

Phoenix 銀河団の多波長観測

滝沢元和

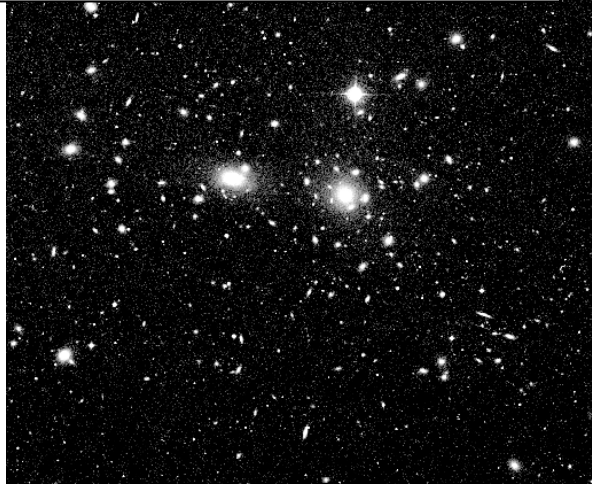
研究室談話会(2022.6.28)

T. Kitayama, S. Ueda, T. Akahori, E. Komatsu, R. Kawabe, K. Kohno, S. Takakuwa, T. Tsutsumi,
M. Takizawa, K. Yoshikawa, PASJ, (2020), 72, 33

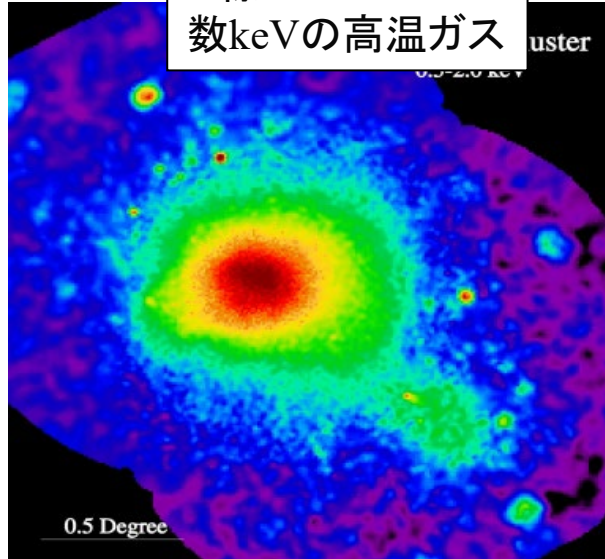
T. Akahori, T. Kitayama, S. Ueda, T. Izumi, K. Lee, R. Kawabe, K. Kohno, M. Oguri, M. Takizawa
PASJ, (2020), 72, 62

Introduction: 銀河団

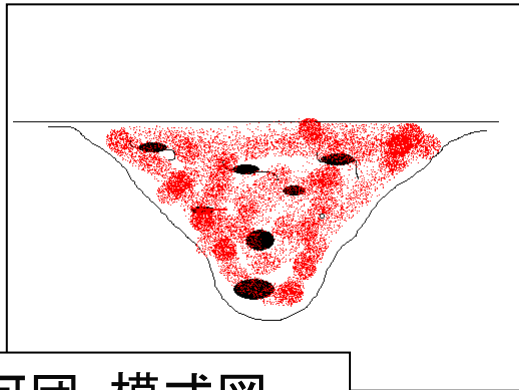
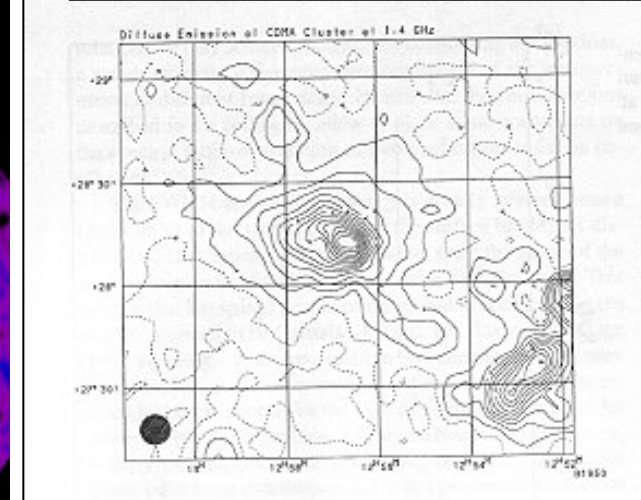
可視光
(数100個の銀河の集まり)



X線
数keVの高温ガス



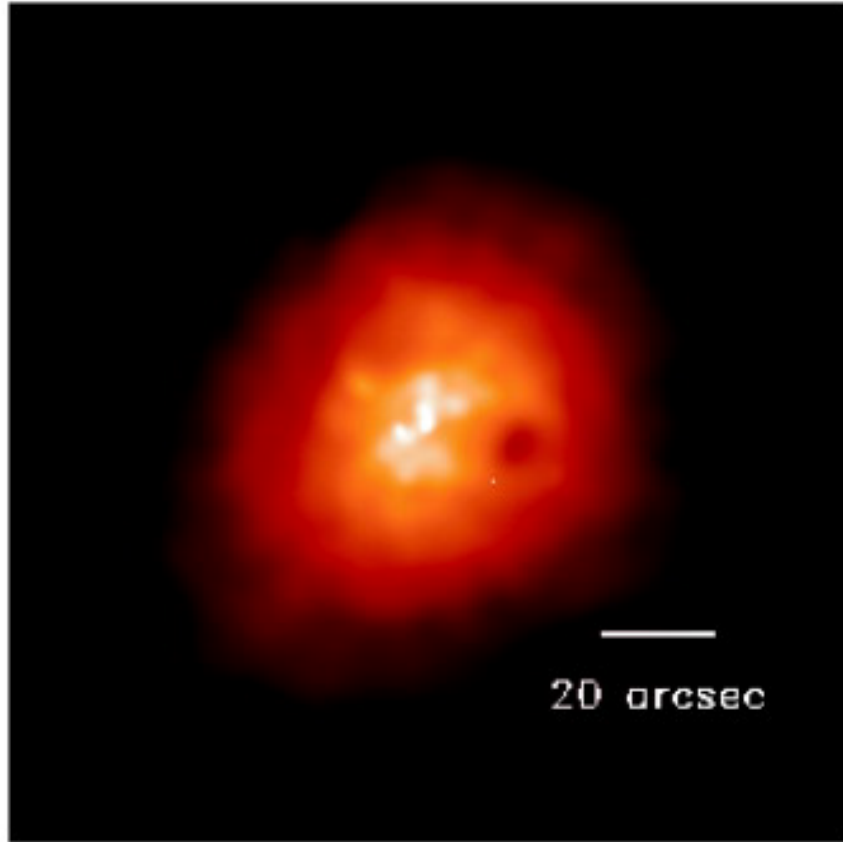
電波
数GeVの高エネルギー電子+磁場



銀河団: 模式図

- 暗黒物質の重力ポテンシャル中に束縛された高温ガス ($T \sim 10^7 - 8 \text{ K}$) と銀河のかたまり。
- 宇宙で最大のビリアライズした天体
($R \sim \text{Mpc}$, $M \sim 10^{14-15}$ 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)
- 暗黒物質の実験場 (重力レンズ、self-interacting dark matter など)

Cooling flow (冷却流) 仮説



Abell 2597
(Mcnamara et al. 2001)

熱制動放射でX線で光る

——> ガスからみるとエネルギーを放射で失う

$$t_{\text{cool}} \sim 2 \times 10^{10} \left(\frac{n_{\text{gas}}}{10^{-3} \text{cm}^{-3}} \right)^{-1} \left(\frac{T}{10^8 \text{K}} \right)^{\frac{1}{2}} \text{yr}$$

かなりの割合の銀河団中心部

($n_{\text{gas}} \sim 10^{-2} \text{cm}^{-3}$ 、 $T \sim 10^7 \text{K}$) ではガスは宇宙年齢以内で冷却可能

——> なにがおこるか？

Cooling flow (冷却流) 仮説(2)

