

銀河団内のサブストラクチャーの運動に伴う ガスの流れについて

山形大学大学院 理工学研究科 博士前期課程2年
物理学専攻 宇宙物理学研究室
倉兼 務

銀河団

- 数十から数千の銀河が互いの重力でまとまっている大規模な集団
- 数十～数千の銀河・銀河団ガス(ICM)・ダークマターから成る

- 銀河：銀河団の全質量の10%以下
- ICM：X線を放射する数千万～数億度のプラズマ
銀河団の全質量の10～20%
- ダークマター：銀河団の全質量の大半を占める
重力ポテンシャルを担っている

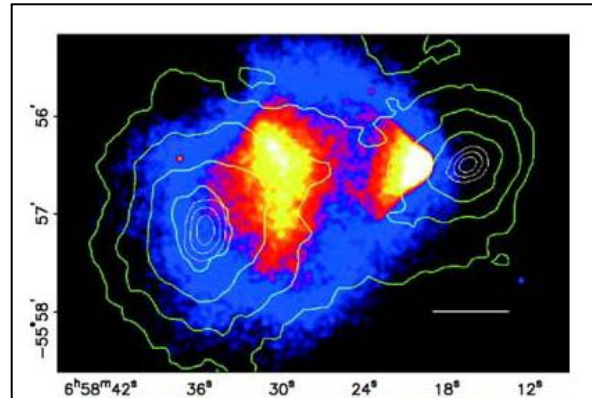
{ 大きさ(直径)：数Mpc
質量： $10^{14} \sim 10^{15} M_{\odot}$

- 小さな銀河団や銀河群と衝突・合体を繰り返しながら成長し続けている天体

近年のX線観測により、銀河団内を運動するサブストラクチャーによる構造(cold front)が確認されてきた。

サブストラクチャーの運動は周囲の銀河団プラズマに乱流を引き起こすことが予想される。このような乱流は**粒子加速・ガスの加熱・重元素の輸送過程**などに寄与すると考えられる。銀河団については、**粒子加速のメカニズム・重元素の輸送過程・cooling flow**など未解決の問題が多々ある。

今回、我々は銀河団内でのサブストラクチャーの運動に伴うガスの進化について、Roe TVD法(空間, 時間二次精度)を用いた三次元流体シミュレーションを行って調べた。

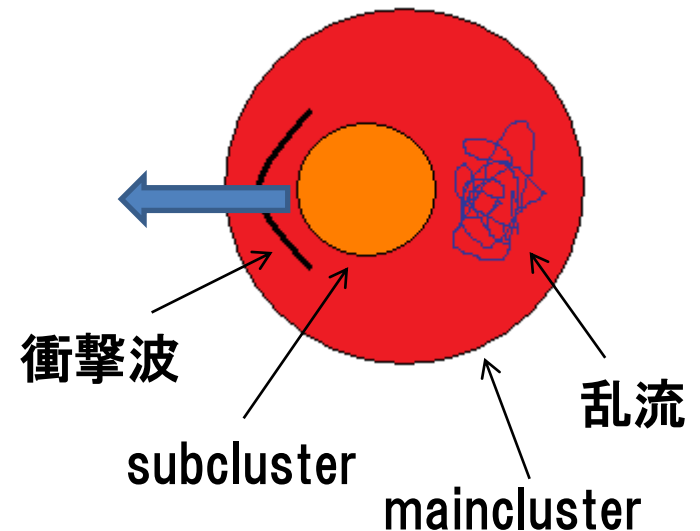


Clowe et al.(2006)

左図: 1E0657-56

等高線: 質量分布
(Hubble宇宙望遠鏡)

カラー: X線イメージ
(X線観測衛星Chandra)



銀河団の衝突と粒子加速

銀河団が衝突すると衝撃波(bow shock)が発生し、その衝撃波で粒子が加速される。すると、**衝撃波の周りで電波が放射**される。

 しかし、銀河団では**衝撃波から大きく離れたところでも電波が放射**されている！

【電波放射について】

- ローレンツ因子 $\gamma \sim 10^4$ の電子からのシンクロトロン放射
- 銀河団を覆うように放射している (Mpcスケールの放射)
- 銀河団からの広がった電波放射は、衝突銀河団から見つかっている！

銀河団の年齢 ($\sim 10^{10}$ yr) より、電波放射している電子の寿命が短い ($\sim 10^8$ yr)

➡ 衝撃波による加速だとすれば衝撃波から大きく離れることが出来ない!

