

銀河団、銀河間物質： 将来計画とシミュレーション

滝沢元和

(山形大学理学部)

目次

- 銀河団研究の意義
- 乱流
- 磁場
- 高エネルギー粒子
- 銀河団周縁部
- まとめ

銀河団研究の意義： 様々な観点から

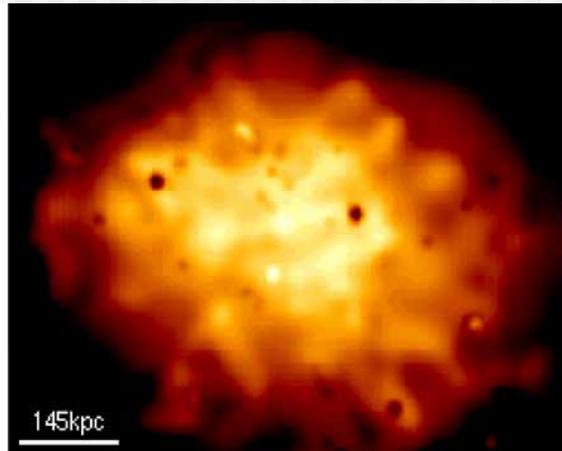
■ 天文学的意義

- 構造形成の(観測可能な)現場
- 宇宙論と銀河天文学のはしわたし
- 銀河にとって極限的な環境(Our galaxy の対極)
- 銀河、AGN等の過去の活動の保管庫
(宇宙線、電波ローブ、重元素 etc)

■ 物理学的意義(宇宙は物理の実験室)

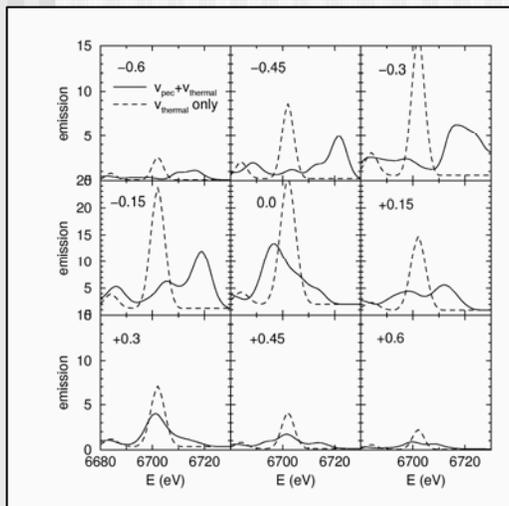
- 理想的な無衝突プラズマ(超希薄、等方的)、境界効果もほとんどなし。
- 重力理論、暗黒物質の天然の実験場

銀河団内の乱流



Coma cluster 中心部の圧力分布。
Schuecker et al. 2004

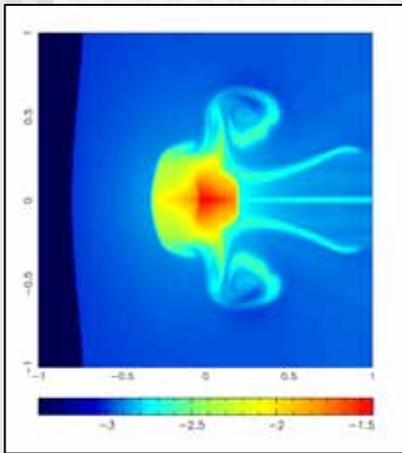
- 構造形成のシミュレーションを見る限り、銀河団内は乱流状態。
- ダイナモによる磁場生成、粒子加速、熱や重元素の輸送
- Coma cluster でのP分布：
Kolmogorov 乱流とconsistent
- 次世代のX線分光では充分観測可能 (Astro-E2, NeXT)
 - ただし、銀河団内の代表的な場所だけで (視野が狭い)。



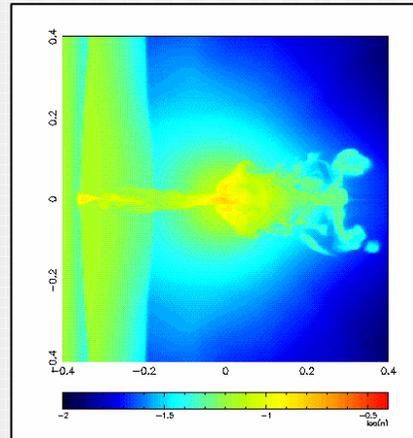
Sunyaev et al. 2003:
鉄輝線のひろがり具合の予想
点線 (thermal のみ)、
実線 (gas motion こみ)