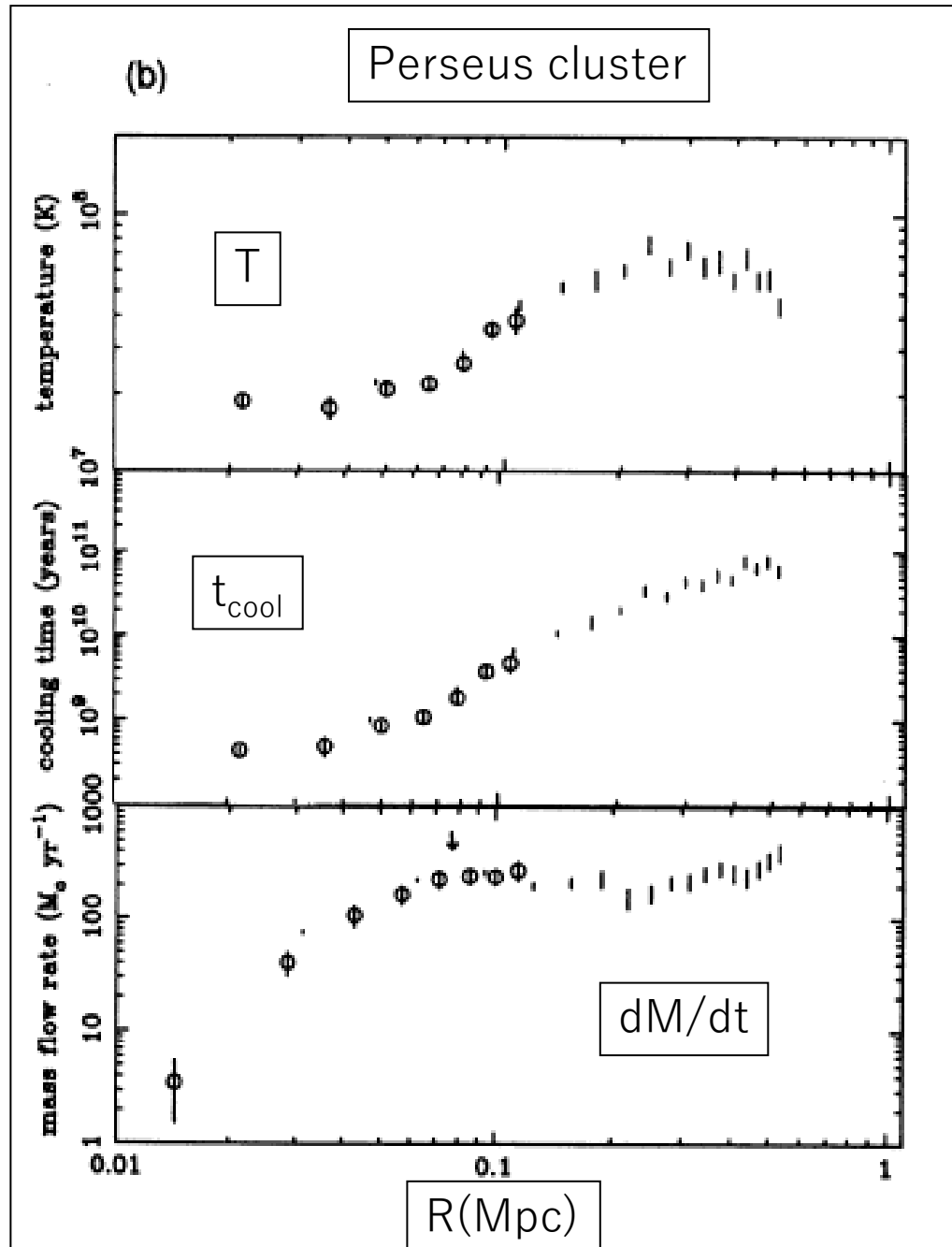
- ガスが冷える → 圧力が下がる →
圧力平衡に達するまで周りから圧縮される → 密度が上がる
→ 冷却時間が短くなる → 最初へ
- 中心部ほどガスは冷えやすい → 放射冷却によって引き起こされる銀河団中心部へのガスの流れの形成 (cooling flow仮説)
- もし、 $dM/dt \sim 100 \text{ solar mass/yr}$ が $\sim 10^9-10^{10} \text{ yr}$ 続くと、、、、
 $M \sim 10^{11-12} \text{ solar mass}$ (銀河 1 - 10 個分) の質量が銀河団中心に集まることになる。 → 新銀河の誕生場面？
- プラズマ物理の実験場 (冷却、加熱、熱伝導、磁場)

Estimation of mass deposition rate

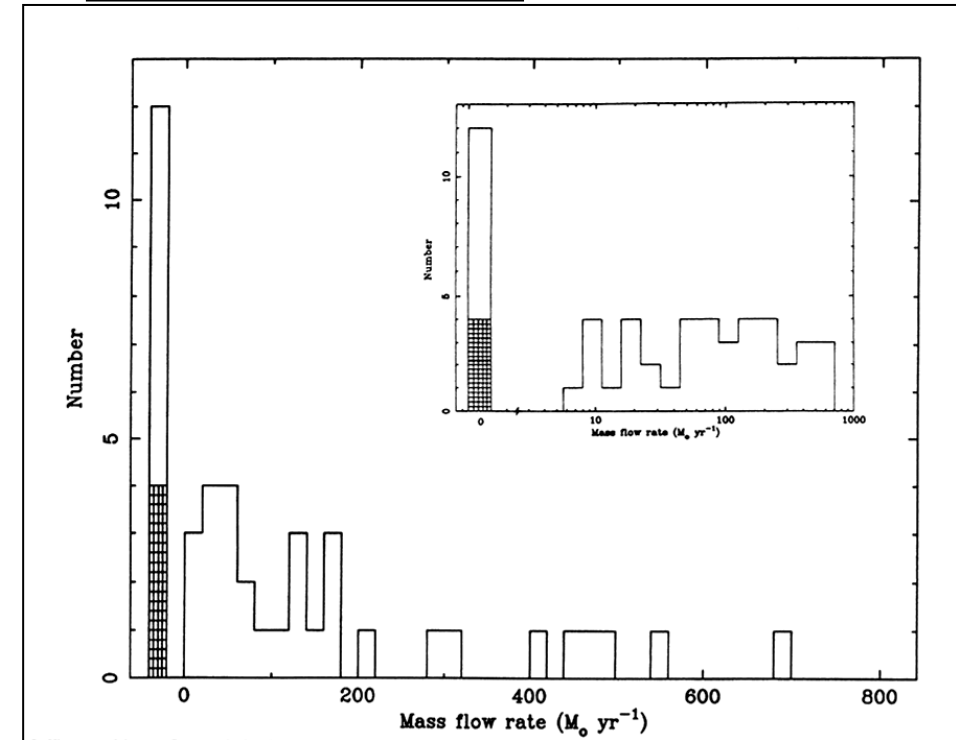
- どれだけの質量の高温ガスが cooling flow になって冷えているのか？
- Imaging から決める mass deposition rate
 - $dL_{\text{cool}} = (5/2)(dM/dt)(kdT/\mu m_p)$
 - 放射で逃げたエネルギーを補うだけ、ガスは等圧的に縮む。
 - 有効な加熱源がないことを仮定。
- Spectroscopy から決める mass deposition rate
 - $L_{\text{cool}}(\nu) = (5/2)(dM/dt)(\mu m_p) \int \varepsilon_{\nu}(T)dT/\Lambda(T)$
 - Cooling function $\Lambda(T)$ の逆数 (cooling time) で重みをかけて、各温度のスペクトル $\varepsilon_{\nu}(T)$ を重ね合わせる。

ROSAT までの時代

主にimagingによって(dM/dt)が
きめられる。



dM/dt の頻度分布



Edge et al. (1992)

ASCA時代

Imaging で決めた(dM/dt)

