

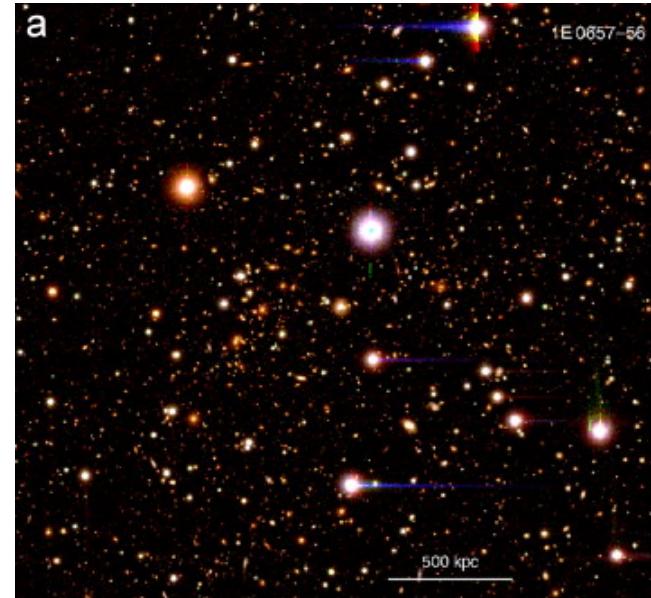
# 多波長で探る銀河団の 高エネルギー現象

東邦大学理学部物理学科  
北山 哲

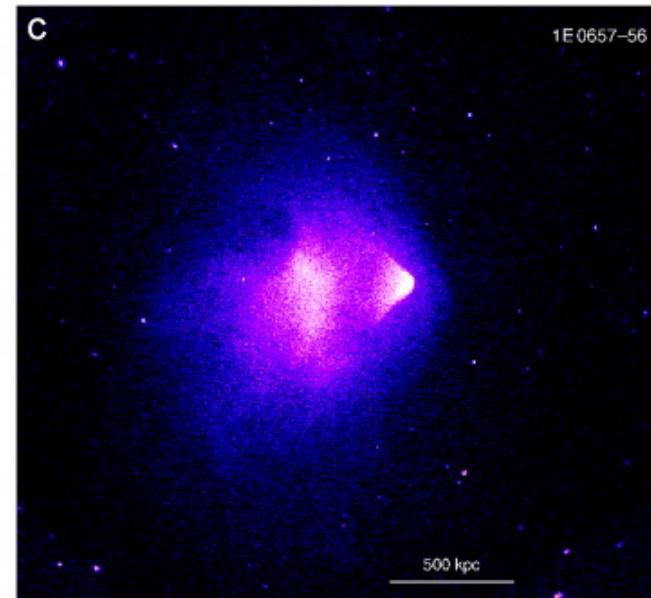
# 多波長で見た銀河団

1E0657-56 at  $z=0.3$  (Markevitch & Vikhlinin 2007)

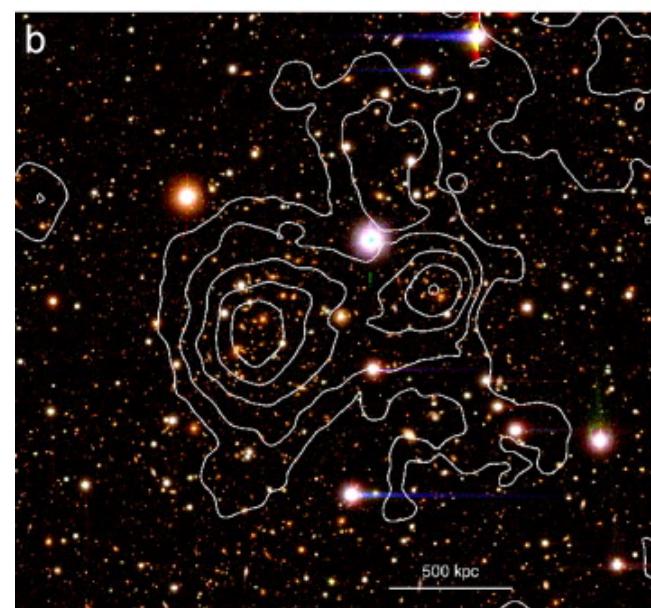
optical  
銀河・星  
 $\sim 5\%$



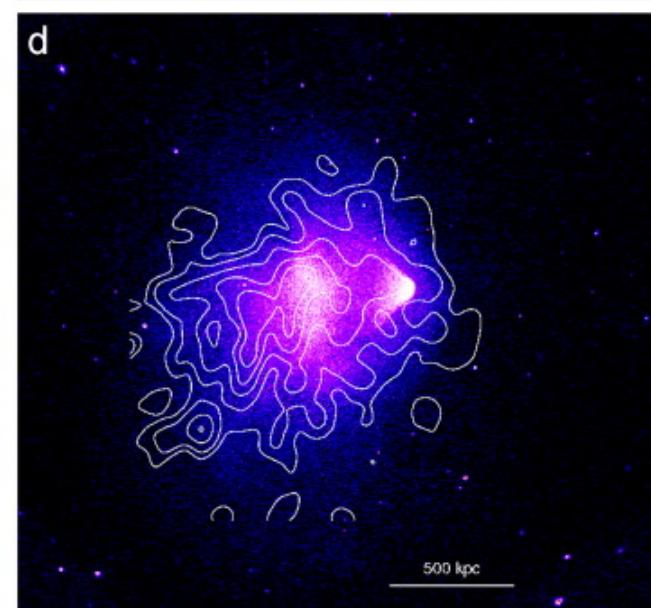
X-ray  
熱的ガス  
 $\sim 15\%$



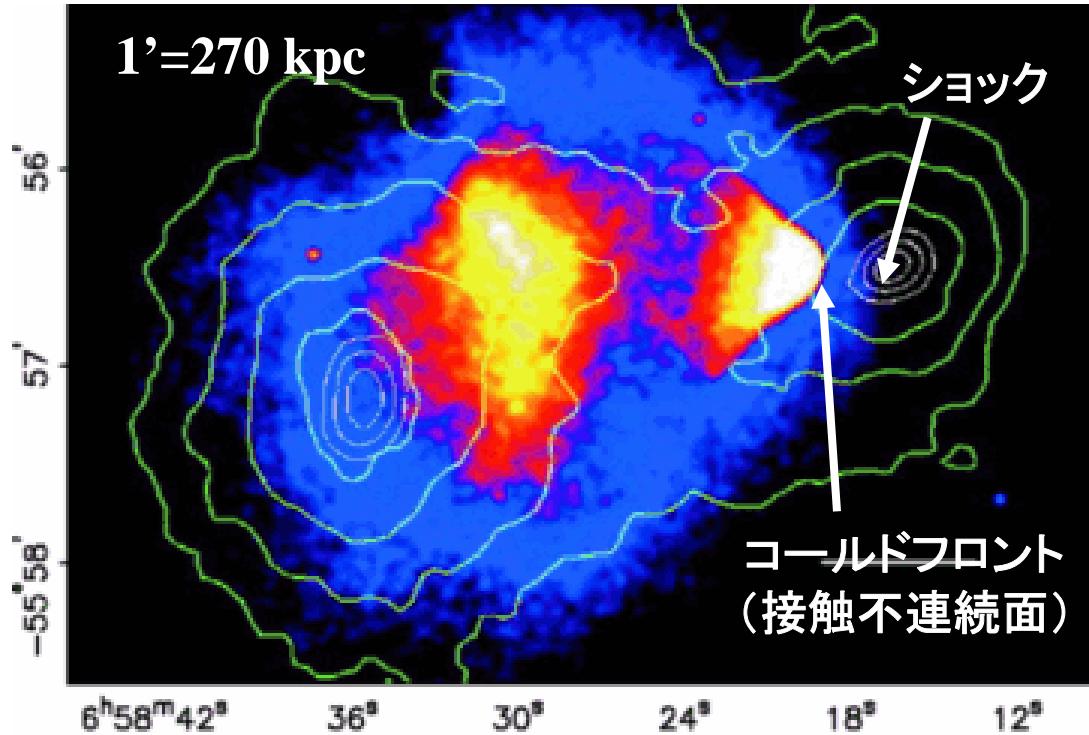
lensing  
contour  
ダーク  
マター  
 $\sim 80\%$



Radio  
contour  
非熱的ガス  
?



# 激しい衝突: Bullet cluster at z=0.3



1E0657-56 (Clowe+08)

カラー: X-ray (collisional gas)

等高線: weak lensing (collisionless DM)

- ・DM とガスが分離:  $20'' = 100\text{ kpc}$

$$\sigma/m < 1 \sim 5 \text{ cm}^2/\text{g}$$

(Markevitch et al. 2004)

- ・Rankine-Hugoniot condition:

$$\text{Mach number } \sim 3.0 \quad (\gamma = 5/3)$$

$$V_{\text{preshock}} \sim 4700 \text{ km/s}$$

$$V_{\text{postshock}} \sim 1600 \text{ km/s}$$

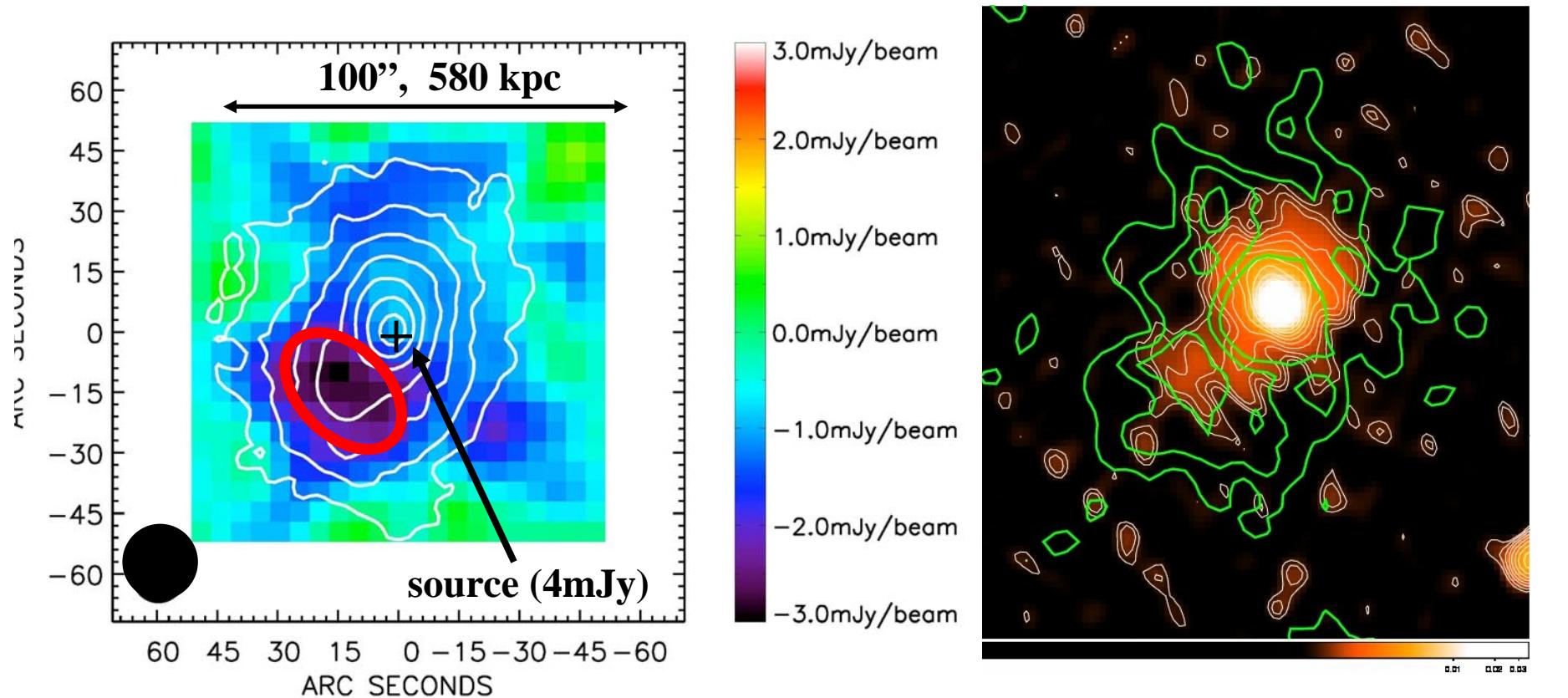
(Markevitch & Vikhlinin 2007)

$$\text{Kinetic energy } \sim 10^{64} \text{ erg}$$

$$\text{if } M_{\text{clump}} \sim 10^{14} M_{\odot}$$

- \* X線( $\propto n^2 T^{1/2}$ )でのショック面  
(圧力ギャップ)同定は困難。  
Chandraで数例のみ。

# 高温ガス: RX J1347.5-1145 at z=0.45

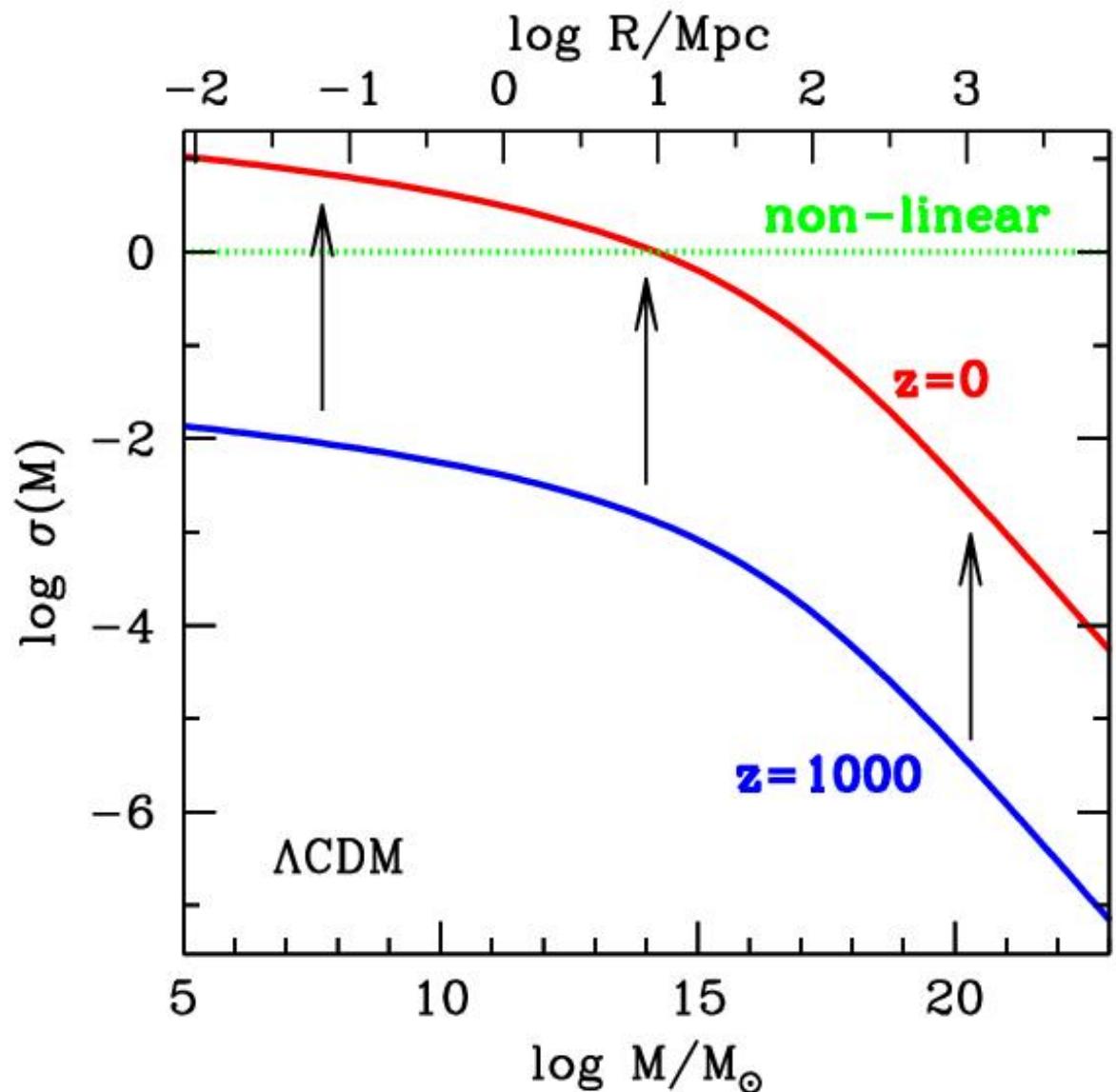


SZ効果 (Komatsu+01; TK+04)  
& Chandra X-ray contours

- Suzaku 0.4-60 keV & Chandra (Ota+08)  
→  $kT_e = 25.3^{+6.1}_{-4.5}$  keV (平均 13keV)  
 $Mach \sim 2, V_{\text{preshock}} \sim 3600 \text{ km/s}$

イメージ&白: 電波  
(GMRT 614MHz, Ferrari+11)  
緑: SZ効果 (MUSTANG, Mason+10)  
→ 高温領域から非熱的放射  
(同定は恐らく初めて)

