin et al. (2001)



サブストラクチャーの運動のMHD simulation (Asai et al. 2007)

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 $(256)^3$
- 粒子数 $(128)^3$
- VPP5000@国立天文台CfCA

Initial Model

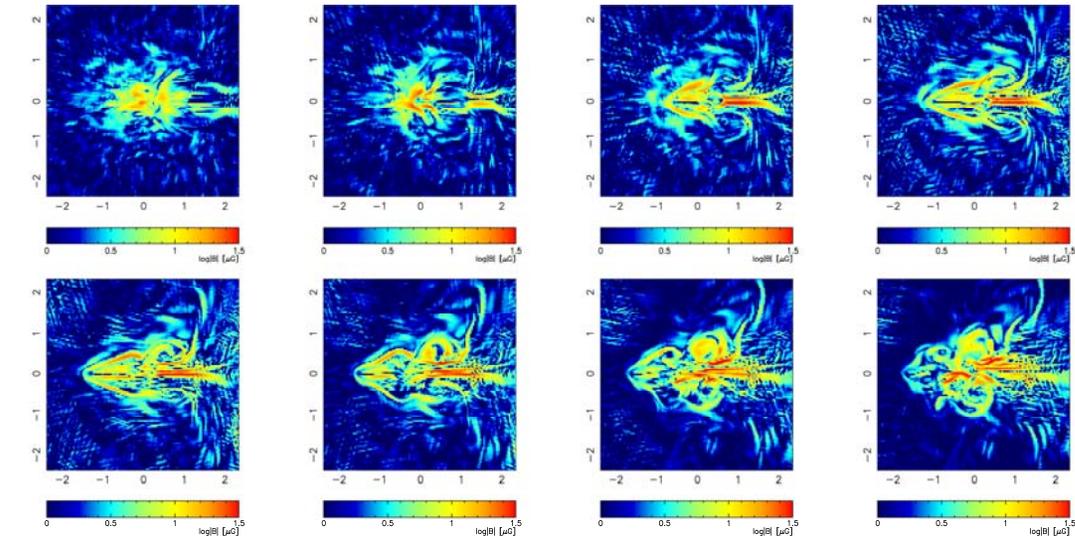
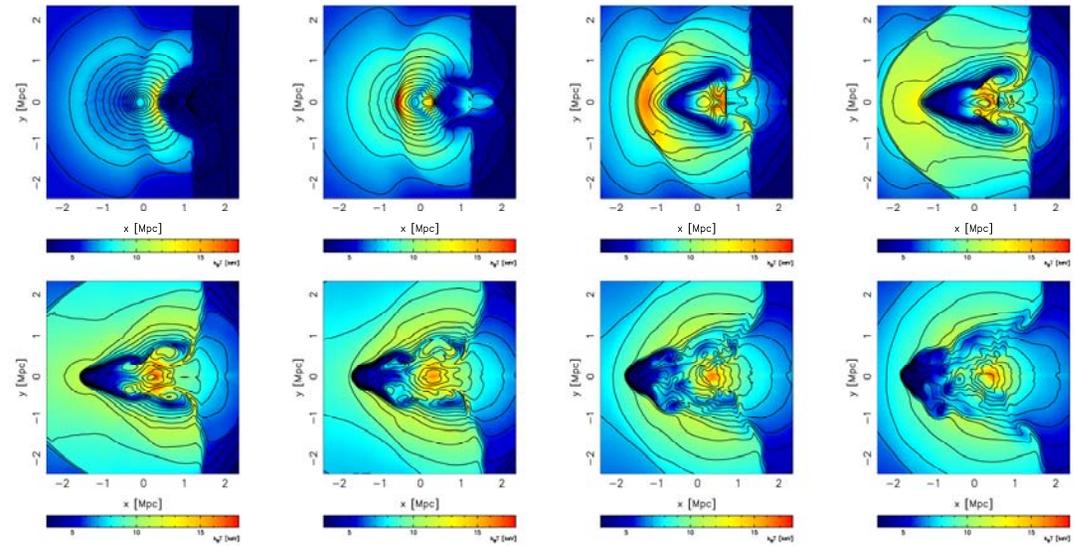
- DMの密度分布はNFWプロファイル、ICMの密度分布は β モデルを仮定。