どこでどうやって乱流がおきているのか？

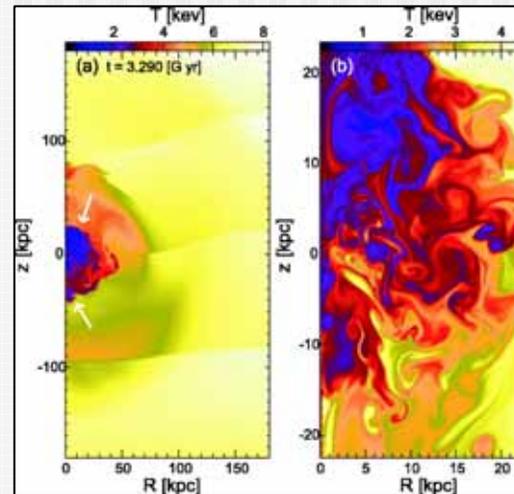
- 構造形成のシミュレーションを見る限り当然のようにおこるが、具体的に何がおきているのかいまいちよくわからない。
- 理想化(単純化)した状況で生成過程、構造にせまる高分解能simulationが重要
- Shear flow、揺らぎの問題 格子法が有利
- hydroだけでいいのか？



Kelvin-Helmholtz 的



Rayleigh-Taylor 的



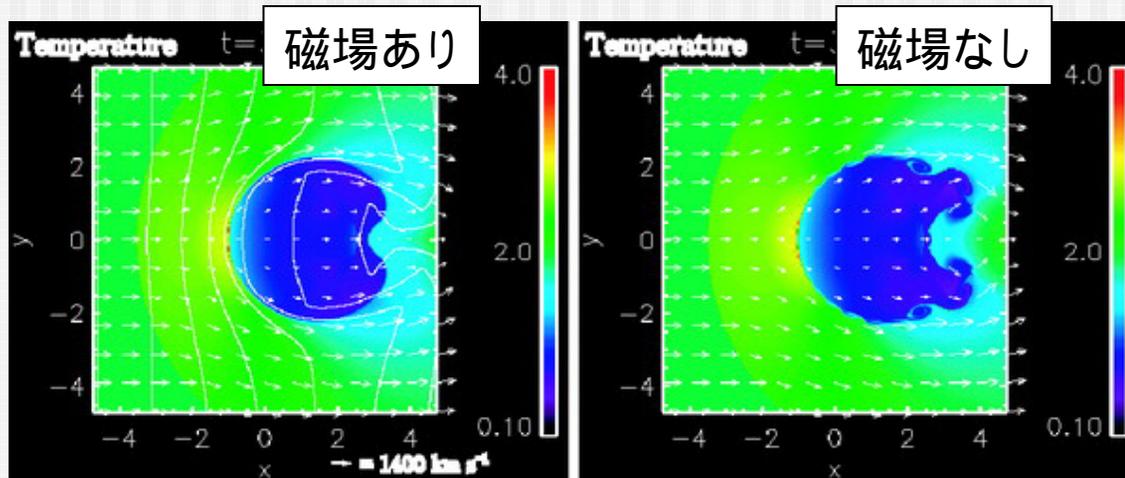
cooling が essential?

Takizawa (2005) in preparation

Fujita et al. (2004)

磁場 (1)

- 平均的には多分 $P_{\text{gas}} \sim 100 P_{\text{mag}}$ ダイナミクスにはきかない？しかし、乱流生成や粒子加速に直接関わる部分ではそうでないかもしれない。
- MHD simulation は避けて通れない道。

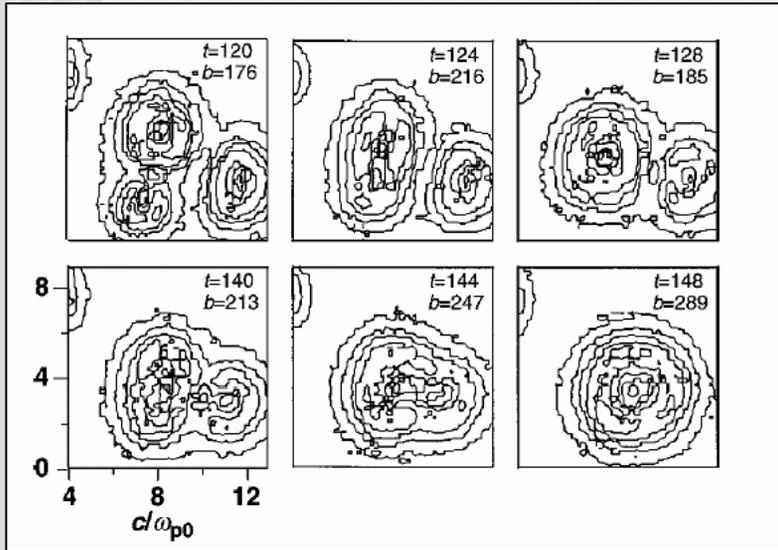


Moving substructure
周囲の温度分布
Asai et al. (2004)