# 宇宙の構造形成

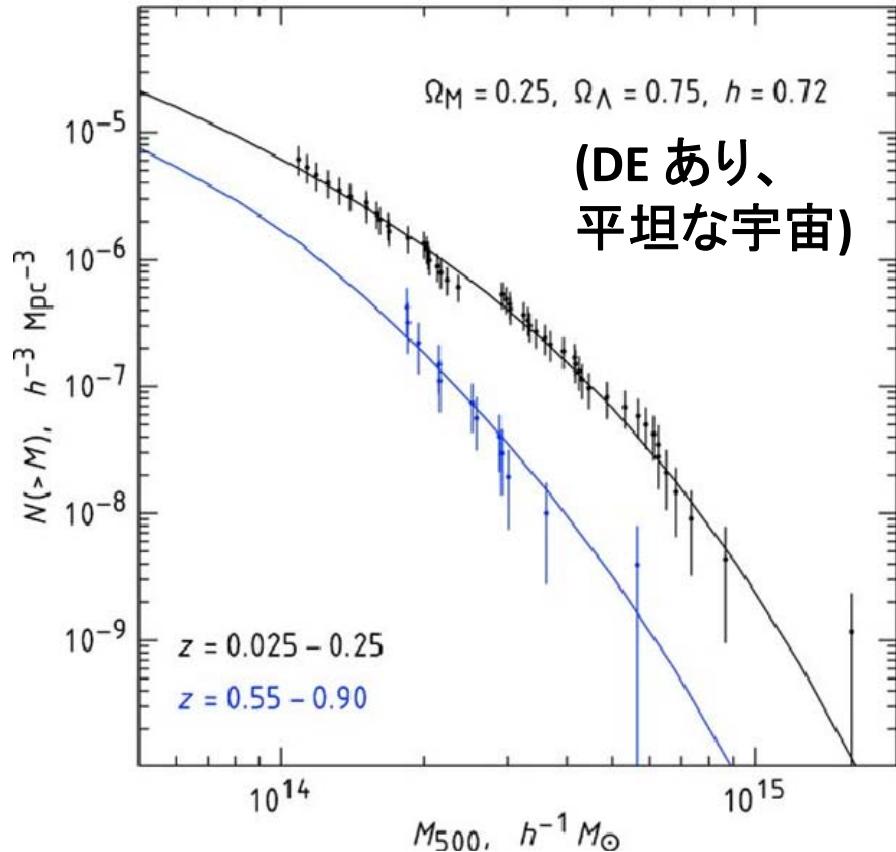


ゆらぎ初期分布 (CDM etc.)  
+ 宇宙論パラメータ  
→ 2乗平均値とその進化

$$\begin{aligned}\sigma^2(R, t) &= \langle |\delta()|^2 \rangle \\ &\sim D^2(t) \int_0^{1/R} P(k) d^3 k\end{aligned}$$

現在最大の非線形構造  
=銀河団

# 銀河団質量関数



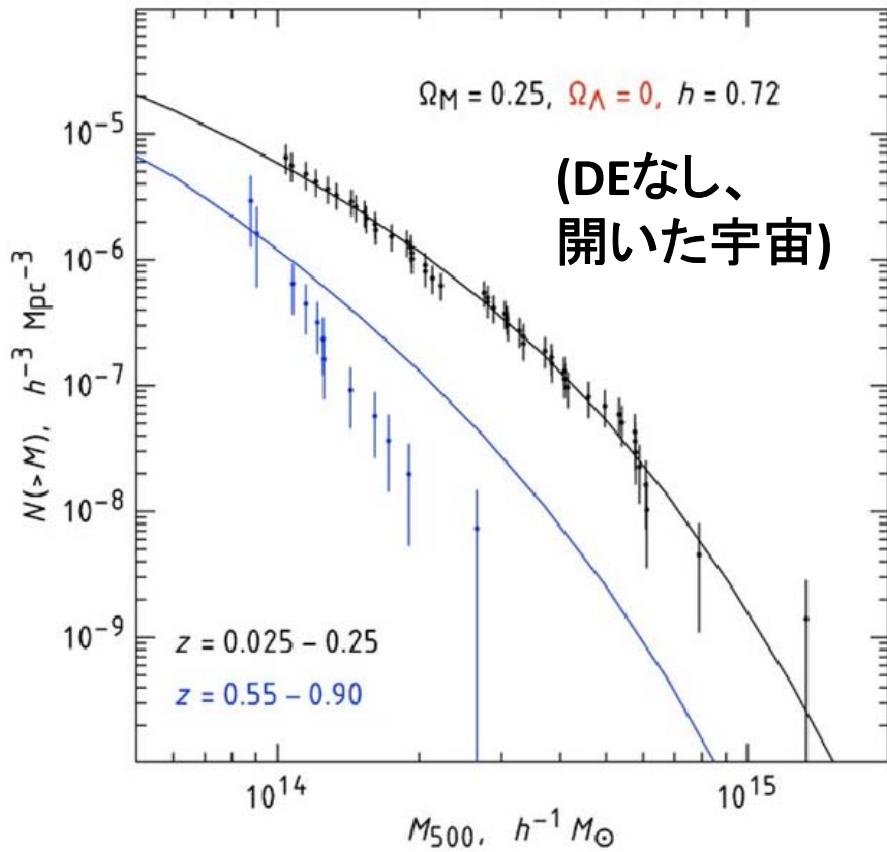
Vikhlinin et al. (2009)

ROSAT selected & Chandra follow-up

49 clusters with  $\langle z \rangle \sim 0.05$

37 clusters with  $\langle z \rangle \sim 0.55$

model: Tinker et al. (2008)



単位共動体積あたりの銀河団数

- 第一原理的に予言可能

- ダークエネルギー等の宇宙論的情報  
(正確な質量測定が不可欠)

# Cosmological shocks

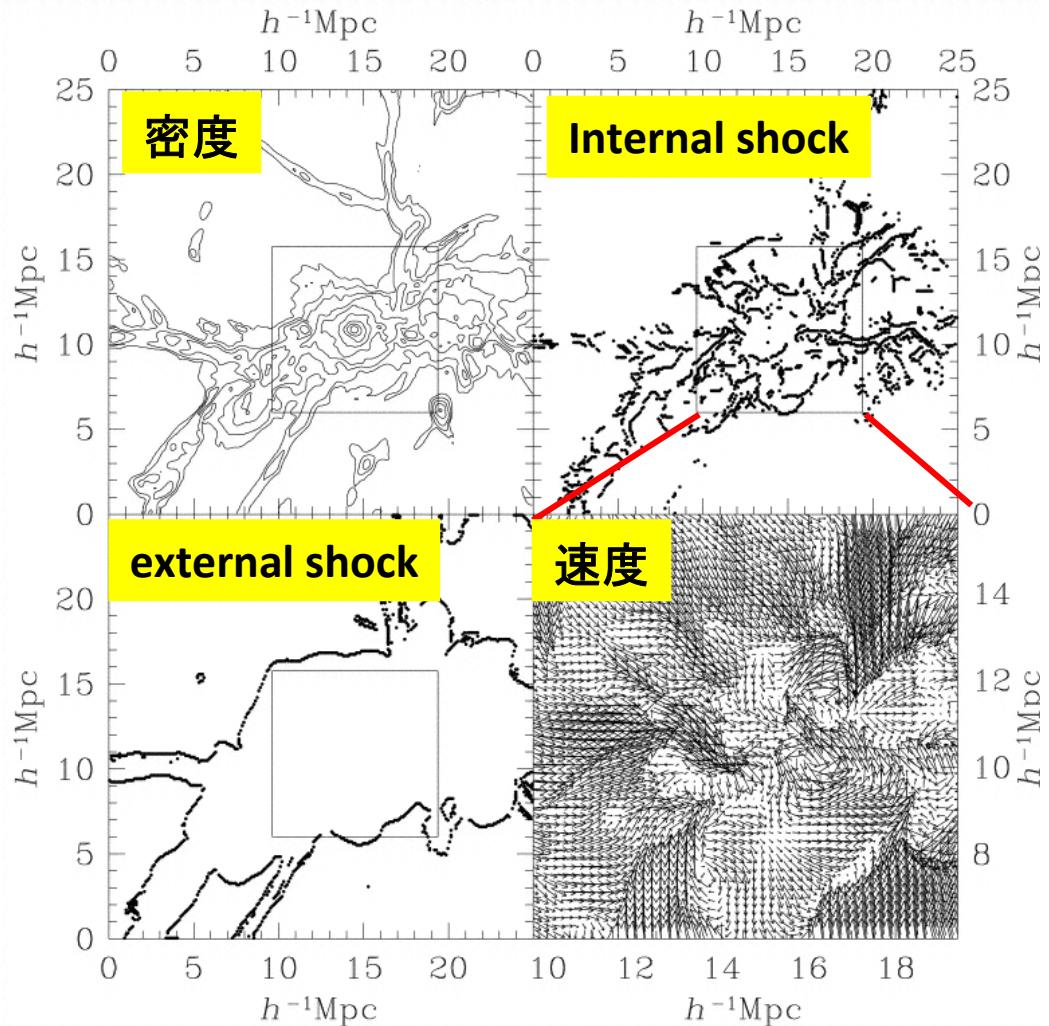
## 1. Internal (merger) shocks

既に加熱されたガスの衝突  
低マッハ数(2~4), 高密度  
運動エネルギーの大半

## 2. External (accretion) shocks

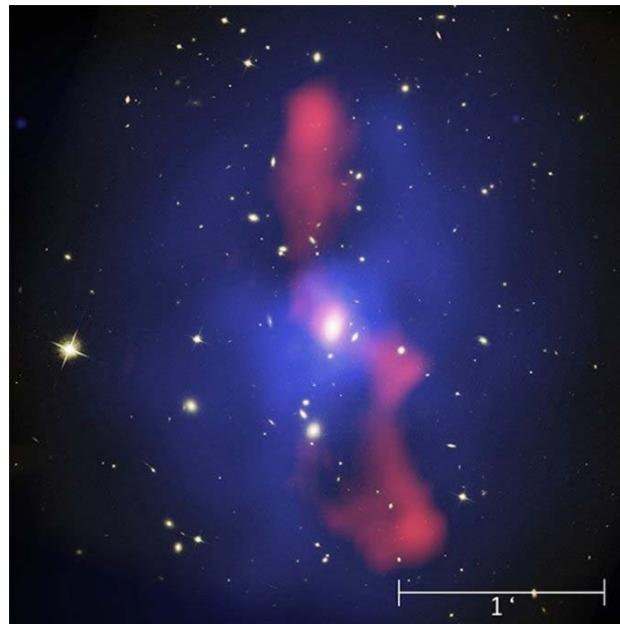
冷たいIGMへの降着  
高マッハ数(~100), 低密度  
観測的には未検出

\* preheating があれば  
マッハ数はさらに下がる



Ryu et al. (2003)  
Cosmological mesh simulation  
Λ CDM,  $L=100 \text{ Mpc}/h$ ,

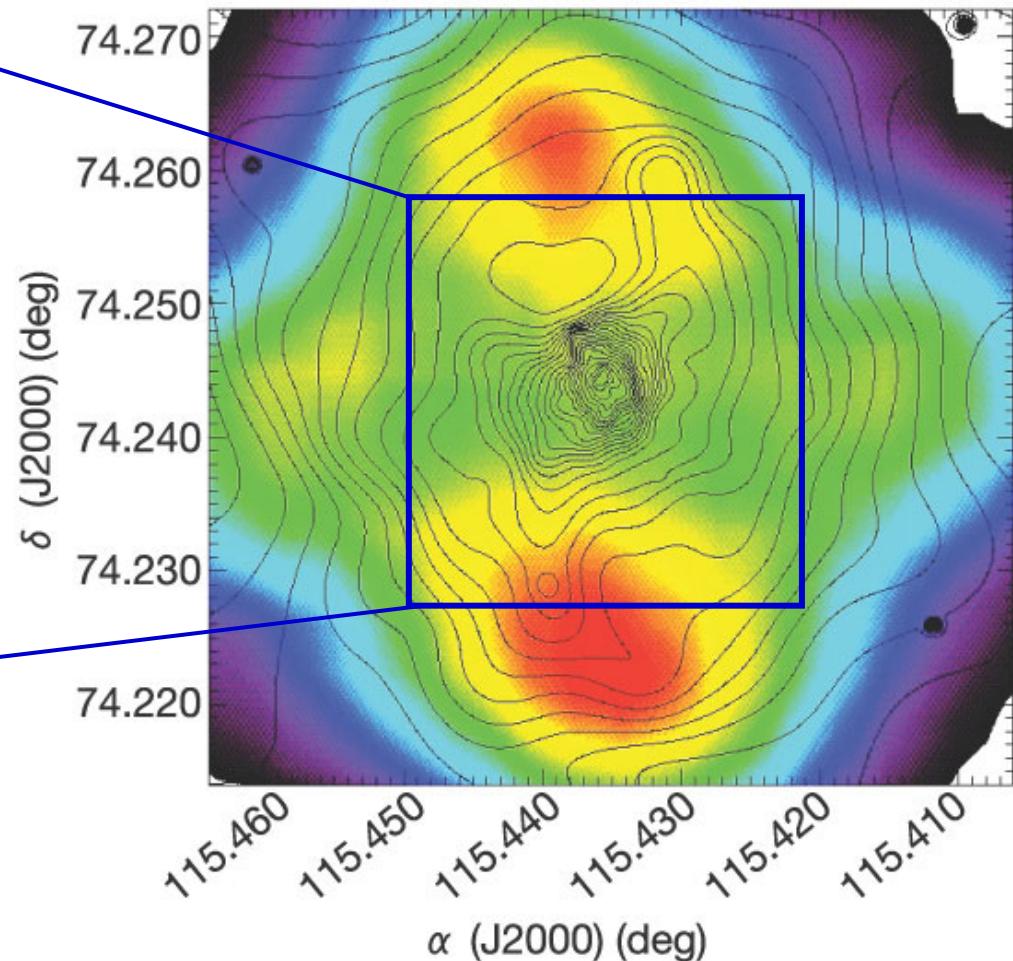
# AGN feedback



MS0735.6+7421 at  $z=0.22$

赤:電波、青:X線

(McNamara et al. 2005; 2009)

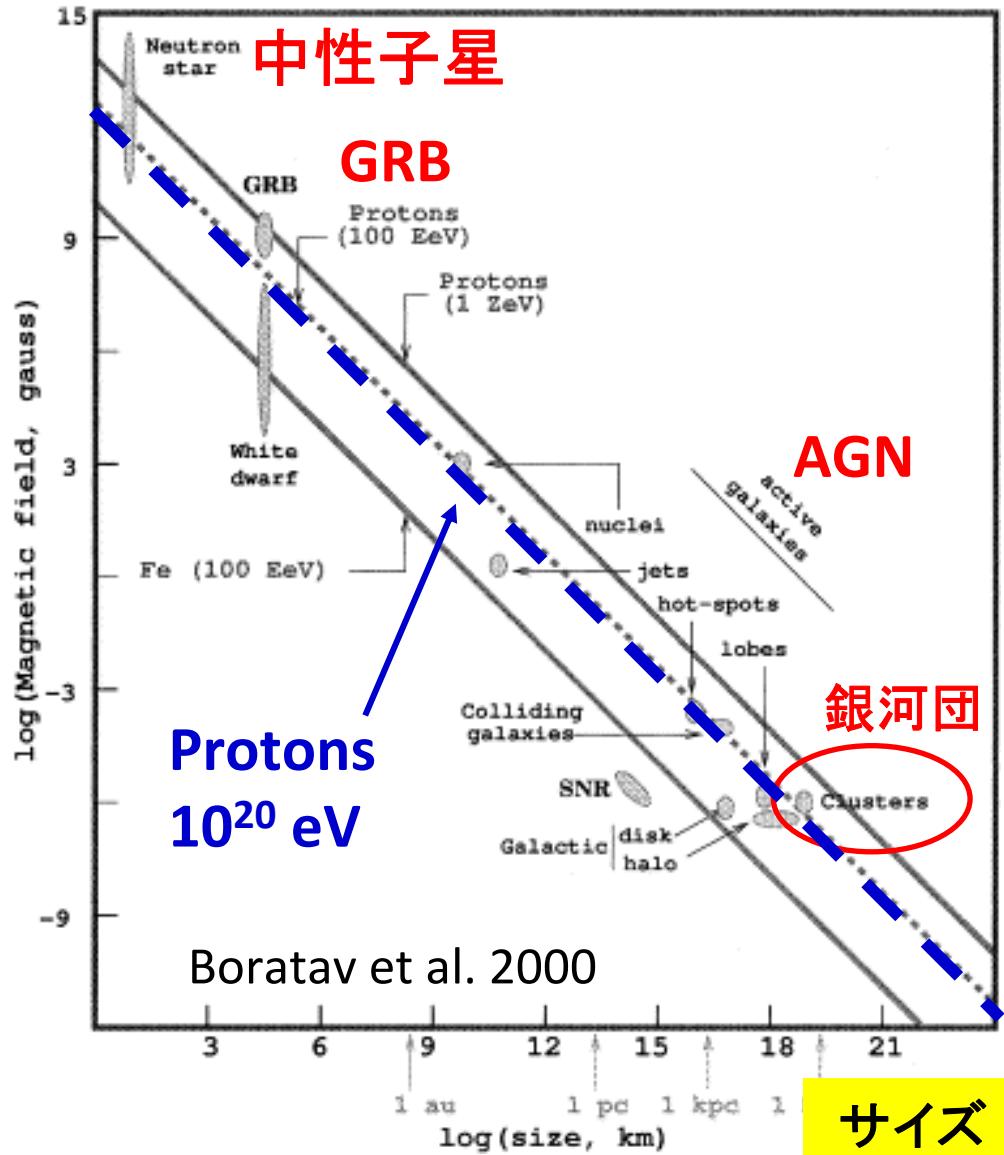


AGN ジェット(電波)と X線空洞・高温領域  
の相関  $\Rightarrow$  力学的仕事  $\sim 10^{62}$  erg

カラー: 温度  
Contour: X線輝度

# 加速場候補としての銀河団

磁場



Hillas 条件 (1984)

$$\text{size} > \text{Larmor radius} = \frac{1\text{pc}}{Z} \left( \frac{E}{10^{15}\text{eV}} \right) \left( \frac{B}{\mu G} \right)^{-1}$$

を $10^{20}\text{eV}$ まで満たす希少な候補

\* 1次 Fermi (加速時間=寿命):

$$E^{\max} \sim 10^{18}\text{eV} \left( \frac{ZB}{\mu G} \right) \left( \frac{V_{\text{shock}}}{2000\text{km/s}} \right) \left( \frac{R}{\text{Mpc}} \right)$$

> $10^{20}\text{eV}$ には、大きな Z or B が必要  
(e.g., S. Inoue et al. 2007)