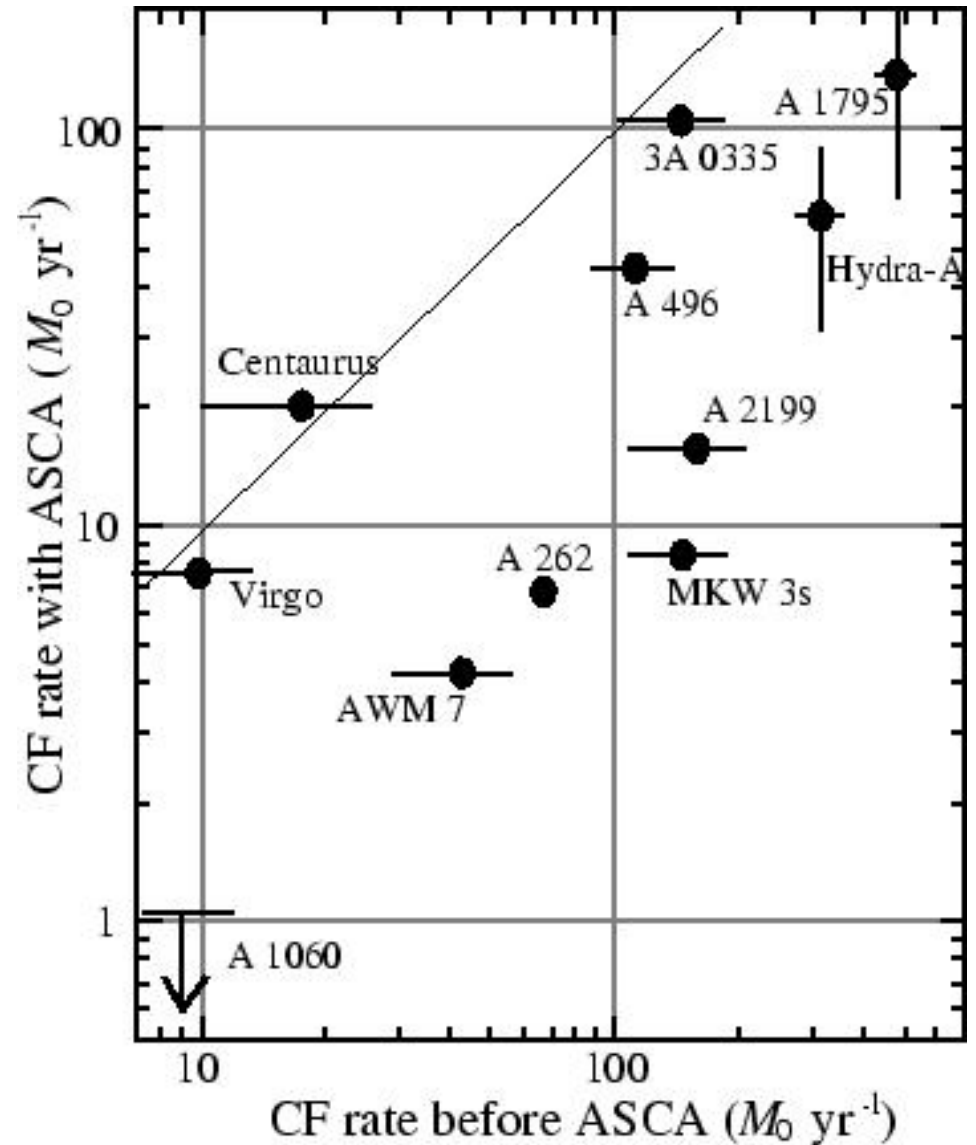
∨

スペクトルから決めた(dM/dt)

— — >何かおかしい

中心部で二温度プラズマ
($T_{\text{low}} \sim 0.5 T_{\text{high}}$)

ジャムパン vs レーズンパン ?
単に c D 銀河の成分が見えてるだけ?

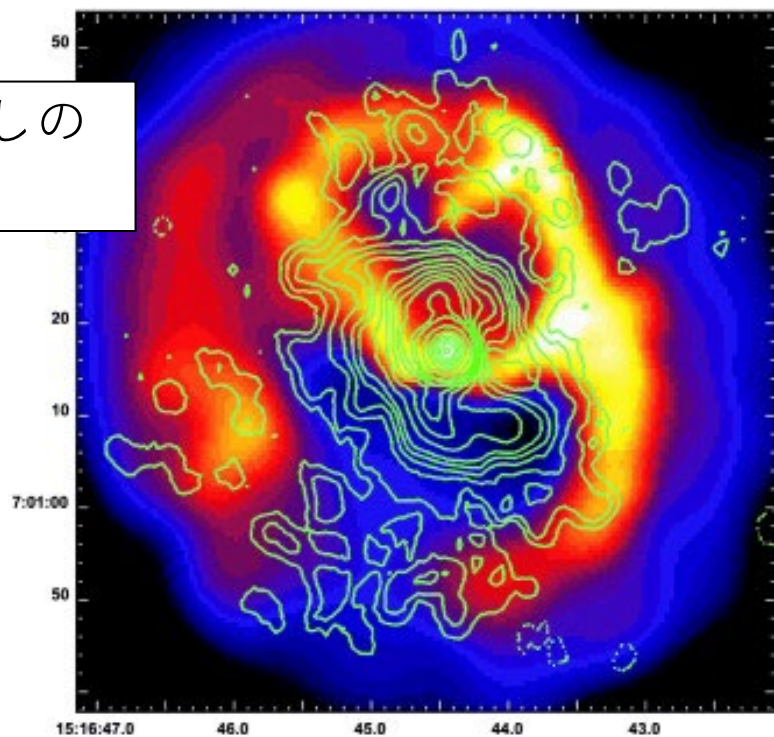


Makishima et al. (2001)

Chandra & XMM-Newton 時代(Chandra 編)

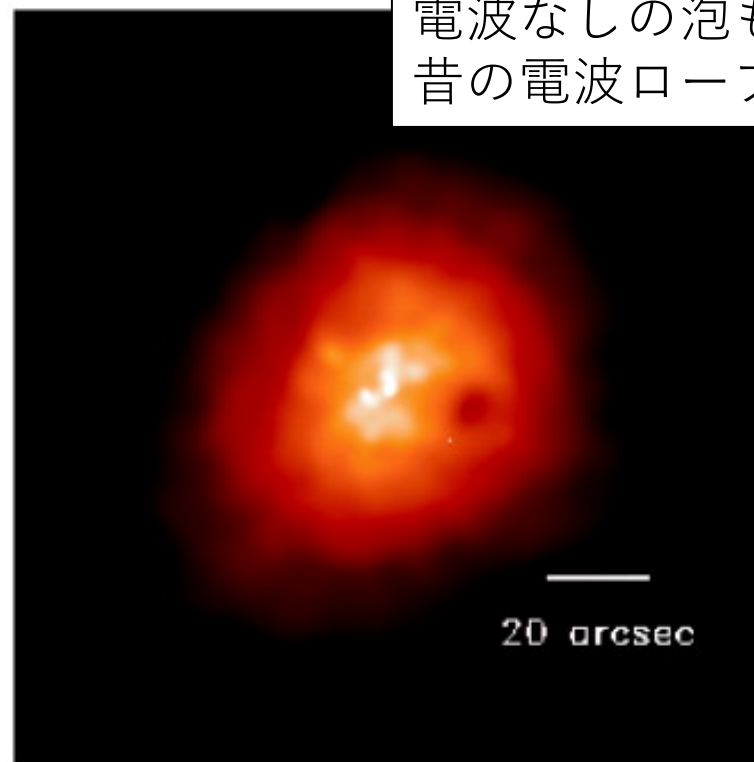
銀河団中心部で A G N が周囲の I C M と相互作用するのが
見えてきた。

電波ローブに押し
のけられる I C M



Abell 2052
カラー：X線の残差 等高線：電波
Blanton et al. (2001)

電波なしの泡も：
昔の電波ローブ？



Abell 2597
McNamara et al. 2001

Chandar & XMM-Newton(XMM-Newton 編)

高分解分光でcool gasの量に厳しい制限

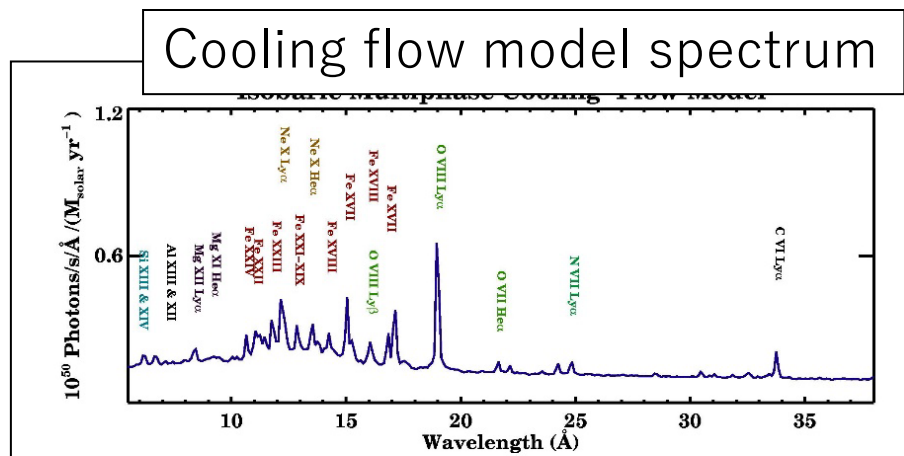
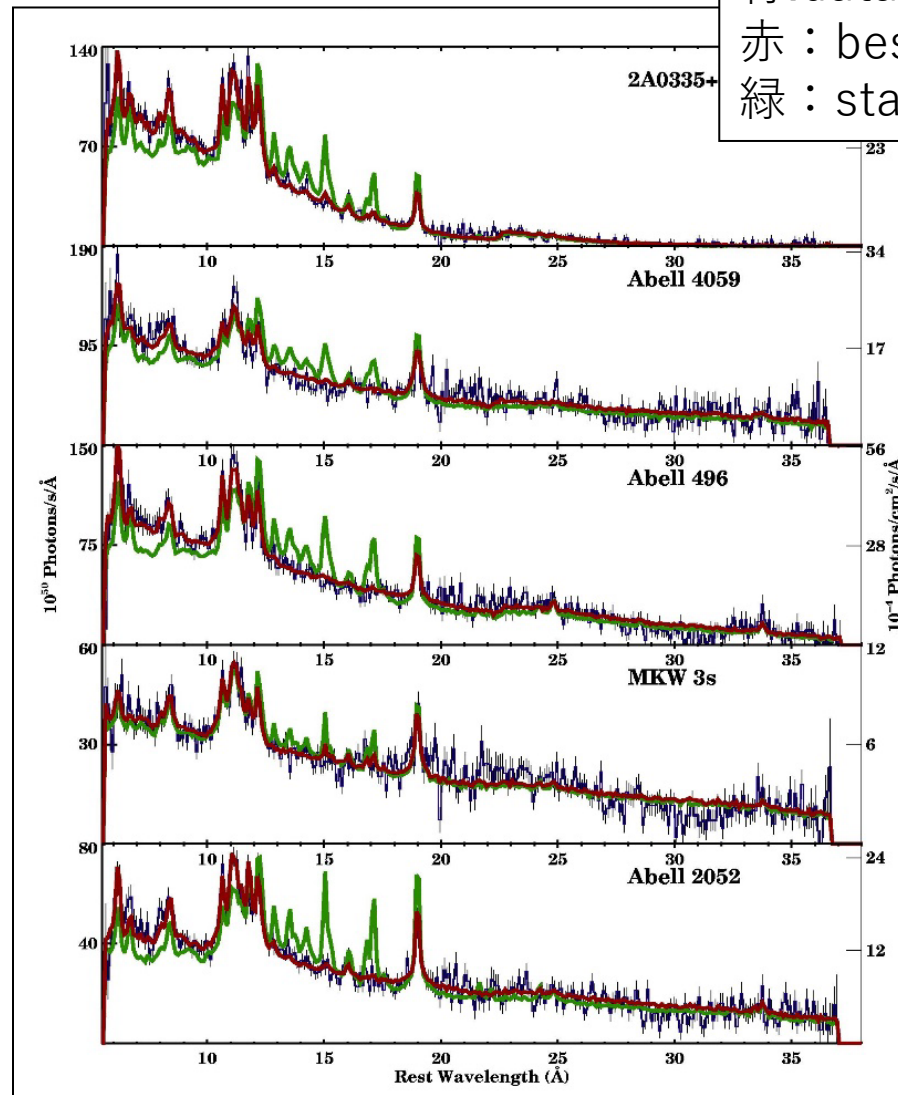
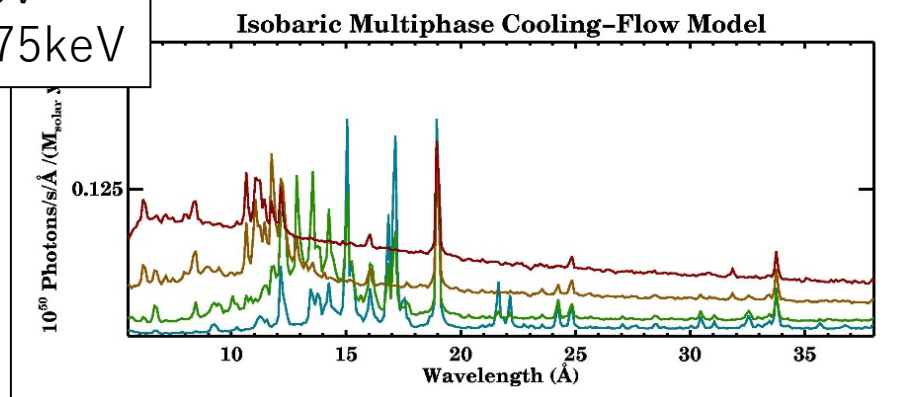