- 磁場によるKH不安定性や熱伝導の抑制 (境界面は磁力線が集められやすい)
- 磁気リコネクションによる粒子加速

磁場(2)

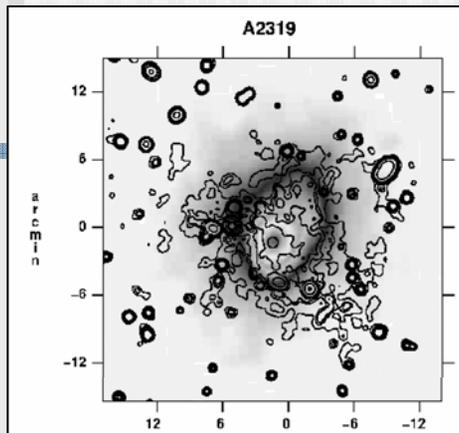
MHDだけでいいのか？



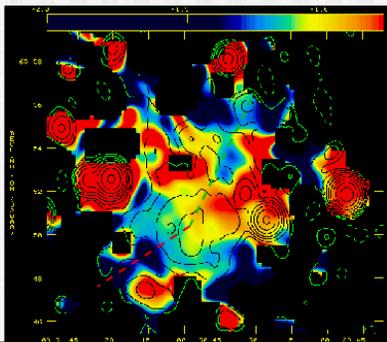
ワイベル不安定性による磁場の成長
逆カスケードでより大局的な磁場構造へ
(Lee & Lampe 1973, Phy Rev Lett 31,1390)

- ワイベル不安定性による磁場生成
(プラズマ運動論的效果)
 - 速度分布の非等方性→磁場生成→
逆カスケード→大局的磁場へ？
 - 温度勾配によっても類似の状況が
生じる (Okabe&Hattori 2003)。
- 粒子加速の素課程
(波動との相互作用など)

高エネルギー粒子



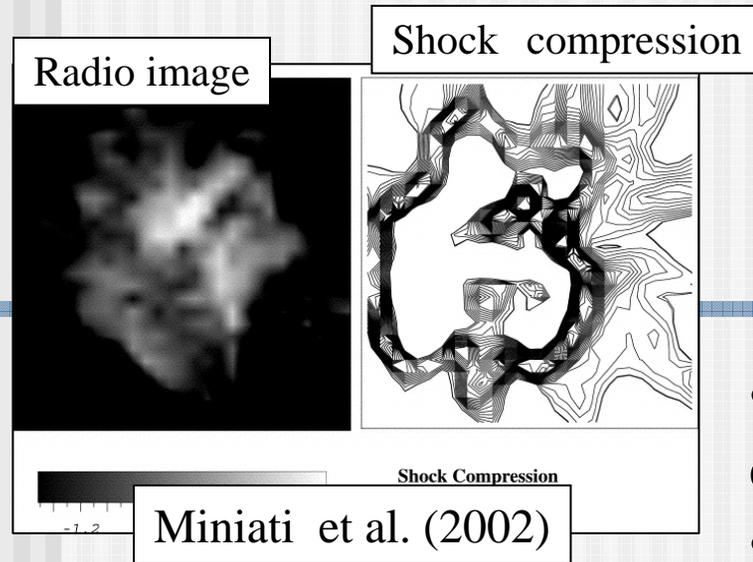
A2319: X線イメージ(グレースケール)
20cm電波(等高線)
Govoni et al. 2001



A665: 電波スペクトルインデックスmap
赤: flat 青: steep
Govoni et al. 2001

- 銀河団 radio halo ($B \sim \mu\text{G} + E_e \sim \text{GeV}$)
 - 磁場強度分布? 高エネルギー電子分布?
 - 起源? 加速過程(衝撃波? 乱流? その他?)
 - スペクトルインデックス分布は非一様、非球対称
- SKA
 - 6-30倍統計が増える(Ensslin & Rottgering 2002)
 - z依存性の議論も
- Astro-E2
 - Beppo-SAXでの硬X線“検出”の検証
- NeXT
 - 硬X線での信頼度の高い検出
 - 磁場強度分布、高エネルギー電子分布
- GLAST
 - MeV領域でComaは受かるかも
 - 陽子、イオン成分の貴重な情報

