

衝突初期銀河団 CIZA J1358.9-4750 の多波長観測

滝沢元和

研究室談話会(2023.7.7)

Kato, Nakazawa, Gu, Akahori, Takizawa, Fujita, & Makishima.

PASJ, (2015), 67, 71

Akahori, Kato, Nakazawa, Ozawa, Gu, Takizawa, Fujita, Nakanishi, Okabe, & Makishima,

PASJ, (2018), 70, 53

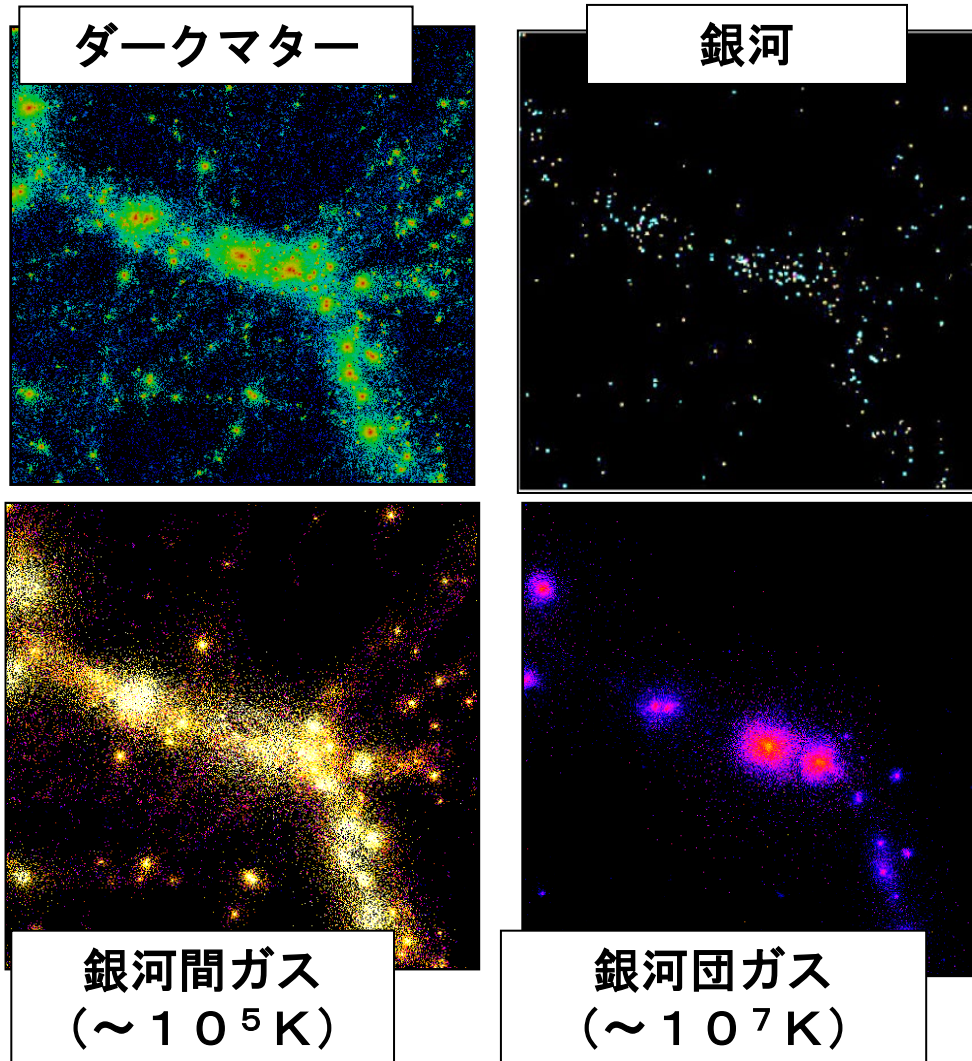
Kurahara, Akahori, Kale, Akamatsu, Fujita, Gu, Intema, Nakazawa, Okabe, Omiya, Parekh,

Shimwell, Takizawa, van Weeren

PASJ, (2023), 75, S138

Introduction

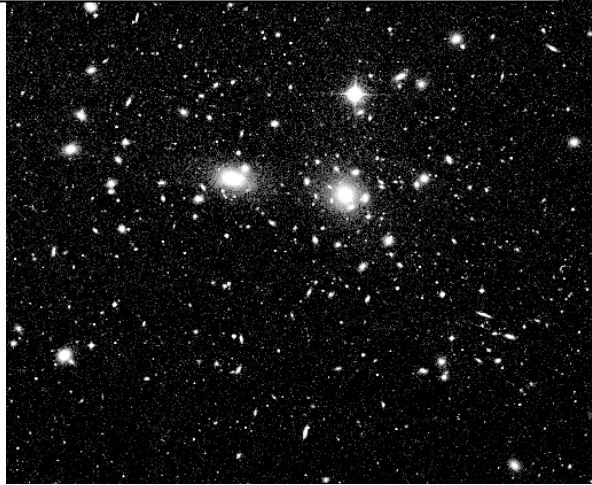
Yoshikawa et al. (2003)



