

銀河団のガスダイナミクスと 粒子加速

滝沢元和

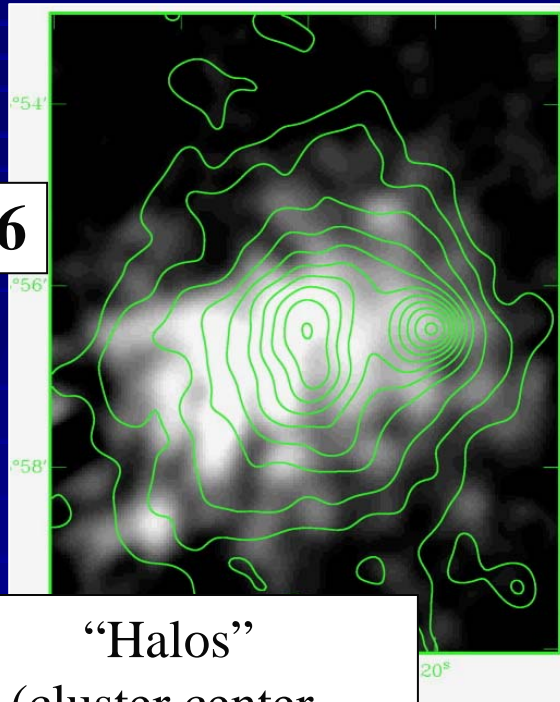
(山形大学理学部物理学科)

目次

- Introduction
- 粒子加速と関連あるガスダイナミクス
 - 衝撃波
 - バブル、Jet
 - 乱流
- Moving substructure の流体シミュレーション
 - Cold front、乱流 (Takizawa 2005, ApJ 629, 791)
 - SZ効果によるICMの物理状態のALMAでの観測可能性 (Yamada et al. in preparation)
- まとめ

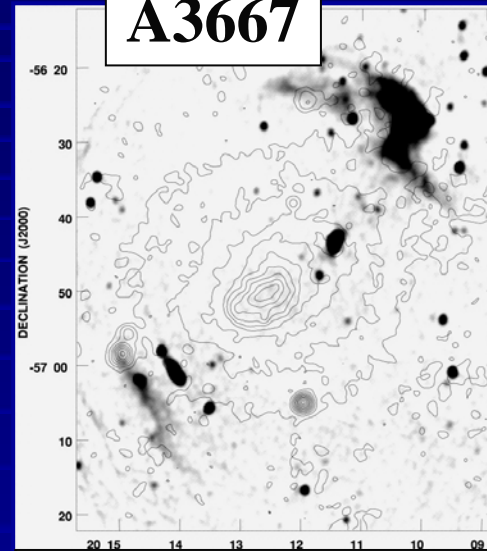
Introduction (Radio Halos, Relics)

1E 0657-56



“Halos”
(cluster center,
X-ray と同様な形態)

A3667



“Relics”
(on cluster outskirts,
Irregular shape)

Rottgering et al.
(1997)

等高線: X-ray

グレースケール: 電波

Liang et al. (2000)

等高線: X-ray

グレースケール: 電波

- $R \sim 100 \text{ kpc} - \text{Mpc}$,
- $S_\nu \propto \nu^{-\alpha} : \alpha \sim 1.3-2.0$ (not a single power-law)
- $L \sim 10^{40-41} \text{ erg/sec}$ (10MHz \sim 10GHz),
- $E_e \sim \text{GeV} + B \sim \mu \text{G}$

Diffusion Problem

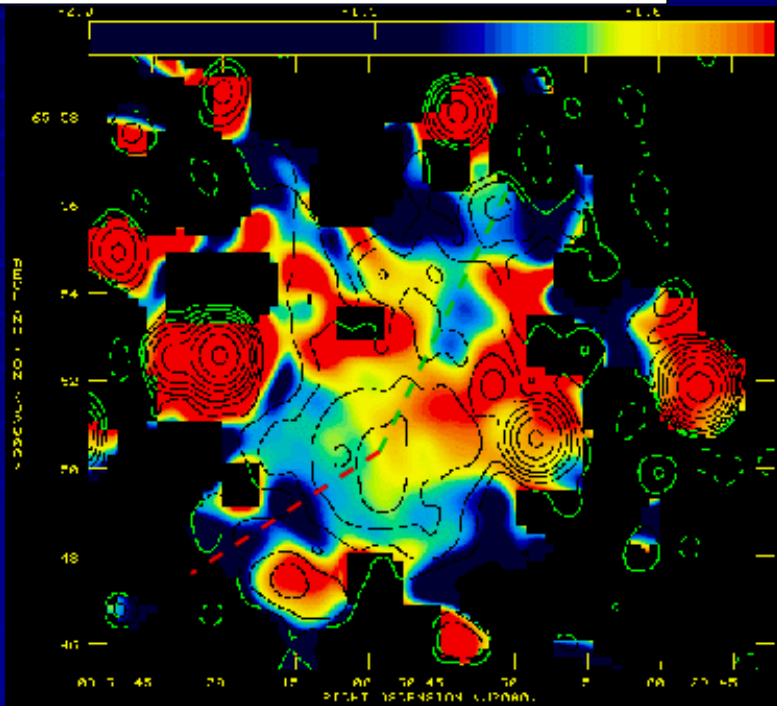
- 銀河団の中には確かに宇宙線電子の点源がある（銀河、AGNs、Jets）。しかし、冷却時間内に拡散しうる距離は短い。
 - Bohm diffusion approximation :
$$\kappa = (\eta E_e c / 3 e B)$$
 - Cooling time:
$$t_{\text{cool}} = 1.1 \times 10^9 \text{ yr } (E_e / \text{GeV})^{-1}$$
 - Diffusion length within the cooling time:
$$L_{\text{diff}} \sim 2.2 \times 10^{-4} \text{ Mpc } (\eta / 10^2)^{1/2} (B / \mu \text{ G})^{-1/2}$$
- 非熱的電子はその場で加速されている

Radio halos

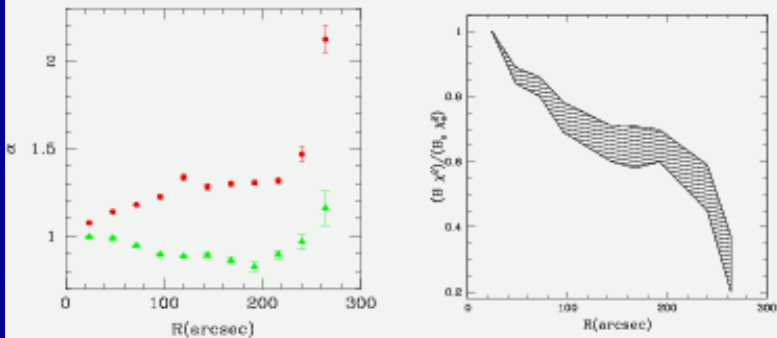
A665の電波スペクトル指数map

赤:ハード 青:ソフト

Feretti et al. (2004)



- 積分するとパワーロー ($\alpha \sim 1-2$)
- スペクトルには空間依存性あり。
- Coma: 中心flat ($\alpha \sim 0.8$)、周辺steep ($\alpha \sim 1.8$)
- A665, A2163: そんなに単純ではない

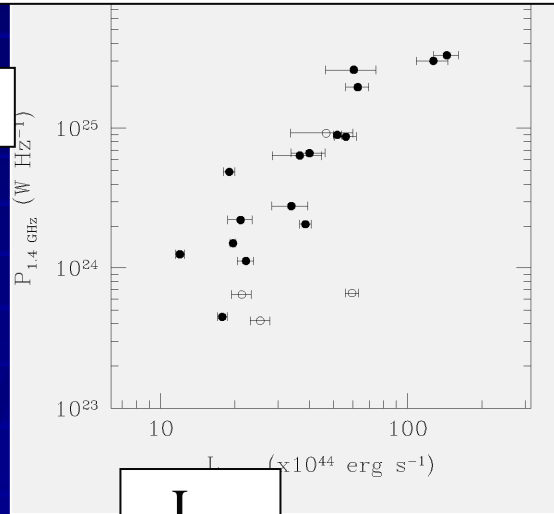


加速過程は場所に強く依存、必ずしも球対称ではない。

Introduction (Radio, statistics)

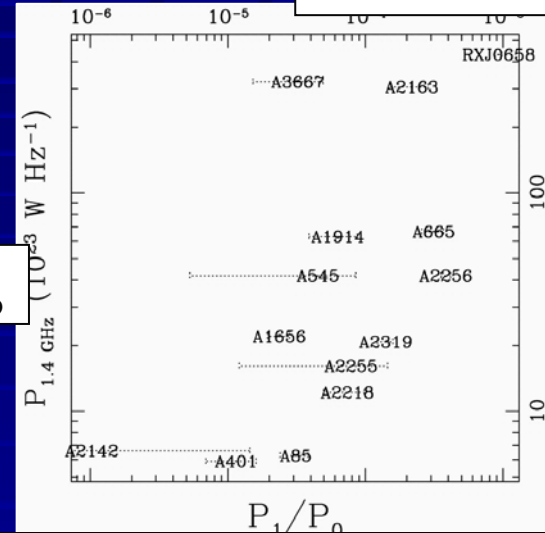
L_{radio} vs L_X (Bacchi et al. 2003)

L_{radio}



Buote 2001

L_{radio}



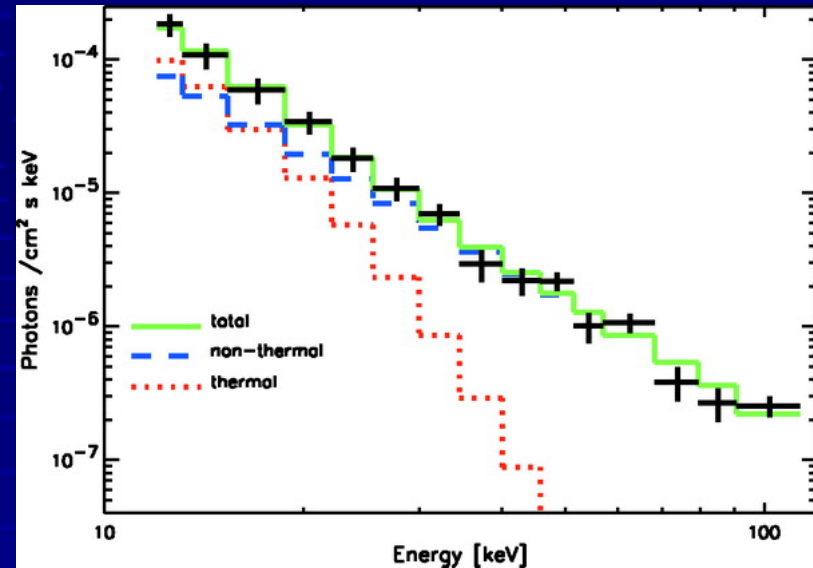
X-ray imageの球対称からのずれ具合

- (最大) 電波強度はX線光度との強い相関
($L_R \sim L_X^{1.7}$)
- Merger との関連をほのめかす状況証拠
- 電波放射とICMの運動との関連を強く示唆(磁化したプラズマでの粒子加速問題)

Observations (Hard X-ray)

- いくつかの銀河団、銀河群から非熱的硬X線放射の報告があるが、反論もある。(Coma, A2256, HCG62, etc)
- 14個の銀河団 (AGNの影響少ない、ほぼ merger) の合成スペクトルからの非熱的硬X線、AGNよりsoft, extended (Nevalainen et al. 2004)
- SUZAKU, NeXTに期待
- Origin????
 - Inverse Compton ($E_e \sim \text{GeV} + \text{CMB}$)
B discrepancy ?
 - Bremsstrahlung ($E_e \sim 10\text{-}100 \text{ keV} + \text{ICM}$)
huge energy input is necessary
 - Synchrotron ($E_e \sim \text{PeV} + B \sim 1 \mu\text{G}$)
(Inoue et al. 2005)

現時点では逆コンプトンが一番もつともらしいが、決定的ともいえない。



Combined spectrum of 14 clusters observed with Beppo SAX: Nevalainen et al. (2004)

$$\text{Photon index} = 2.8^{+0.3}_{-0.4}$$

---->

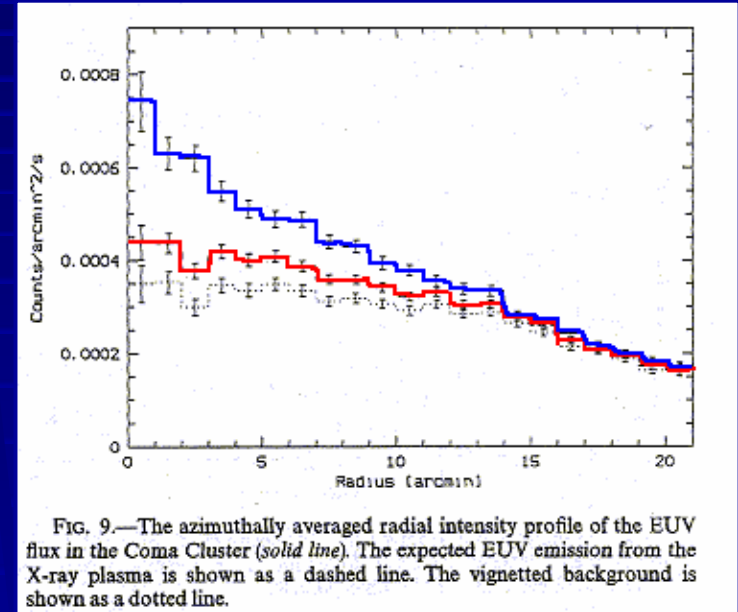
逆コンプトンだと思つと

Electron spectrum: $\mu = 3.8\text{-}5.0$

Radio spectral index: 1.4-2.1

Observations (EUV, γ -ray)