高エネルギー粒子： ダイナミクスとのリンク

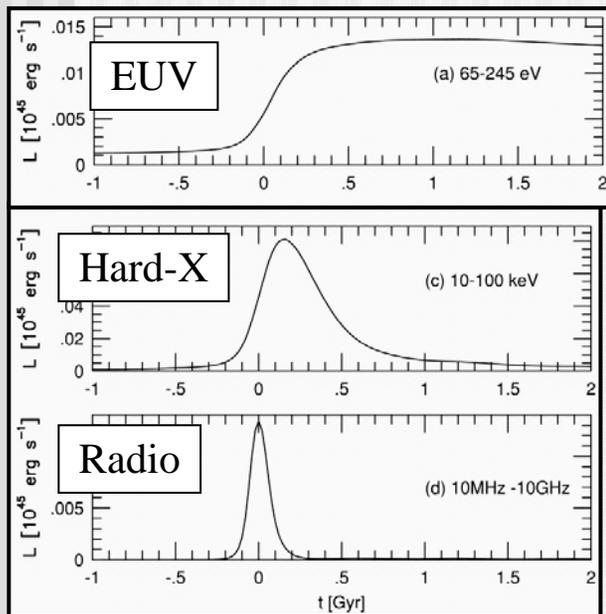


- 時間進化、空間分布を考えるには dynamics とのリンクが必要。
- N体 + hydroのsimulationに加速過程をモデル化して組み込む。

- 構造形成シミュレーション + 衝撃波加速 + 簡易スペクトラム (energy bin ~ 10)

(Miniati達の一連の仕事)

- Merger Simulation + 衝撃波加速 + 非熱的電子スペクトル (Takizawa & Naito 2000)

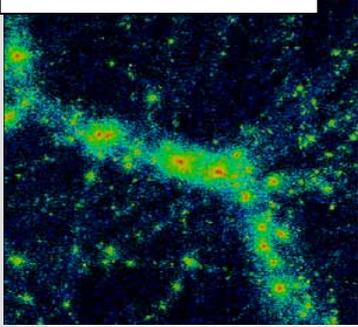


Merging cluster での非熱的放射強度の時間進化
Takizawa & Naito (2000)

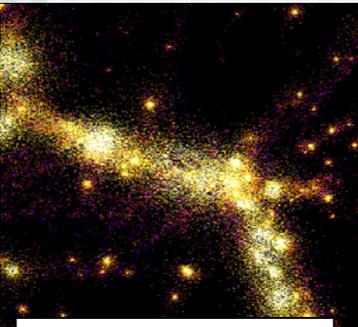
- 乱流加速をどうモデル化するか？
- Cluster 自身のサイズ $\sim 10^{24}$ cm
- GeV電子の加速に関わる波長 $\sim 10^{14}$ cm

銀河団周縁部 (1)

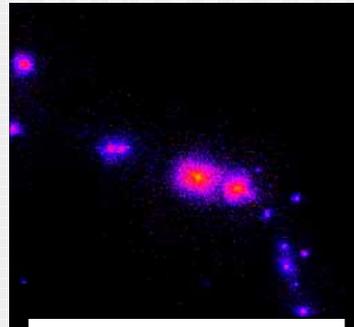
ダークマター



銀河



銀河間ガス
(10^5 K)



銀河団ガス
(10^7 K)

• Dark haloに物質が降り積もっているところ、まさに構造形成の現場

• 銀河団ガス ($\sim 10^7$ K) への加熱過程

• 銀河の形態変化

• missing baryon

• WHIM ($\sim 10^5$ K)

銀河団周縁部(2)

■ 観測手段

- WHIM: 酸素輝線(DIOS)
- 銀河団の外側: 低BGD X-ray imager
実はASCA、SAX以上のものは計画なし?

■ シミュレーション手法

- 低密度領域での衝撃波伝播 (格子法有利?)
- イオン化非平衡 (SPH有利?)

まとめ

■ 乱流

- shear flow, 高空間分解能、高精度格子法
- 観測的に速度場が得られれば、、(カロリメーターアレイ?)

■ 磁場

- ダイナモ: shear flow, 高精度格子法による MHD simulation
- ワイベル不安定: pariticle simulationも

■ 高エネルギー粒子

- 今後続々と新たな観測結果が
- ダイナミクスとのリンク、適切なモデル化

■ 銀河団周縁部

- 低密度領域での衝撃波伝播(格子法が有利?)
- 非平衡イオン化(SPH有利?)
- diffuse sourceに適したミッションは? ASCA, SAX以上のものは?。