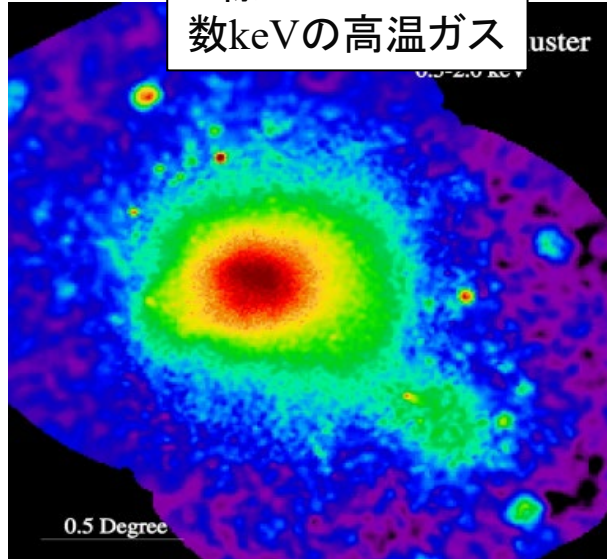
- 標準的な構造形成理論によれば、宇宙の構造は小さなものから大きなものへ (bottom up scenario)
 - Cold Dark Matter
 - Dark Halo, filaments
 - バリオン (CDMの重力ポテンシャルで加熱)
 - 一部は冷えて銀河、星へ
 - 大部分は高温ガスに (X-ray, Sunaev-Zel'dovich効果)

Introduction: 銀河団

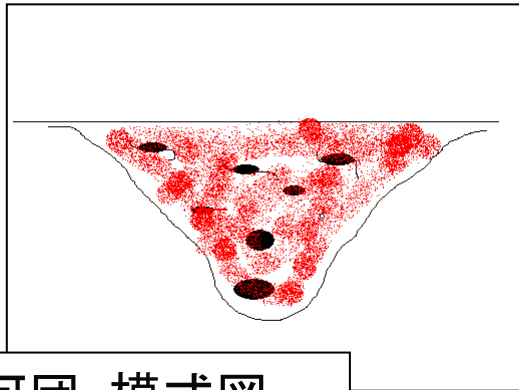
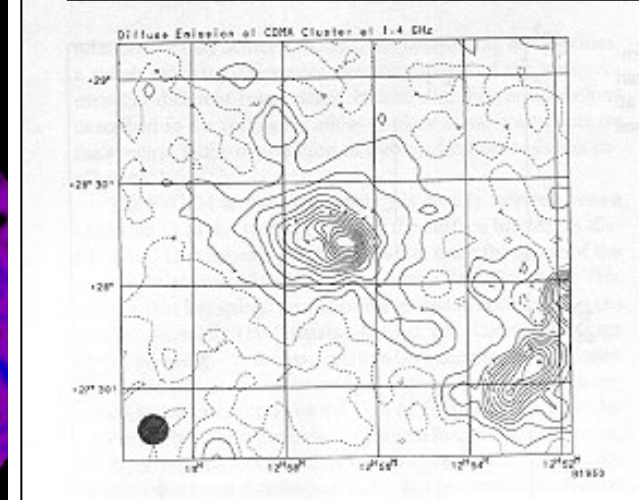
可視光
(数100個の銀河の集まり)