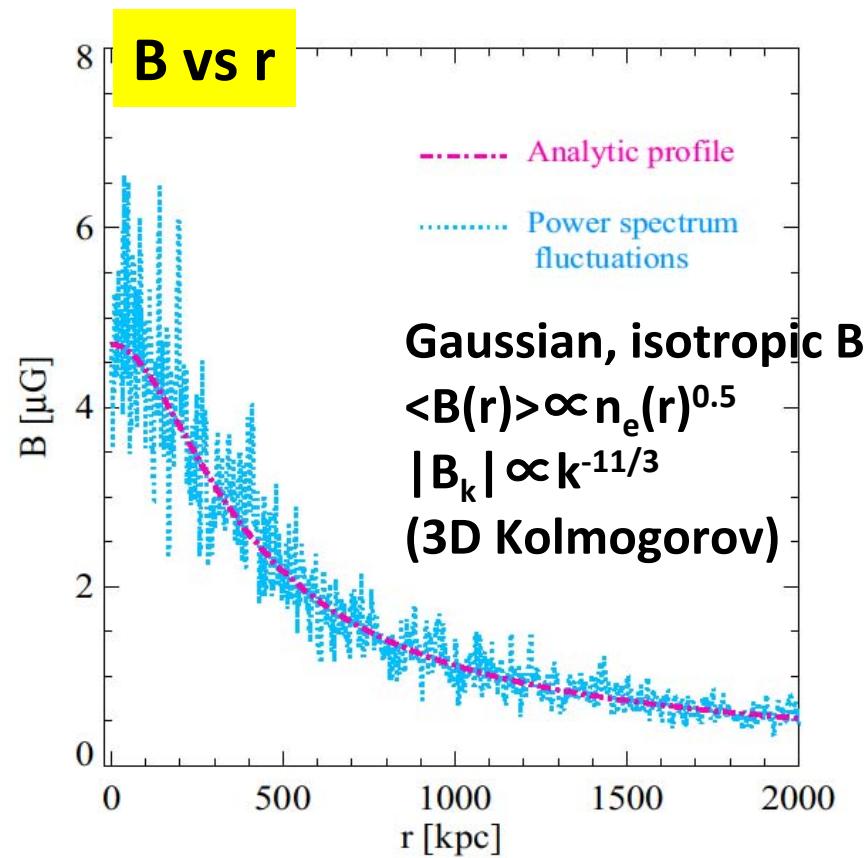
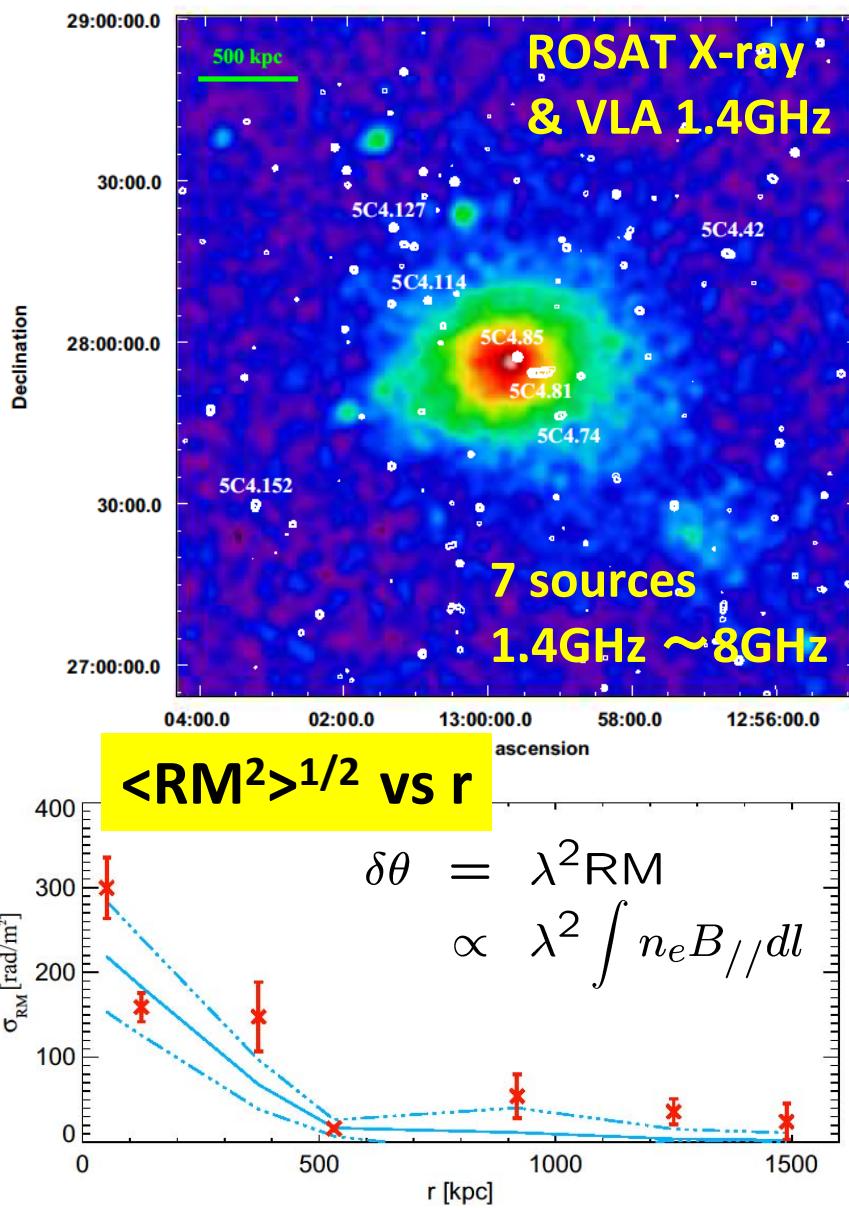
cf. 電子:  $E_e^{\max} \sim 10^{14} \text{ eV}$  by IC loss.  
(e.g., Totani & Kitayama 2000)

# 銀河団の高エネルギー現象：特徴

- ・特徴的スケールが大きい
  - サイズ～Mpc
  - 力学時間～ $10^9$  yr
  - 運動エネルギー～ $10^{64}$  erg
- ・境界条件、初期条件、エネルギー源、等の不定性が“比較的”少ない（実験場として好都合）
- ・宇宙論へのインパクト
  - 銀河団のエネルギー組成（質量測定）
  - 構造形成ダイナミクス
  - ダークマター

etc.

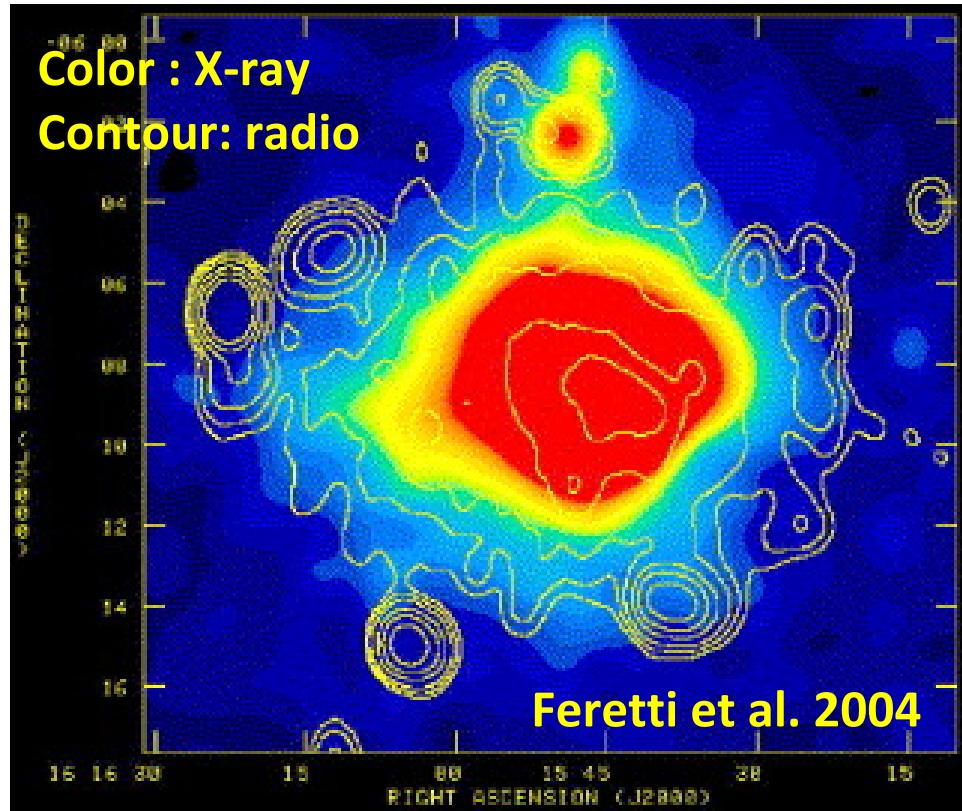
# 磁場分布: Coma (Bonafede et al. 2010)



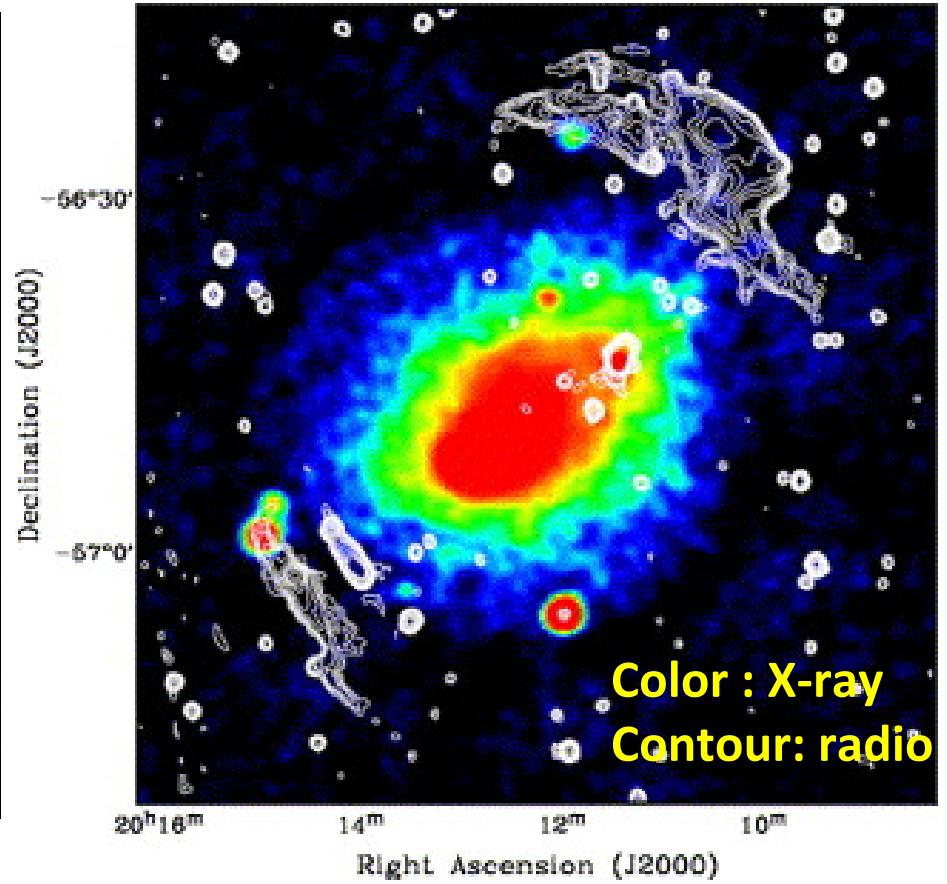
$$\frac{P_B}{P_{\text{therm}}} = 0.0035 \left( \frac{B}{\mu\text{G}} \right)^2 \left( \frac{n_e}{10^{-3} \text{cm}^{-3}} \right)^{-1} \left( \frac{kT_e}{5 \text{keV}} \right)^{-1}$$

$= 1/\beta$  (ダイナミクスへの影響小)

# 非熱的粒子: Radio halo/relic

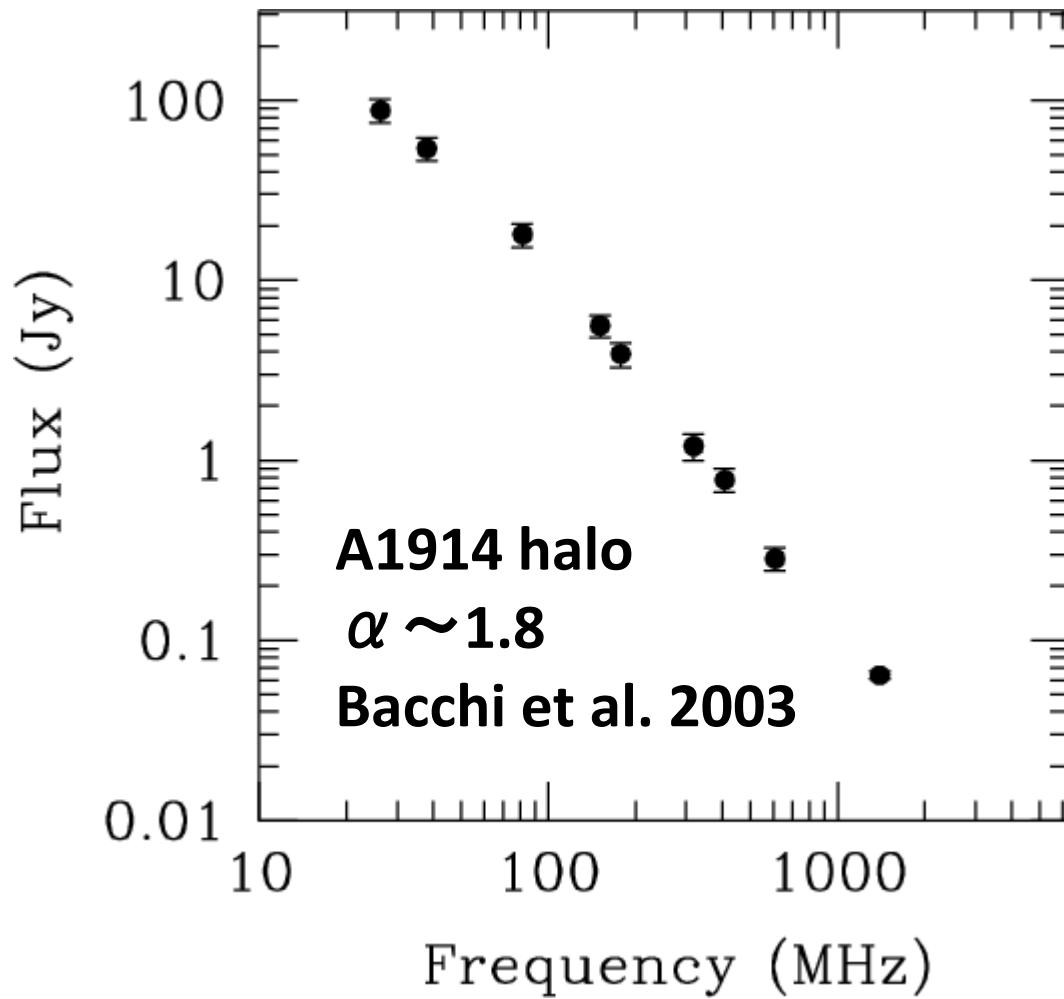


Radio halo: A2163@z=0.203  
Largest extent (>2Mpc)  
Regular & unpolarized (<数%)



Radio relic: A3667@z=0.055  
Strongest diffuse (3.7 Jy at 1.4GHz)  
Asymmetric, peripheral  
& polarized (数10%)

# Radio halo/relic: スペクトル



Steep power-law spectra:  
 $S \propto \nu^{-\alpha}$  with  $\alpha = 1 \sim 2$

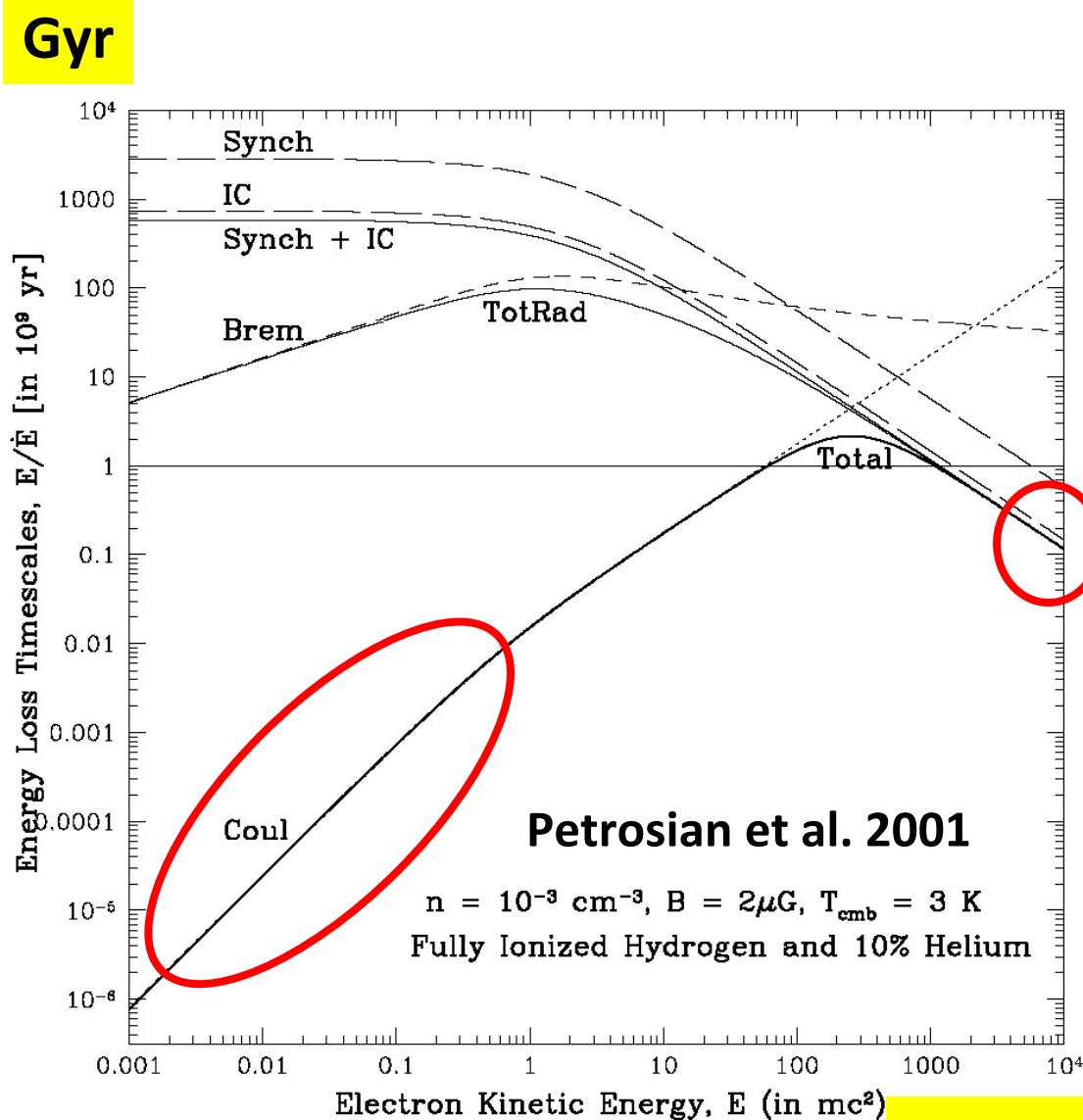
(高周波で急になる傾向)

