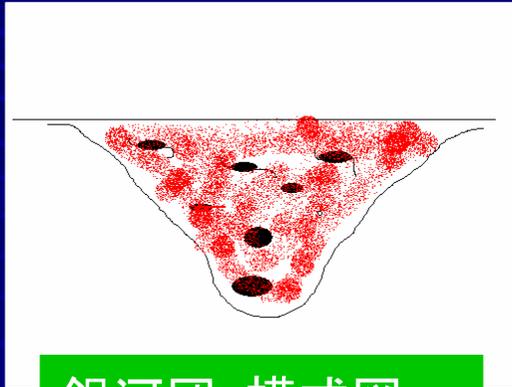


# 衝突銀河団の N体＋流体シミュレーション

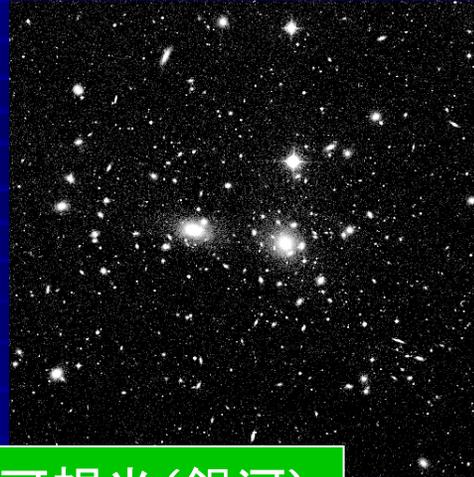
滝沢元和(山形大学理学部)

プロジェクトID:wmt27b

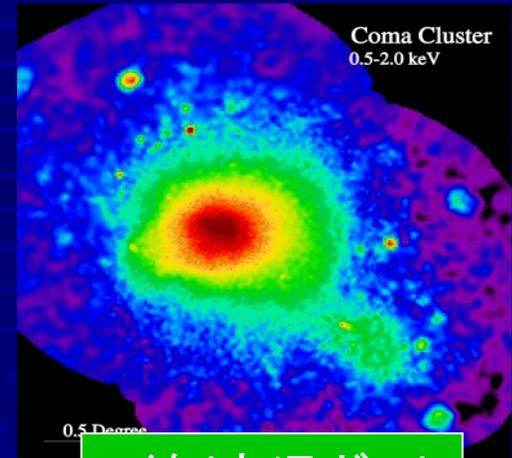
# Introduction



銀河団: 模式図



可視光(銀河)



X線(高温ガス)

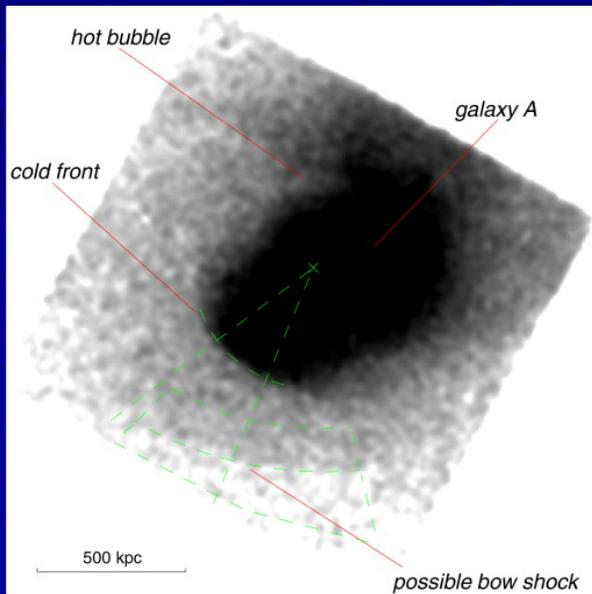
## ■ 銀河団

- 暗黒物質の重力ポテンシャル中に束縛された高温ガス ( $T \sim 10^7 - 8$  K) と銀河のかたまり。
- 宇宙で最大のビリアライズした天体 ( $R \sim \text{Mpc}$ ,  $M \sim 10^{15}$  太陽質量)
- 宇宙の構造形成の(観測可能な)現場
- プラズマ物理の実験場(理想的な無衝突プラズマ)