FIG. 1. The predicted spectrum of the isobaric multiphase model for a maximum temperature of 6 keV. Note that Fe L lines and O VIII are particularly prominent.

青: data
赤: best fit
緑: standard CF model



赤: 6-3keV
黄: 3-1.5keV
緑: 1.5-0.75keV
青: 0.75-0.375keV

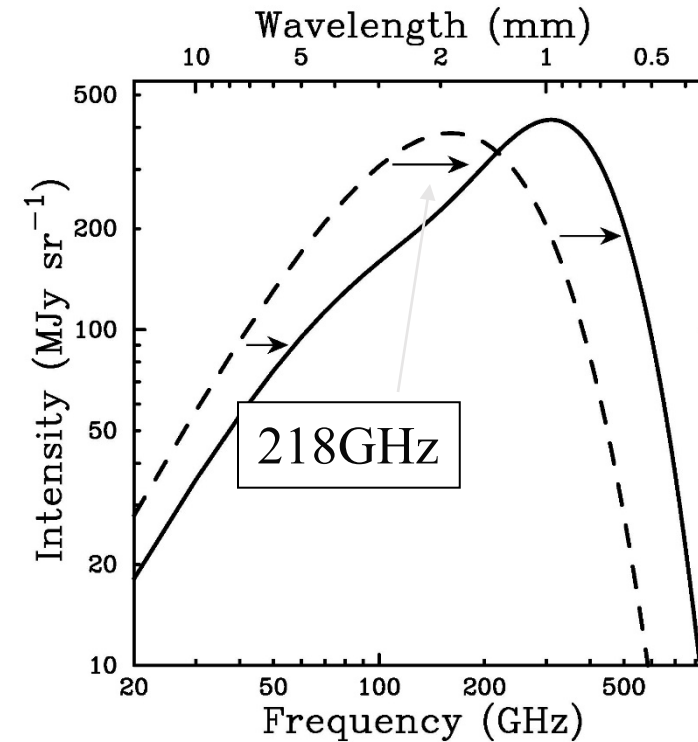
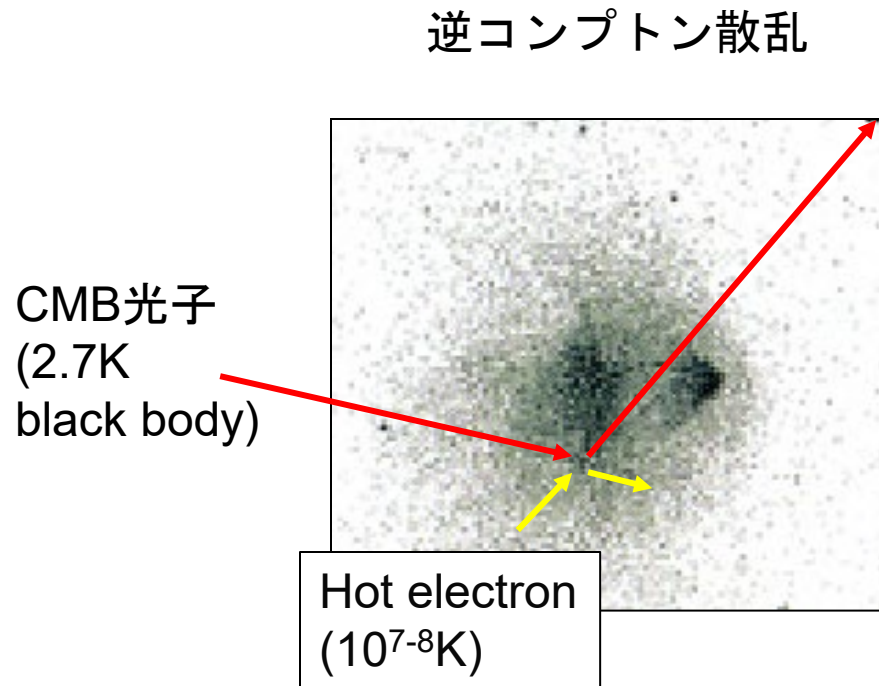


Peterson et al.
2003

近傍銀河団でわかってきたこと： cooling flow からcooling coreへ

- 銀河団中心部ではガスの冷却時間が宇宙年齢より充分短い
--->冷えて内向きの流れが生じる (cooling flow 仮説)
中心銀河への大規模な質量降着、大量の星形成活動に??
- 近傍の銀河団を見る限り、確かに低温領域はあるが、予想ほどは冷えていない。
- 中心銀河に予想されるような大規模な星形成活動は見られない。
---->なにか加熱源 (たぶん中心銀河の電波ジェット、ローブなど??)
とバランスしているようにみえる (cooling core)。
- 遠方では？
- 加熱が始まる前の天体はあるのか？