➡ 銀河団が衝突した際に乱流が発生し、その乱流によって加速される?

銀河団衝突以外の粒子の起源



AGNの活動による電波放射

[高エネルギー粒子の起源]

- 銀河団衝突
- AGN

[粒子加速]

- 衝撃波加速
- 乱流加速

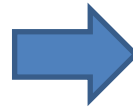
(※まだよく分かっていない)

Cooling Flow

ICMは実質的に冷えない

[銀河団の中心部] (※例外)

ガスの密度が大きい

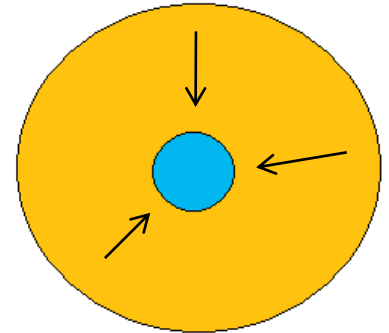


強いX線を放射

銀河団コアは熱を失う



周囲のガスからの圧力を支えられなくなる



銀河団の周辺部からガスが中心に向かって冷えながら流れ込むことで、失われた熱エネルギーを補っているはず！

Cooling Flowが起きるコア領域：銀河団の中心から～100kpc程度

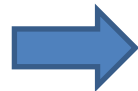
ICMのスペクトル測定  銀河団中心部の温度が周囲よりも数倍低い

Cooling Flowモデルを支持する証拠に

ここで問題が…

流れ込むガスの割合：～ $100M_{\odot}/\text{yr}$

Cooling Flowが銀河団の年齢ぐらい持続しているとすると
～ $10^{11}\sim 10^{12}M_{\odot}$ のガスが銀河団コアに流れ込んだはず！



銀河の質量に匹敵

銀河団コアにガスが流れ込んだ形跡が見つからない！

[Cooling Flow問題の解決案として]

○ AGN説

➡ 銀河団中心にある活動中のAGNのエネルギーにより補っている

AGNは放出するエネルギーを何桁も変えることがある
AGNからICMへのエネルギーの輸送過程は？

○ 熱伝導説

➡ コア以外のICMからの熱伝導

熱伝導率が適切な値に設定されている必要がある

○ 津波モデル

➡ コアと周囲のガスとの間に相対運動が発生

境界面で流体不安定性が発達 → 乱流

乱流渦に沿ったガスの運動によってコアの外部から内部に熱が運ばれる

重元素の輸送

ICMの主成分：水素・ヘリウム

X線観測 → 鉄などの重元素がわずかに含まれる

重元素 → 銀河中の超新星爆発で作られる

銀河で作られた重元素がICMへ運ばれるメカニズム

Ram-pressure stripping

銀河風

AGN活動

(※まだよく分かっていない)

銀河団の衝突による乱流も寄与している？

Kingモデルを仮定  概ね等温モデルであり、なおかつ有限の大きさ

$$\rho_{DM}(r) = \rho_0 (1 + x^2)^{-\frac{3}{2}} \quad \left[x = \frac{r}{r_c} \right]$$

$$M_{DM}(r) = 4\pi\rho_0 r_c^3 \left\{ \ln \left[x + (1 + x^2)^{\frac{1}{2}} \right] - x (1 + x^2)^{-\frac{1}{2}} \right\}$$

$$\rho_g(r) = \rho_0 (1 + x^2)^{-\frac{3}{2}\beta}$$

重力ポテンシャルについて(ガスの自己重力は無視)

$$f_r = \begin{cases} -\frac{GM_{DM}(r)}{r^2} & (r < r_{out}) \\ -\frac{GM_{DM}(r_{out})}{r^2} & (r \geq r_{out}) \end{cases}$$

初期条件

計算領域：2Mpc立方（100×100×100）

<subcluster>

【重力ポテンシャル】

$$\left\{ \begin{array}{l} r_c = 100\text{kpc} \\ r_{out} = 500\text{kpc} \\ M_{DM} = 10^{14}M_{\odot} \end{array} \right.$$