$\gamma \sim 10^4$  電子のシンクロトロン

$$\nu_{\text{syn}} \sim 0.1 \left( \frac{B}{\mu G} \right) \left( \frac{\gamma}{10^4} \right)^2 \text{ GHz}$$

$N_e(\gamma) \propto \gamma^{-p}$ ,  $p = 3 \sim 5$

# 非熱的電子の寿命



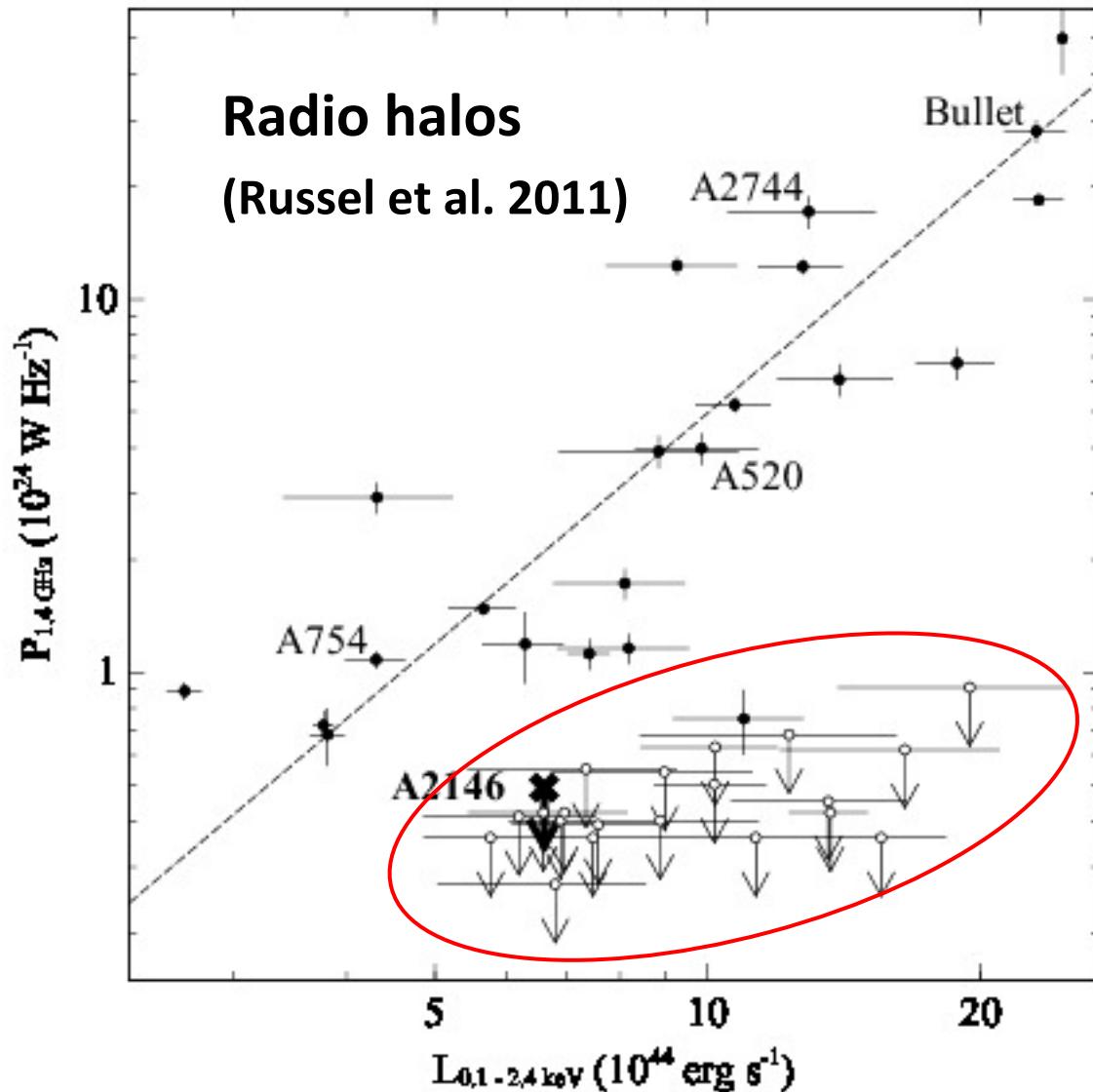
$\gamma \sim 10^4$  電子  
→ 寿命  $\sim 0.1$  Gyr (主に IC)  
拡散できない

1) Leptonic model  
その場で電子加速  
shock and/or 乱流  
+ injection が必要

2) Hadronic model  
 $p_{\text{CR}} + p \rightarrow \pi^\pm \dots \rightarrow e^\pm$   
冷却時間長いので、  
過去の加速の積算

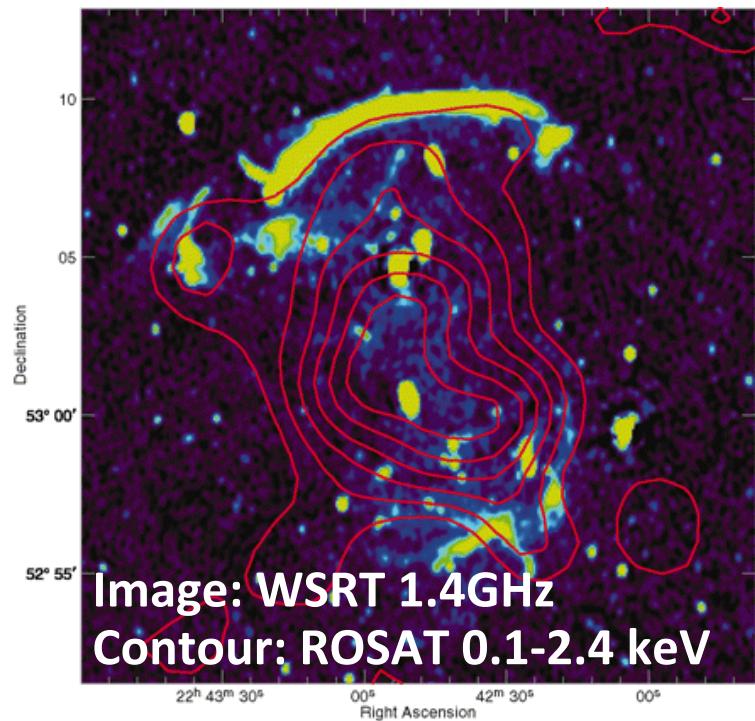
$$\gamma_e - 1$$

# Radio halo/relic: 統計

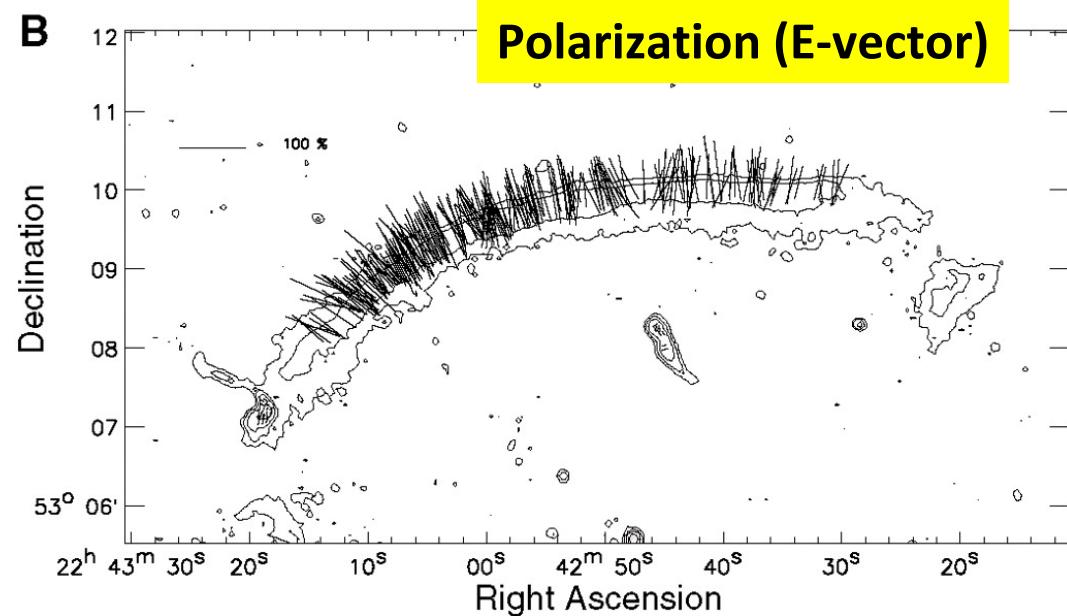
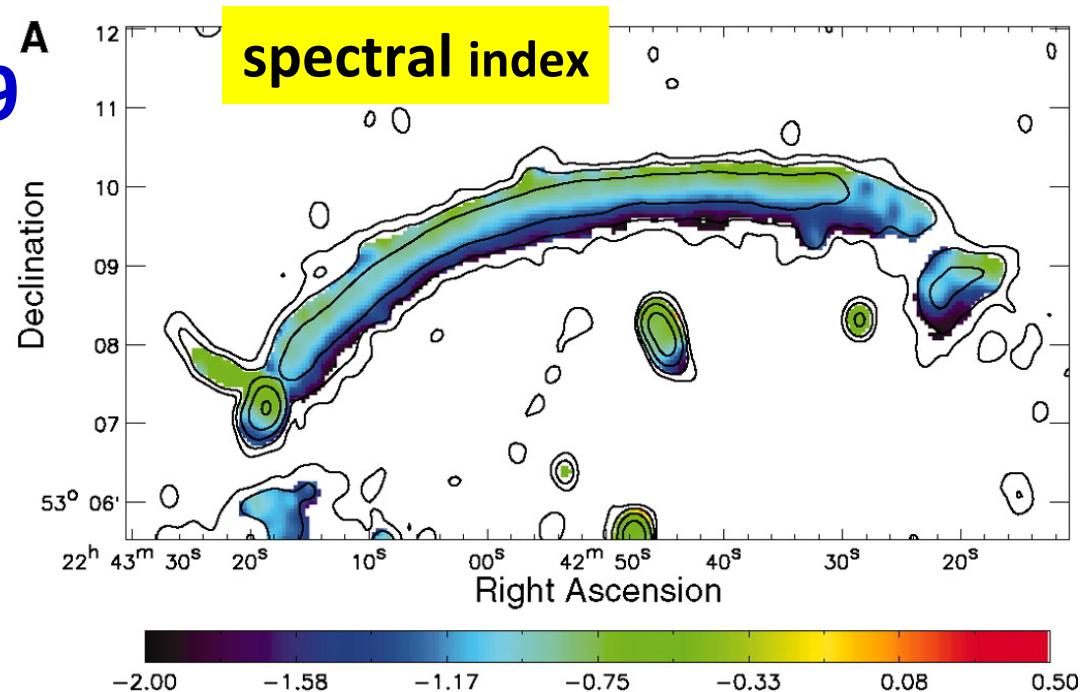


- halo + relic  $\sim 50$  個
- $L_x > 10^{45} \text{ erg/s}$  では  $> 30\%$   
(Giovannini et al. 2002)
- 電波とX線の強い相関  
relic は、ばらつき大
- ほぼ全て衝突銀河団  
ただし、電波が見えない  
ものも多い: e.g., A2146

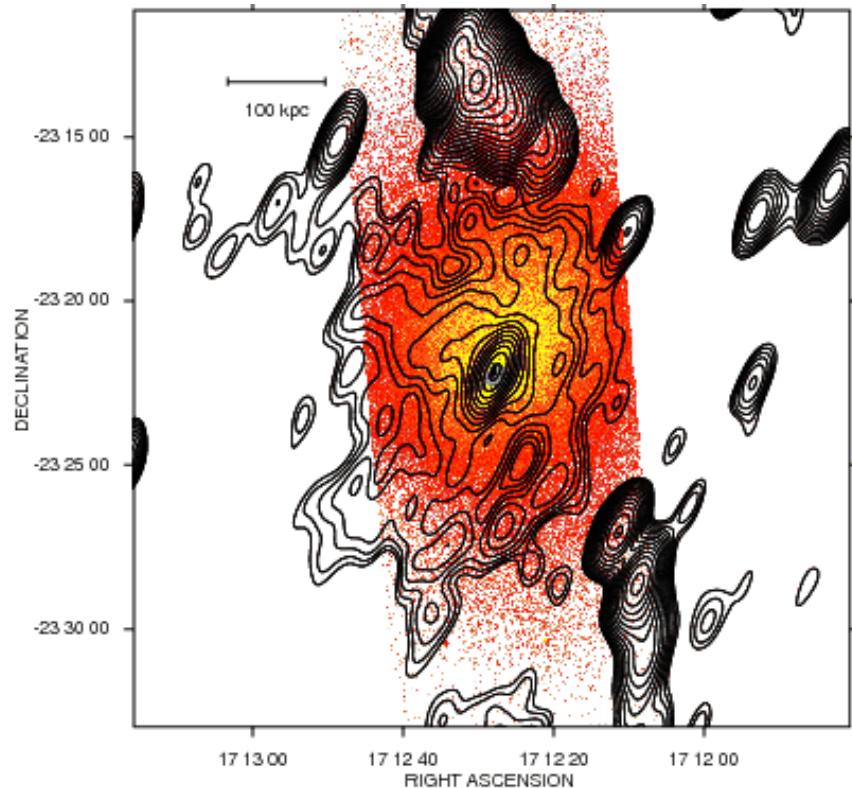
# CIZA J2242.8 at z=0.19 (van Weeren+10)



- relic size :  $2 \text{ Mpc} \times 50 \text{ kpc}$
- index: **0.6~2.0 across the shock**  
→ Mach  $\sim 4.6$  (1次 Fermi)
- polarization: **>50%, well aligned**  
→ ordered B-field



# Radio “mini-halo”: 3rd population?

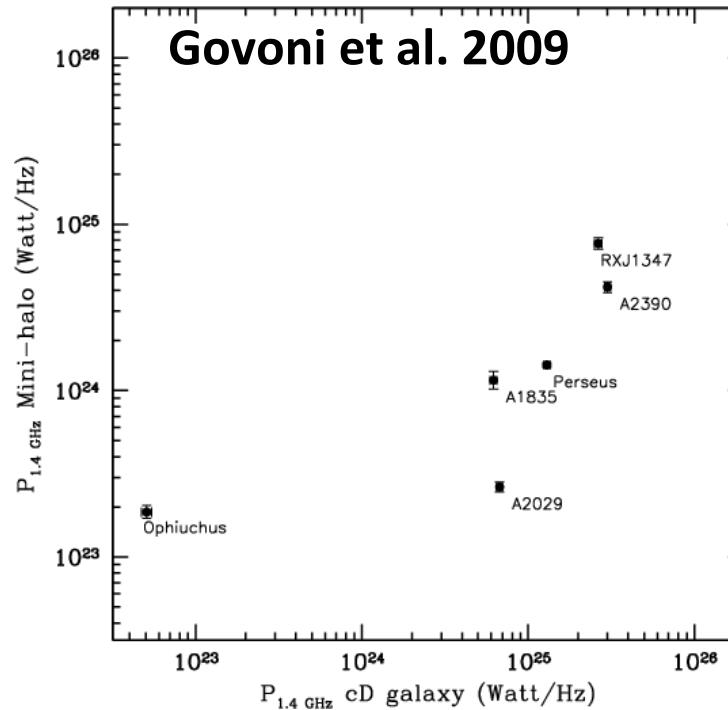


Ophiuchus cluster at  $z=0.028$   
(Govoni et al. 2009)

Contour: VLA 1.4 GHz

Image: Chandra 0.5-4 keV

$I_{\text{Radio}}$  &  $I_x$  are well-correlated.