Sunyaev-Zel'dovich 効果



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

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。

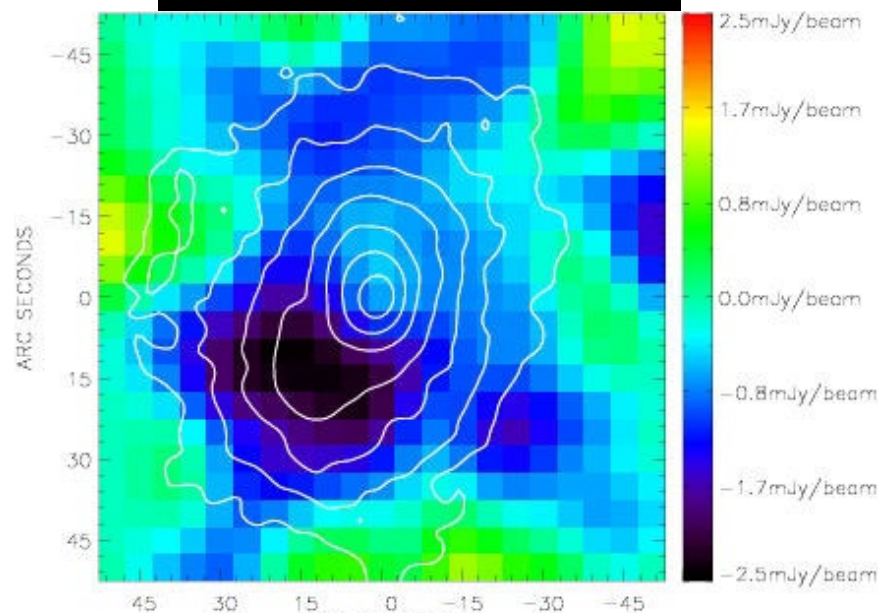
$$I_X \propto (1+z)^{-4}$$

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

high z object にはSZが相対的に有利

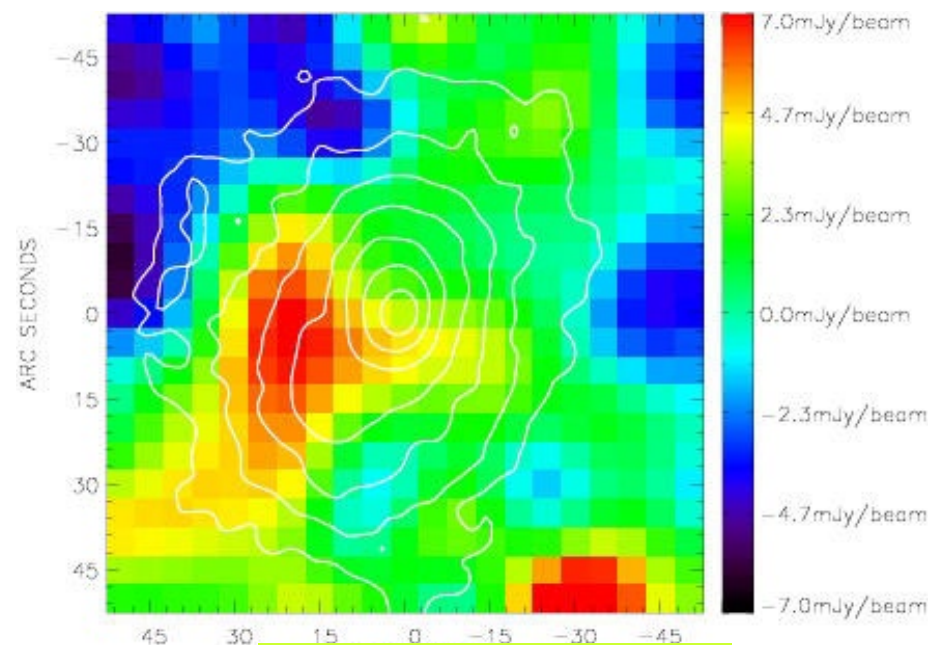
SZE vs X-ray maps of RX J1347.5-1145

ミリ波 (decrement)



150GHz, NOBA on Nobeyama 45m
13" beam, 15" smoothing
(Komatsu et al. 2001)
Contours: Chandra X-ray (Allen et al. 2002)

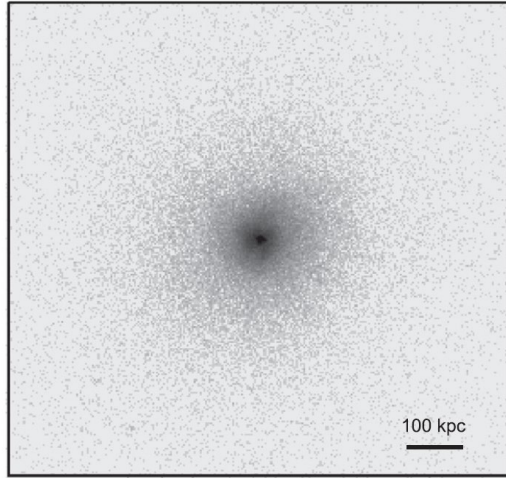
サブミリ波 (increment)



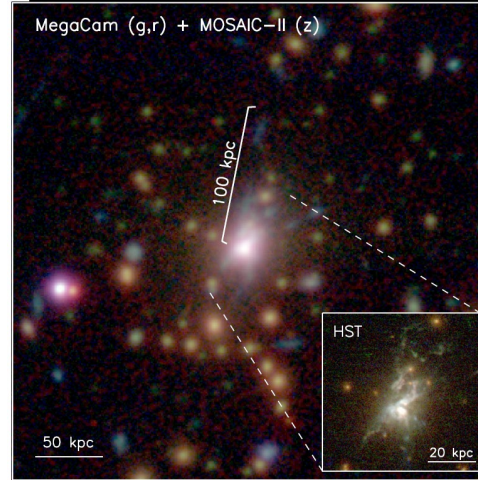
350GHz, SCUBA on JCMT 15m
15" beam, 15" smoothing
(Komatsu et al. 1999)

X線(等高線)とSZ(カラー)で
空間分布が違うように見える。

Chandra でのX線イメージ



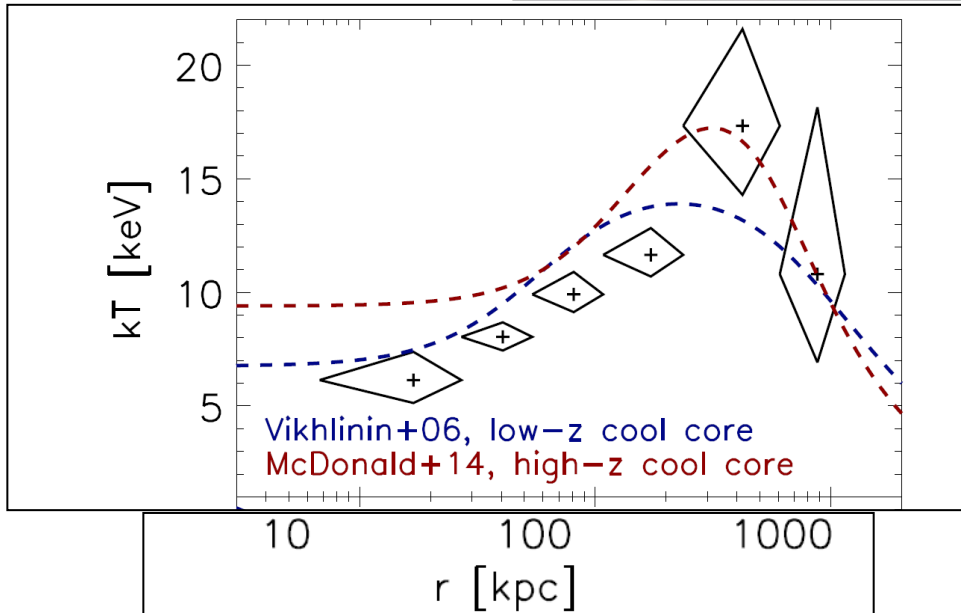
可視光 image
中心銀河はfilamentaryな構造(冷えたガス??)



Phoenix 銀河団

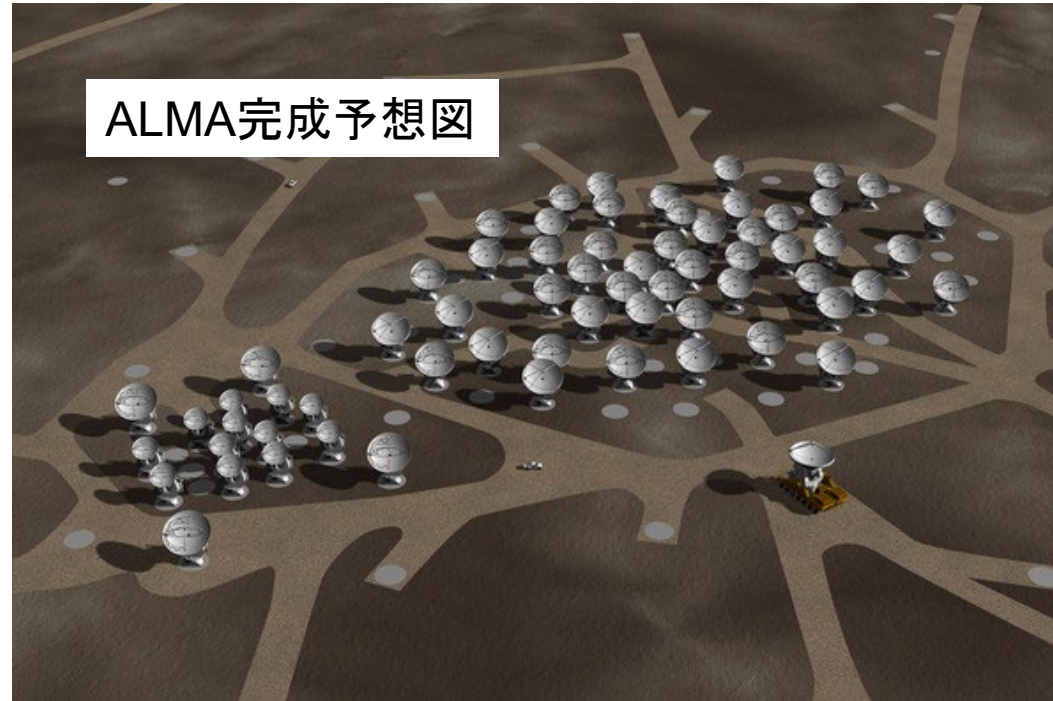
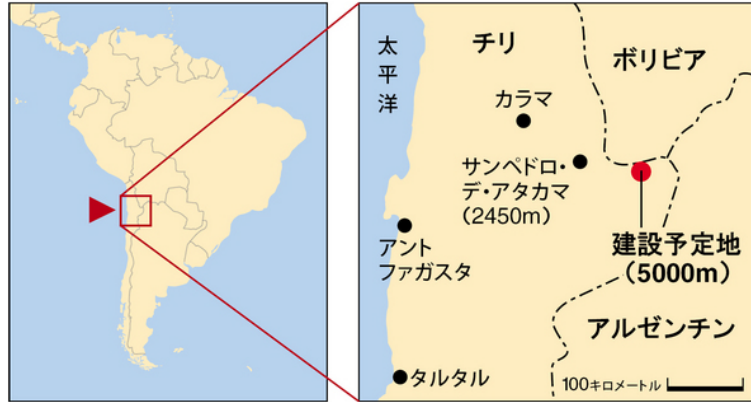
(McDonald et al. 2015)