King分布

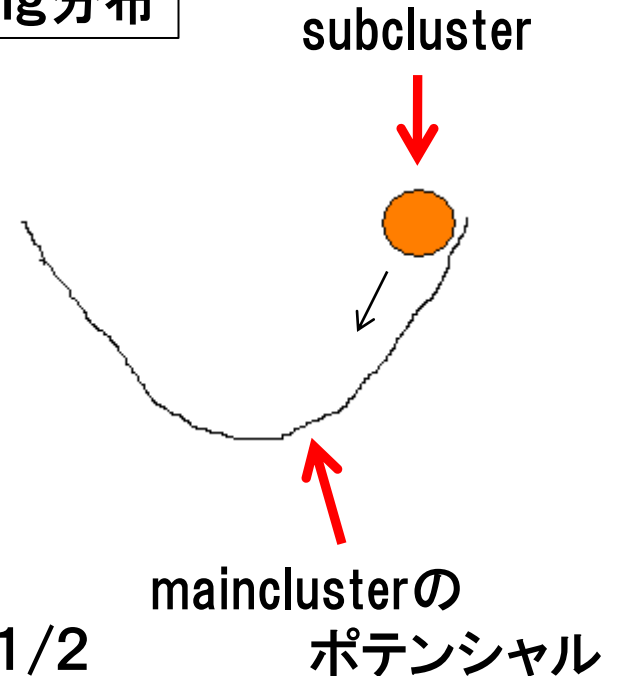
【ICM】 ($r < r_{out}$)

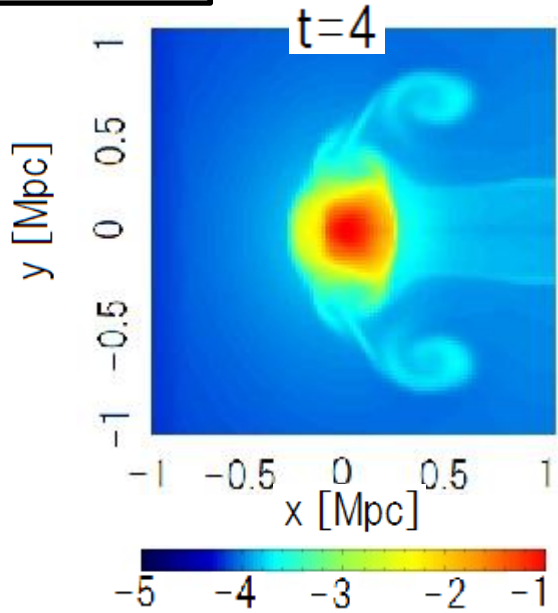
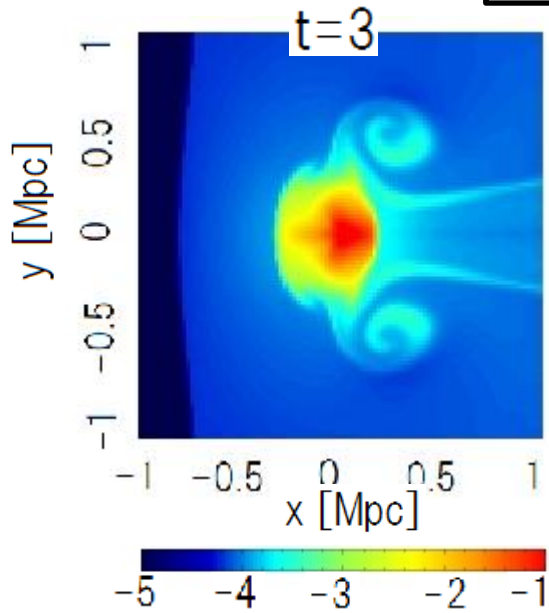