X線
数keVの高温ガス



電波
数GeVの高エネルギー電子+磁場

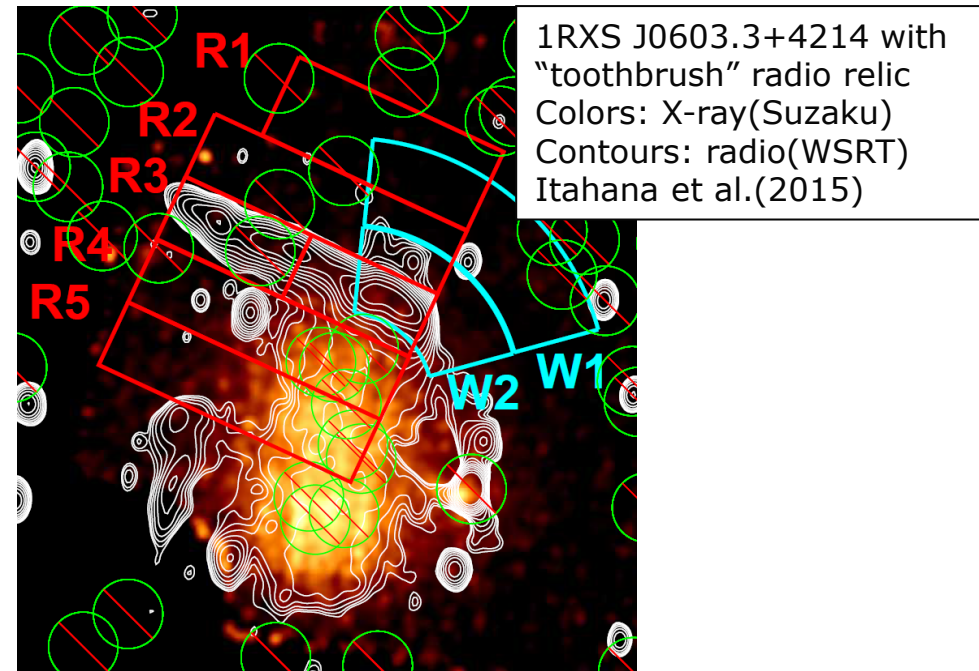
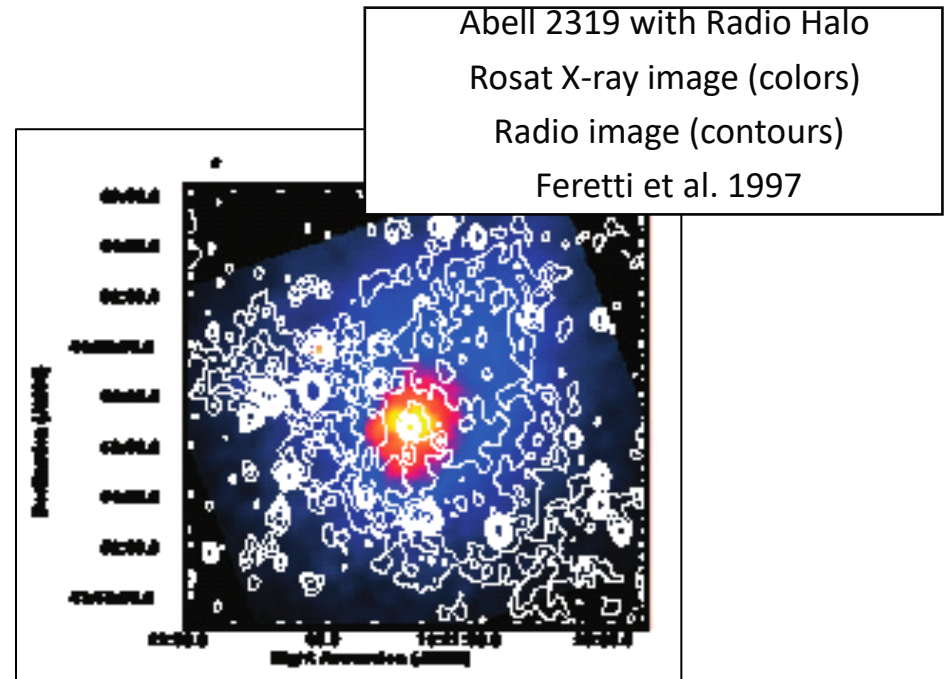


銀河団: 模式図

- 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)