- EUV ($\gamma_e \sim 300 + \text{CMB} ???$)
 - Still controversial
 - How significant are these detections?
 - Thermal or non-thermal?
- **XMM-Newton detect warm (~ 0.2 keV) thermal plasma, which is probably from filaments in a large scale structure near clusters. (Kaastra et al. 2003)**
- γ -ray
 - Only upper limit (EGRET: Reimer et al. 2003)



Coma cluster: EUV radial profile
(Bowyer et al. 1999)

Blue: observed emission

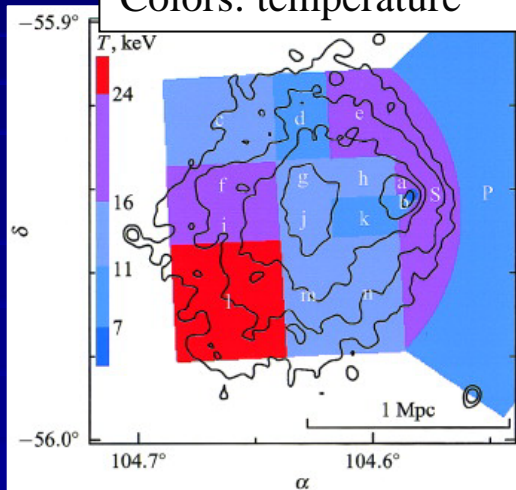
Red: emission expected from
thermal model in X-ray

銀河団内衝撃波 (merger, moving substructure によるもの)

1E 0657-56

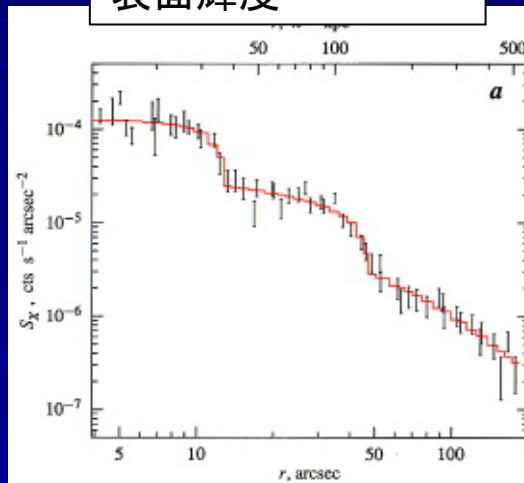
Contours: X-ray brightness

Colors: temperature

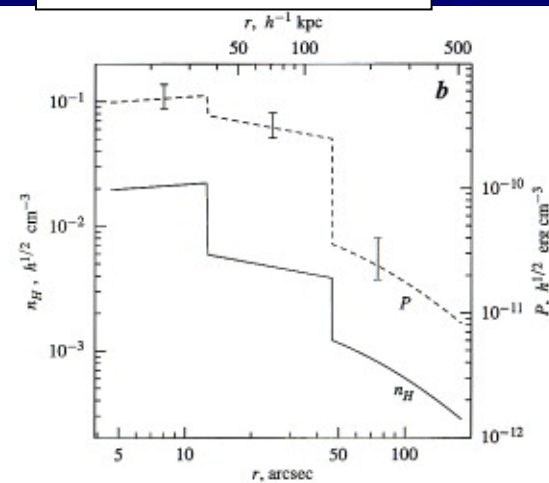


Markevitch et al. (2002)

Substructure 前面の
表面輝度



Substructure 前面の
密度、圧力



いくつかの銀河団でsubstructure 前面の衝撃波が密度and/or温度のジャンプとして見えている。

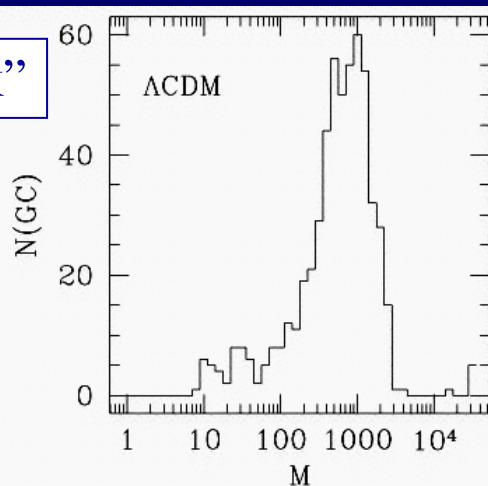
典型的には $M = 1 \sim 3$

構造形成に伴う衝撃波

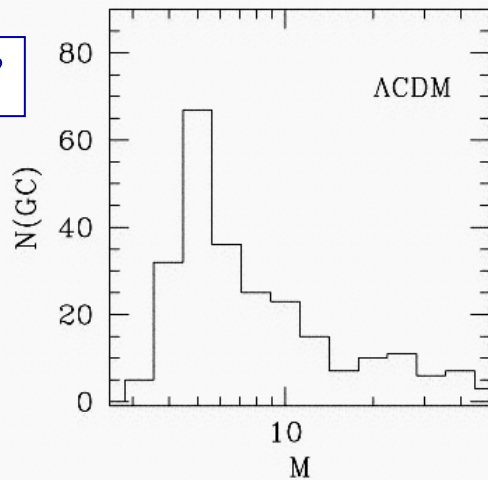
Mach number distribution

(Miniati et al. 2000)

“accretion shock”



“merger shock”



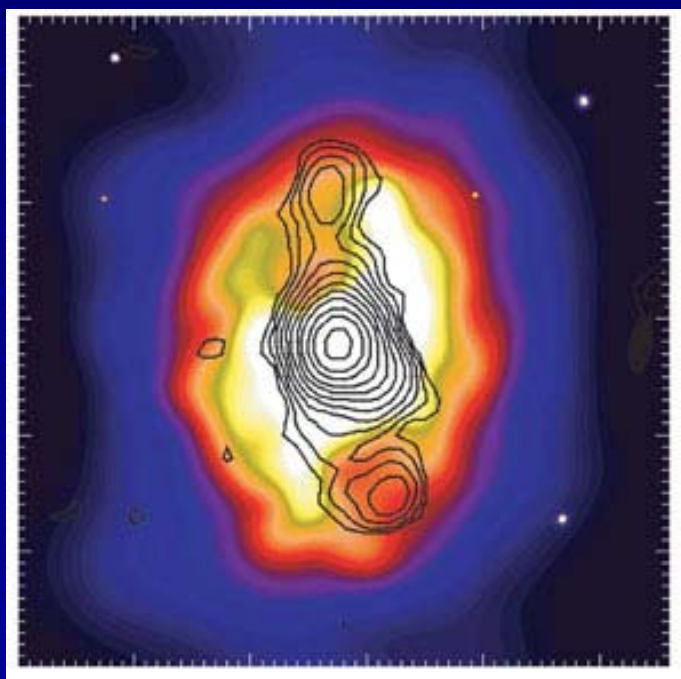
–Cosmological N-body + hydro simulation (Λ -CDM)

–“accretion shocks have higher Mach numbers (10—1000)
ただし、もっと低くなるかもしれない (Totani & Inoue 2002)

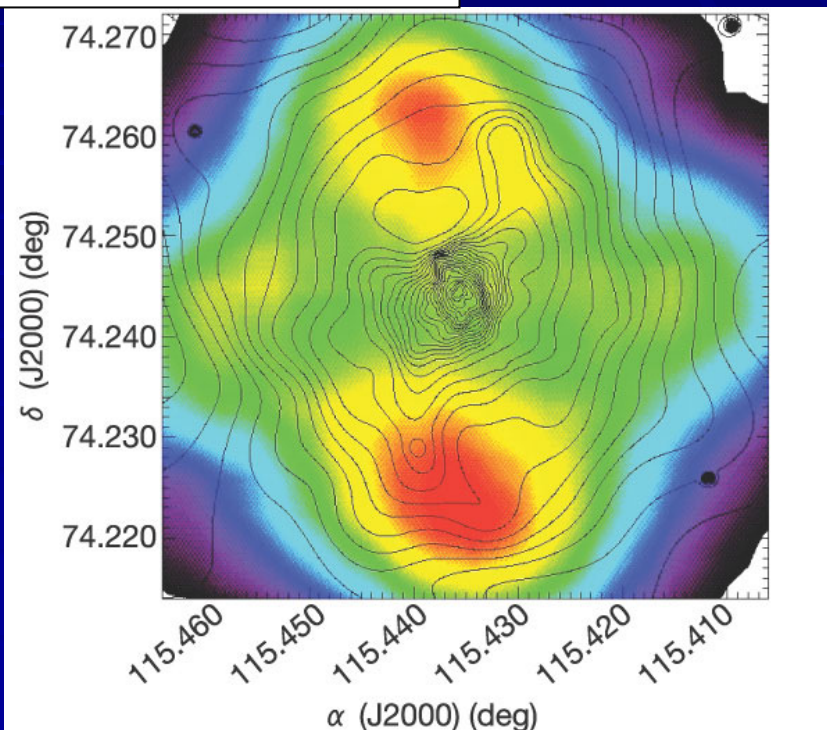
–“merger shocks have lower Mach numbers (1--10)

電波銀河による衝撃波と 非熱的粒子の供給

MS0735.6+7421 銀河団中心部での電波ジェット
McNamara et al. (2005)

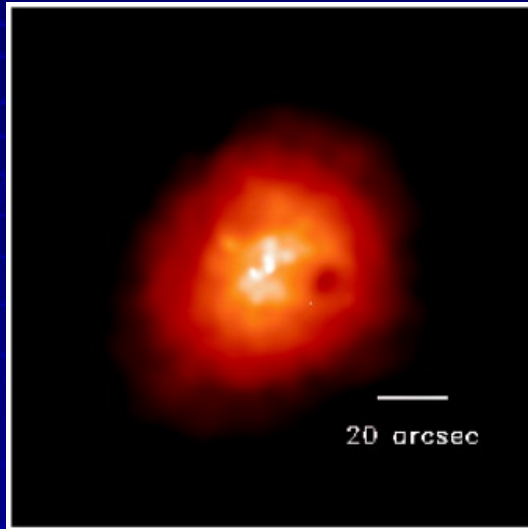


カラー: X線
等高線: 電波



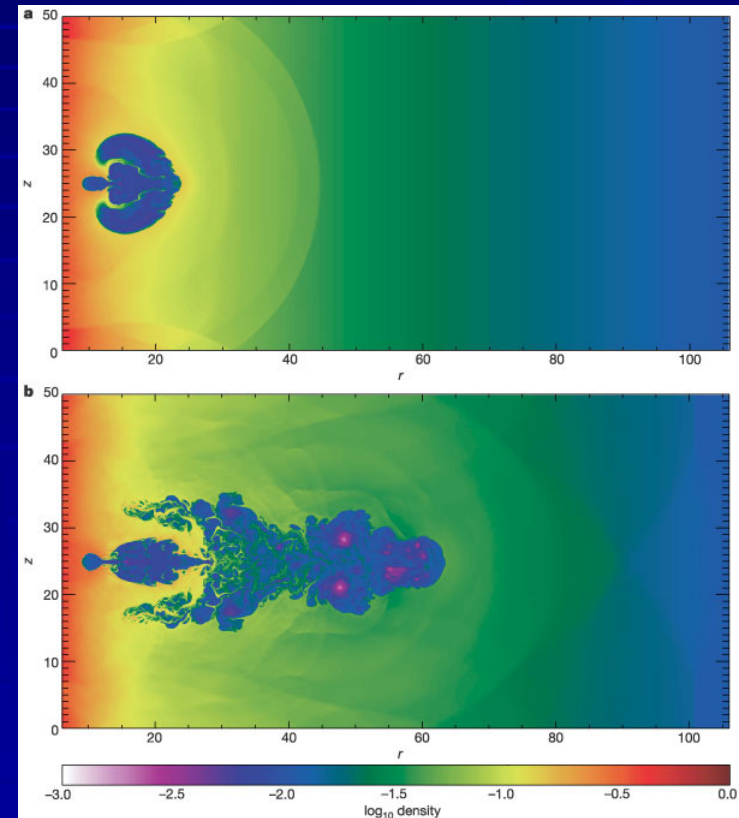
カラー: 温度
等高線: X線表面輝度

バブルのsimulations: バブルをどうやって長生きさせるか



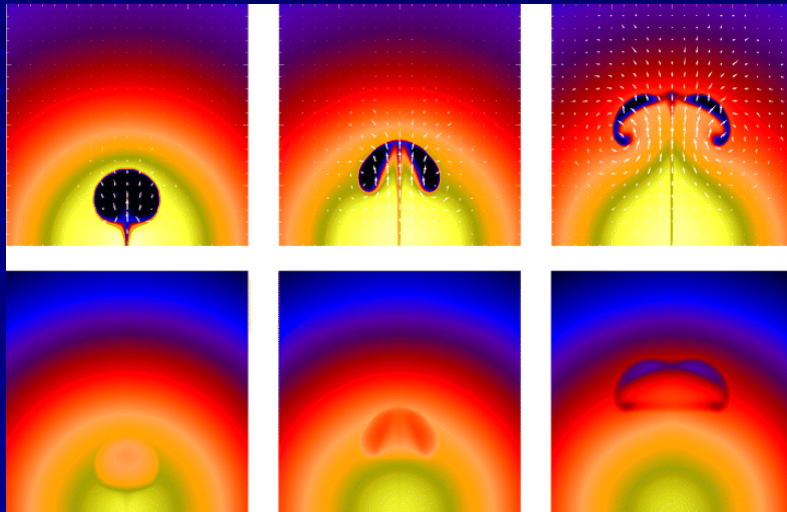
Abell 2597
McNamara et al. 2001

- AGNから離れたところのバブル、低周波電波でしか光っていないバブルが見つかる——>
バブルは簡単には周囲と混ざらない
- 流体シミュレーション(粘性なし)——>
すぐにK-H不安定性で壊れてしまう