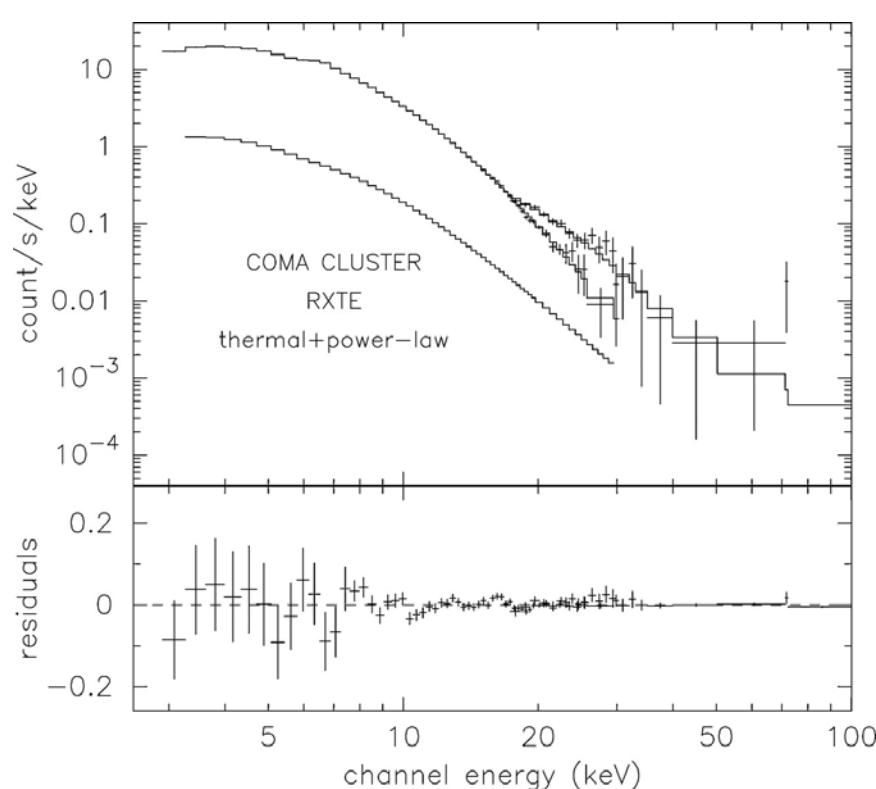


Detected in  $\sim 9$  cool-core  
(apparently relaxed) clusters

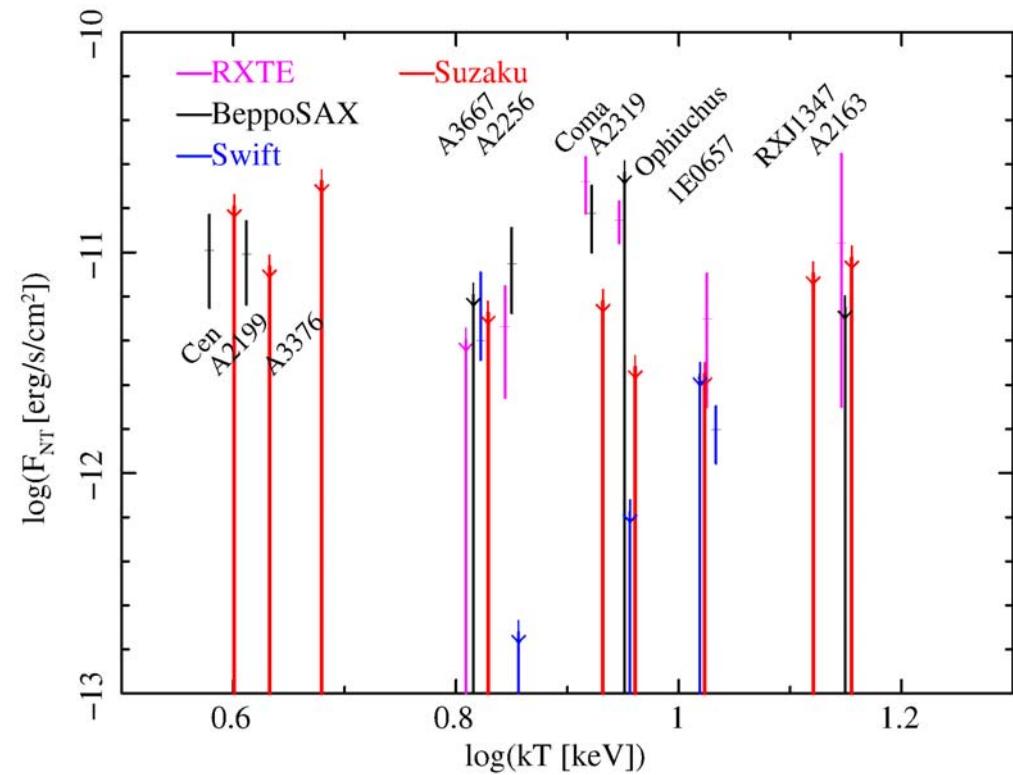
- spatial extention  $\sim 500$  kpc
- weak correlation with central CD (?)

# 硬X線放射？

$\gamma \sim 10^4$  電子の逆コンプトン  $\Rightarrow \langle B \rangle$  と  $E_e$  の分離  
(非熱的制動放射、 $kT > 20$  keV の可能性もあり)



Coma by RXTE (Fusco-Femiano+99)  
 $\rightarrow \langle B \rangle \sim 0.15 \mu G$ ,  $E_e \sim 7e-14$  erg/cm<sup>3</sup>



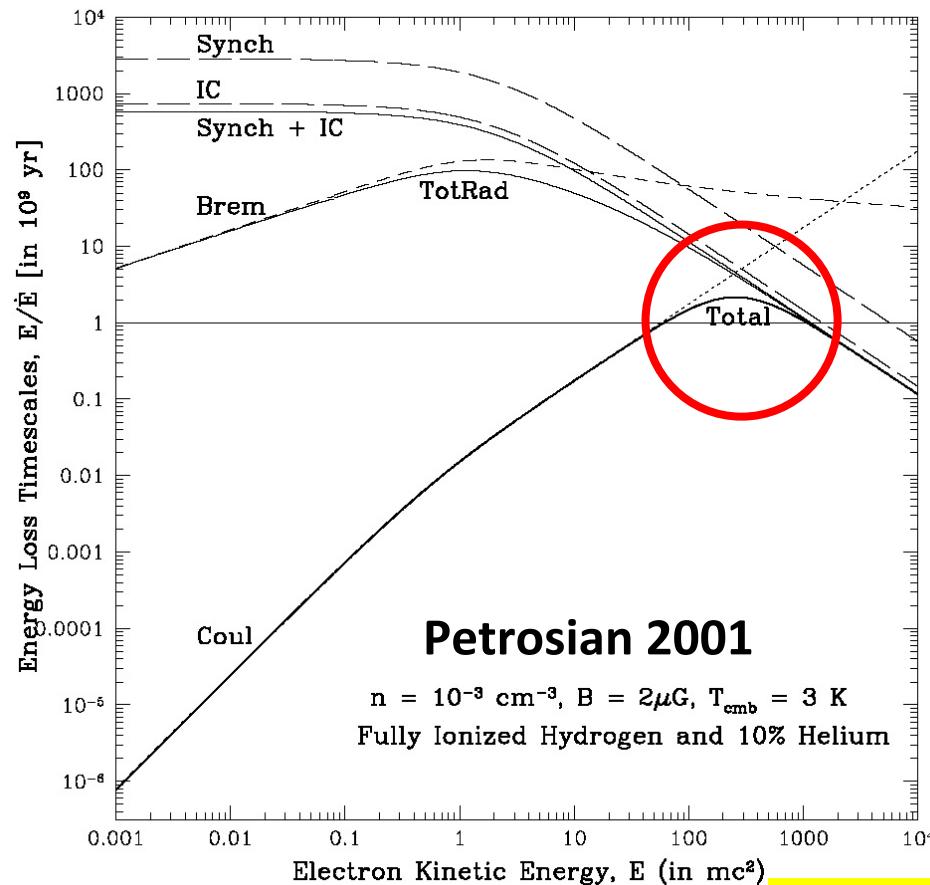
(Ota et al. 2011, in prep.)

No firm detection.

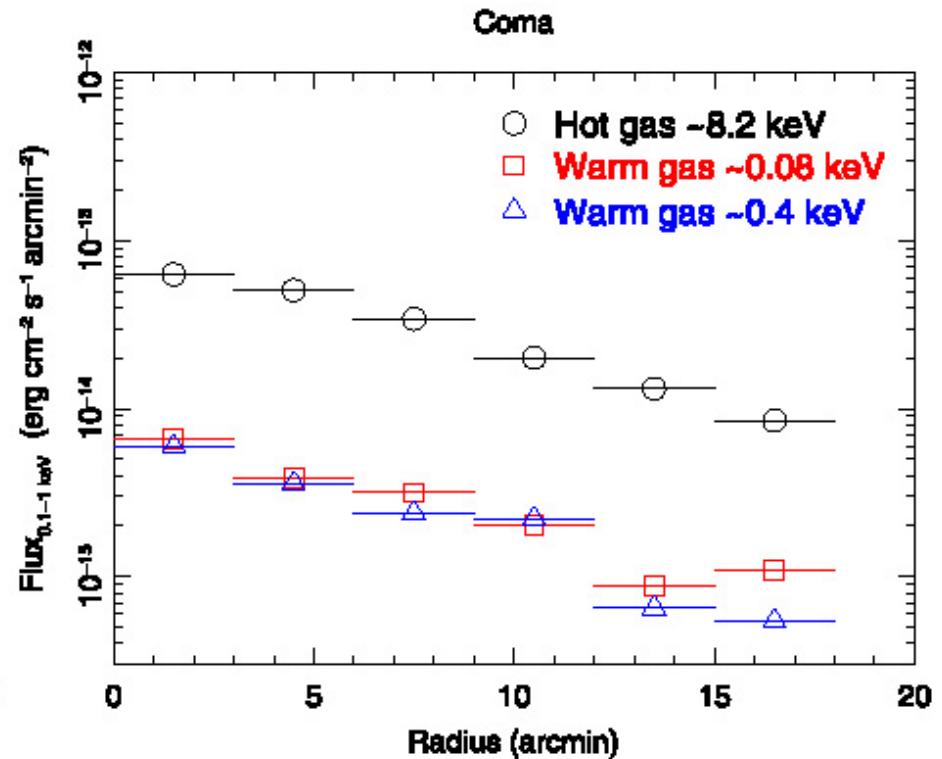
$B > 0.1 \sim 1 \mu G$

# 軟X線放射？

Gyr



非熱的電子の寿命  
 $\gamma \sim 300$ が最長 (Sarazin 99)  
 軟X線でIC



Coma by EUVE (Lieu et al. 1996)  
 他にも数個の銀河団での報告  
 があるが、controversial  
 (Suzaku では全て上限)  
 WHIMとの区別も難しい。

# $\gamma$ 線放射？

主な候補：

1. 加速陽子 (e.g. Ensslin et al. 1997; Blasi & Colafrancesco 1999)

熱的イオンと衝突  $\rightarrow \pi^0 \rightarrow \gamma$  線 ( $\sim$ GeV 陽子)

$\rightarrow \pi^\pm \dots \rightarrow e^\pm \rightarrow$  radio ( $>10$ GeV 陽子)

冷却時間長い、i.e. 宇宙年齢での積算

2. 加速電子 (e.g. Loeb, Waxman 2000; Totani, Kitayama 2000)

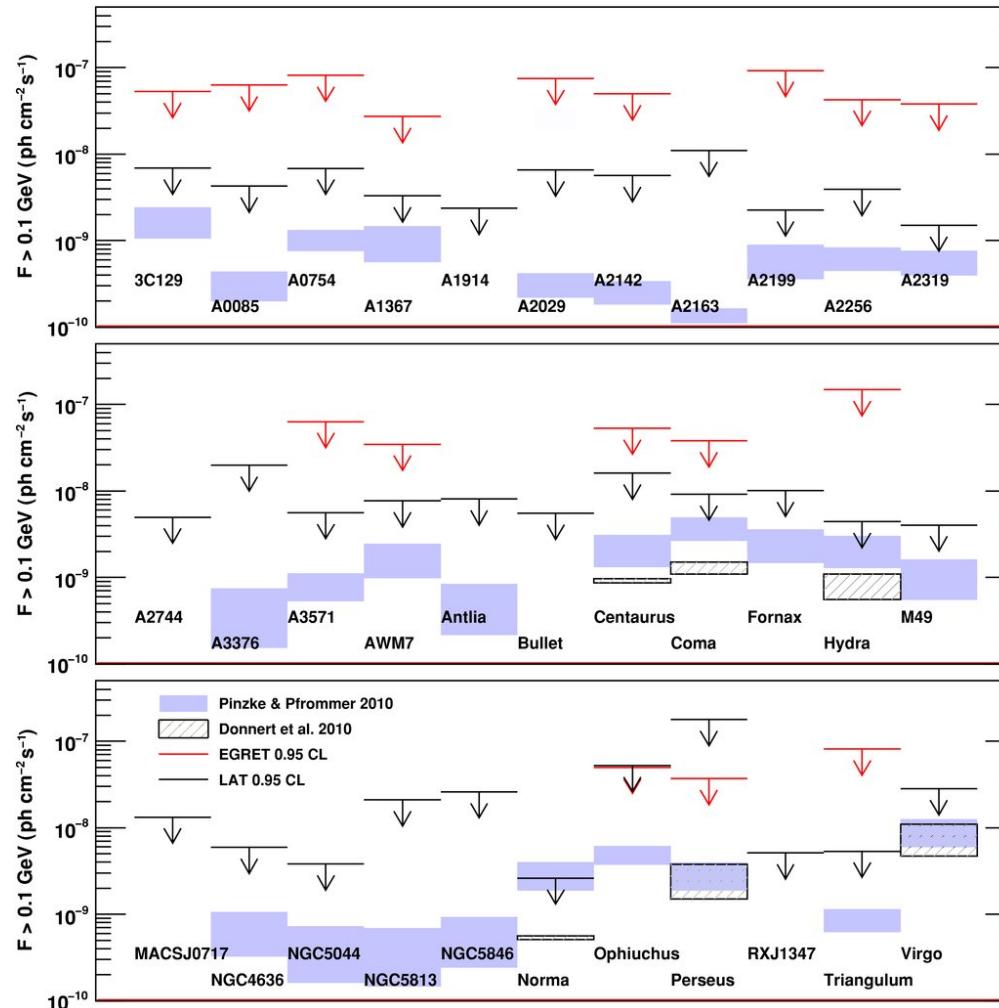
Inverse Compton ( $\gamma_e > 10^6$ ), 制動放射( $\gamma_e > 10^4$ ) など

冷却時間短い、i.e., 加速現場のみ

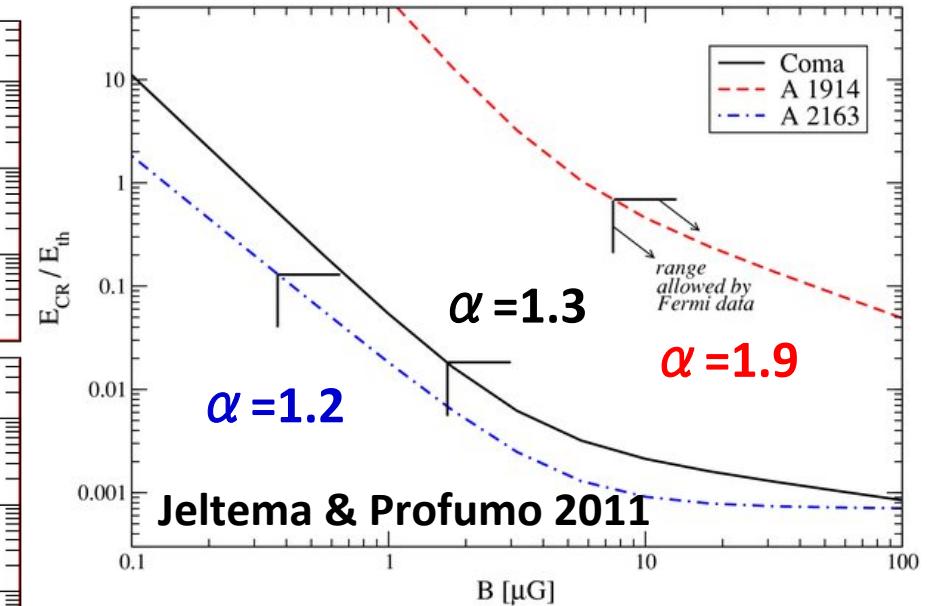
3. ダークマター (e.g., Colafrancesco & Mele 2001; Totani 2004)

ニュートラリーノ対消滅等

# $\gamma$ 線: Fermi による制限



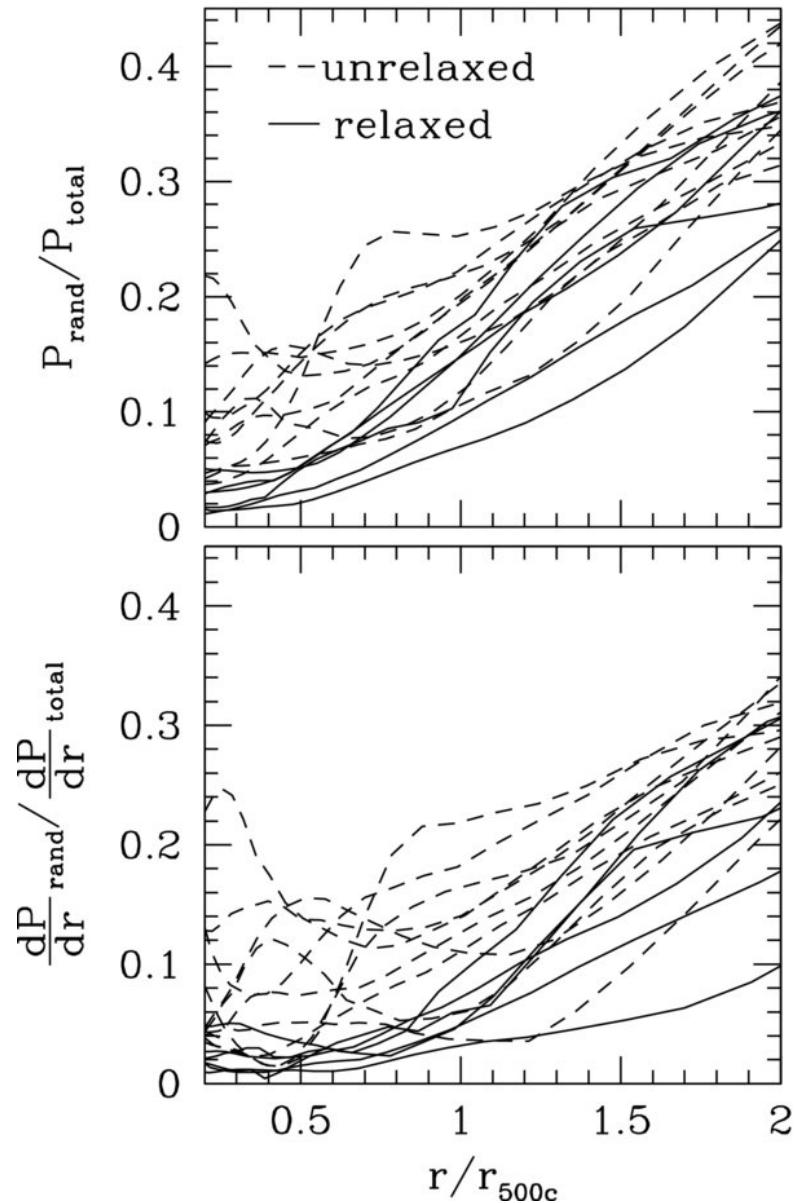
flux upper limits on 33 clusters  
(18 month data: Ackermann et al. 2010)