# Introduction (2) :

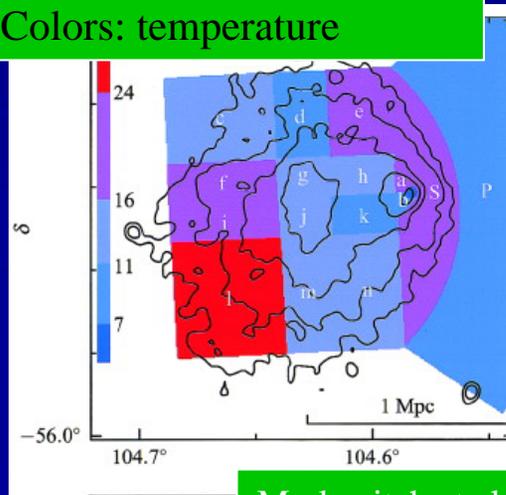
## 銀河団衝突の痕跡 (X線、weak lensingより)

銀河団の中を運動するsubstructure  
非一様性な温度分布  
ガスと暗黒物質の空間分布の食い違い



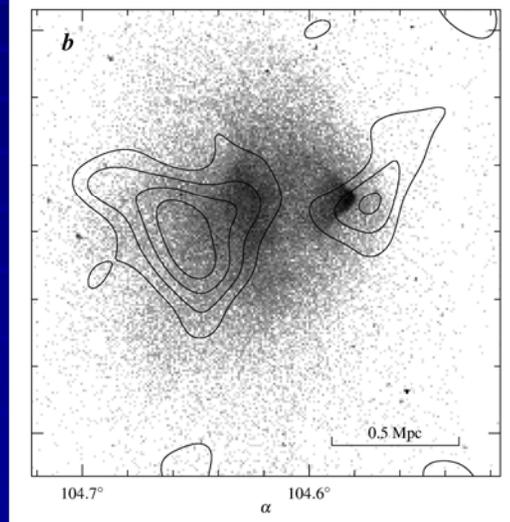
Moving substructure in A3667  
Vikhlinin et al. (2001)  
Chandra X-ray image

1E 0657-56  
Contours: X-ray brightness  
Colors: temperature



Markevitch et al. (2002)

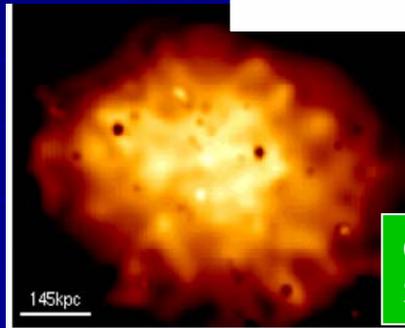
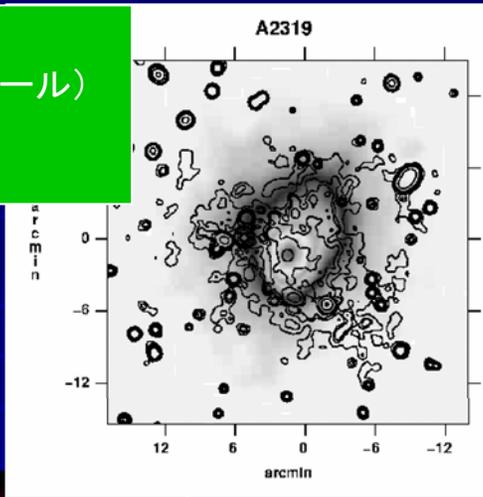
1E 0657-56  
Contours: 質量分布  
Gray scale: X-ray (ガス分布)



X線イメージ(グレースケール)  
質量分布(等高線)  
Markevitch et al. (2004)

# Introduction(3): 粒子加速器としての銀河団

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



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

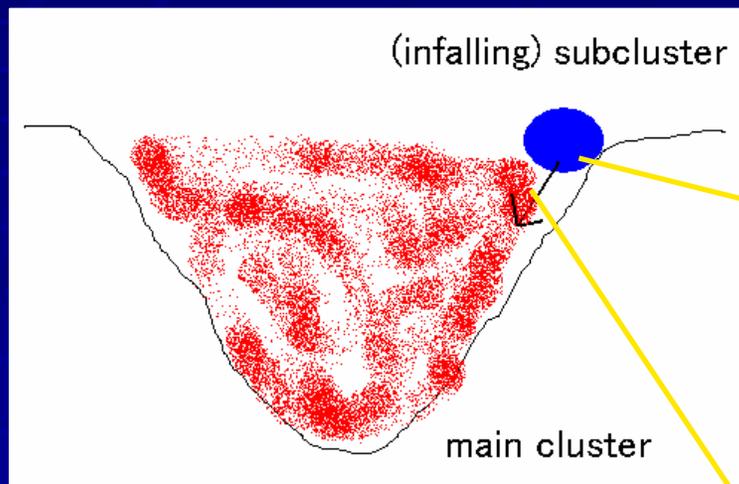
- 銀河団プラズマ中には非熱的高エネルギー電子 ( $E_e \geq \text{GeV}$ ) が Mpc スケールにわたって存在。
- 衝撃波
- 乱流
  - かみのけ座銀河団での P 分布
  - ダイナモによる磁場増幅
  - 磁気乱流による粒子加速
  - 次世代の X 線分光では充分観測可能 (NeXT)