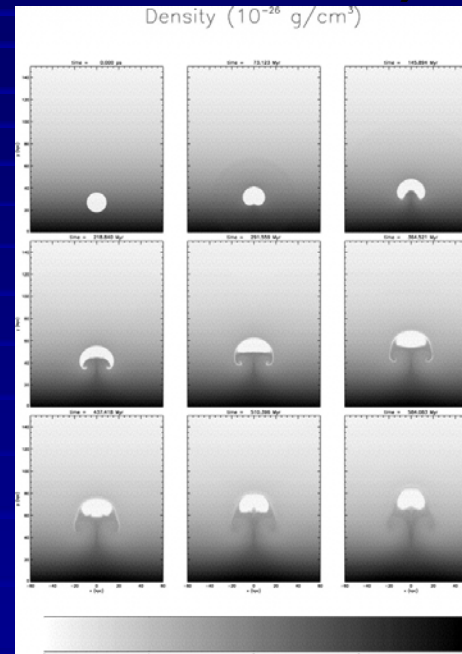
Bruggen & Kaiser (2002)

バブルをどうやって長生きさせるか (粘性、磁場、etc)

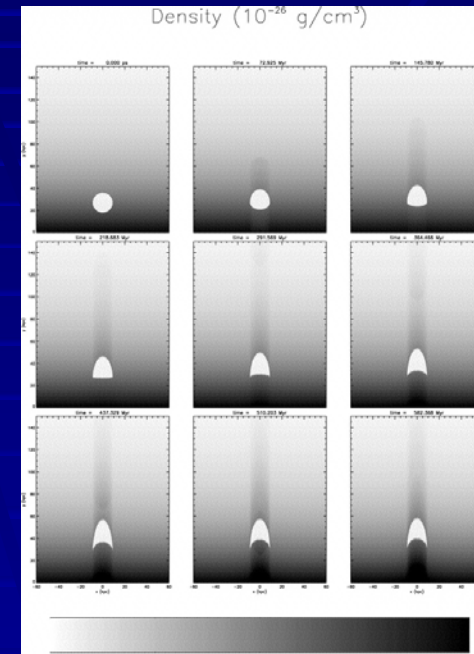


上段: 密度分布
下段: X線イメージ
Christopher et al. (2005)

$Re \doteq 250$
粘性係数はSpitzerの約0.25倍

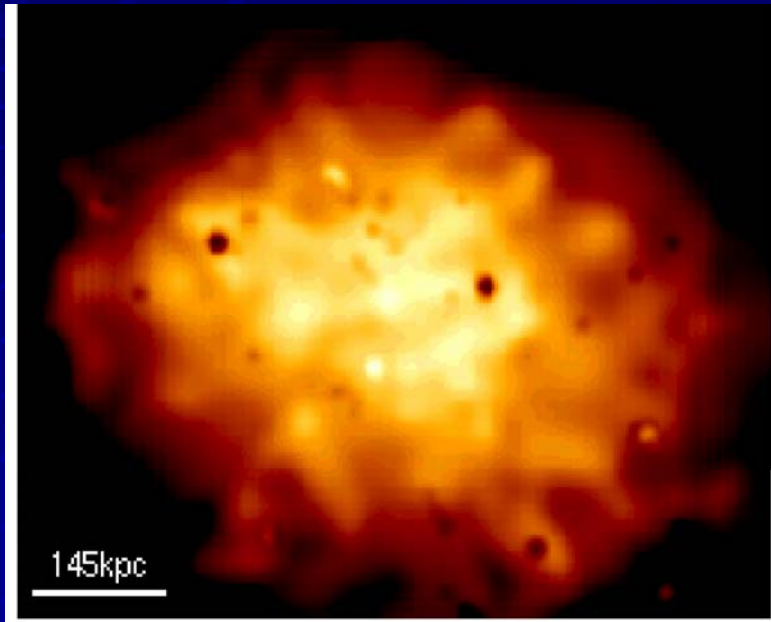


背景磁場が水平
($\beta = 462$)
Robinson et al. (2004)



背景磁場が垂直
($\beta = 0.019$)

銀河団内の乱流



- 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
(Schuecker et al. 2004)
- 次世代のX線分光では充分観測可能 (NeXT)

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

Turbulent Acceleration Model: Resonant scattering by Alfvén waves

- Resonant Scattering condition:

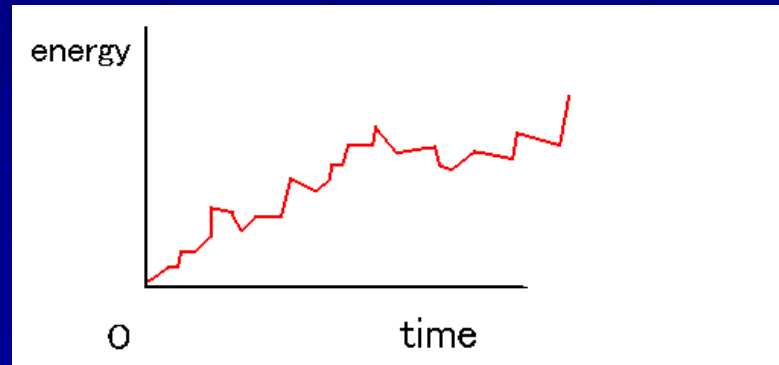
$$\omega_A = kv_e + \Omega_e$$

電子は**位相が lock された状態**で波と相互作用。 $v \doteq c$ とすると、

$$k = (r_l \gamma)^{-1}$$

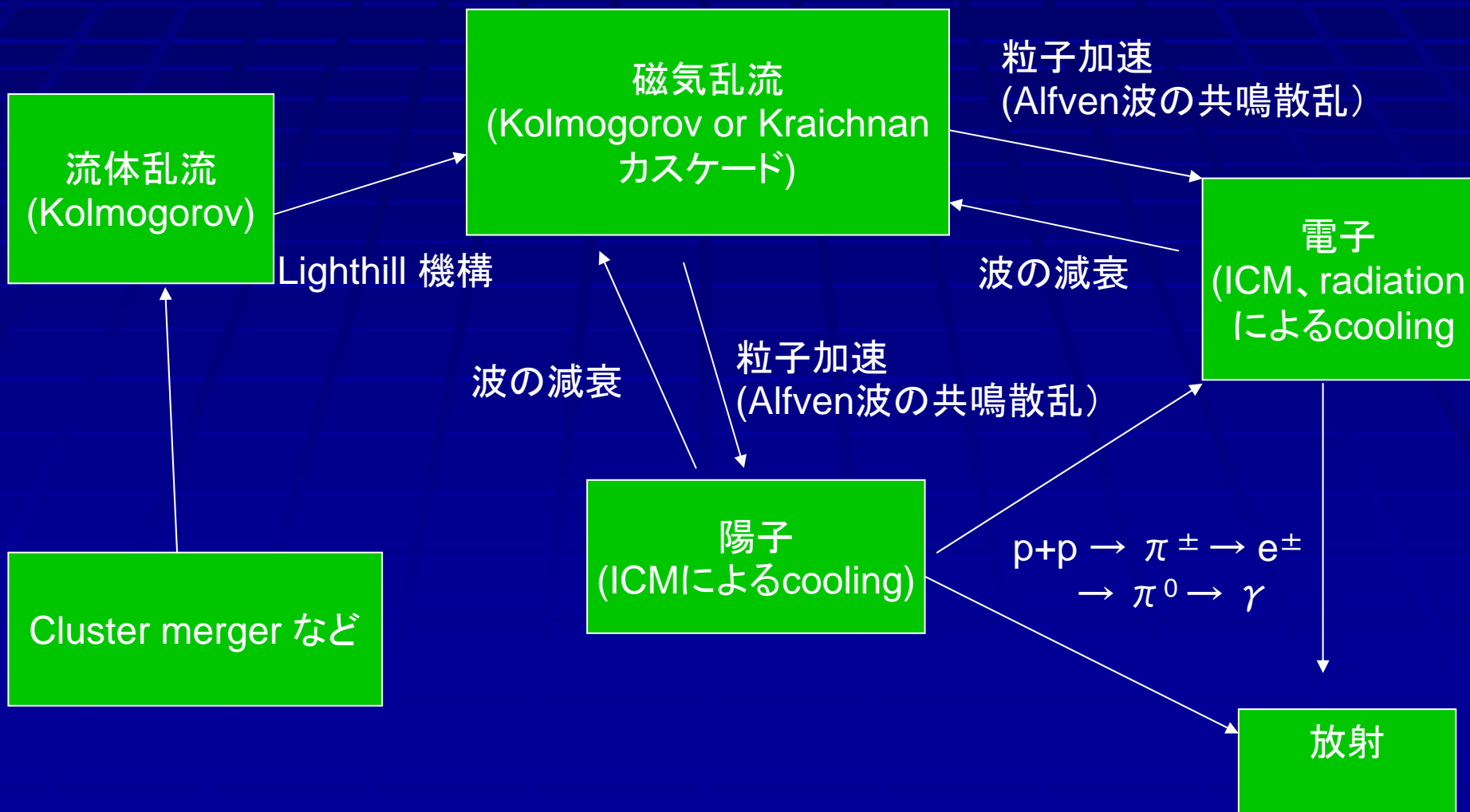
波が連続スペクトルを持っていれば、電子は連続的に加速される。

- 散乱過程は**運動量空間での random walk プロセス**とみなせる。

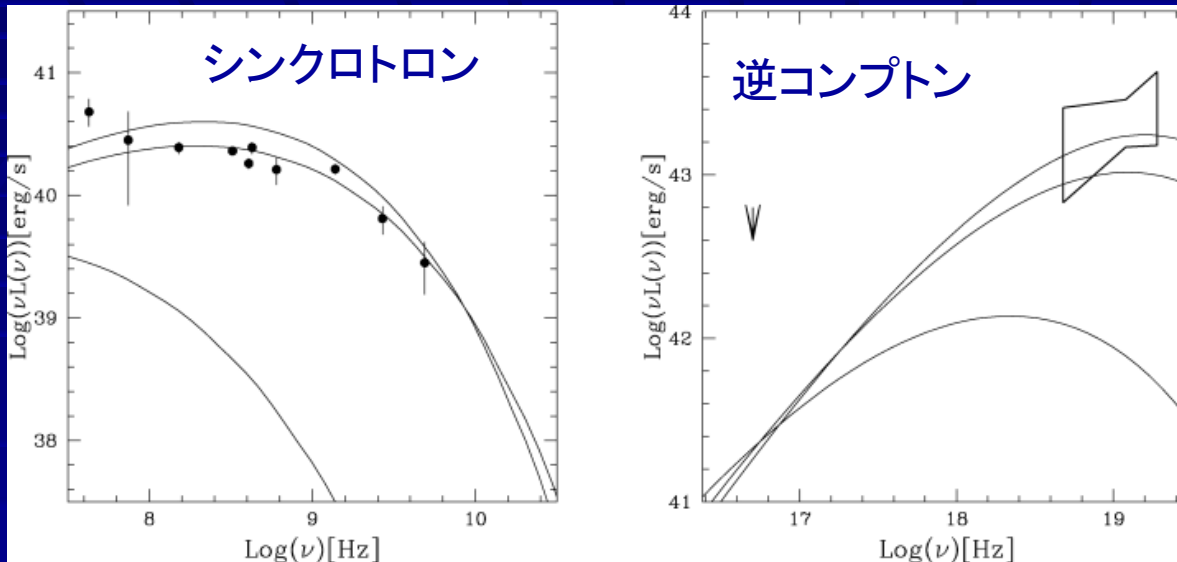


- Fokker-Planck equation を使って定式化

磁気乱流による粒子加速 (Brunetti et al. 2004 など)