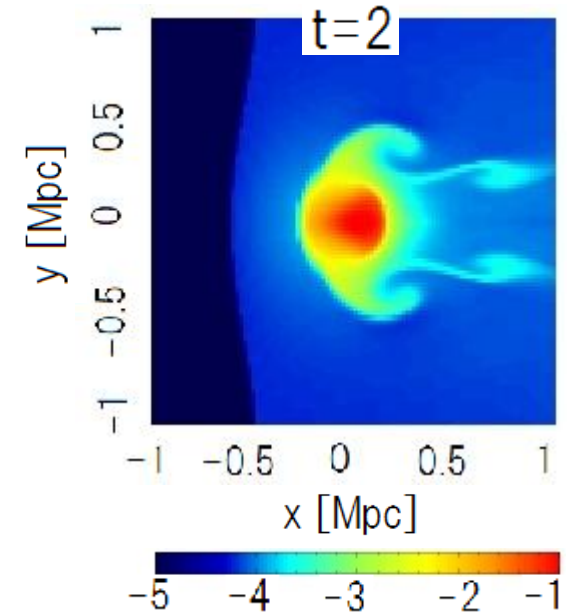
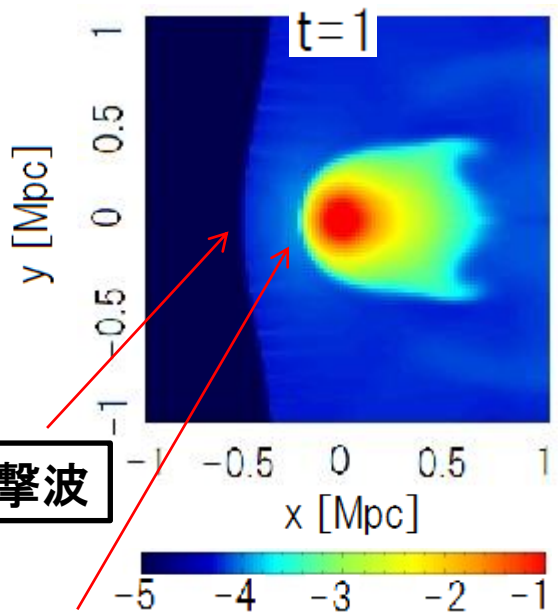
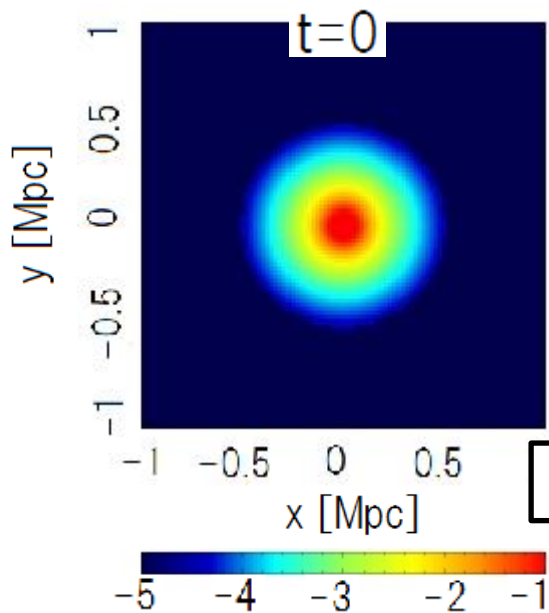
$\beta = 0.8$ 等温・静水圧平衡