Hadronic model for radio +  $\gamma$ -rays  
⇒ Limits on  $E_{\text{cr}}/E_{\text{th}}$  &  $B$   
sensitive to spectral index

- \* A521, A697 も  $\alpha > 1.7$   
high  $B$  or spectral break at  $E_p > \text{GeV}$ ?  
(Brunetti+08; Macario+10)
- \* leptonic modelへの制限は弱い  
 $B > 0.15 \mu\text{G}$  for Coma (Ackermann+10)

# 乱流？

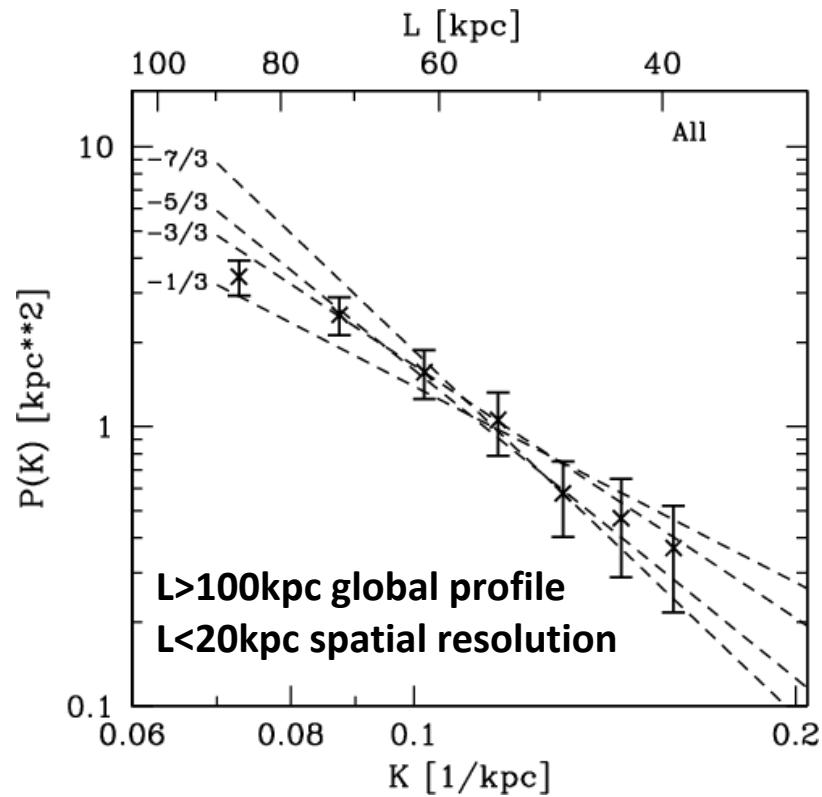


構造形成シミュレーションからは、  
広く存在が示唆。  
→粒子加速、磁場、質量測定、、、

$$\frac{P_{\text{turb}}}{P_{\text{therm}}} = 0.11 \left( \frac{V_{\text{turb}}}{300 \text{km/s}} \right)^2 \left( \frac{kT_e}{5 \text{keV}} \right)^{-1}$$

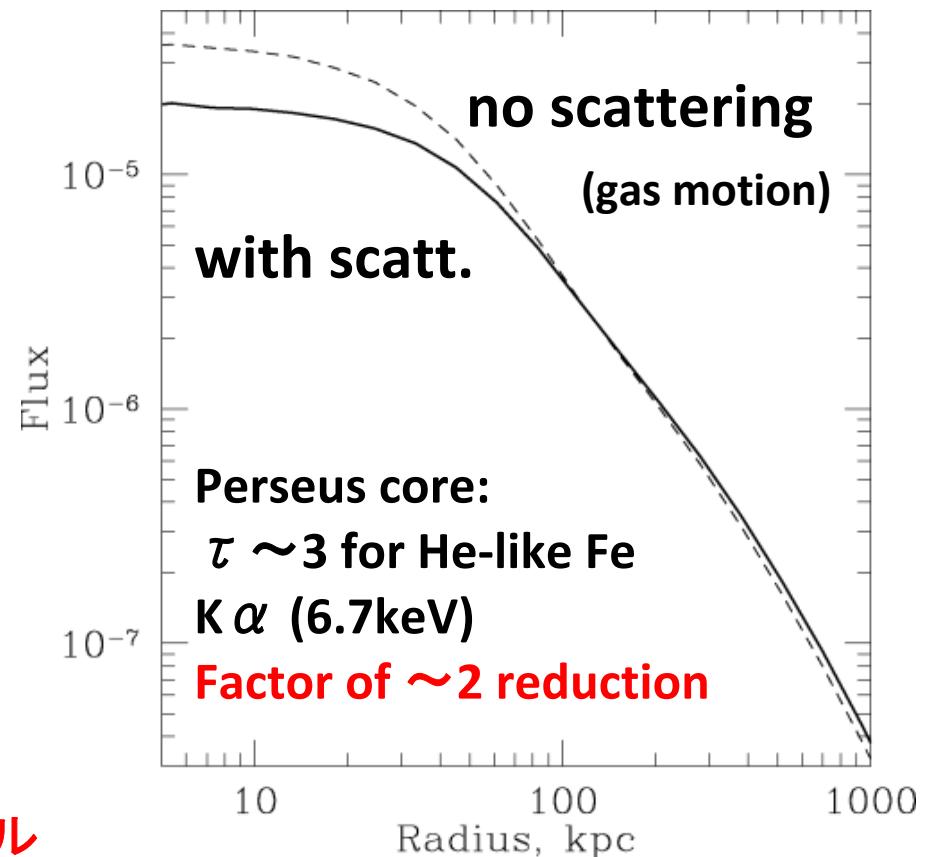
Lau et al. (2009)  
Adaptive mesh refinement hydro. sim.  
16 clusters with  $M_{\text{vir}} = 5 \times 10^{13} \sim 2 \times 10^{15} M_{\odot}/h$   
spatial resolution 5~7 kpc/h

# 乱流の状況証拠



Coma: “圧力”( $T \Sigma_x \propto v^2$ ) パワースペクトル  
Kolmogorov と整合 (Schuecker+04)

cf. Hydra A core: 磁場パワースペクトル:  
Kolmogorov と整合、相関距離 $\sim 3\text{kpc}$   
(Vogt & Ensslin 2005)

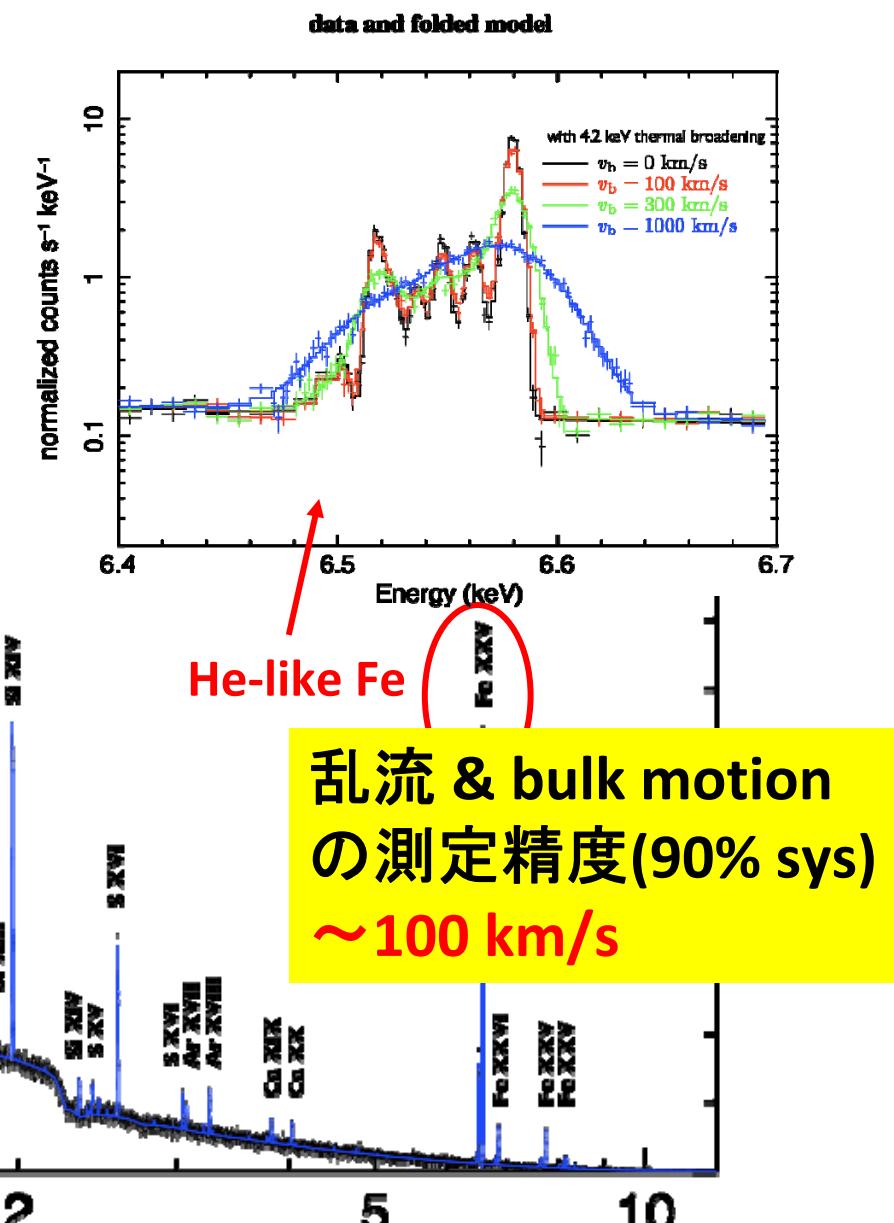
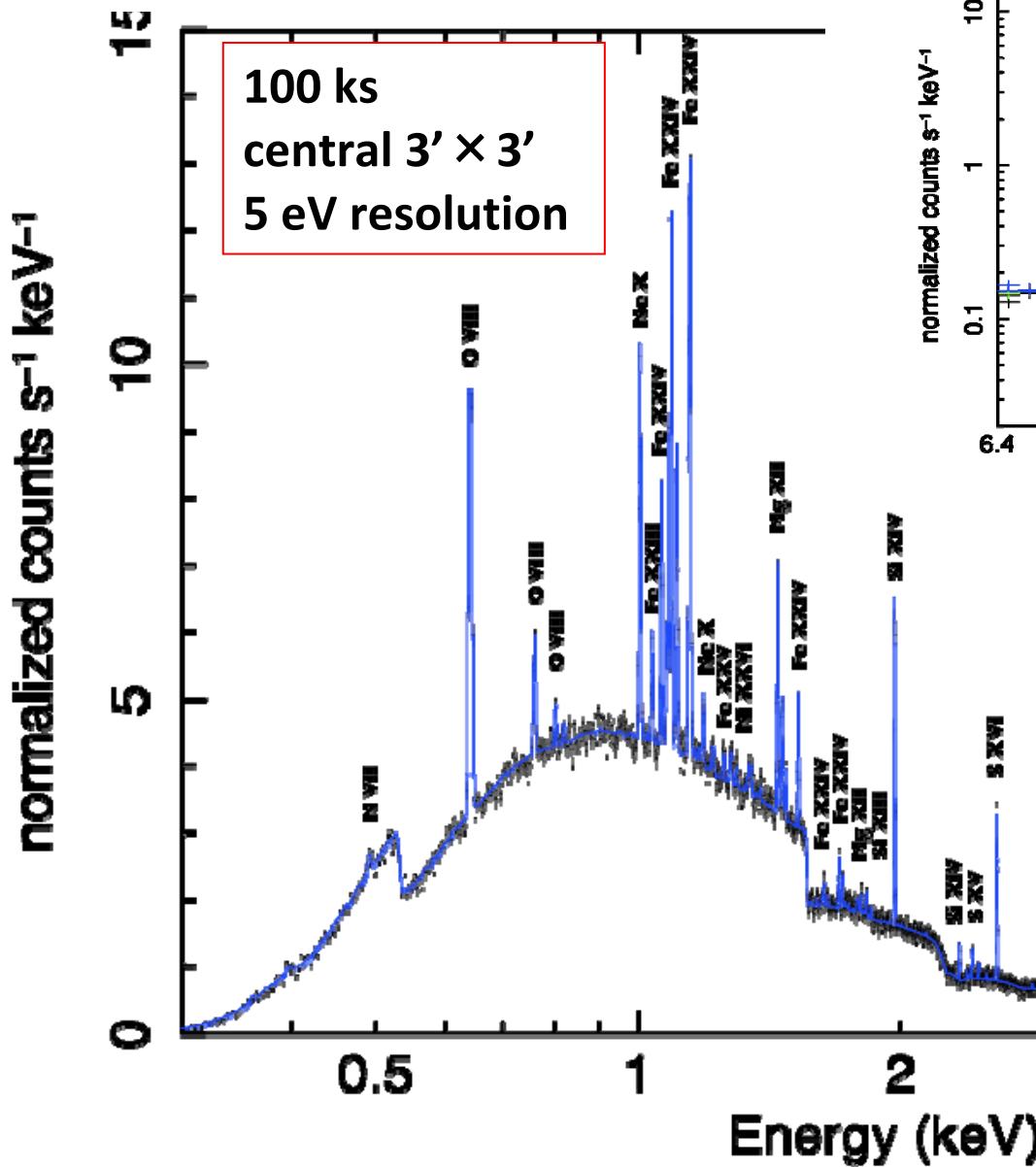


共鳴散乱の欠如: Perseus by XMM  
 $\rightarrow V_{\text{turb}} > 500 \text{ km/s}$  (Churazov+04)

cf.  $V_{\text{turb}} < 500 \text{ km/s}$  for 5 cool cores  
by XMM/RGS (Sanders+11)

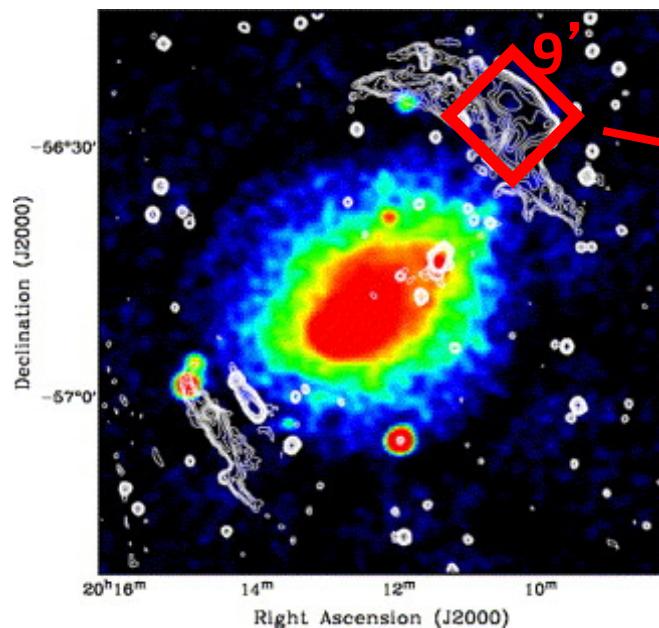
# Mock spectra of Perseus by ASTRO-H/SXS