$$\rho_{\text{DM}}(r) = \frac{\delta_c \rho_{c0}}{(r/r_s)(1 + r/r_s)^2},$$

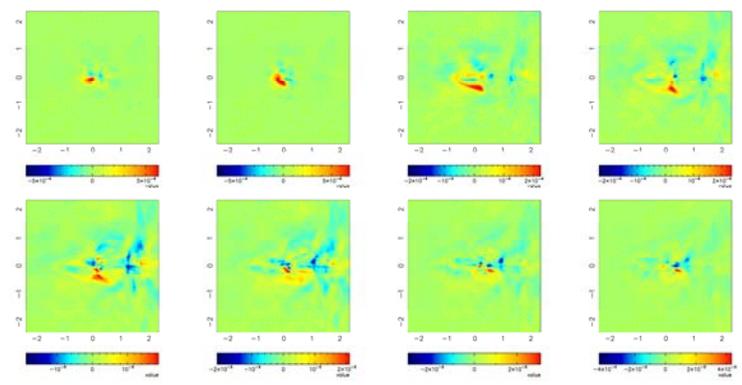
$$\rho_g(r) = \rho_{g,0} \left\{ 1 + \left(\frac{r}{r_c} \right)^2 \right\}^{-\frac{3}{2}\beta}$$

- (ランダムかつ密度にスケールした)初期磁場モデルの作り方
 - ベクトルポテンシャルを $A(k) \propto k^{-(5/3)}$ のrandom gaussianとしてk空間でrealize
 - $A(k_x, k_y, k_z)$ を逆FFTして $A(x, y, z)$ へ
 - $A(x, y, z)$ を各位置で $\rho_g(x, y, z)^{(2/3)}$ 倍する。
 - $B = \nabla \times A$
 - 銀河団全体で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。