$\rho_{0,g} = 0.1\rho_{0,DM}$

<背景ICM> ($r > r_{out}$)

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{密度} : \text{subcluster境界の} 1/2 \\ \text{圧力} : \text{subcluster境界と同じ} \\ u_x : \text{subcluster前面で音速の2倍} \end{array} \right.$$



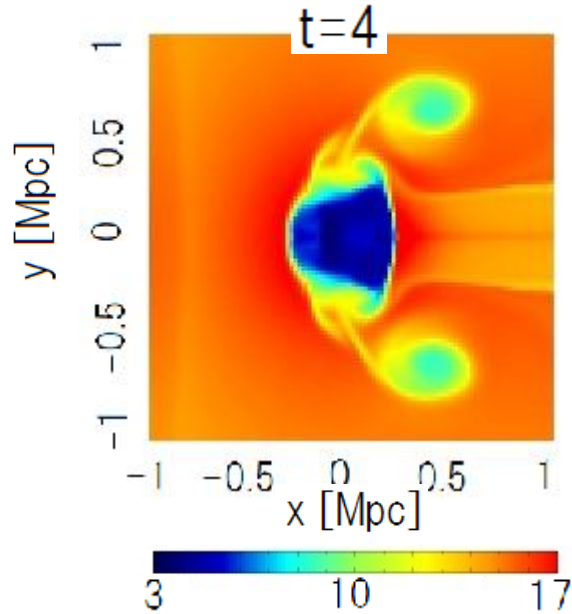
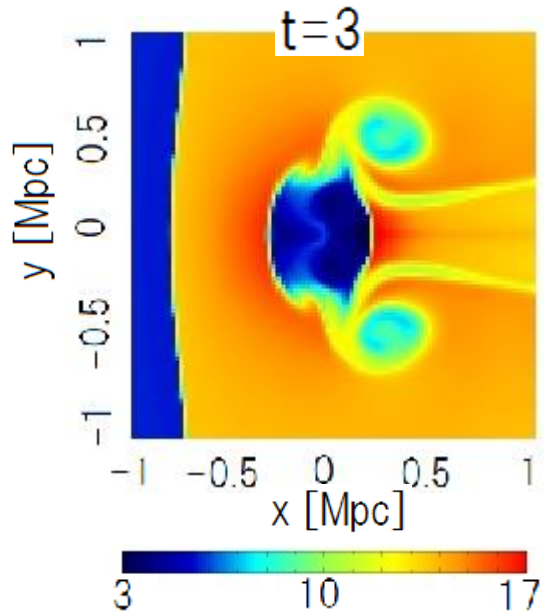
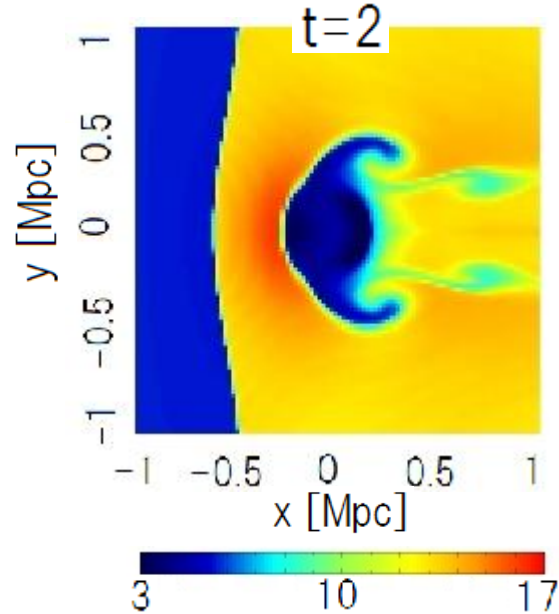
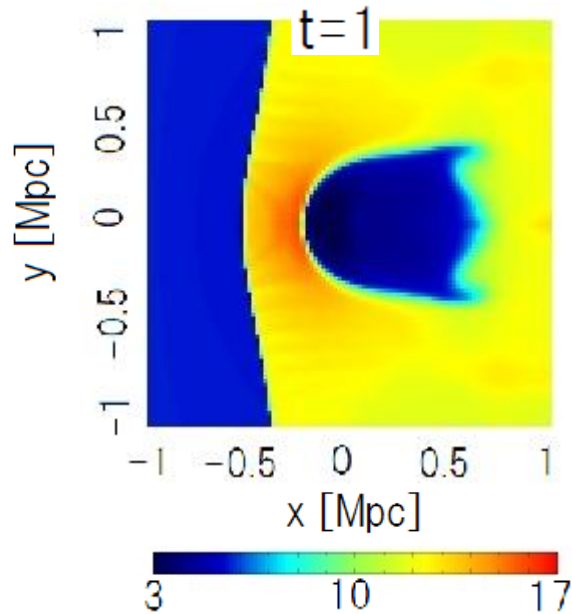
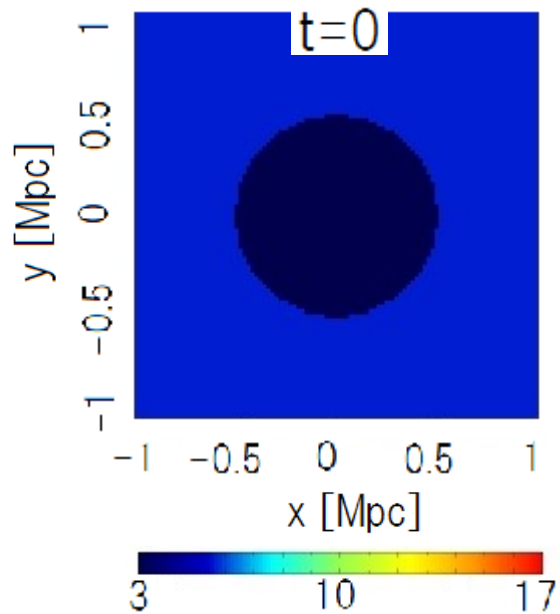