## (Tamura & Sekiya)

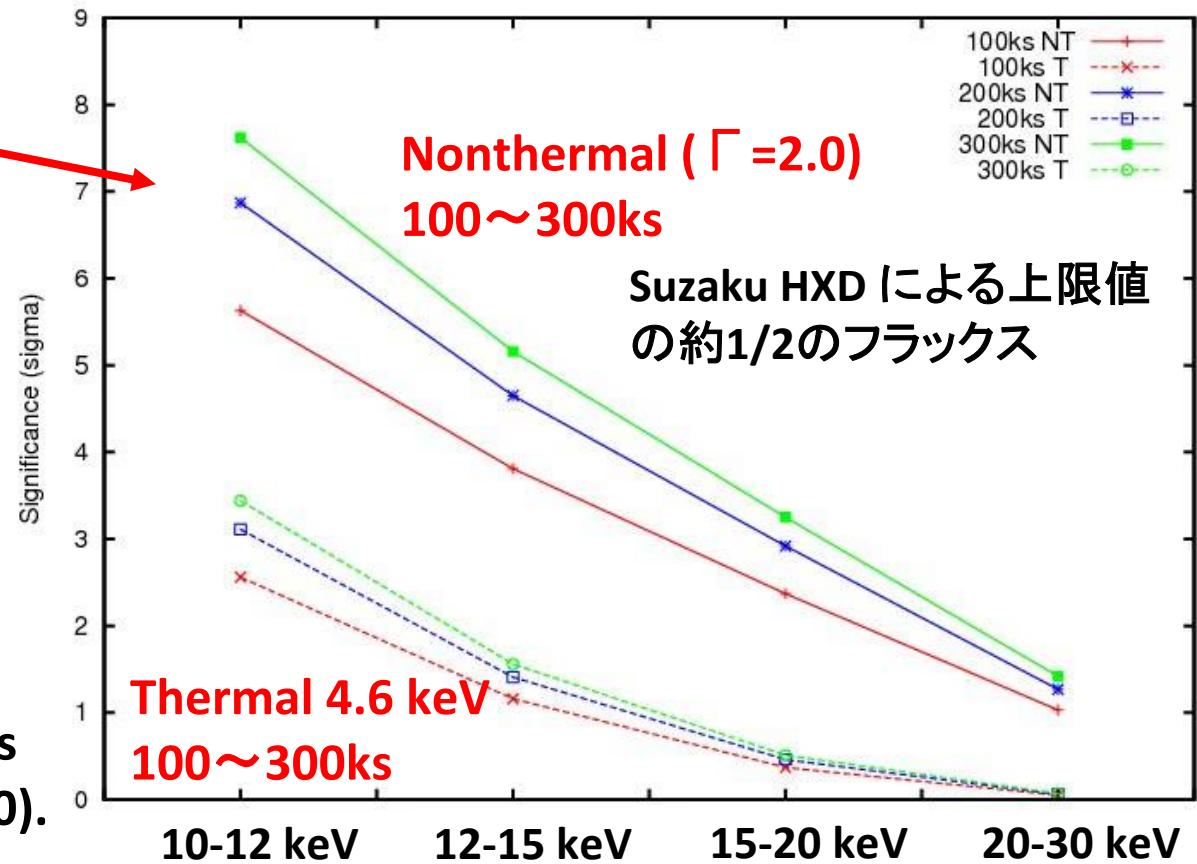


# Mock obs. of A3667 relic by ASTRO-H/HXI

## (Kawaharada & Akamatsu)

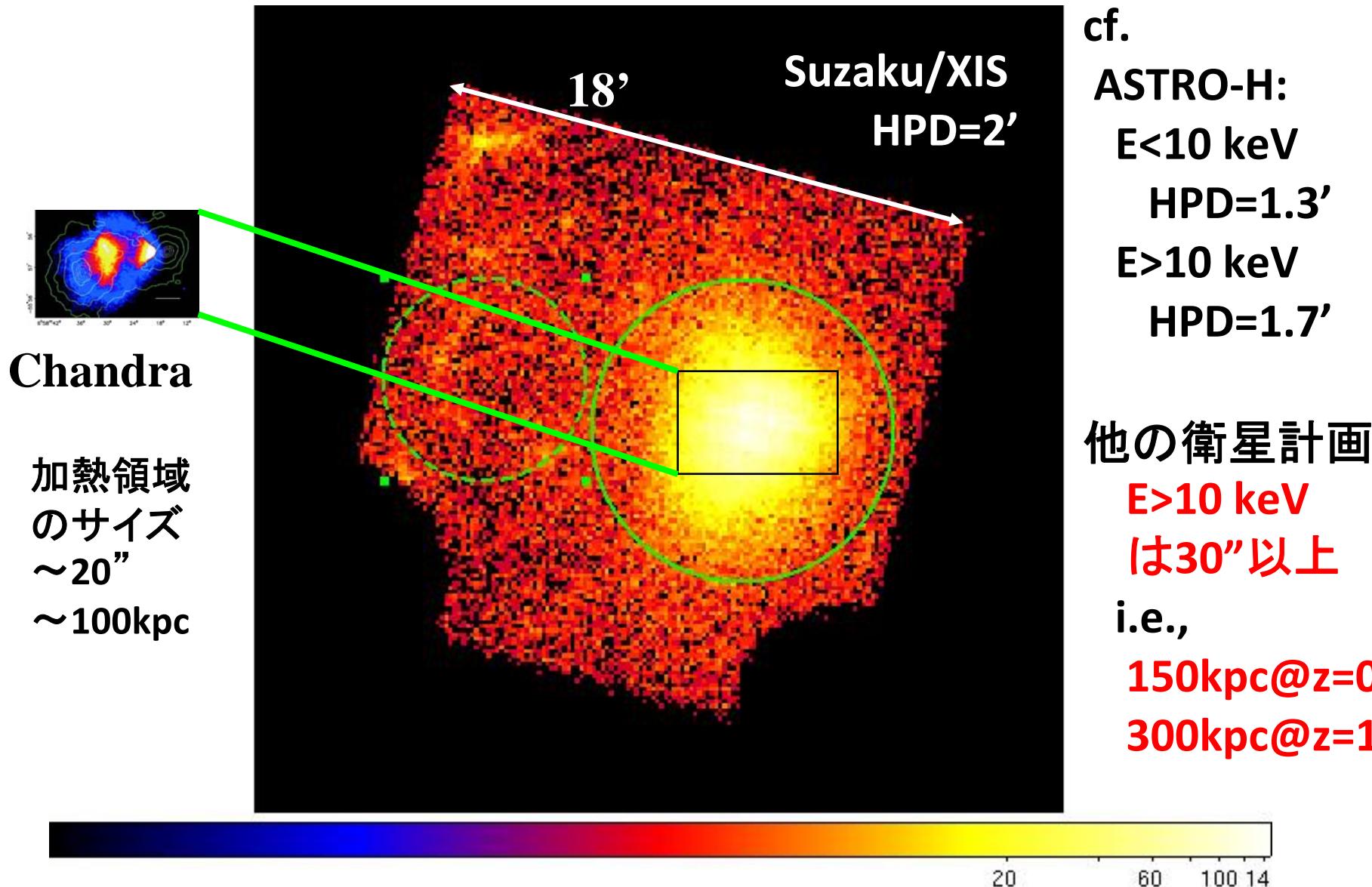


Input based on XMM results  
at E<10 keV (Finoguenov+10).

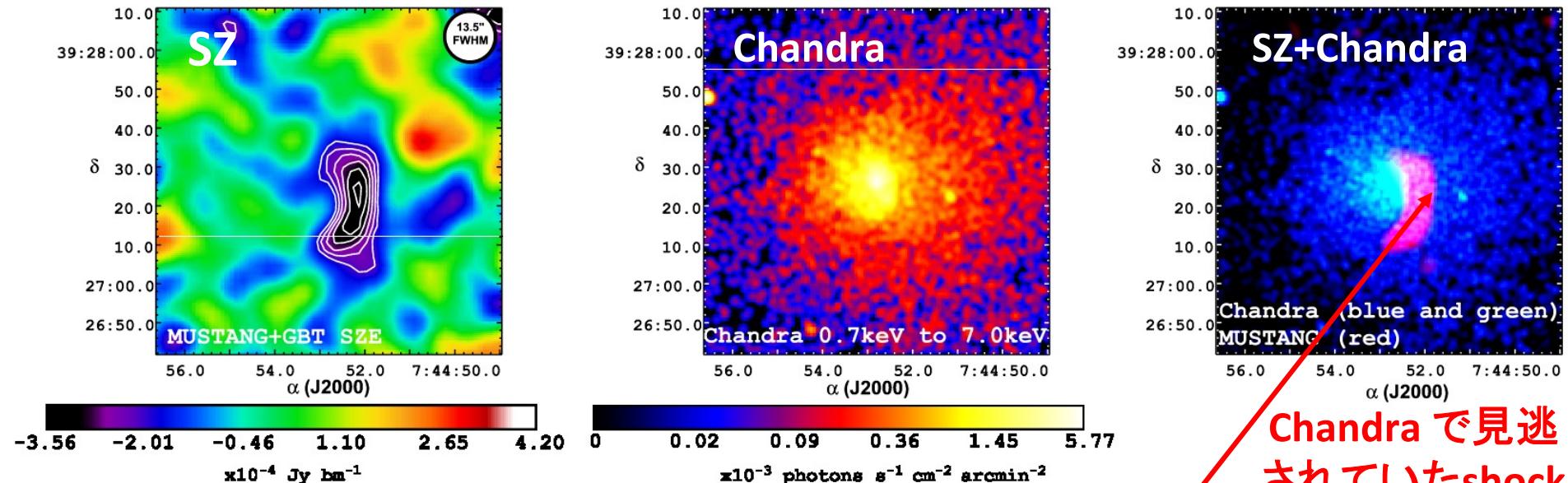


Stat + Sys (NXB 5%, CXB<sub>FOV</sub> 6.6%,,,) included

# Suzaku imae of Bullet Cluster @ z=0.3

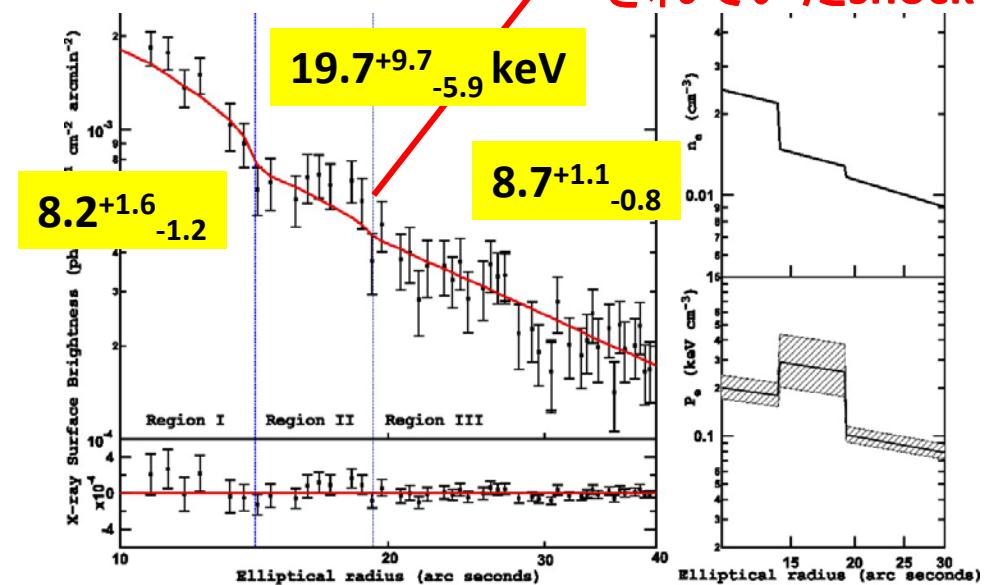


# 高分解能SZ効果観測: MACS J0744+3927 @ z=0.69



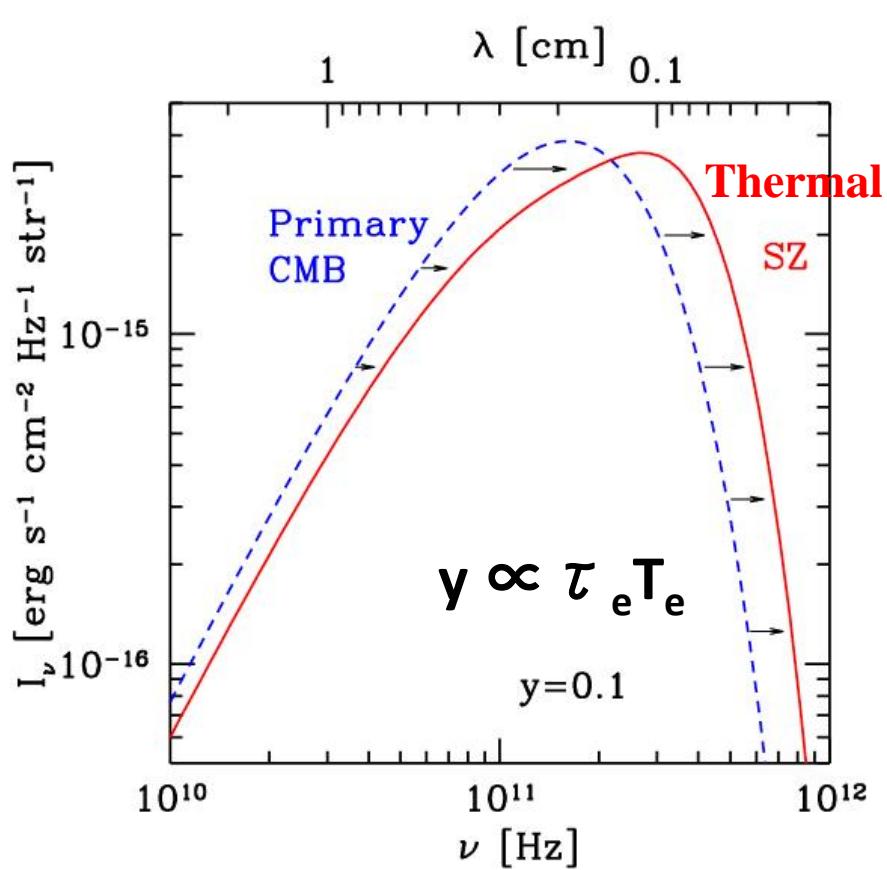
MUSTANG on GBT 100m  
90GHz, Effective beam **13.5''**  
>30'' の情報はフィルターで除去  
(Korngut et al. 2010)

**M=1.2±0.2** (密度差より)  
→  $V_{\text{shock}} = 1827^{+267}_{-195} \text{ km/s}$   
※温度差からは  $M=2.1^{+0.8}_{-0.5}$



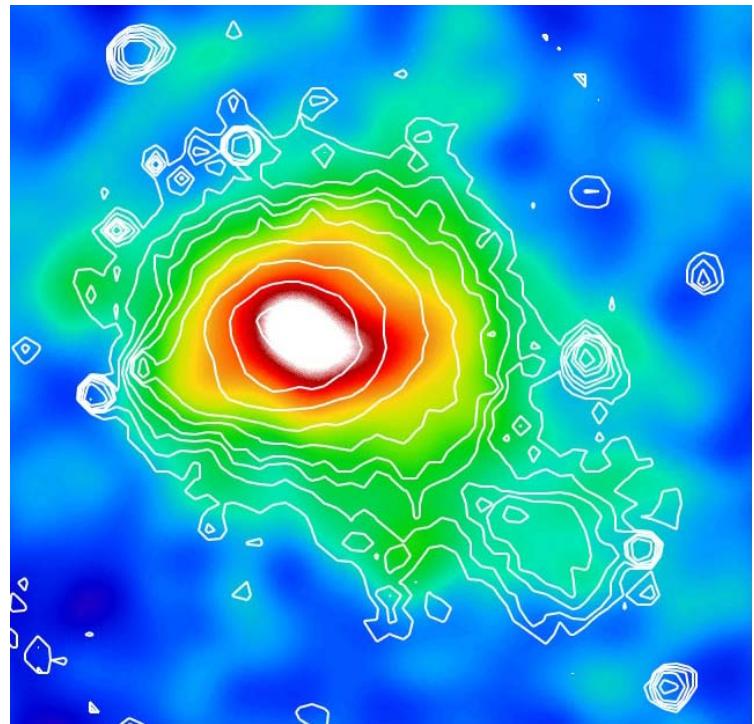
# Sunyaev-Zel'dovich 効果(SZE)

熱的プラズマによる逆コンプトン散乱 (SZ 1969)

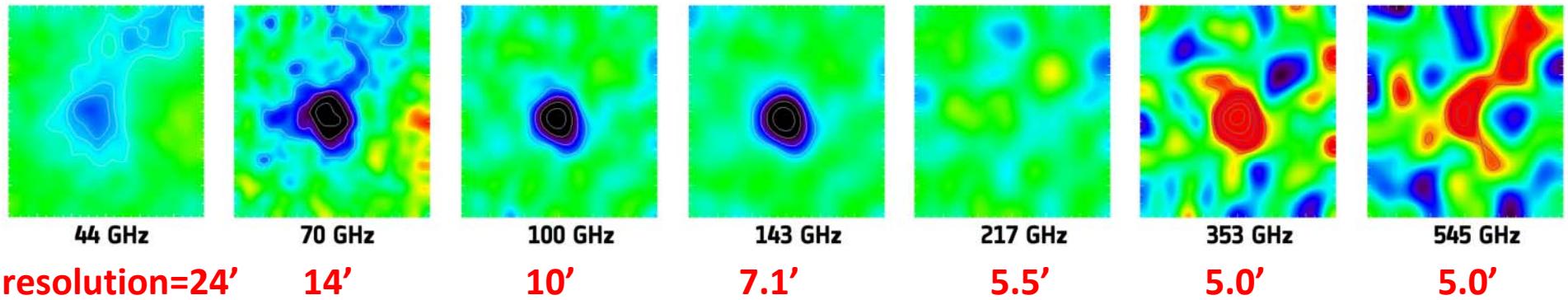


- ・特徴的スペクトル  
RJ(ミリ波): decrement  
Wien(サブミリ波): increment
- ・  $I_{\text{SZ}} \propto \int n_e T_e dl$   $z$ によらない  
 $\Rightarrow$  **high  $z$ , high  $T$**  に高感度  
& **圧力分布(ショック含む)**  
の直接測定
- \* 銀河団進化では、 **$z > 1$**  が特に重要。  
merger 頻度も高かつたはず  
(宇宙の加速膨張前)

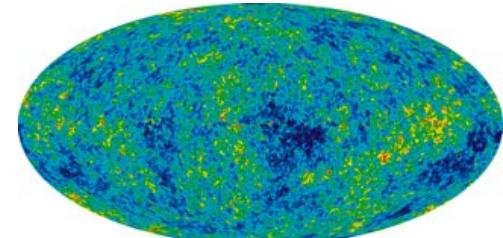
# PLANCK (2009-2012)