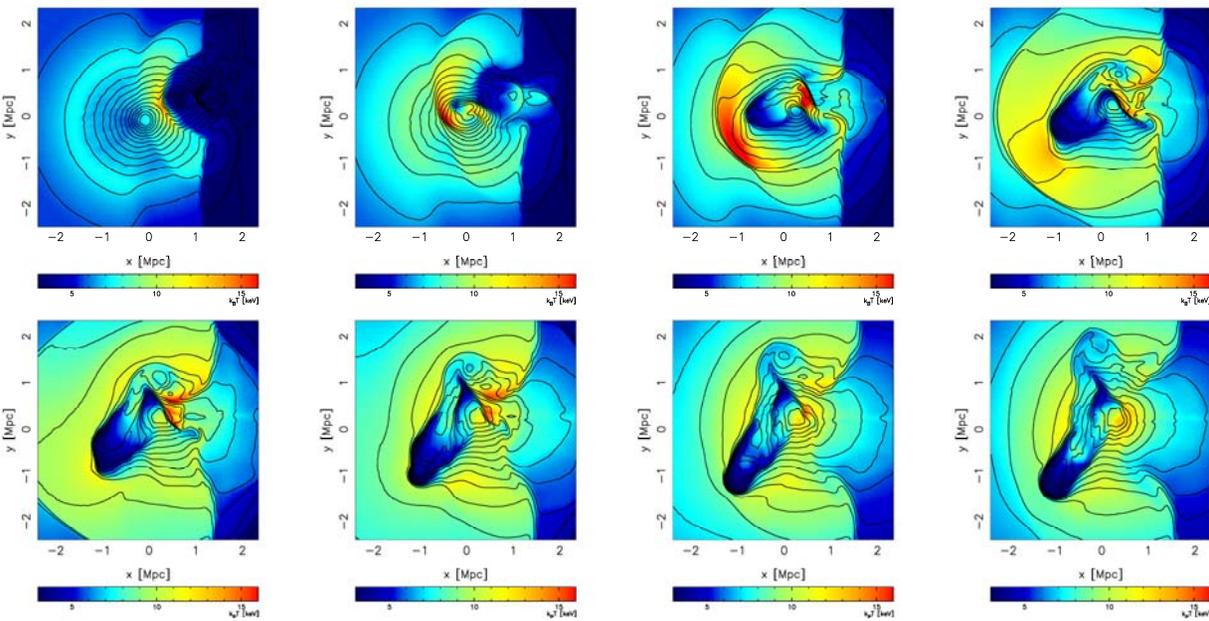
等高線: ガス密度
 カラー: 温度



カラー: 磁場強度

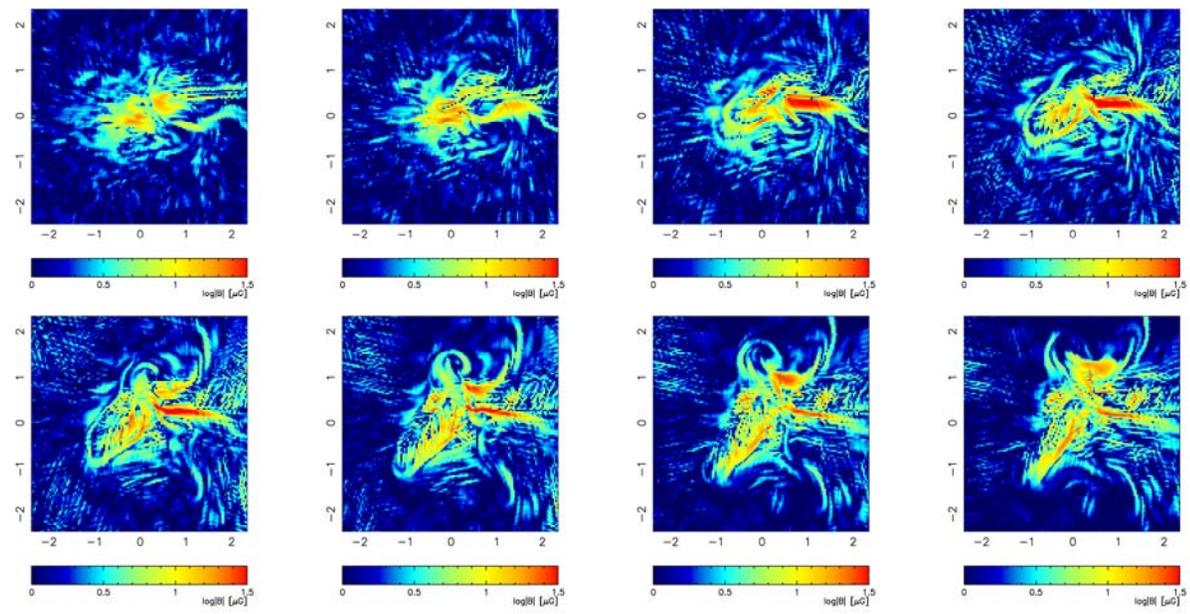


カラー: ファラデー回転



等高線: ガス密度
 カラー: 温度

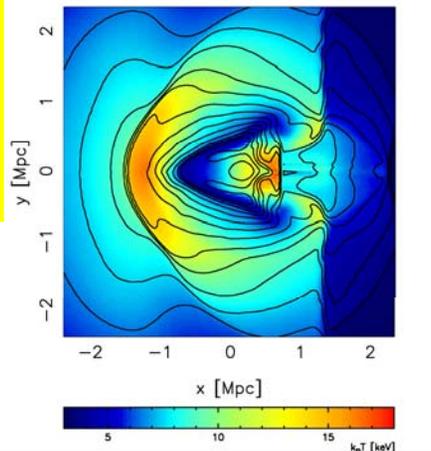
カラー: 磁場強度



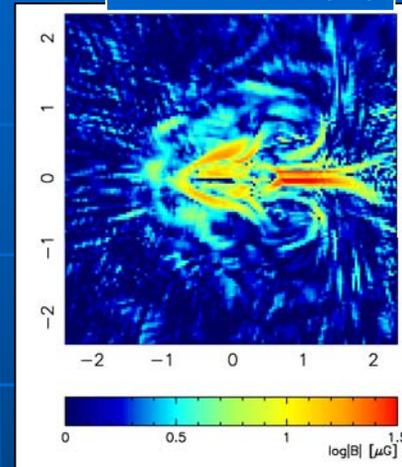
Results(1)

密度(等高線)
& 温度(カラー)

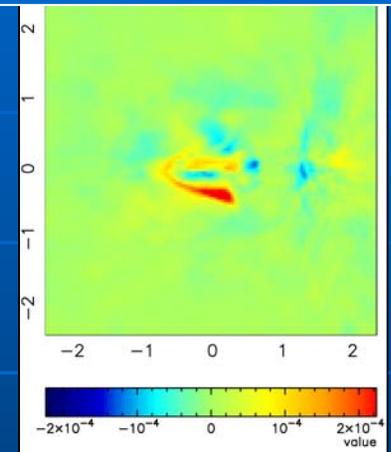
1:4
head-on merger
コア通過後
0.66Gyr