磁気乱流による粒子加速



Brunetti et al. (2004)

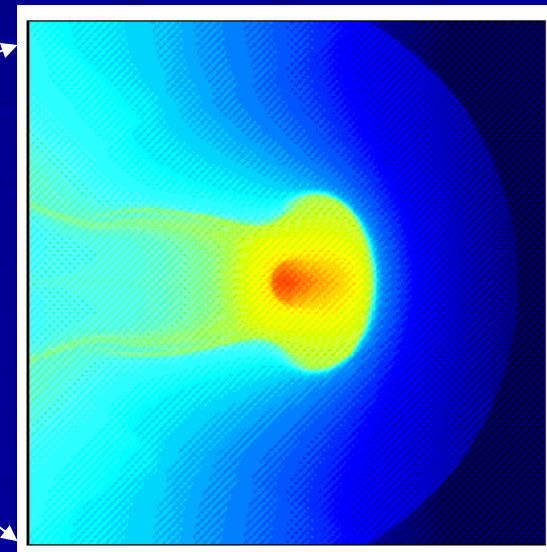
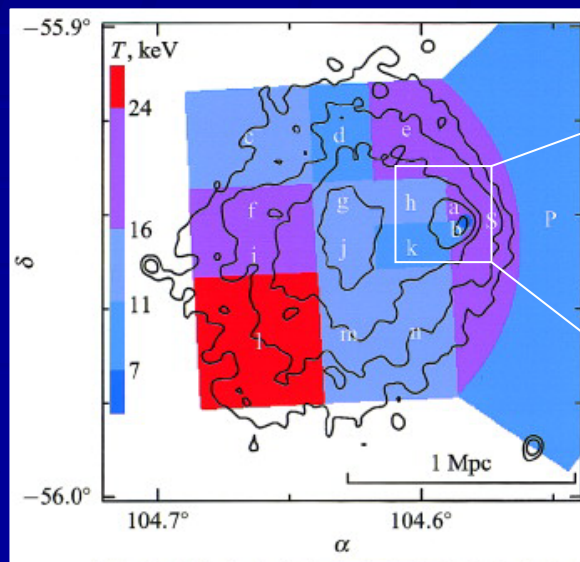
Coma との比較

$E_e = 5 \times 10^{-5} E_{th}$

- Alfvén波による乱流再加速モデルはそれなりに現象をうまく説明、ただし非熱的陽子が少ないことが必要
- $\gamma_e \geq 10^4$ を説明するには $E_p < 0.03 E_{th}$
- ガンマ線の結果によっては葬り去られる可能性も

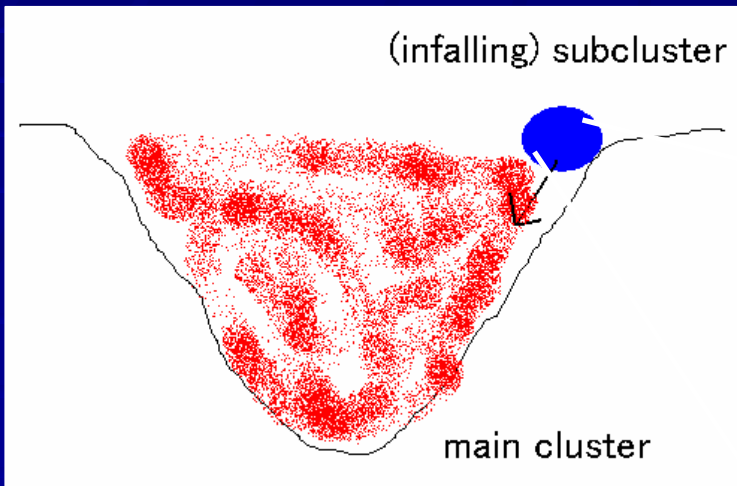
どこでどうやって乱流がおきているのか？ (Takizawa 2005)

- 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、具体的に何が起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
- **Moving substructure の周辺に焦点を定めて、高空間分解能流体 simulation を行う。**



Numerical Method

- 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。



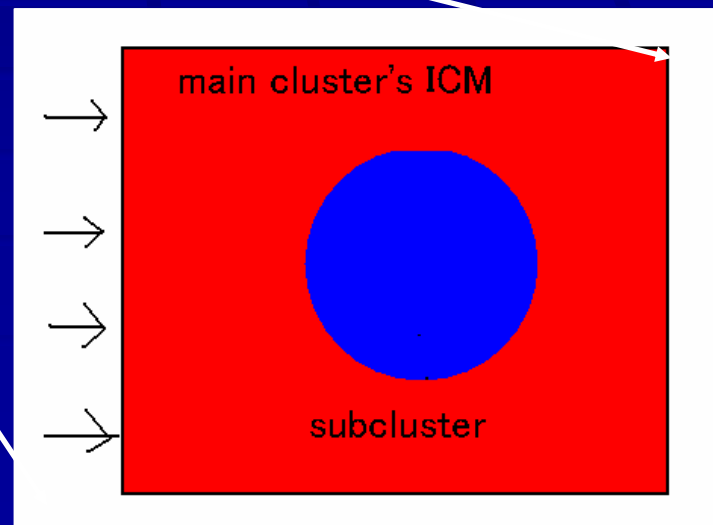
Simulation Box:

$800\text{kpc} \times 800\text{kpc} \times 800\text{kpc}$

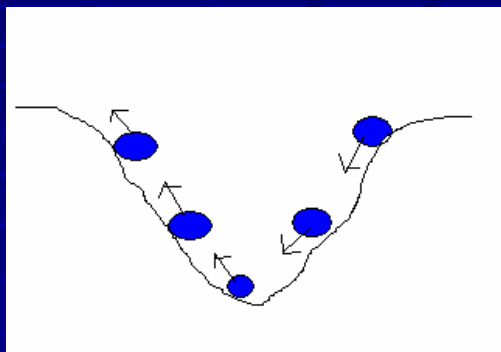
Mesh Size:

$400 \times 400 \times 400$

VPP5000@NAOJ (48PE, 4-8h)



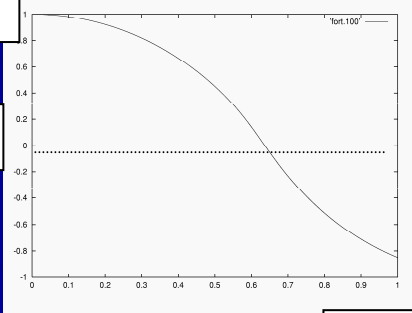
Radial infall model: Results (density at $z=0$ surface)



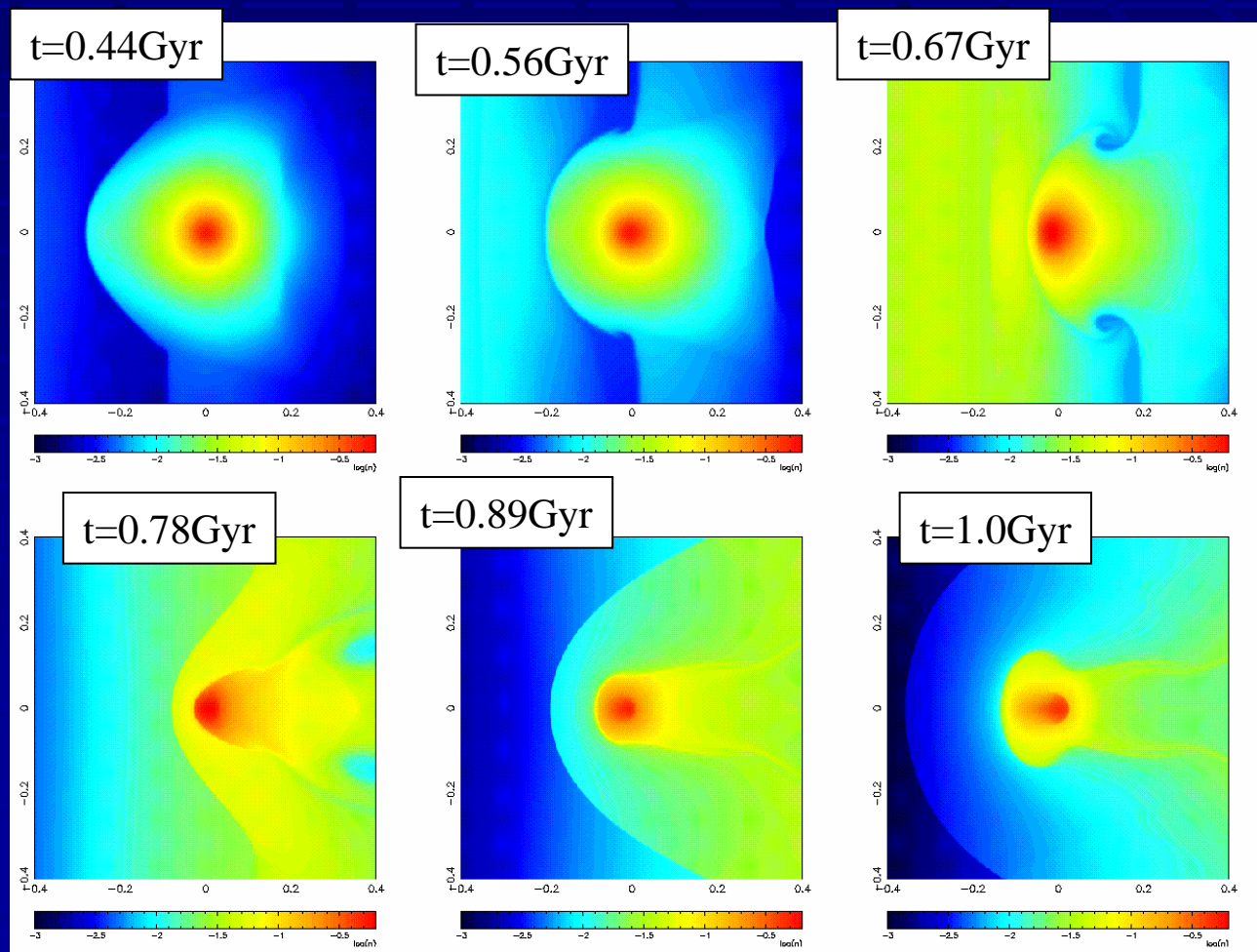
Time evolution of the subcluster's position in the main cluster

1Mpc

0

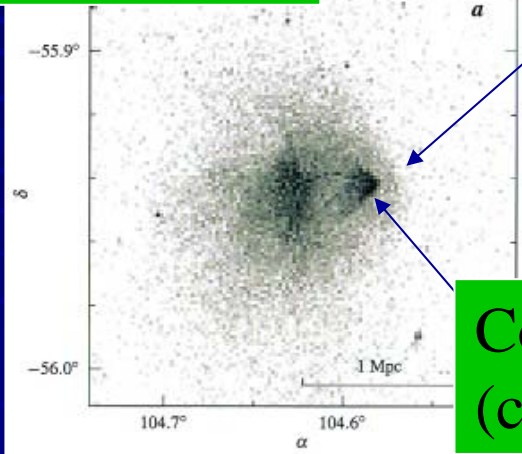


1Gyr



1E 0657-56: "Bullet" cluster

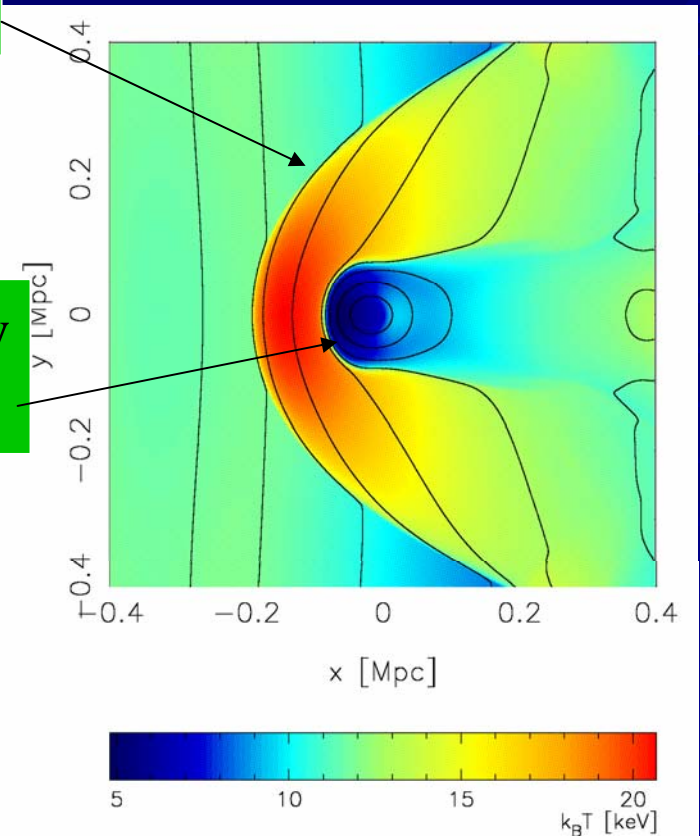
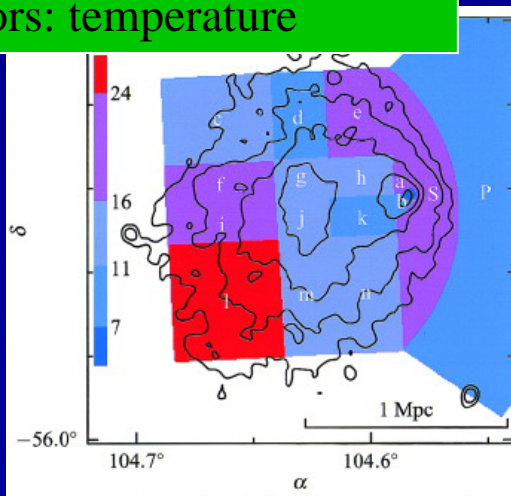
X-ray brightness