計算時間: 0~4 Gyr
 計算領域: 2 Mpc
 (100×100×100)

【カラスケール】
 $[10^{15} M_{\odot} / \text{Mpc}^3]$

z=0面での密度変化

(対数表示)



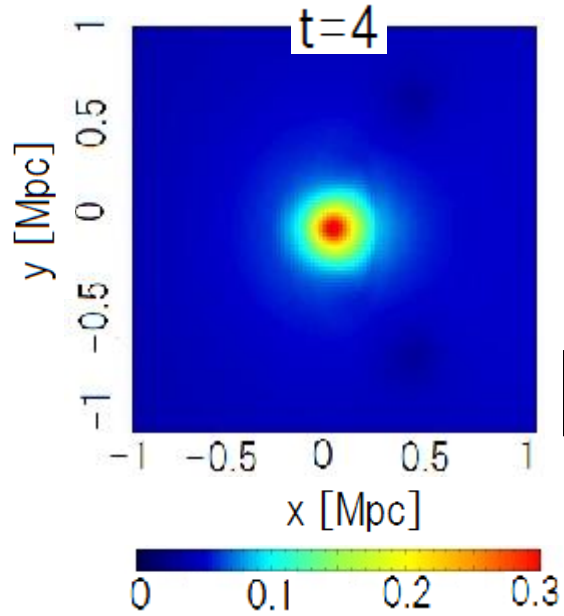
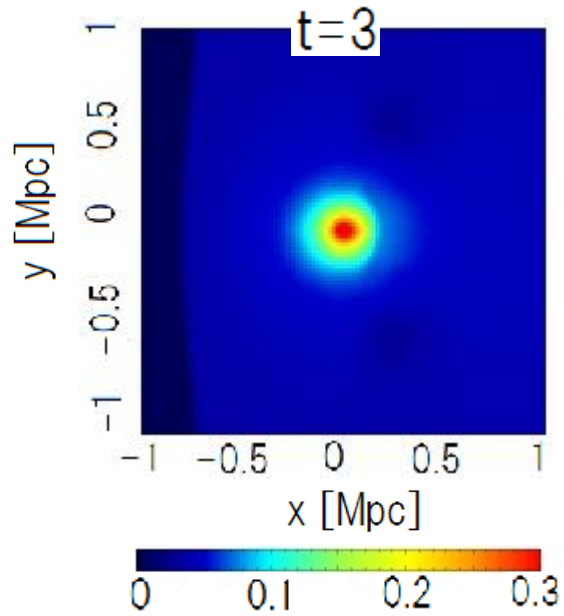
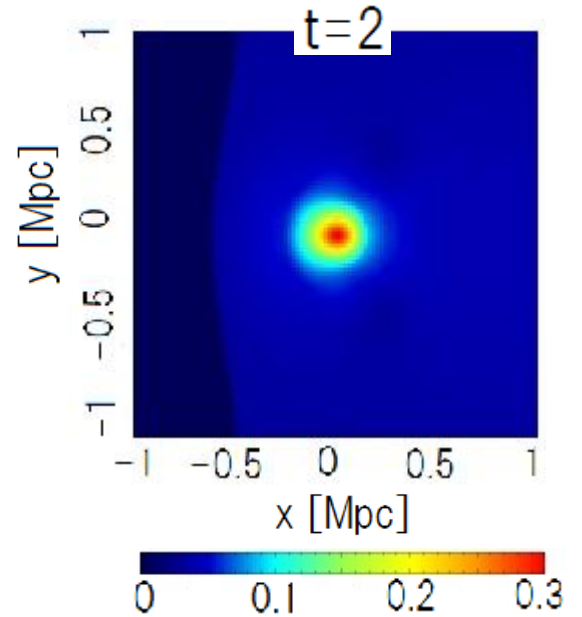
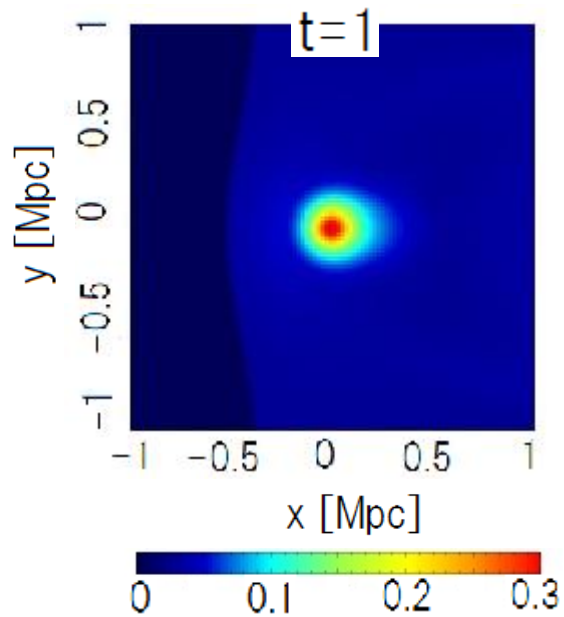
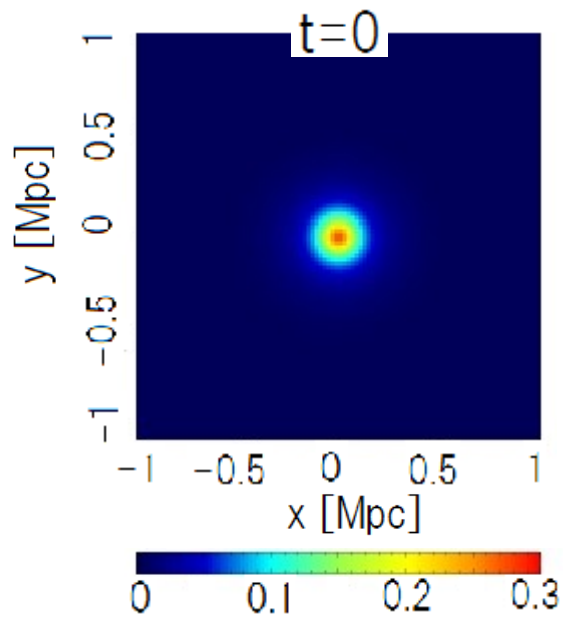
計算時間: 0~4 Gyr