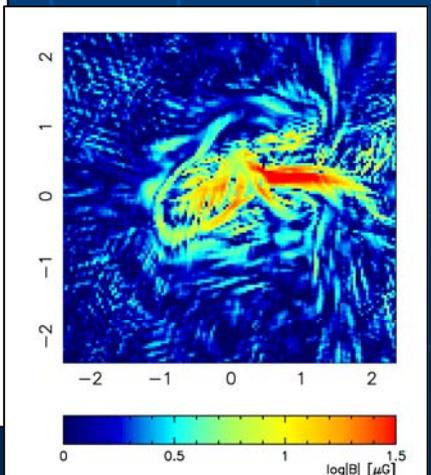
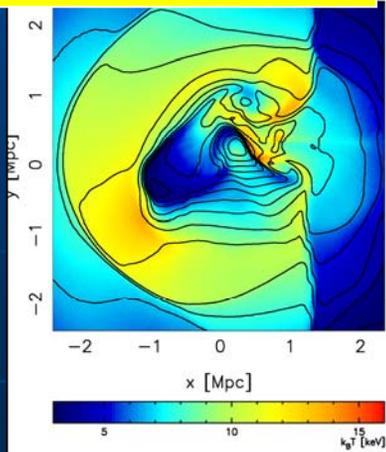
磁場強度 $|B|$



Faraday Rotation Measure
($\int n_e B_{||} dl$)

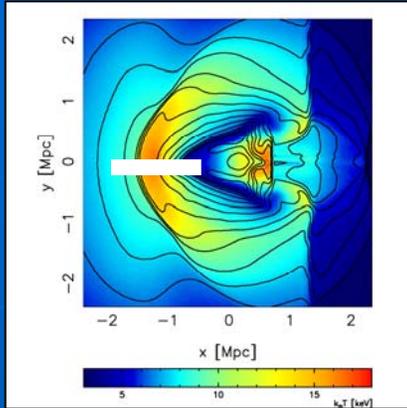


1:4
off-center merger



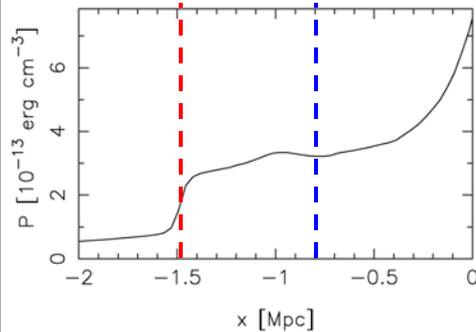
- ◆ 磁場に囲まれた低温領域 (Faraday Rotation Measureの大きな領域として見えるかも)
- ◆ 小銀河団後方に磁場が集められる。(off-center mergerでは衝突相手に近い側の斜め後方)