(電磁) 流体シミュレーションの役割:

宇宙最大の加速器“銀河団”のエンジン部分  
(衝撃波、乱流構造、磁場増幅、磁気リコネクション etc) を明らかにしたい。

# 銀河団内を運動するsubstructureの 流体simulation(今年度前半まで)

- メインクラスターの重力ポテンシャル内でのサブクラスターの運動を、サブクラスターをtest particle と近似して解く。
- 上の結果をサブクラスター前面の境界条件に反映。
- サブクラスター周囲のガスの運動を流体コード(Roe TVD法)で解く。



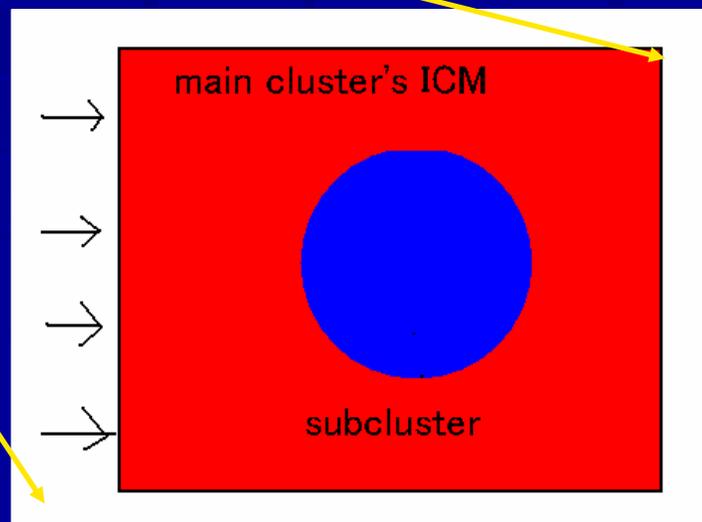
Simulation Box:

800kpc × 800kpc × 800kpc

Mesh Size:

400 × 400 × 400

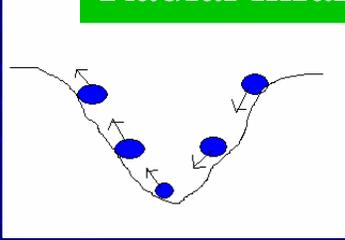
VPP5000@NAOJ



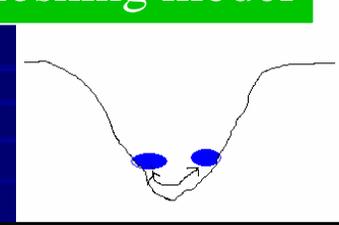
# 今年度前半までの成果

(Takizawa 2005 ApJ, 629, 791:論文出版費の補助どうもありがとうございました。)