計算領域: 2 Mpc
($100 \times 100 \times 100$)

【カラスケール】

[keV]

z=0面での温度変化



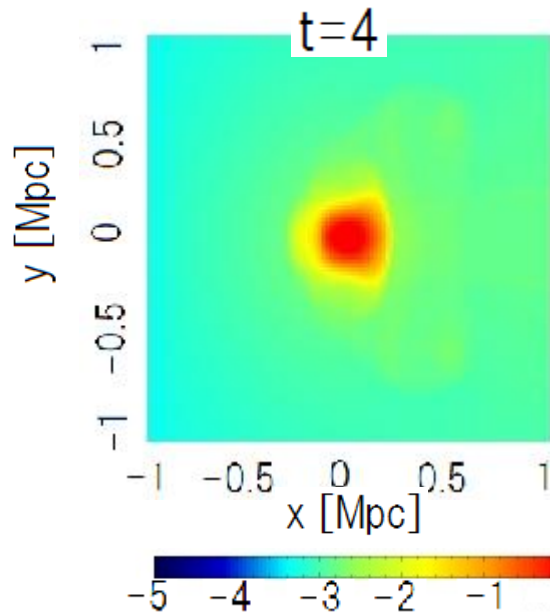
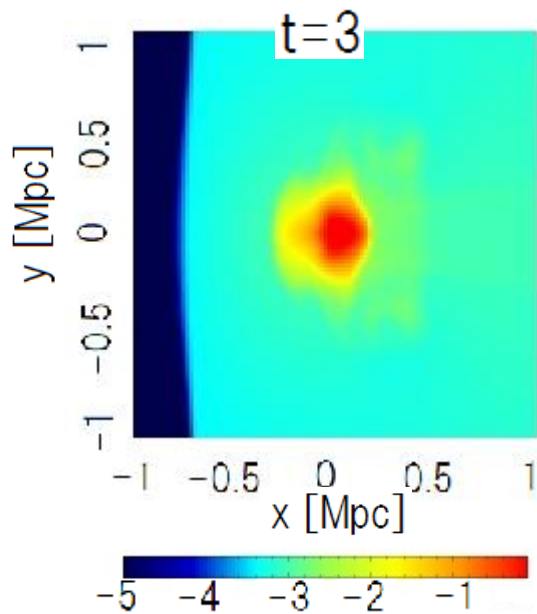
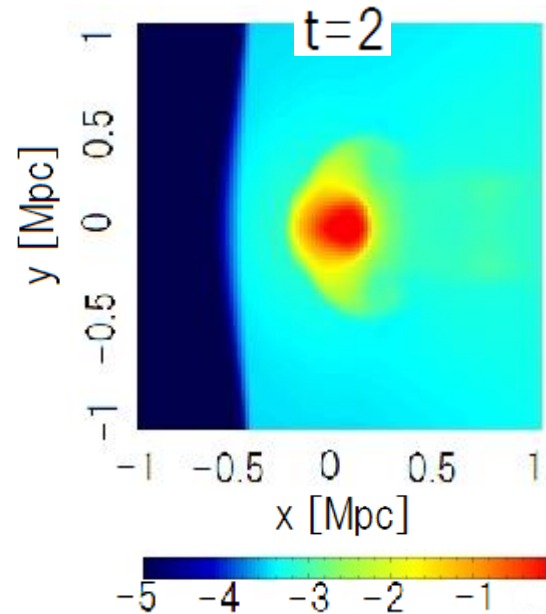
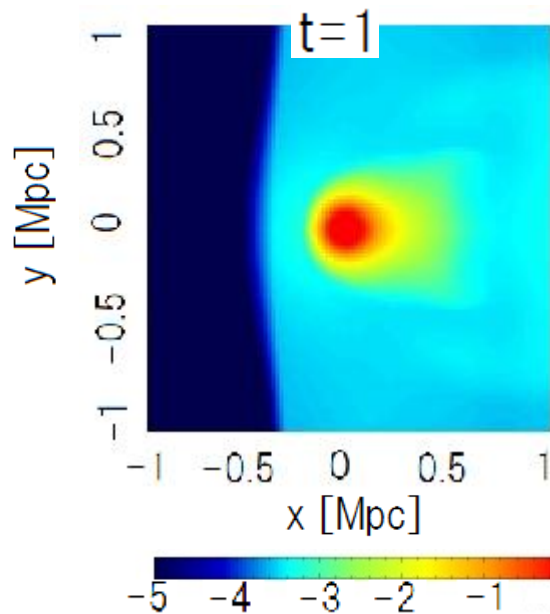
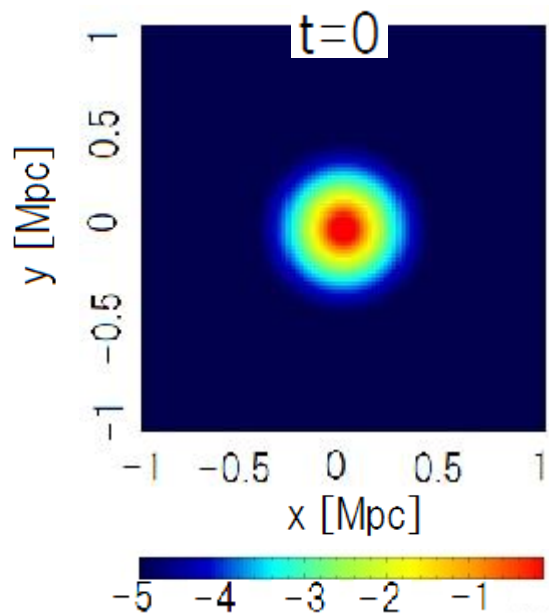
計算時間:0~4 Gyr

計算領域:2 Mpc
(100×100×100)

【カースケール】

$[10^{15} M_{\odot} / \text{Mpc} \cdot \text{Gyr}^2]$

z=0面での圧力変化



計算時間: 0~4 Gyr

計算領域: 2 Mpc
($100 \times 100 \times 100$)

【カースケール】

【対数表示】

X線表面輝度

まとめと今後

- サブストラクチャー前面には衝撃波が生じ、前方へ伝搬していく。
- サブストラクチャー外側のガスはラムプレッシャーにより剥ぎ取られ、境界面でKelvin-Helmholts不安定により渦状の構造が発達する。

【疑問点】

- 重力ポテンシャルとガスの分布のズレが見られない。
- 磁場の影響やCooling Flowなどを考慮すると？

【今後】

- N体シミュレーションについても学び、N体＋流体シミュレーションを用いて銀河団の運動の様子を見る。
- 発生した乱流によってどれだけのガスがどれくらいの時間で飛ばされていくのかを調べる。