Results(2)

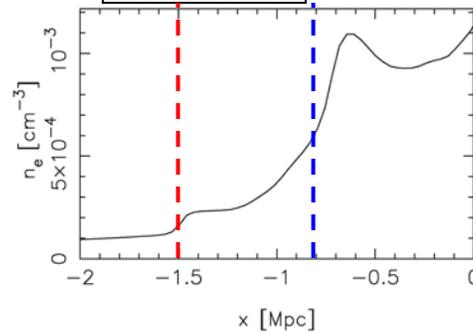


サブストラクチャ前面での衝突軸に沿った各物理量プロファイル。赤破線付近にバウショックが、青破線付近に接触不連続面が見え、その付近で、特に衝突軸に垂直な磁場成分が強められていることがわかる。

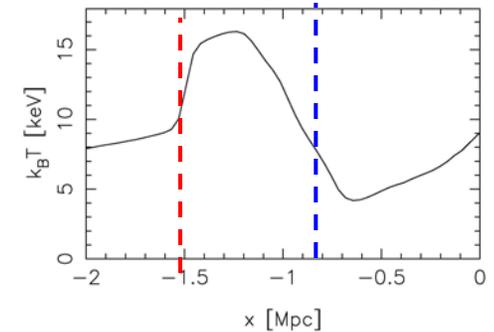
ガス圧



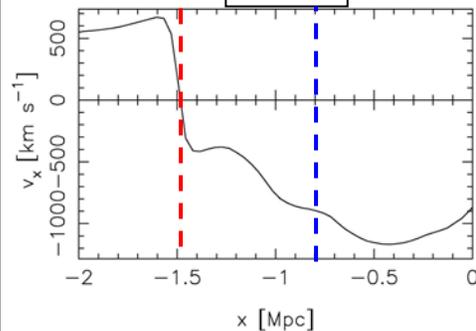
ガス密度 n_e



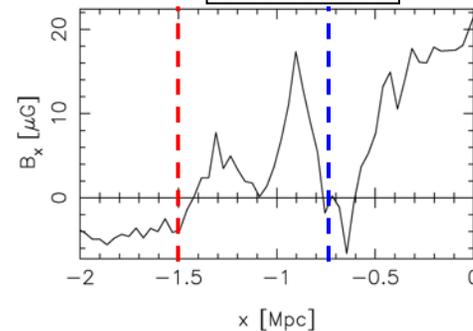
ガス温度



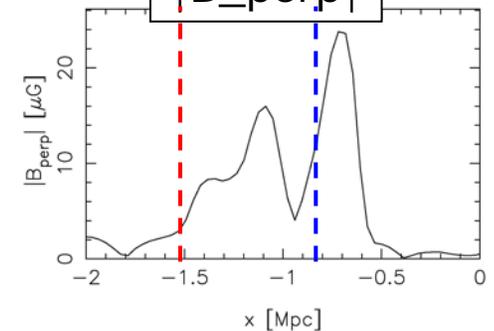
V_x



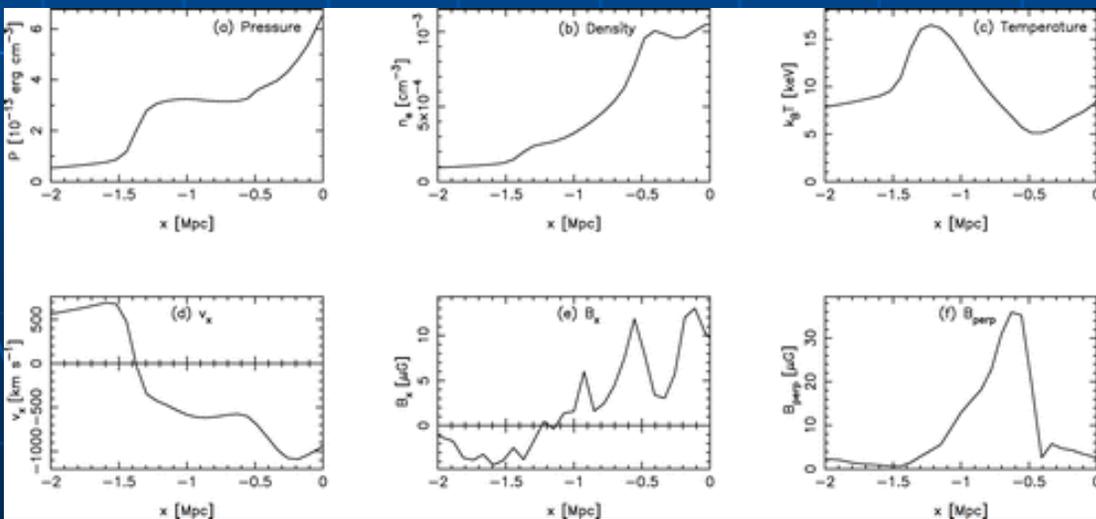
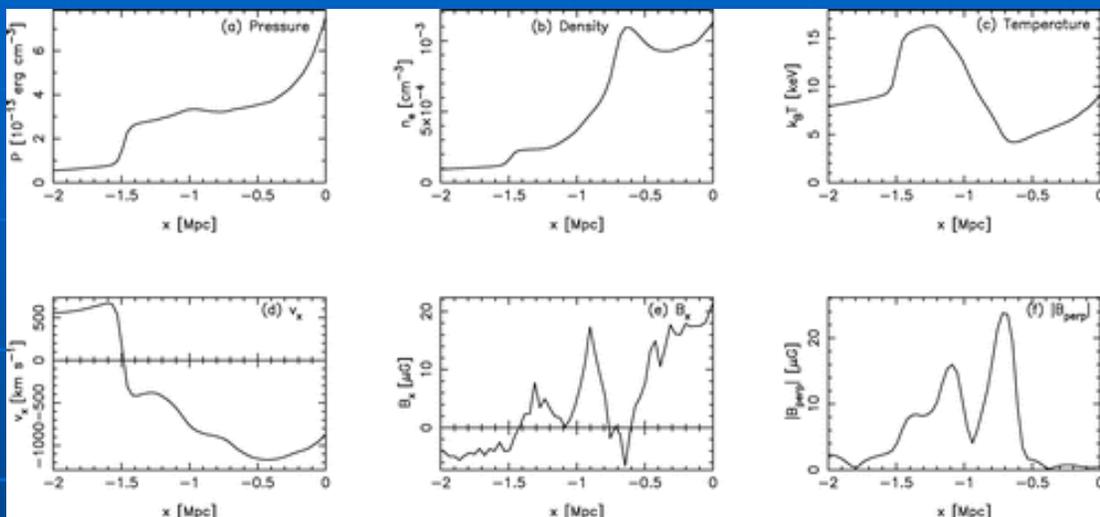
B_{para}



$|B_{perp}|$



数値計算結果の空間分解能依存性



格子間隔を2倍にしてみた

Summary

- 銀河間空間にも磁場がある。
- Faraday Rotation
 - 磁場構造のモデル化に結果が依存
 - うまく偏光源がないとできない。
 - 将来的にはCMBを偏光源として使えばどこでもできる
- シンクロトロン+逆コンプトン
 - 逆コンプトンの観測がまだ難しい。磁場に関しては下限値のみ
- N体+MHD (PM+Roe-like TVD法)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。
- 以下のような特徴的な構造がひきおこされる。
 - 磁場に囲まれた低温領域。
 - 低温領域の境界面(接触不連続面)では温度勾配と磁場が直交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。
 - 小銀河団の後方にガスの運動によって集められた整った磁場構造があらわれる。
 - KH渦をトレースするような磁場構造
 - 以上の特徴は正面衝突でなくても、定性的にはさほど変わらない。
- 銀河団全体をカバーするようなFaraday rotation measure 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。