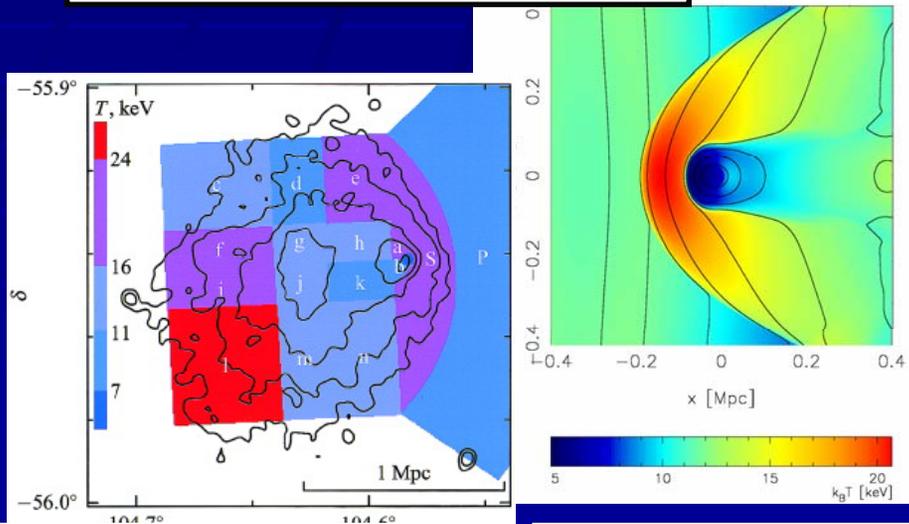
Radial infall model



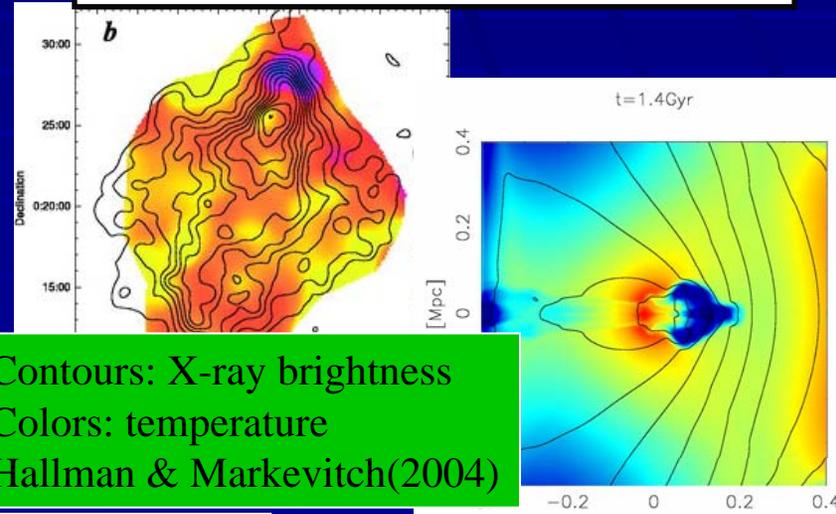
Sloshing model



1E 0657-56: "Bullet" cluster



A168: Turbulence is generating through RT instability ?



Contours: X-ray brightness  
Colors: temperature  
Hallman & Markevitch(2004)

Contours: X-ray brightness  
Colors:  $T$ : temperature  
Markevitch et al. (2002)

X-ray image made from the simulation data  
Contours: X-ray brightness  
Colors: emissivity-weighted temperature

# N体＋流体(今年度後半)

- N体計算: Particle Mesh(PM)法
- 自己重力: FFT with isolated boundary conditions
- 流体計算: Roe TVD法
  - 境界条件: zero gradient boundary conditions (ただし outflow のみを許す)
- Simulation Box
  - 一様メッシュ、宇宙膨張等なし
  - 18Mpc × 9Mpc × 9Mpc (200 × 100 × 100)
  - 粒子数 N= 200万

# Virialized Cluster Model

- DMの密度分布はKingモデル、ICMの密度分布は $\beta$ モデルを仮定(コア半径は共通)

DM密度分布

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

ICM密度分布

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

- $r_{\text{out}} \geq 15r_c$ では $\rho_{\text{DM}} = 0$ 、 $\rho_{\text{gas}}$ 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。

$$d(\rho_{\text{DM}} \sigma^2)/dr = -(GM_r \rho_{\text{DM}}) / r^2$$

- ICMの温度分布は静水圧平衡の式より定める。

$$dP/dr = -(GM_r \rho_{\text{gas}}) / r^2$$

- $r \leq r_{\text{out}}$ で $M_{\text{gas}} / (M_{\text{gas}} + M_{\text{DM}}) = 0.1$

# 1:4 Merger

- Larger cluster

$r_c=200$  kpc,  $r_{\text{out}}=3$  Mpc,  $\beta =0.6$ ,  
 $M=5.0 \times 10^{14}$  solar mass

- Smaller cluster

$r_c=100$  kpc,  $r_{\text{out}}=1.5$  Mpc  $\beta =0.6$ ,  
 $M=1.25 \times 10^{14}$  solar mass

$R \propto M^{0.5}$  のスケージング則 ( $P(k) \propto k^{-2}$  擬似的に表現)