- 比較的遠方 $z=0.596$
- ガスの分布などは近傍の典型的な cooling core 銀河団ににている。
- しかし中心部を詳しく見てみると、、、
 - より低温、短冷却時間ガスの存在を示唆
 - 中心銀河で活発な星形成活動 (~ 600 solar mass/year)
- classicalな cooling flow シナリオにむしろ近い?
- ただ問題も
 - 中心AGNが強いX線点源
 - X線スペクトルの解釈のモデル依存性
 - 中心AGNの電波放射が空間分解されていない



温度分布。典型的な cool core 銀河団より冷えているように見える

Atacama Large Millimeter/Submillimeter Array (ALMA)



- ミリ波・サブミリ波で最高の感度・分解能を誇る電波干渉計
- 12m-Array (50台)、7 m-Array(12台 + 12mを4台)
- 2011年より初期運用開始、2013年より本格運用
- 東アジア、米、欧、チリによる国際共同プロジェクト

観測のまとめ

(Kitayama et al. 2020)

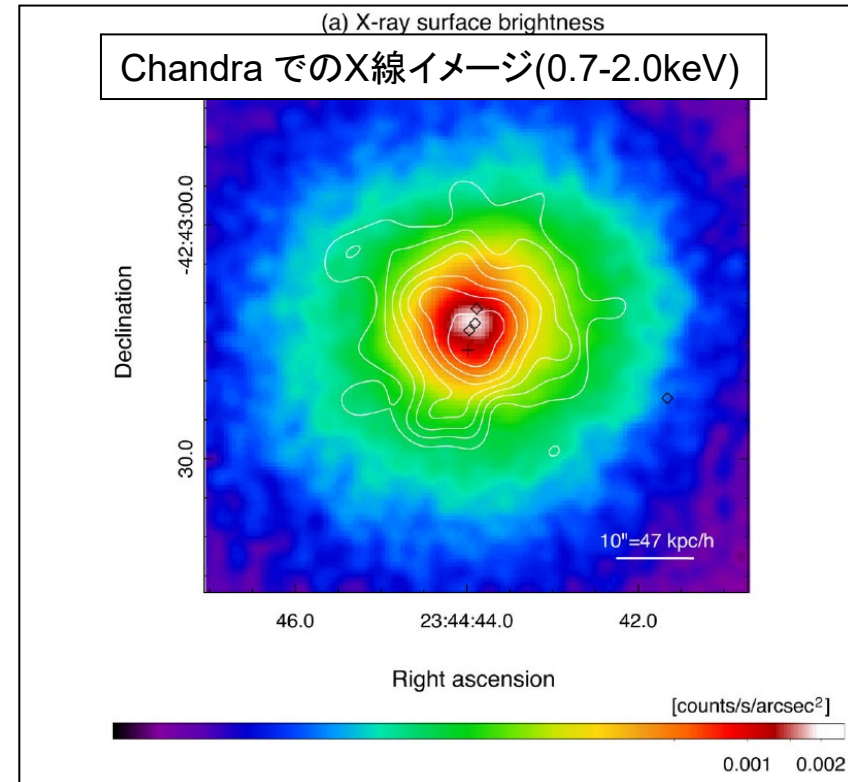
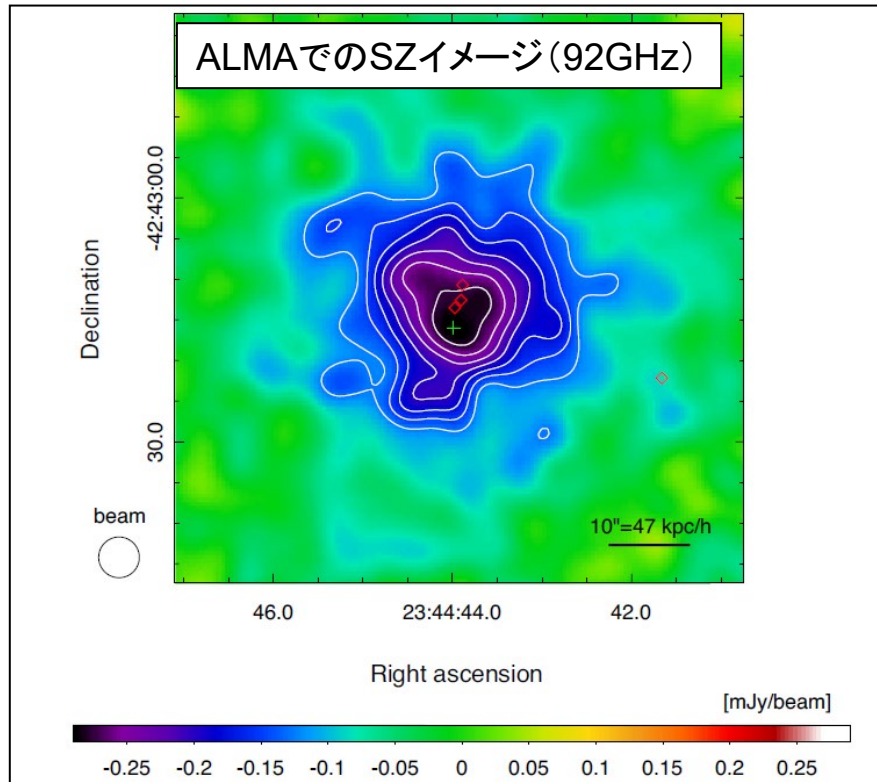
Table 2. Properties of synthesized images.

Array	12 m	12 m (>30 k λ only)	7 m	12 m + 7 m
Beam major axis FWHM ["]	2.22	1.86	19.7	2.25
Beam minor axis FWHM ["]	1.89	1.61	11.5	1.92
Beam position angle [°]	76.6	74.4	84.2	76.6
Average 1σ noise [mJy beam ⁻¹]	0.0123	0.0144	0.0714	0.0122

Table 1. Summary of observations.

Array	12 m	7 m
Date	2016 March 17–19	2016 May 3–June 12
Total on-source time [hr]	3.21	8.06
Number of execution blocks	4	15
Number of antennas	36–37	7–10
Flux calibrator	Neptune	Neptune, Uranus
Phase calibrator	J2336–4115	J2328–4035
Bandpass calibrator	J2357–5311	J0006–0623, J2258–2758, J0538–4405
Central frequency [GHz]	92	92
Band widths [GHz]	7.5	7.5
Baseline coverage [k λ]	3.7–145	2.1–15.6
Primary beam FWHM at the central frequency ["]	62	107
Number of pointings	7	7