Radio Halos / Relics

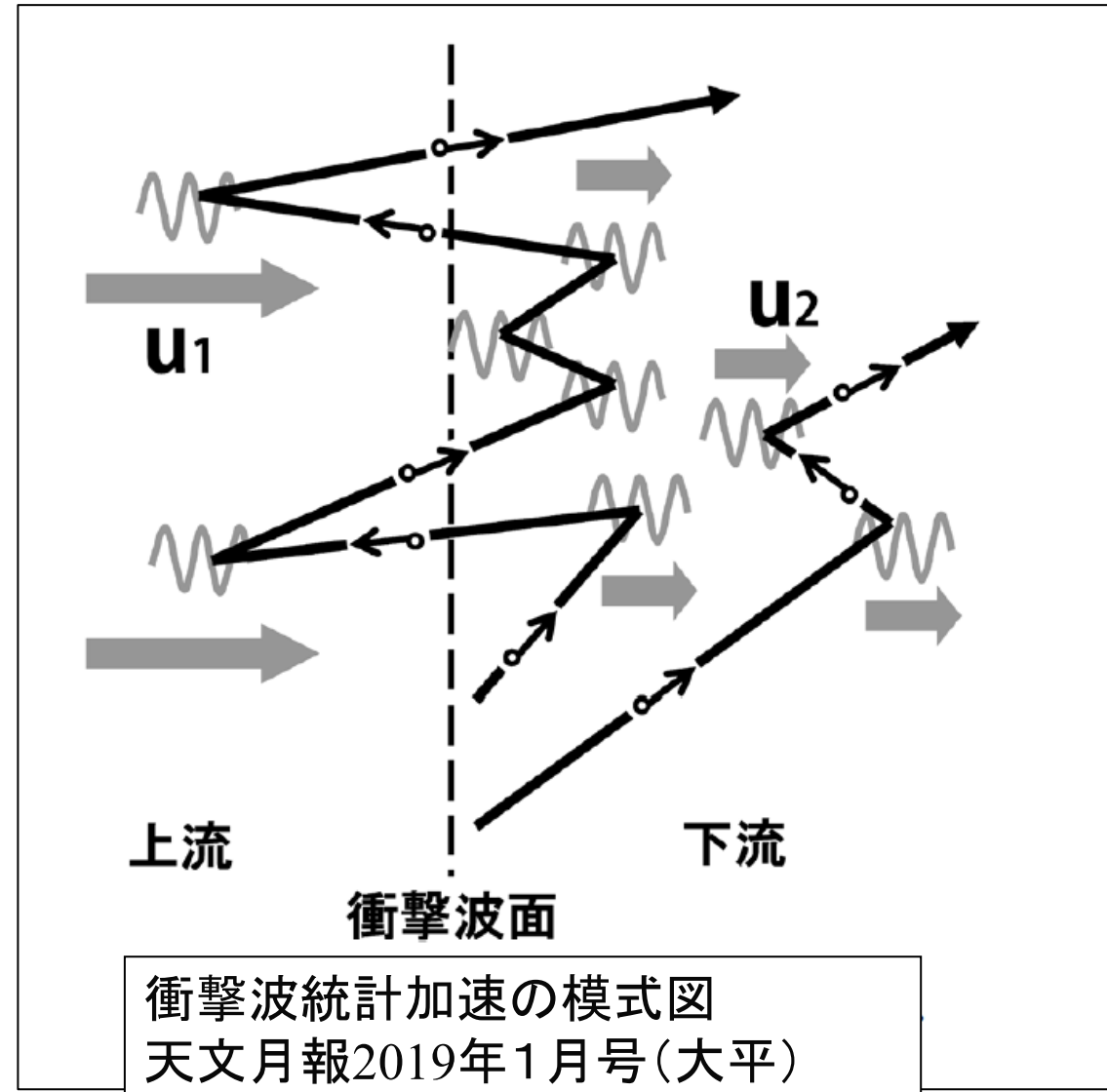
- Some merging galaxy clusters have diffuse non-thermal radio emitting regions.
($E_e \sim \text{GeV}$, $B \sim \mu\text{G}$)
- Radio halos and (mini halos)
 - Located near the center, similar to X-ray morphology
 - Associated with ICM turbulence???
- Radio relics
 - Located in the outskirts, arc-like shape,
 - Likely associated with ICM shocks?