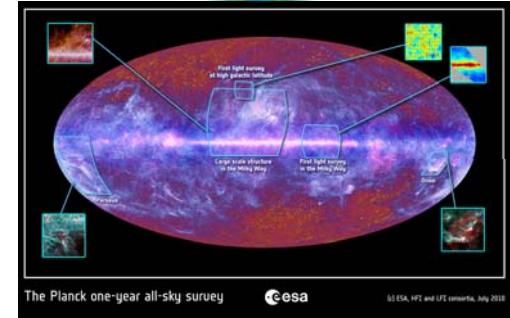
Abell 2319 at  $z=0.056$



WMAP  
7 yr



PLANCK



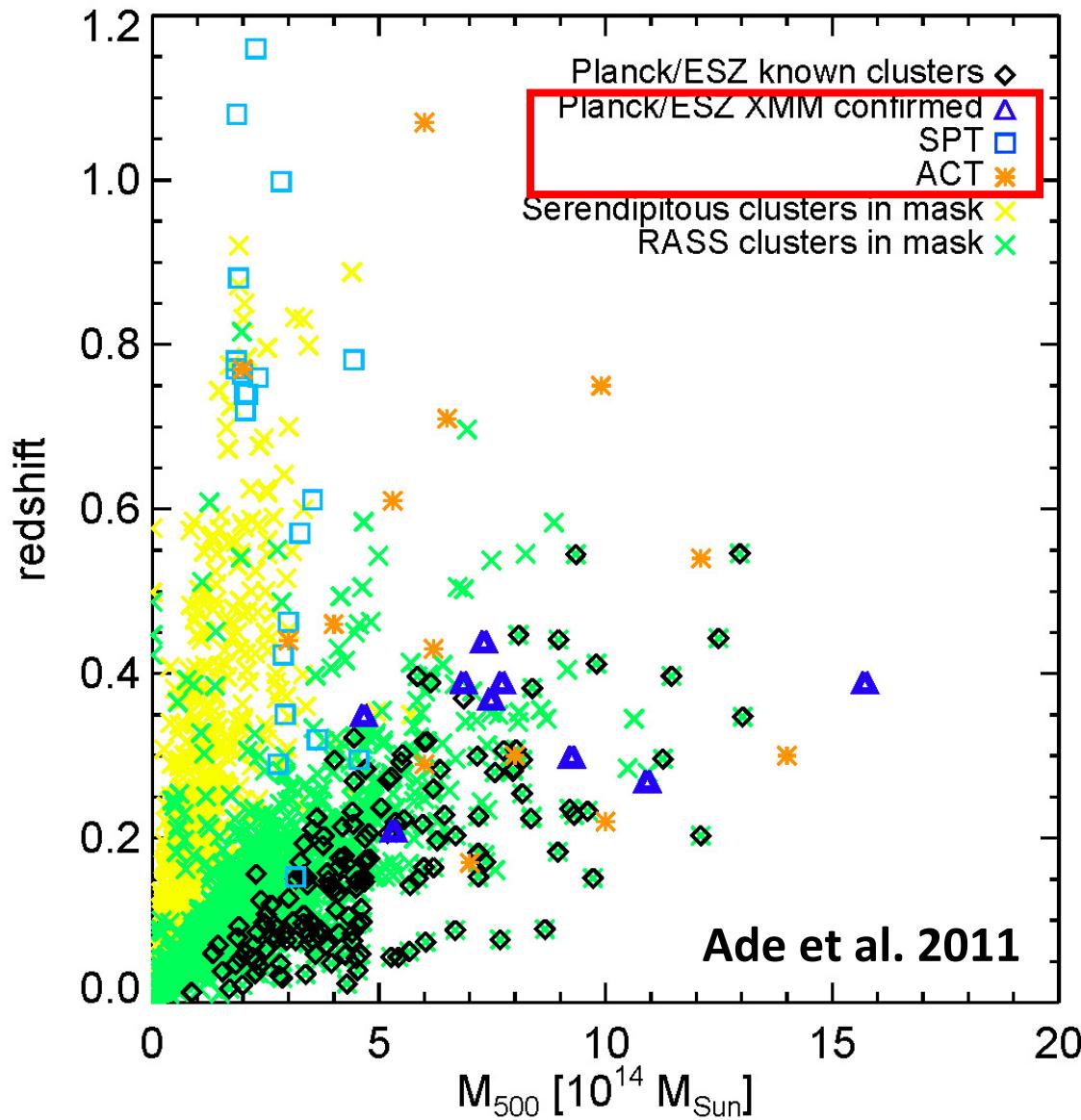
<100GHz 分解能約1.5倍  
>100GHz 新データ！

全天データ！

Coma at  $z=0.023$

color: y-parameter (SZ)  
contour: ROSAT X-ray

# SZE selected clusters

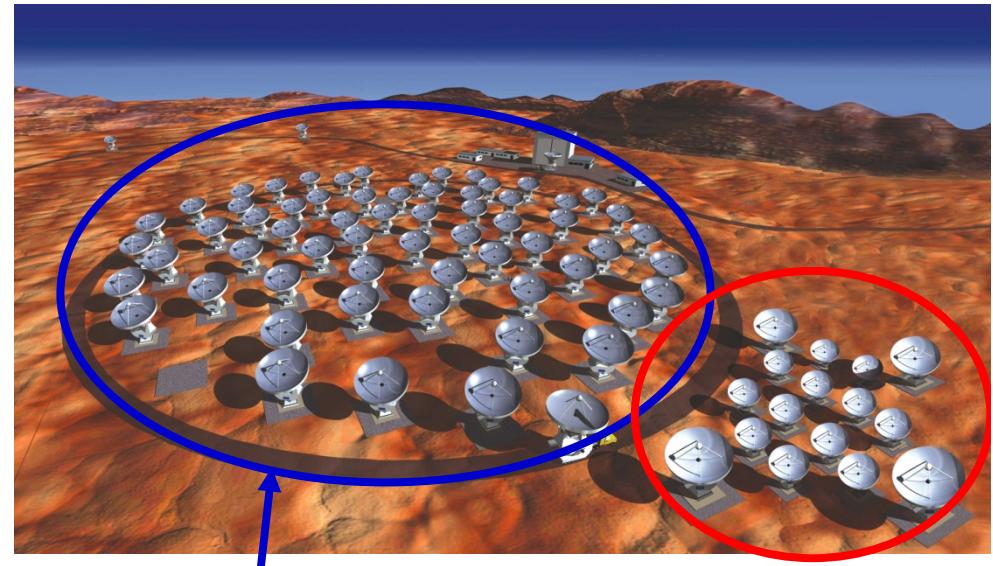


- Planck (all sky)  
**189 clusters** in 10 mon.  
**20 new**  
(Ade et al. 2011)
  - SPT (4000 deg<sup>2</sup> total)  
**26 clusters** in 2500 deg<sup>2</sup>  
**12 new**     $\langle z \rangle = 0.74$   
(Williamson et al. 2011)
  - ACT  
**23 clusters** in 455 deg<sup>2</sup>  
**10 new**  
(Marriage et al. 2011)
- \* Only high S/N clusters.  
\* High fraction of mergers.

# ALMA/ACAによる SZ効果観測 シミュレーション (Yamada et al.)

ALMA Specifications (rough values):

Band	$\nu$ [GHz]	resolution[""]	FOV[""]
(1)	31-45	13-0.1	140
(2)	67-90	6-0.05	80
<u>3</u>	<u>84-116</u>	<u>5-0.04</u>	<u>62</u>
4	125-169	3-0.03	43
5	163-211		33
6	211-275	2-0.02	26
7	275-373	1.5-0.012	19
8	385-500	1.0-0.009	14
9	602-720	0.7-0.006	9
10	787-950	0.5-0.005	7



12m × 50  
Higher resolutions

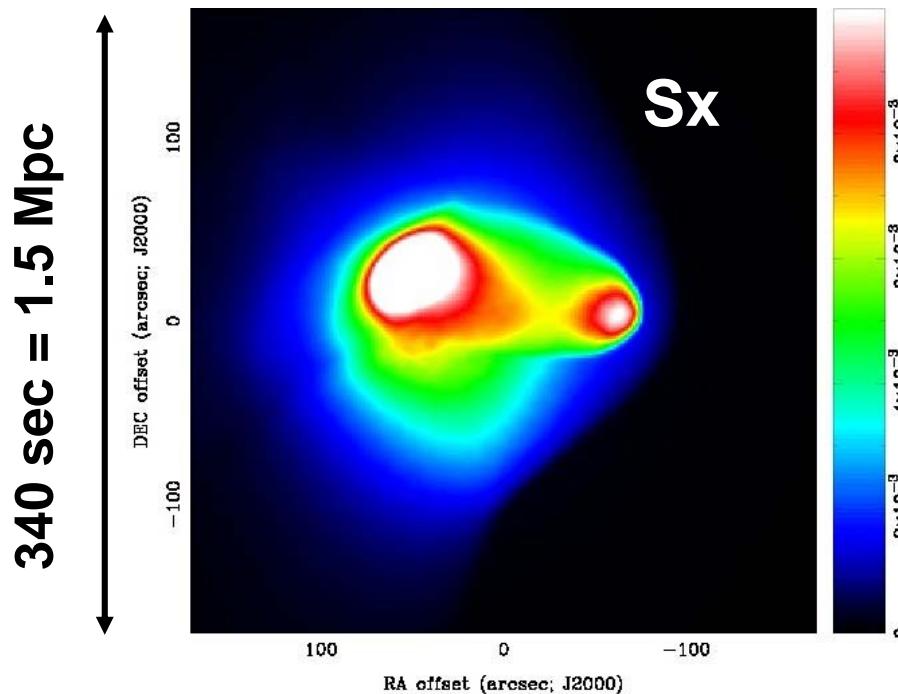
Atacama in Chile  
5000m above sea level  
Early operation: 2011-

ACA  
(Atacama  
Compact  
Arrays)  
7m × 12 &  
12mSD × 4  
Lower resol.

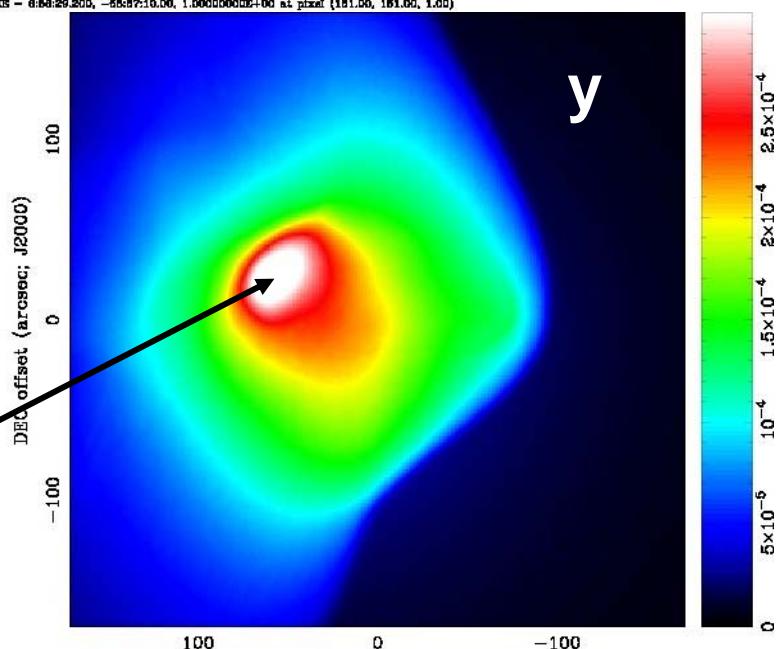
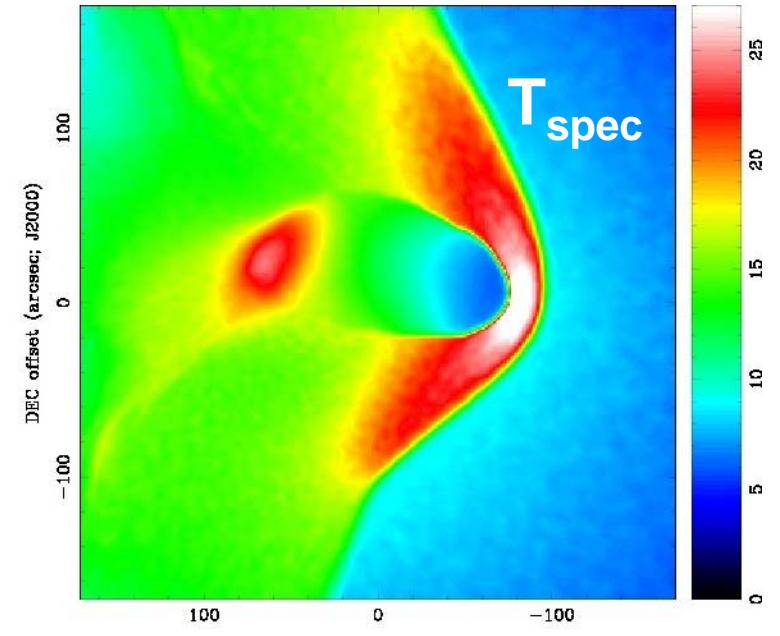
※Bands 1, 2 will be  
added in the future.

# Simulated Bullet cluster

(Akahori & Yoshikawa)



Rescaled to match the obs.  
value  $y=3.3 \times 10^{-4}$  by APEX-SZ  
(Halverson et al. 2009)



# その他のSZ効果

## 1. Kinematic SZE (SZ 1970)

- ガス視線運動、強度 $\propto V_{//} \times \tau_e$
- $\nu \sim 230\text{GHz}$  にピーク
- 有意な検出報告は無い  
→ 4000km/s あればALMAで

## 2. Non-thermal SZE (e.g. McKinnon+91)

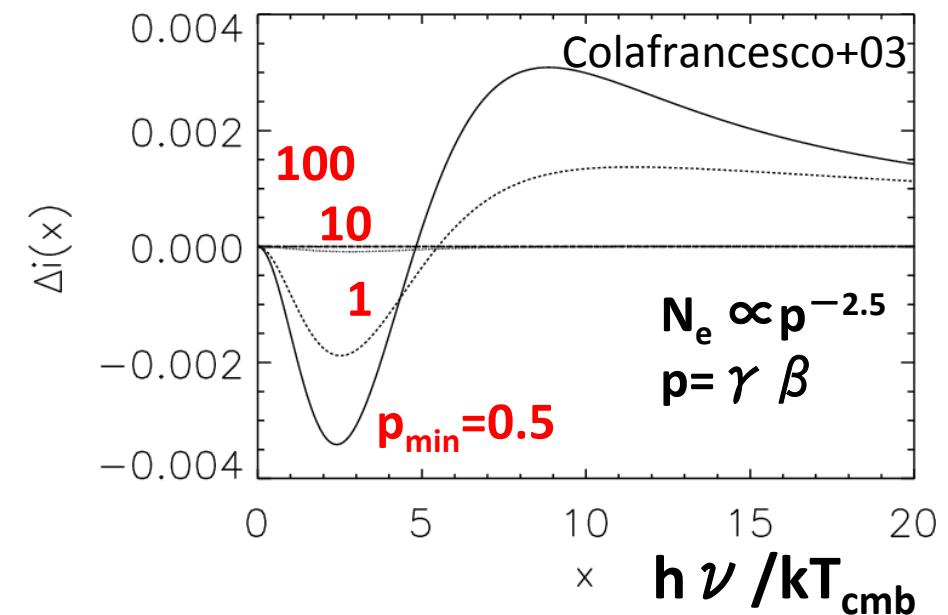
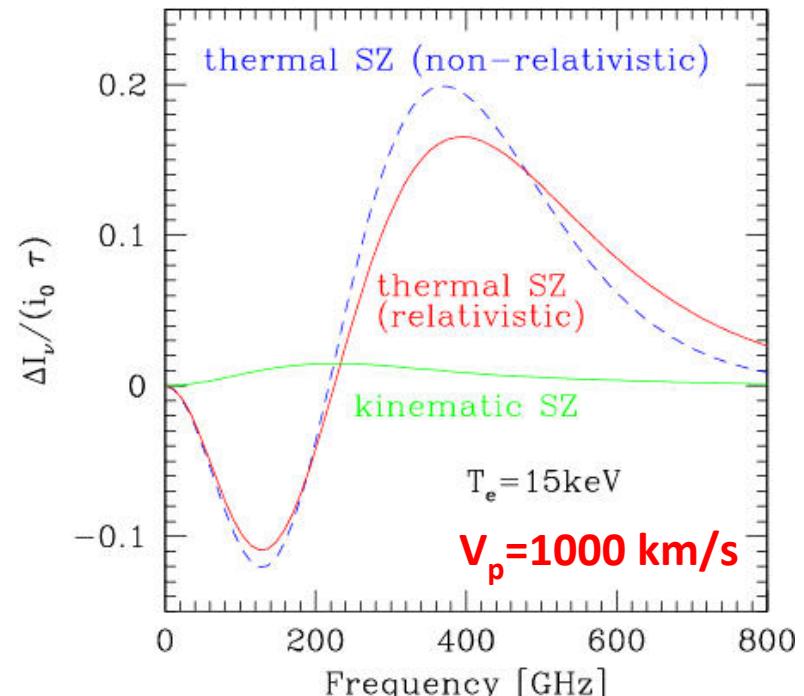
- low  $\gamma$  電子
- 寿命短い(Coulomb loss)

## 3. Polarization SZE (SZ 1980)

Leading terms with  $\propto \tau_e$

- 1) 銀河団が見たCMB 4重極
- 2) transverse motion of gas

いずれも  $P < 10^{-7}$



# 銀河団の高エネルギー現象：まとめ

## 1. 激しい衝突活動

- ・数例のショック、 $kT_e > 20\text{keV}$ ,  $V_{\max} \sim 4000 \text{ km/s}$ (換算値)
- ・頻度？ 乱流？ 非平衡過程？ 磁場？

## 2. “一部”の銀河団に非熱的電子

- ・ $\gamma_e \sim 10^4$ ,  $E_{nt} < 0.1 E_{th}$  有意な検出は電波のみ
- ・普遍性？ 加速機構？ 陽子？ 最高エネルギー？
- ・軟X線～硬X線は、熱的成分との区別も必要

⇒ **ASTRO-H**: 高分散X線分光 & 硬X線 (HPD=1~2')

**Nustar**: 硬X線(HPD=45")、サーベイ中心、銀河団も数個？

**ALMA, MUSTANG, CARMA**: 高分解能SZ (HPD<10")

**LOFAR, SKA**: Radio halo/relic, Faraday rot. の高感度観測

**CTA**:  $\gamma$ 線マッピング

etc.