bow shock

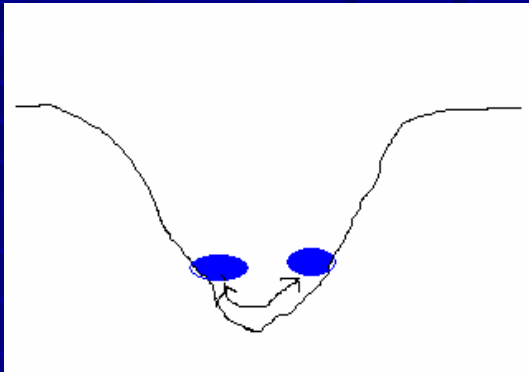
Contact discontinuity
(cold front)

Contours: X-ray brightness
Colors: temperature

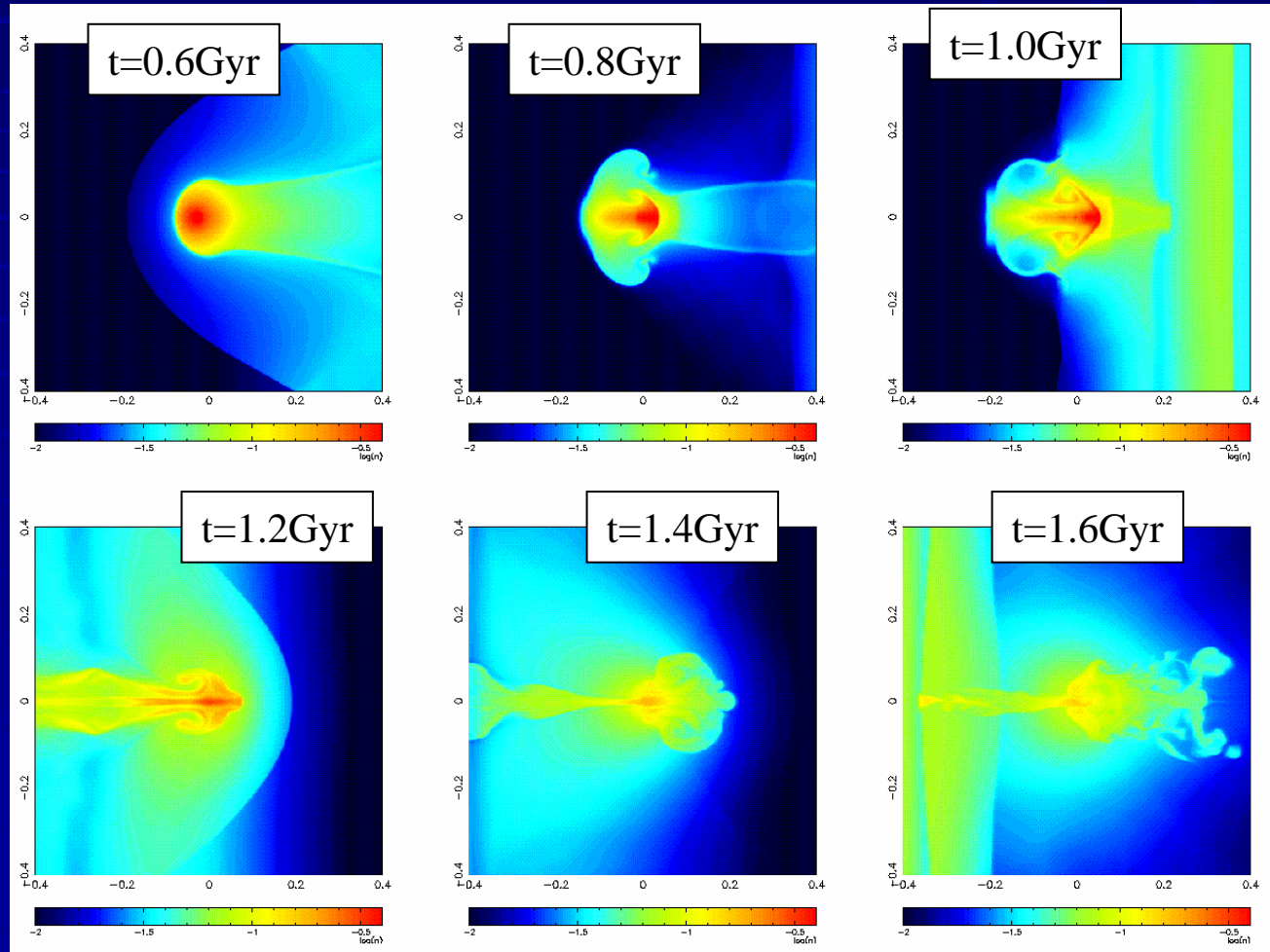
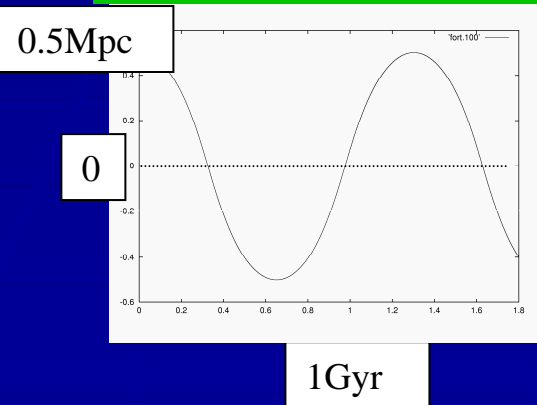


X-ray image made from the simulation data
Contours: X-ray brightness
Colors: emissivity-weighted temperature

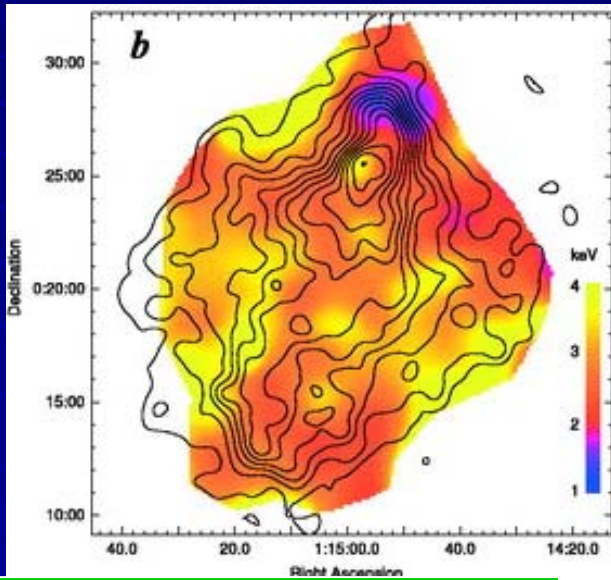
Sloshing model: Results (density at $z=0$ surface)



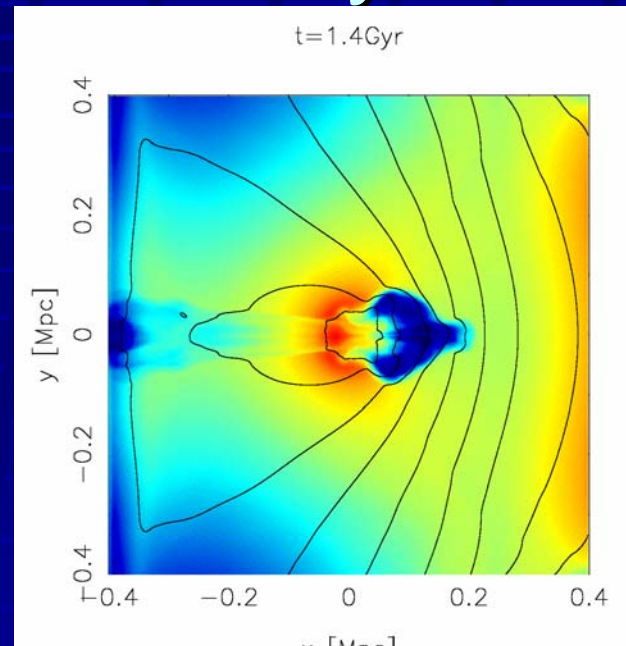
Time evolution of the subcluster's position in the main cluster



A168: Turbulence is generating through RT instability ?

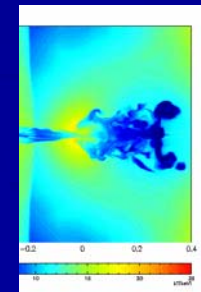
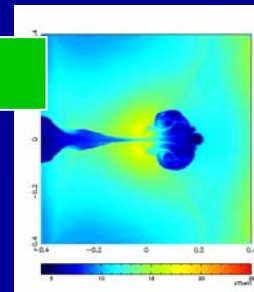


A168
Contours: X-ray brightness
Colors: temperature
Hallman & Markevitch(2004)



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

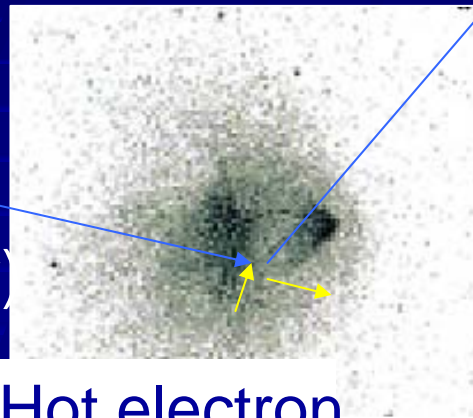
temperature



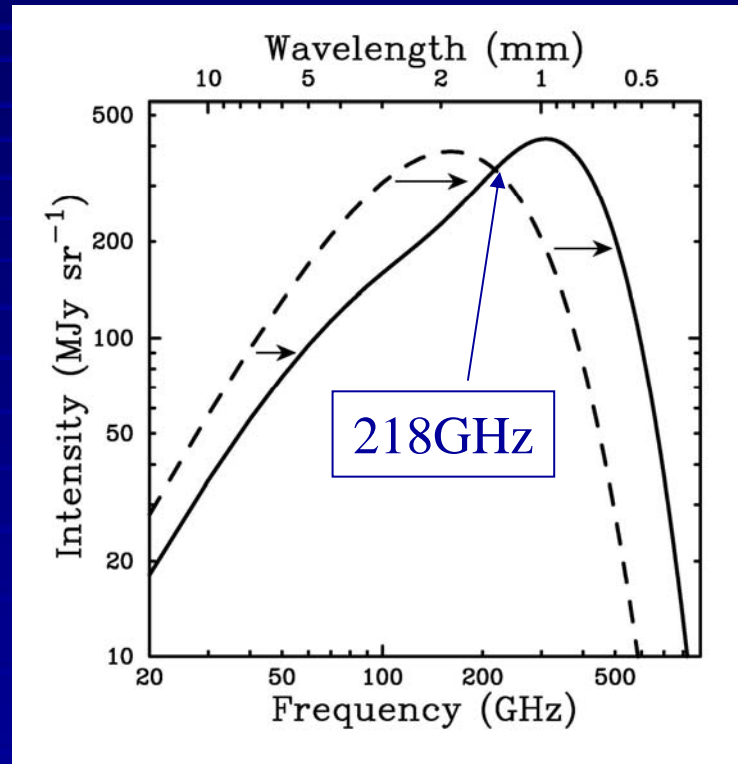
Sunyaev-Zel'dovich 効果

逆コンプトン散乱

CMB光子
(2.7K
black body)



Hot electron
(10^7 - 8 K)