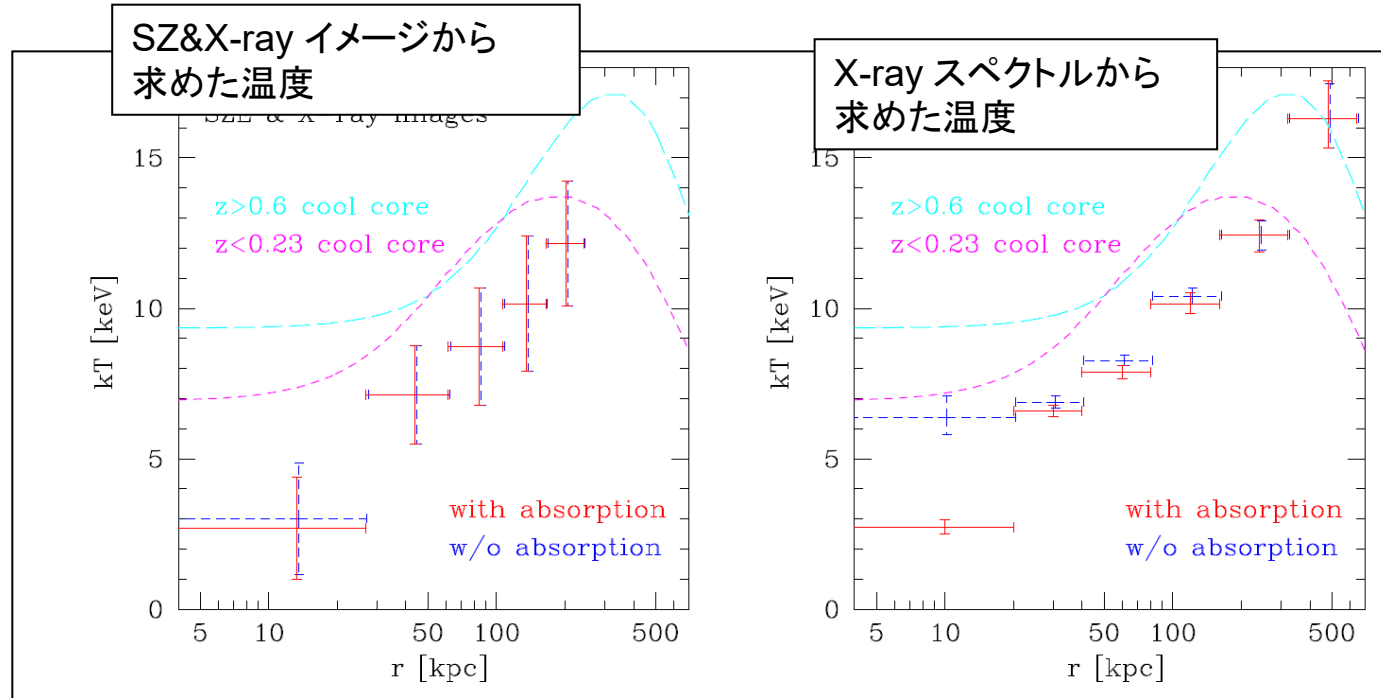
ALMA (SZ効果) + Chandra(X-ray)で多波長観測 (Kitayama et al. 2020)



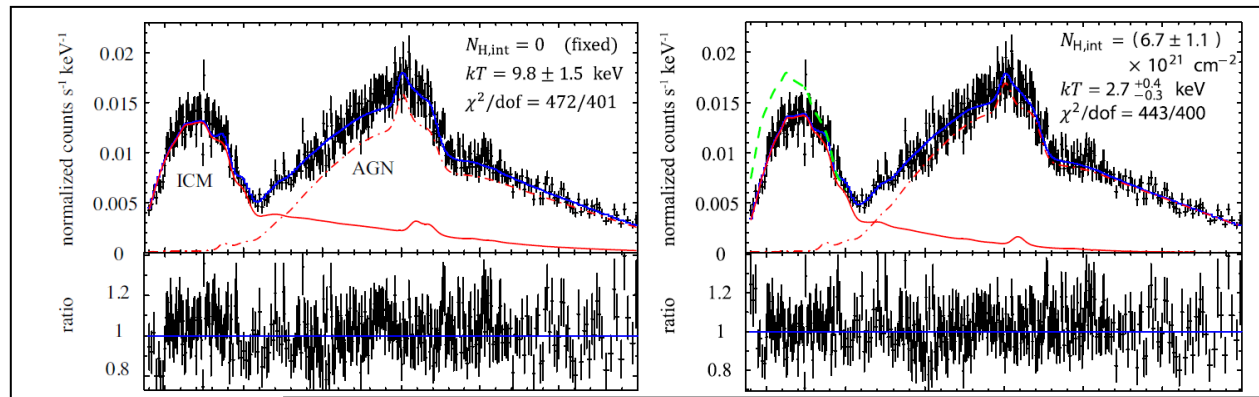
- SZ効果---高温電子によるCMBの逆コンプトン散乱、X線観測とは相補的な高温ガスのプローブ $I_{SZ} \propto n_e k T L$, $I_X \propto n_e^2 (k T)^{1/2} L$
- ALMAを用いることで高空間分解能を達成(5" ~ 23h⁻¹kpc)
- Chandra(X-ray)との比較でイメージから温度が決定できる。

ALMA (SZ効果) + Chandra(X-ray)で多波長観測 (つづき)

(Kitayama et al. 2020)



- X線スペクトルによる温度決定は中心部の吸収体 (cold gas) の有無の仮定に結果が左右される。
- SZ+Xのイメージ解析では吸収体の有無にほとんど結果は左右されない。
- 典型的なcooling core 銀河団よりも確かによく冷えているようだ。

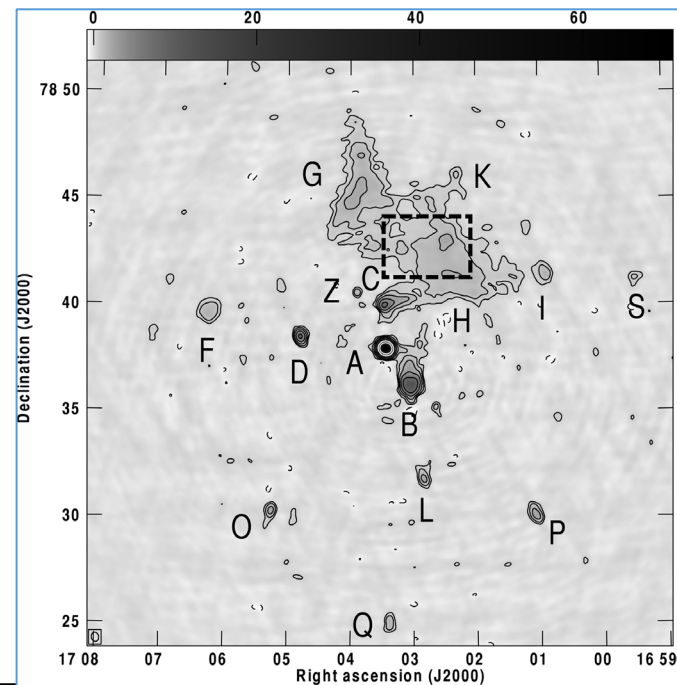


中心部のX線スペクトル。右では銀河団内での吸収体の存在を入れたモデルで考慮。

電波観測でなにがわかるか(シンクロトロン放射の場合)

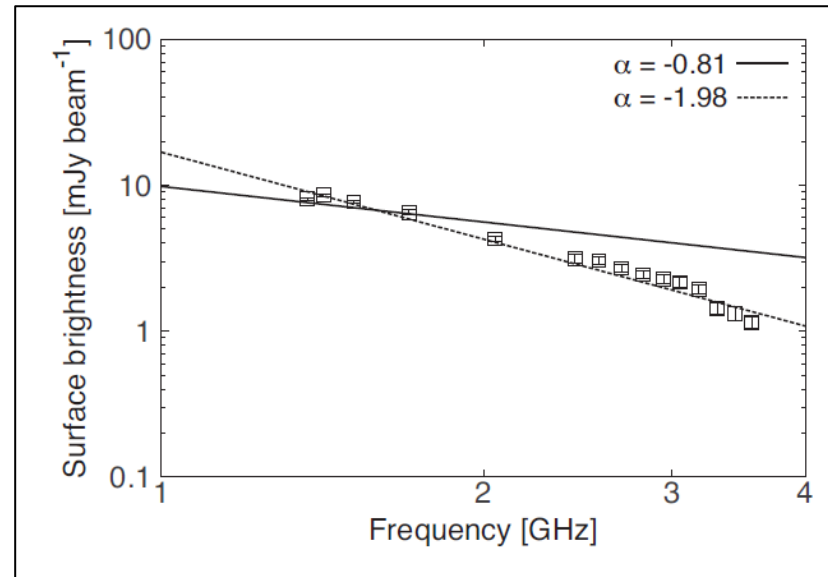
図はOzawa et al.(2015)から

電波表面輝度 $\propto \int n_{CR,e} B^2 dl$
→宇宙線電子密度、磁場強度



Abell 2256 の電波レリック周辺の電波イメージ(2051MHz)

Abell 2256 電波レリックの
スペクトル



スペクトルの形 ⇒
宇宙線電子のエネルギー分布
特に巾型の場合は

$$F_\nu \propto \nu^\alpha \Leftrightarrow N(E_e) \propto E_e^{2\alpha-1}$$

• さらに偏波からは以下のような情報が得られる

- 偏波方向 → 放射領域での磁場の天球面内成分
- 偏波度 → 磁場の乱雑さ具合
- ファラデー回転 → 放射領域から我々までの熱電子密度および磁場の視線方向成分

電波観測

Akahori et al.(2018)

Table 1. Summary of observing specifications of ATCA.