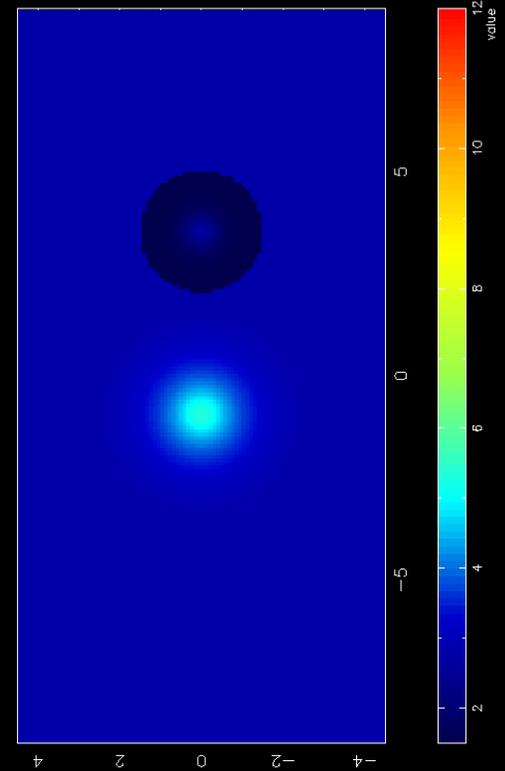
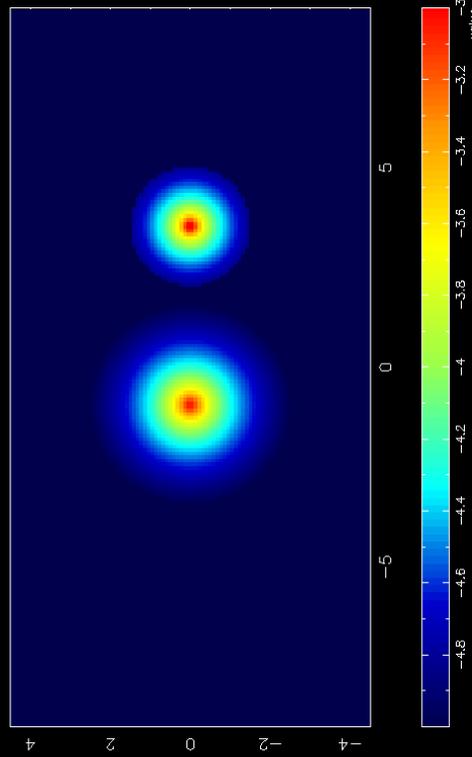
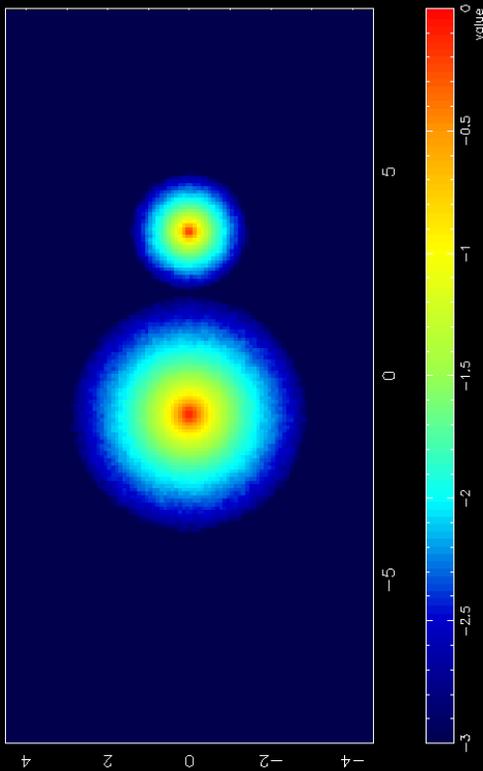
- $t=0$ で両clusterは互いに接している状態。 $t=12$ Gyrまで計算。

# 1:4 Head-on Merger

DMの面密度  
(視線方向に積分)

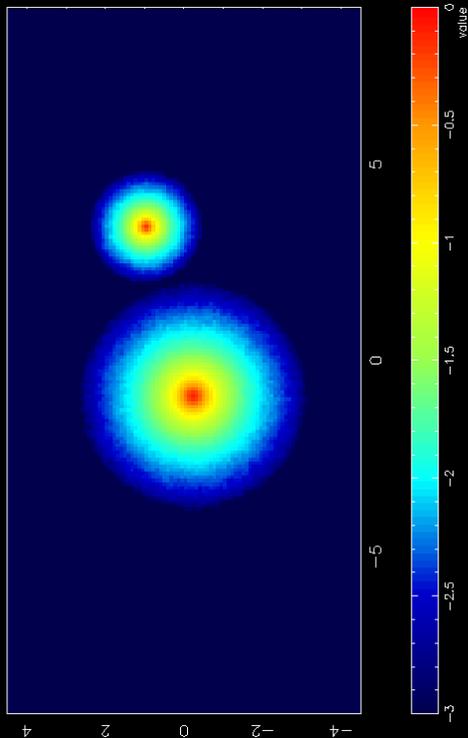
ガス密度(中心面で)