銀河団(など)の高温ガスによる逆コンプトン散乱で
Cosmic Microwave Background (CMB) のスペクトルが変形。

- ミリ波帯(R-J側)ではdecrement
- サブミリ波帯(Wein側)ではincrement

(Thermal) SZ vs X-ray

$$I_X \propto \int n_e^2 T_e^{1/2} dl$$

$$I_{SZ} \propto \int n_e T_e dl$$

X線は密度構造に、SZは温度構造によりsensitive。

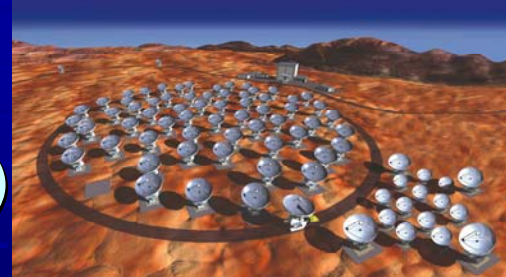
$$I_X \propto (1+z)^{-4}$$

$$I_{SZ} \propto (1+z)^0 \quad (U_{CMB} \propto (1+z)^4 \text{ ため})$$

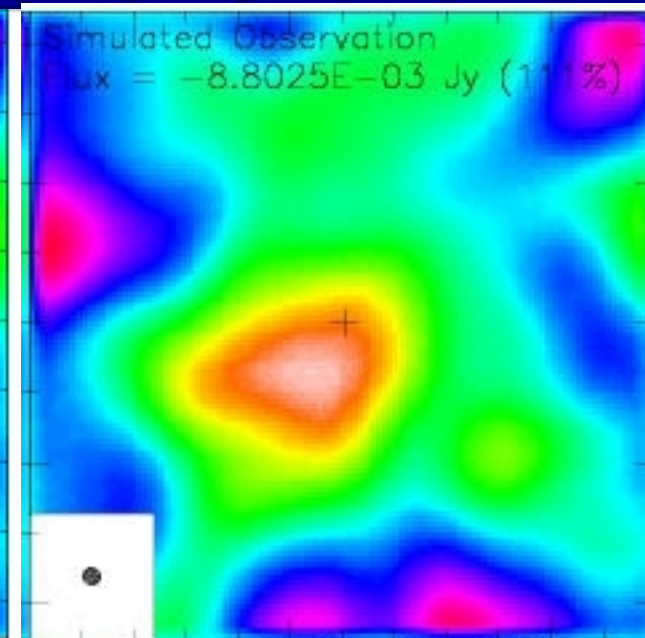
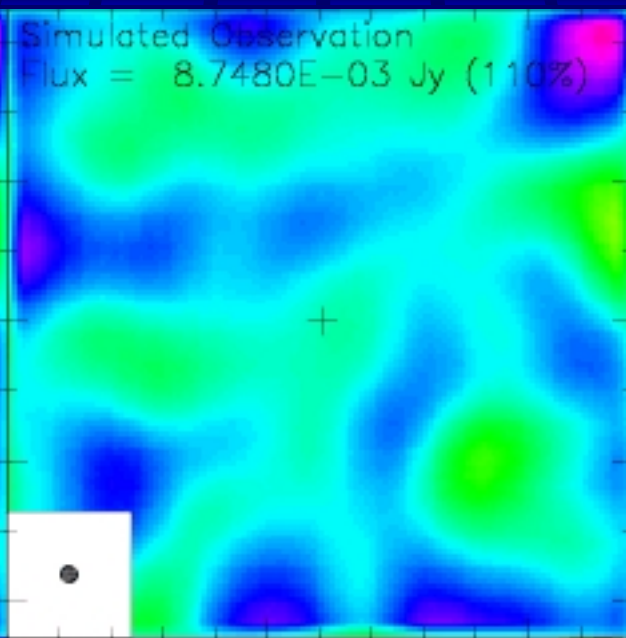
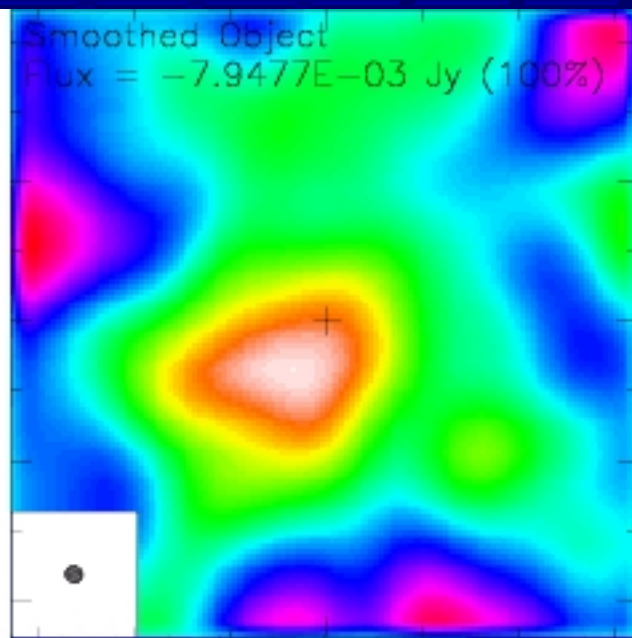
high z object にはSZが有利

ALMAで見えるか？

by GILDAS (Tsutsumi et al. 2005)



90''



INPUT based on
150GHz data (13'' FWHM)
of RX J147.5-1145

ALMA 64 arrays
longest baseline 150m
13 mosaics, 18 min

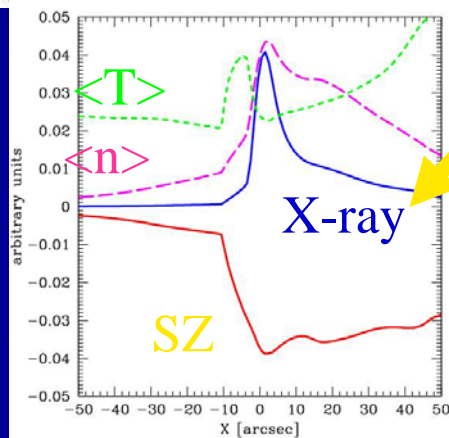
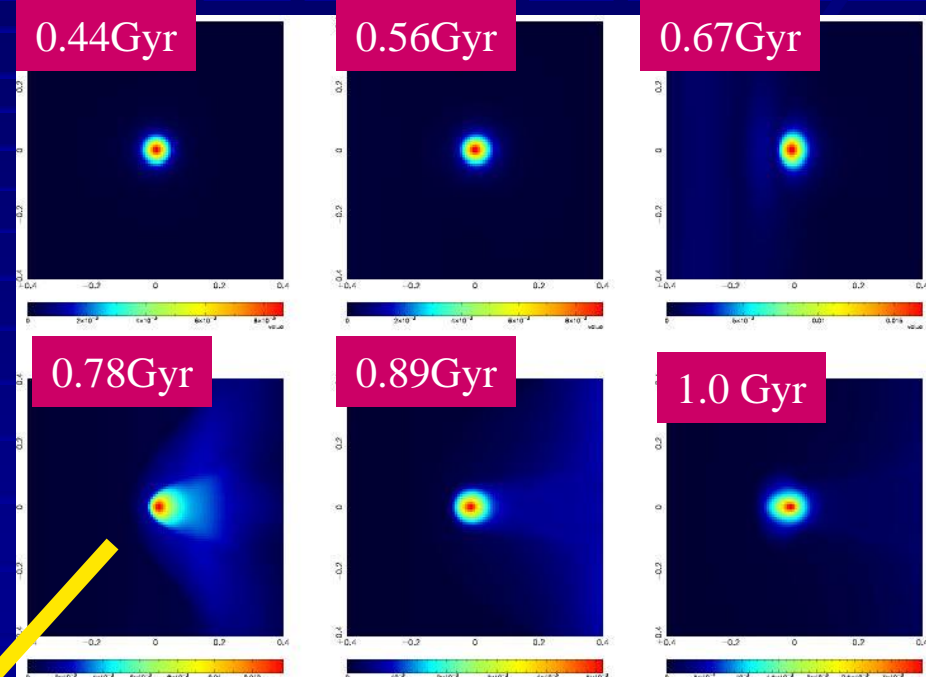
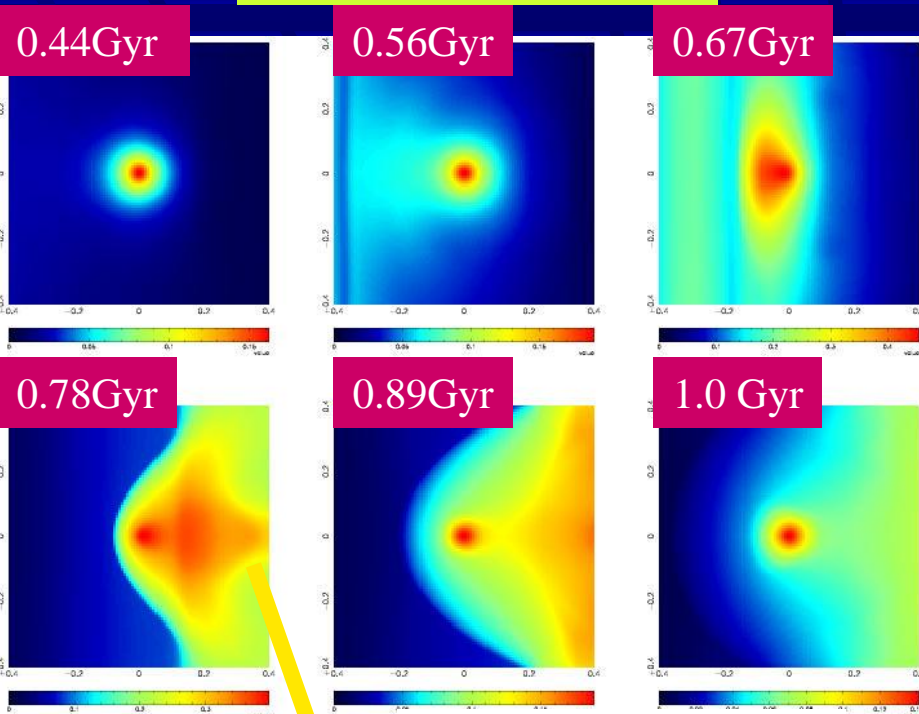
with ACA
longest baseline 30m
13 mosaics, 72 min

$1\sigma = 0.03$ mJy/beam
peak = -0.22 mJy/beam
FWHM = 2.4''

Simulations による評価: SZ vs X-ray

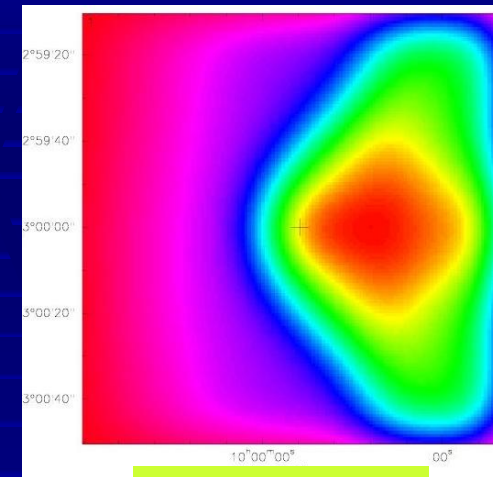
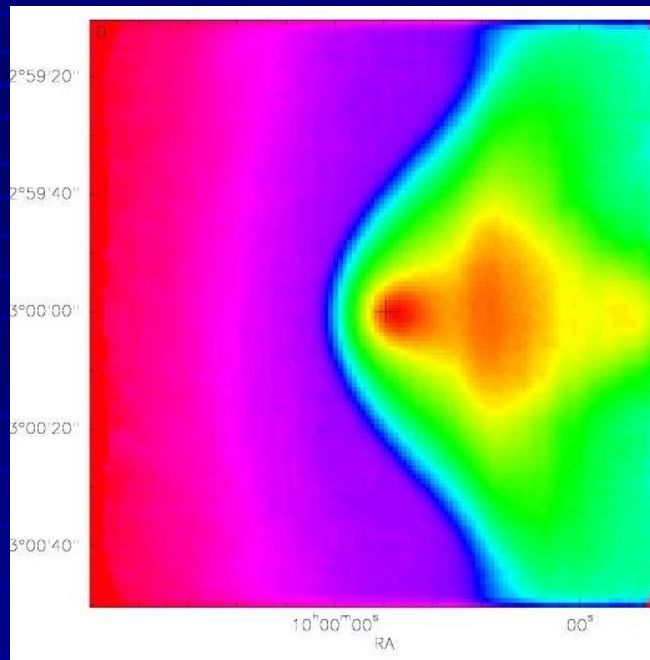
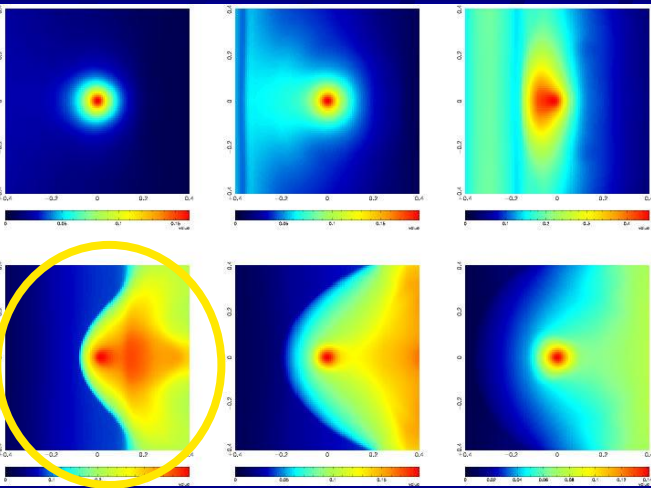
$$I_{SZ} \propto \int n_e T_e dl$$

$$I_X \propto \int n_e^2 T_e^{1/2} dl$$

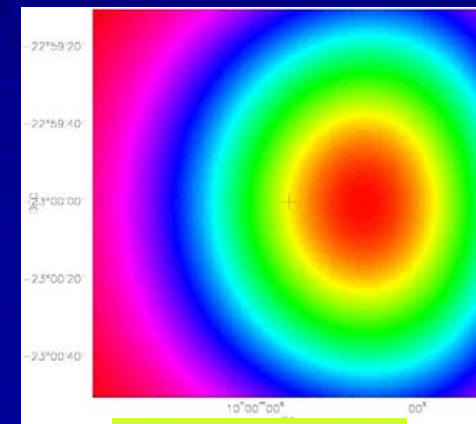


SZE image is highly disturbed,
while X-ray remains compact.
⇒ better tracer of shock front

GILDAS Simulations (Yamada et al. in preparation)



14'' FWHM



60'' FWHM

INPUT:

Snapshot from cluster merger simulations (Takizawa 2005).
Place it at $z=1$, Dec= -23 deg.