Pointing (right ascension)	23 ^h 44 ^m 44 ^s
Pointing (declination)	-42°43'15"
Date and time 1 (UT)	2017 November 1 06:30-16:30
Date and time 2 (UT)	2017 November 2 06:30-16:30
Maximum baseline	6 km
Center frequency* (MHz)	17000, 19000
Bandwidth* (MHz)	2048, 2048
Setup calibrator	2251+158
Flux calibrator	1934-638
Bandpass calibrator	1921-293
Pointing/gain/phase calibrator	2333-415
Target on-source time (min)	760

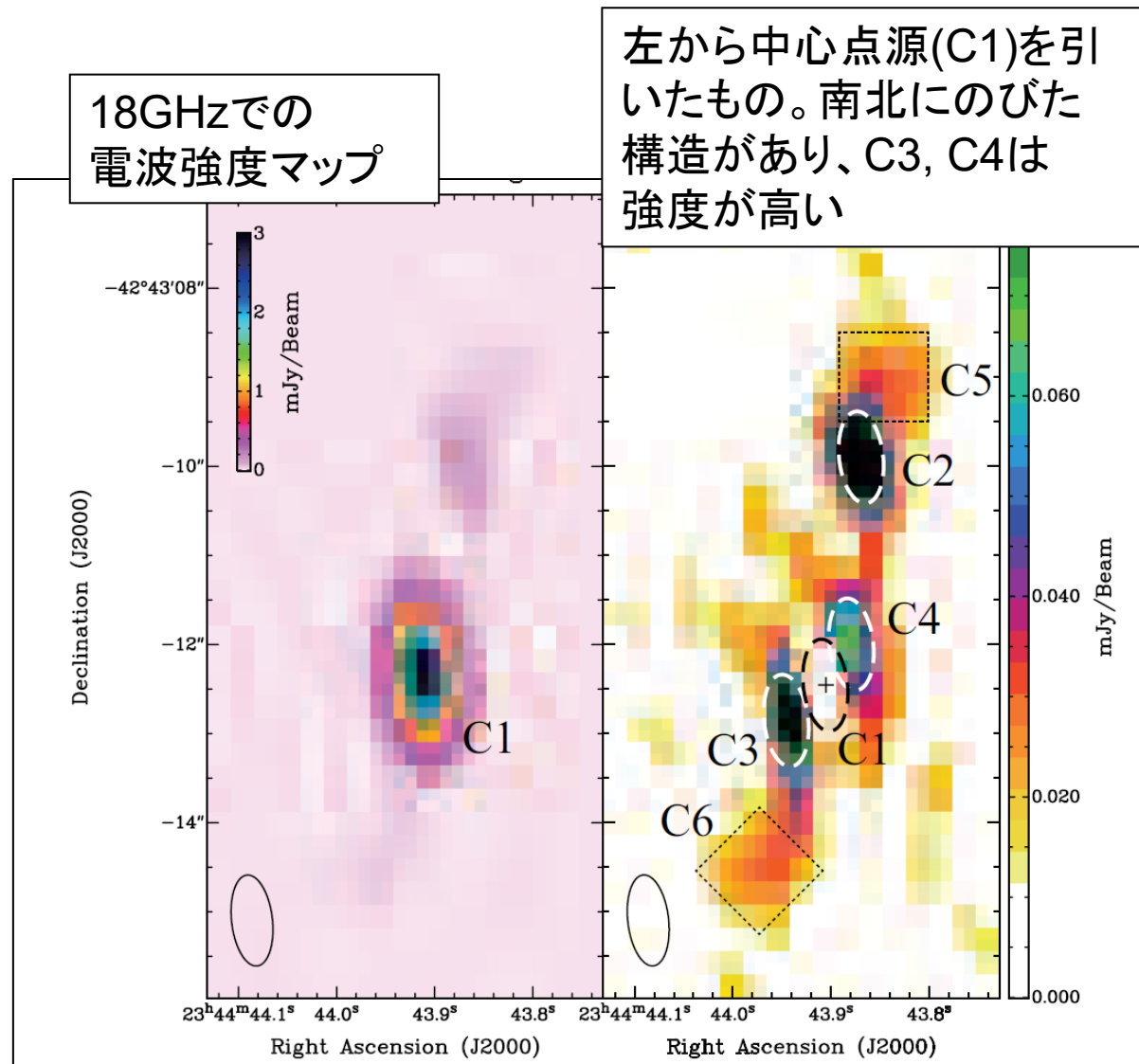
*CABB recorded two IF bands.

ATCA
wikipediaより



- Phoenix銀河団の中心には電波源はあるが空間分解はされていない。
- ATCA(Australia Telescope Compact Array)で観測
- ATCA---口径22m × 6台の電波干渉計、南天の観測に適

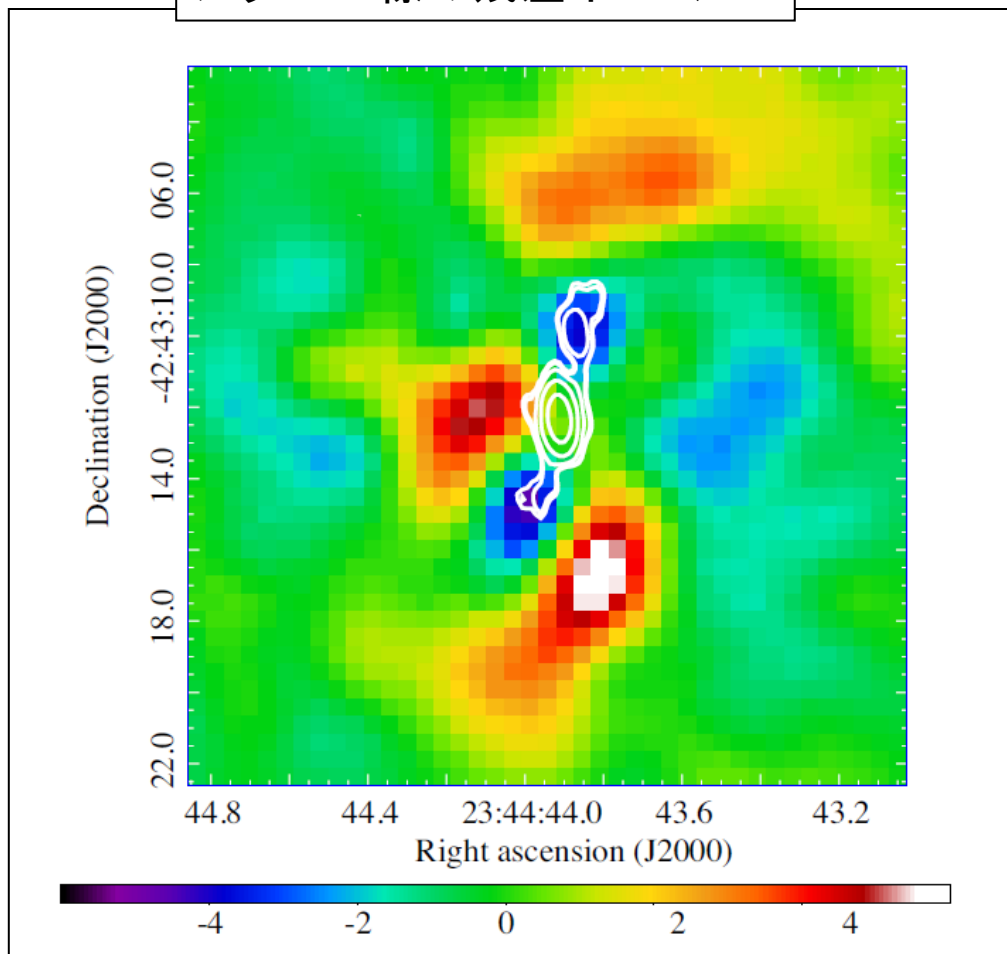
ATCA (電波) 観測(Akahori et al. 2020)



- Phoenix銀河団の中心銀河は電波では空間分解はされていなかった。
- ATCAで高周波側(17—19GHz)で観測して分解能をかせいだ。(1",03×0",46)
- 南北にのびた構造を初めて確認。
- ジェット？+ノット？

ATCA (電波) 観測(Akahori et al. 2020) (つづき)

等高線: 18GHz電波強度
カラー: X線の残差イメージ



- X線 (Chandra) の残差イメージと電波イメージとを比較。
- X線でのnegative残差と電波ジェットが一致。
- ジェットで高温ガスが押しつけられている様子が見えている。
- 中心銀河から加熱がおきはじめたところ？。

まとめ

- 銀河団中心部ではガスの冷却時間が宇宙年齢より十分短くなりうることからcooling flow仮説がたてられた。
- その後の観測の進展により冷却となんらかの加熱（AGN feedback?）が部分的にバランスした描像が近傍銀河団については確立した（cooling flowからcooling coreへ）。
- Phoenix銀河団は古典的なcooling flowの描像に近いように思える高赤方偏移銀河団。
- ALMAによるSZ観測より、確かにPhoenix銀河団中心部は近傍の典型的なcooling core銀河団よりも冷えていることが確認できた(Kitayama et al. 2020)。
- ATCAによる電波観測より、Phoenix銀河団中心の電波源が初めて空間分解され、ジェットがICMを押しつけている様子が見えた(Akahori et al. 2020)。
- Phoenix銀河団では中心部が十分に冷えた後でAGNによるfeedbackがまさに起き始めたところを見ている可能性が高い。