ガス温度(中心面で)

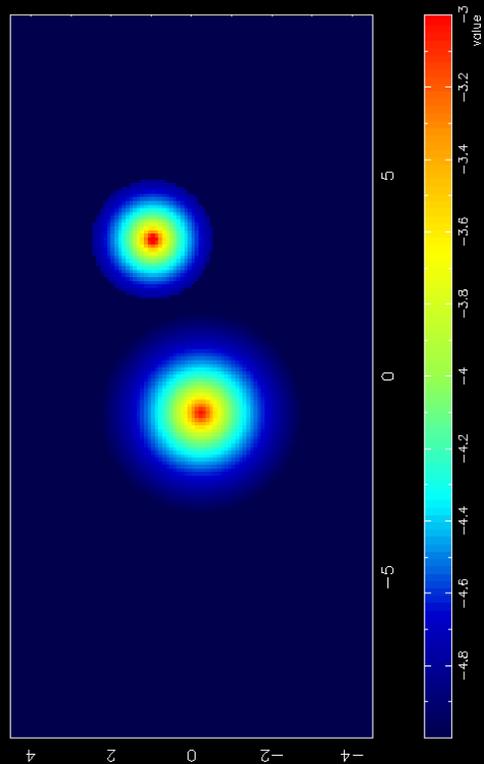


# 1:4 Off-center Merger: $\lambda = (J|E|^{0.5}/GM^{2.5})=0.05$

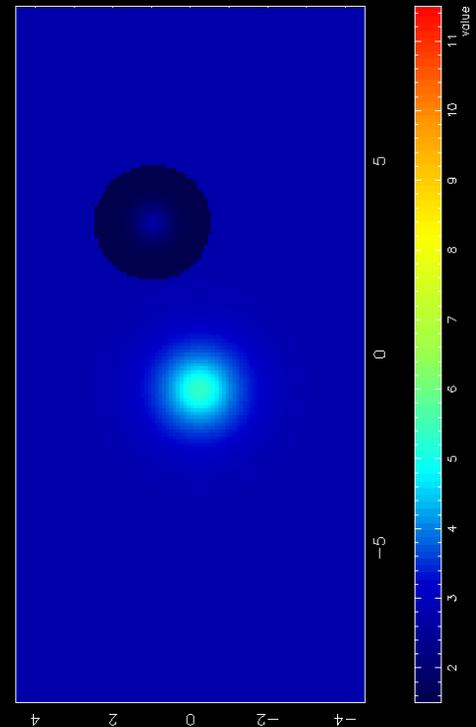
DMの面密度  
(視線方向に積分)



ガス密度(中心面で)



ガス温度(中心面で)



# N-body+hydro Merger(まとめ)

- 小銀河団のダークハローは生き残って、銀河団ポテンシャル中を減衰振動(スロッシング)しながら小さくなっていく。
- スロッシングに伴って複数組の(弱い)衝撃波が外側へと伝搬していく。またKelvin-Helmholtz不安定による渦状の構造が生じる。そのスケールはサブストラクチャーのサイズ程度。
- 衝突後8Gyr後でも音速の0.3-0.5倍程度の組織的な流れがガスに残る(スロッシングによる重力ポテンシャルの変動による)。
- Off-Center な merger の場合、ガスにbulkな回転運動が残る

# まとめ

- 銀河団内を運動するsubstructureの流体シミュレーションを行った (Takizawa 2005 ApJ, 629, 791).
  - 1E0657-56 (バウショック+コールドフロント)、
  - A168 (RT不安定性によって壊れつつあるコールドフロント)
- N体+流体コードを開発中。銀河団衝突に適用。
  - ダークハローのスロッシングによるweak multiple shocks
  - Off-center merger によるbulk rotation
- Additional Physics (放射冷却、磁場、非熱的粒子のモデル化、NFW的な密度分布 etc)
- 「すざく」に提案中 (A2319, Coma, Ophiuchus, A399&A401, A3667, A1914) のX線観測ともあわせて衝突銀河団の力学進化や粒子加速の謎に迫っていきたい。