Output:

ALMA 64 arrays + ACA
13 field mosaic

FWHM=2.4'' @ 150GHz
 $1\sigma = 0.03$ mJy/beam
peak = -0.22 mJy/beam

まとめ

- 銀河団での衝撃波
 - Accretion shock (非常に高マッハ数、観測的には見つかってない。TeV γ で見えるかも)
 - Merger shock (低マッハ数 1~3、X線で少数見えている、SZのほうが見つけやすいかも)
 - 電波銀河によるもの(非熱的粒子も供給、例は少ない)
- バブルは長生き(粘性? 磁場?)
- 乱流加速(非熱的陽子の存在量が鍵)
- Moving substructure によるcold front と乱流の生成
- 銀河団内の衝撃波の検出にSZ効果は有望

以下は予備スライド

Acceleration processes in the intracluster space

- Shock acceleration
 - Power-law spectra
 - $E_{\max} \sim 10^{13}$ eV (for electrons, $t_{\text{accel}} \sim t_{\text{cool}}$)
 $\sim 10^{19}$ eV (for protons, $t_{\text{accel}} \sim t_{\text{age}}$)
- Turbulent acceleration
 - Resonant scattering of random Alfvén waves
 $k = (r_l \gamma)^{-1}$

Random walk process in momentum space

E_{\max} depends on Alfvén wave power spectra

Turbulent Acceleration Model: Model Description

- One-zone, steady
- $P(k) = b(B_0^2/8\pi)(w-1)k_0^{-1}(k/k_0)^{-w}$ ($k_0 < k$)
 - b: (乱流磁場のエネルギー密度 / 大局的な磁場のエネルギー密度)
 - w: べき指数
 - k_0 : 5GHzの電波を出す電子と共鳴する波長 ($\sim 10^{-14}\text{cm}^{-1}$)

Fokker-Planck Equation

$$\frac{\partial N}{\partial t} = \frac{\partial^2}{\partial \gamma^2} [DN] + \frac{\partial}{\partial \gamma} [\{b(\gamma) - A(\gamma)\}N] + Q(\gamma) = 0,$$

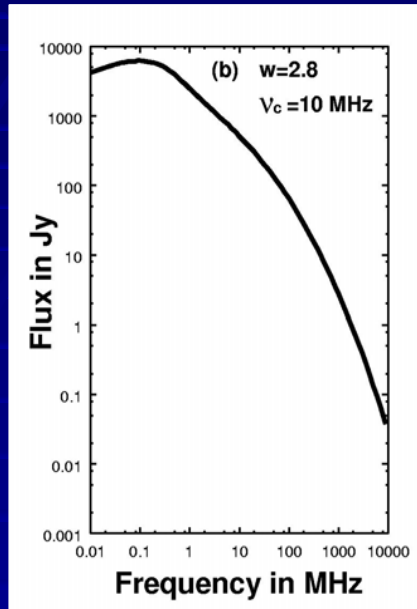
$b(\gamma) = b_1 \gamma^2$: Inverse Compton and synchrotron loss rate

$A(\gamma) = (2D/\gamma) + (\partial D/\partial \gamma) \propto \gamma^{w-1}$: systematic acceleration rate

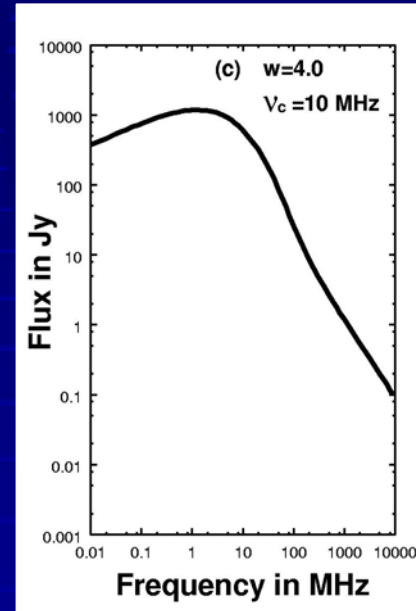
$Q(\gamma) = \delta(\gamma - \gamma_0)$: source term, $\gamma_0 \sim 100\text{MeV}$

- P(k) をあてて、定常解 N(γ)を得る。

Turbulent Acceleration Model: Results (Radio Spectra)



$w=2.8$



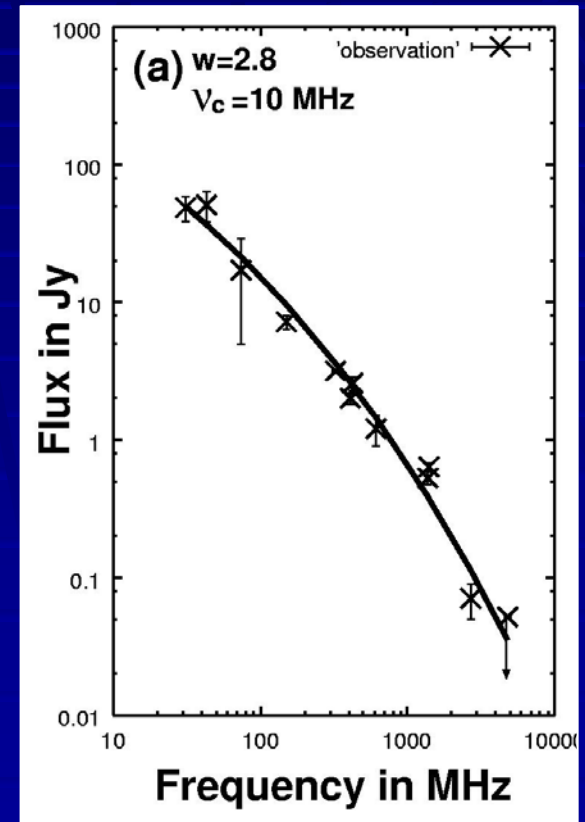
$w=4.0$

- 冷却: $b(\gamma) \propto \gamma^2$, 加速: $A(\gamma) \propto \gamma^{w-1}$
- $w < 3 \rightarrow$ 凸形スペクトル
 - 低エネルギー側で加速優勢、高エネルギー側で冷却優勢
- $w > 3 \rightarrow$ 凹形スペクトル
 - 低エネルギー側で冷却優勢、高エネルギー側で加速優勢

Turbulent Acceleration

Model: Comparison with Coma

- Best fit model for Coma
 - $w=2.8$
 - Steeper than what is expected from MHD turbulence theory (cf, Kolmogolov: $k^{-3/2}$, Kraichnan: $k^{-5/3}$)
 - This suggests particle acceleration affects power spectrum of random Alfvén waves.
- $N(E_e)$ has exponential cut-off around $E_e \sim 10$ GeV.



Radio spectrum of the best fit model for Coma (Ohno, Takizawa & Shibata 2002)

Shock加速と乱流加速の関係 は？

- Shock 加速：
 - 長所：(乱流加速と比べると)加速時間が短い
 - 短所：影響は局所的。電波放射の空間分布の説明は困難。
- 乱流加速：
 - 長所：電波放射の空間分布、電波スペクトル
 - 短所：数100MeVからでないとはGeVまで加速できない。
- Shockで加速——>冷える——>
冷え止まる($\sim 100\text{MeV}$: $t_{\text{cool}} \sim \text{a few Gyr}$)
——>乱流で加速

Model

- メインクラスター、サブクラスターともに重力ポテンシャルはKingモデル(に対応するもの)、ICMの分布は等温 β モデルを仮定

DM密度分布

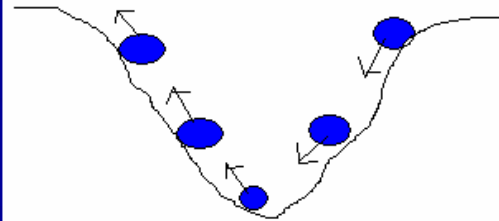
$$\rho_{\text{DM}}(r) = \rho_{\text{DM},0} \left\{ 1 + \left(\frac{r}{r_c} \right)^2 \right\}^{-\frac{3}{2}}$$

ICM密度分布

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

- メインクラスター $r_c=200$ kpc, $\beta=0.8$, $M=8.57 \times 10^{14}$ solar mass
- サブクラスター $r_c=40$ kpc, $\beta=0.8$, $M=1.43 \times 10^{14}$ solar mass

Radial infall model

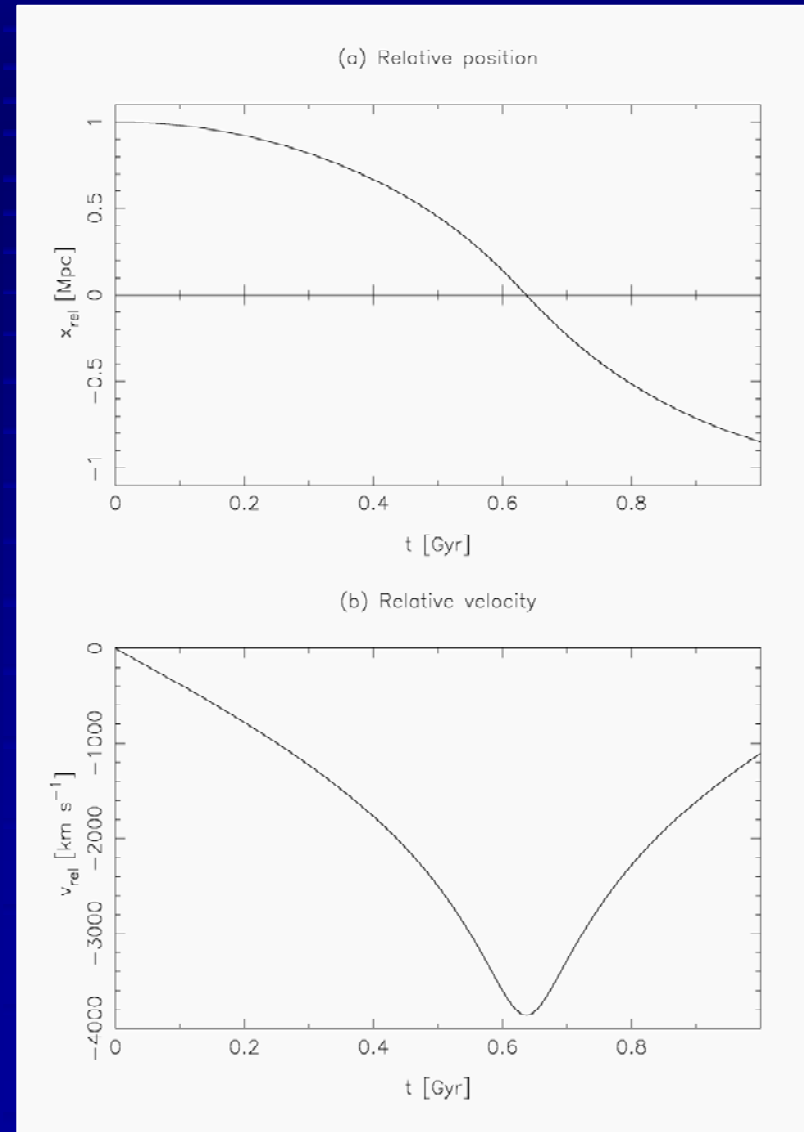


Sloshing model



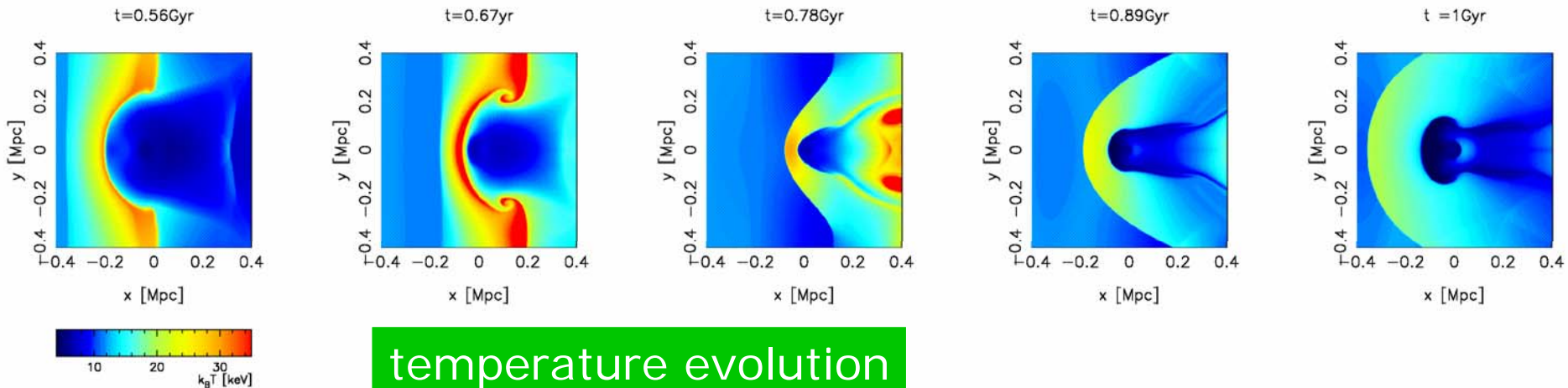
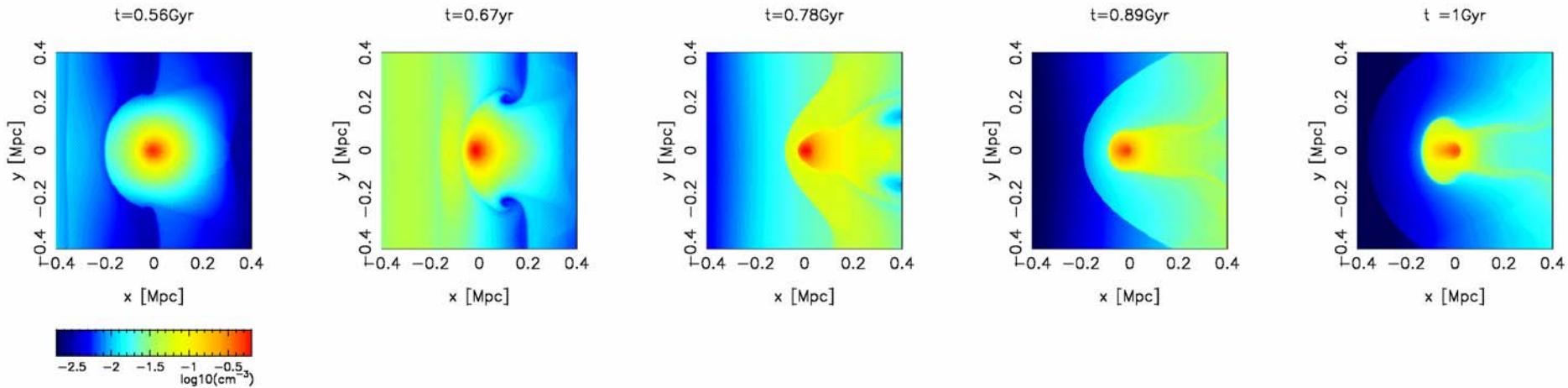
Radial infall model

- Initial position of the subcluster is 1 Mpc away from the main cluster's center
- Simple radial infall



Radial infall model: Results(ρ & T on the $z=0$ surface)

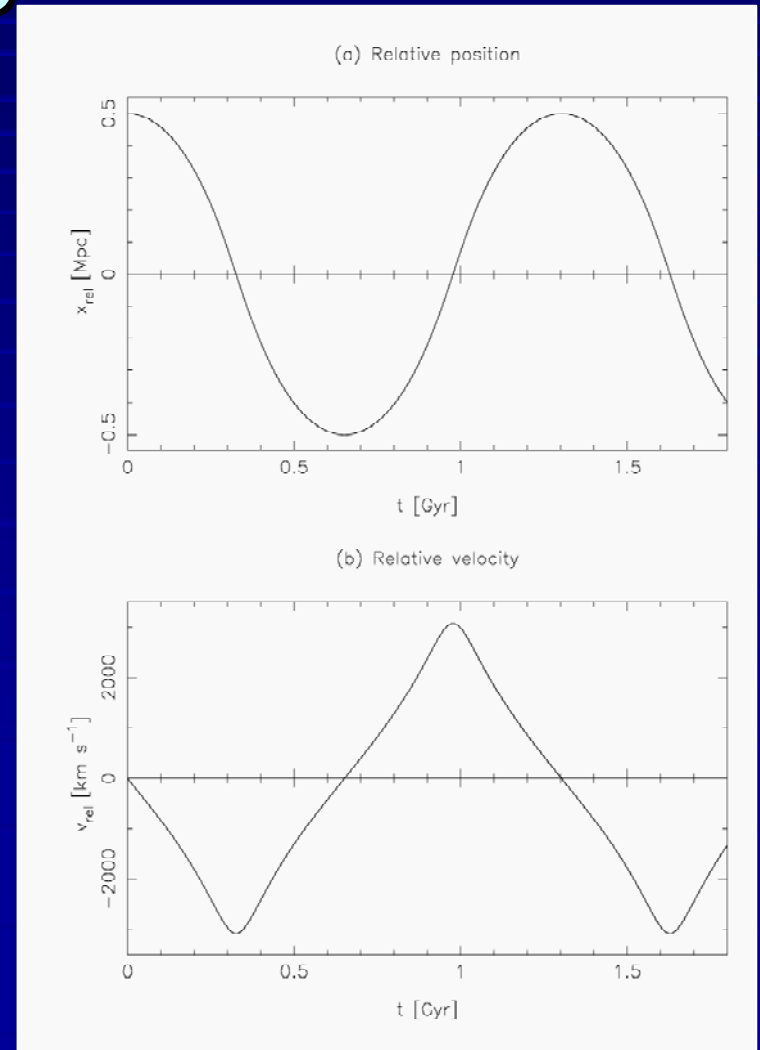
Density evolution



temperature evolution

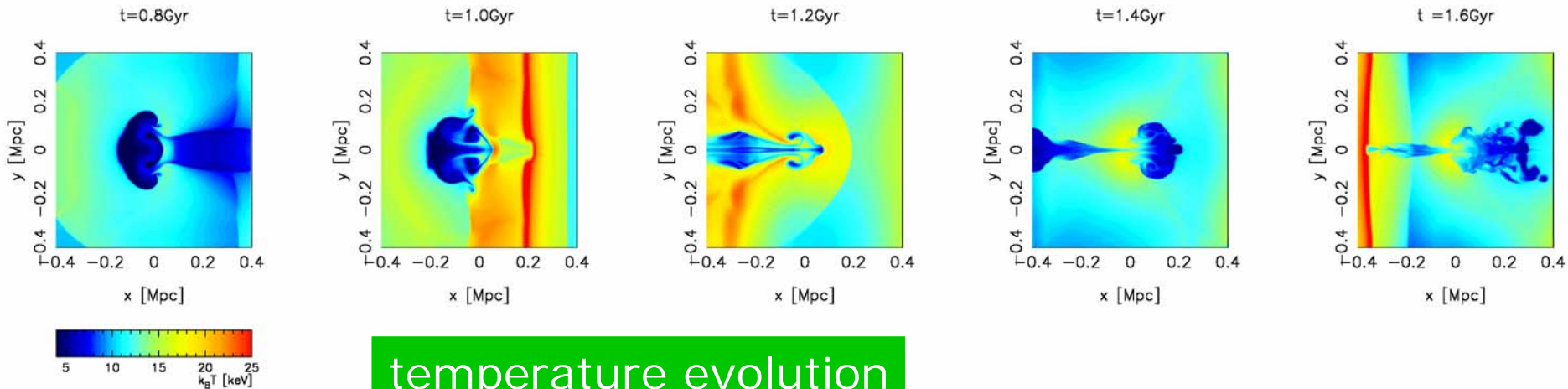
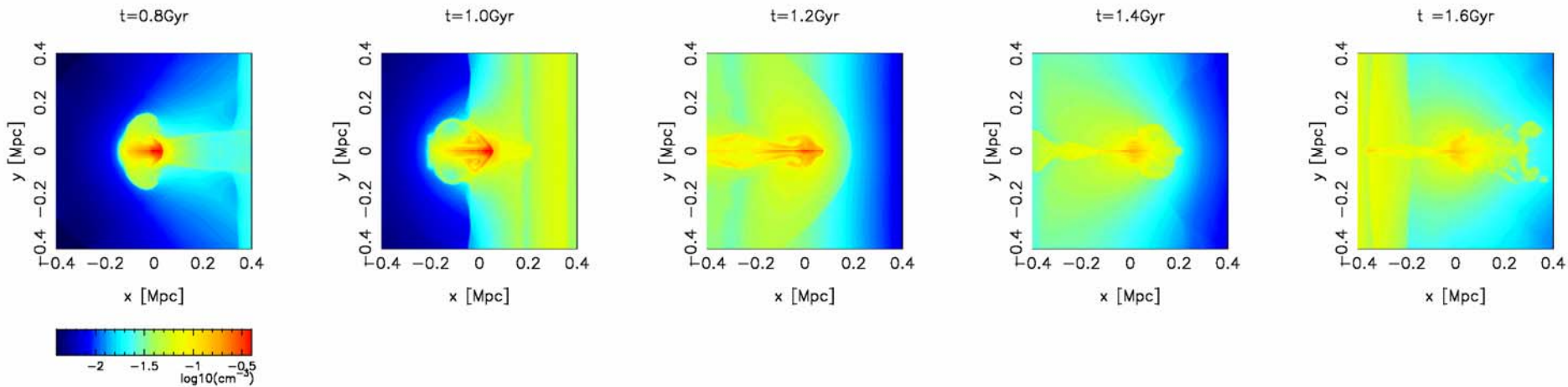
Sloshing model

- Initial position of the subcluster is 0.5 Mpc away from the main cluster's center.
- radial oscillation around the main cluster center



Sloshing model: Results(ρ & T on the $z=0$ surface)

Density evolution



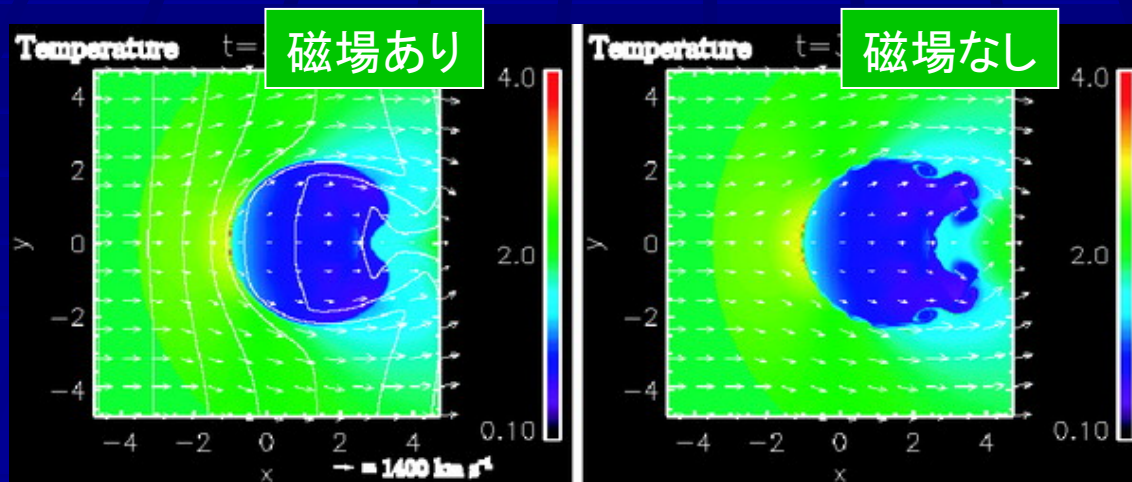
temperature evolution

Discussion on turbulence

- 外から銀河団に落ちてきたサブストラクチャーはどうなるか？ (radial infall model的な状況)
 - ラムプレッシャーによって外側のガスが剥ぎ取られる(流れのパターンは層流的)。
 - 力学的摩擦等により中心付近へ落ち込む
 - > sloshing model的な状況へ
 - Kelvin-Helmholtz不安定性やRayleigh-Taylor不安定性の成長により破壊され、周囲と混合(流れのパターンは乱流的)

磁場についてのコメント

- 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。



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