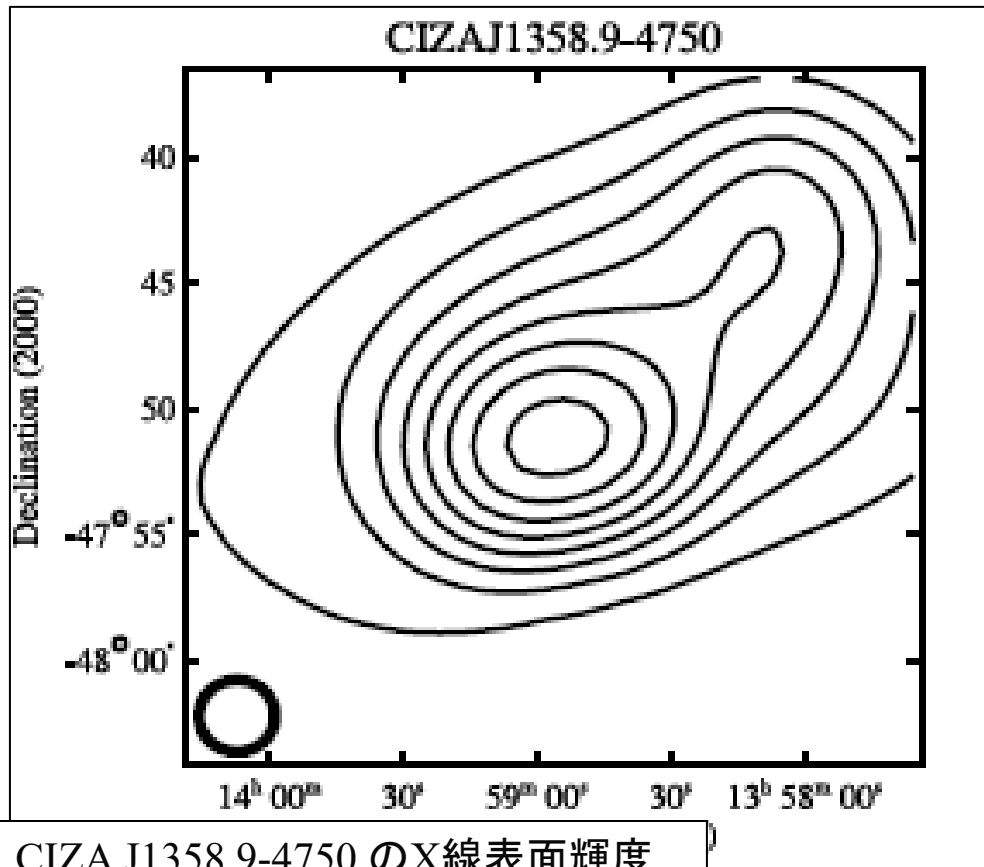
衝撃波統計加速

- 衝撃波静止系で見るとお互いに近づく流れ。何回も反射されることで粒子が加速される。
(近づきつつある2つの壁の間で何度も跳ね返されるテニスボールみたいなもの)
- “反射体”は磁場の乱れやプラズマ波動など
- ただし、一定の割合で逃げていき、そうすると加速は終了
- 結果としてべき型のエネルギー分布に。

$$\frac{dN}{dp} \propto p^{-s}, s = \frac{u_1/u_2 + 2}{u_1/u_2 - 1}$$



CIZA J1358.9-4750 (以降CIZA1359)



CIZA J1358.9-4750 のX線表面輝度
分布: ROSAT all sky surveyから
Kocevski et al.(2007)

- CIZAカタログ ($|b| < 20$ 度での銀河団サーベイ) で見つかった。
(Ebellig et al. 2002, Kocevski et al. 2007)。
- CIZA: Cluster in Zone of Avoidance
- 近傍 ($z \sim 0.07$)
- X線表面輝度に二つのピーク (間隔は $\sim 14'$ or 1.2Mpc)
- 両X線ピーク位置にそれぞれ巨大楕円銀河 (たぶんcD銀河)
- 衝突前半期の銀河団か? 衝突の詳細を調べるのに適。

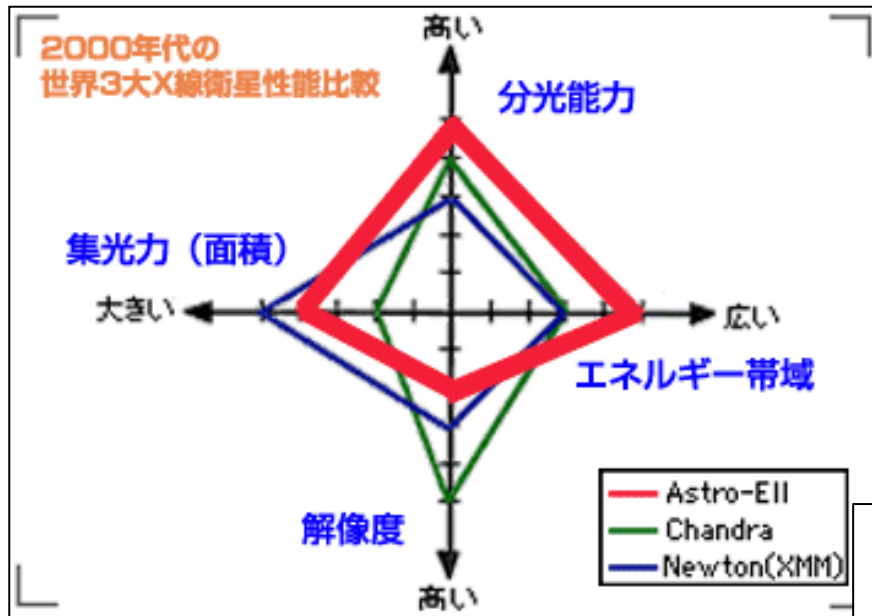
X線観測

Kato et al.(2015)

すざく
(日本 2005--2015)



ニュートン(欧)



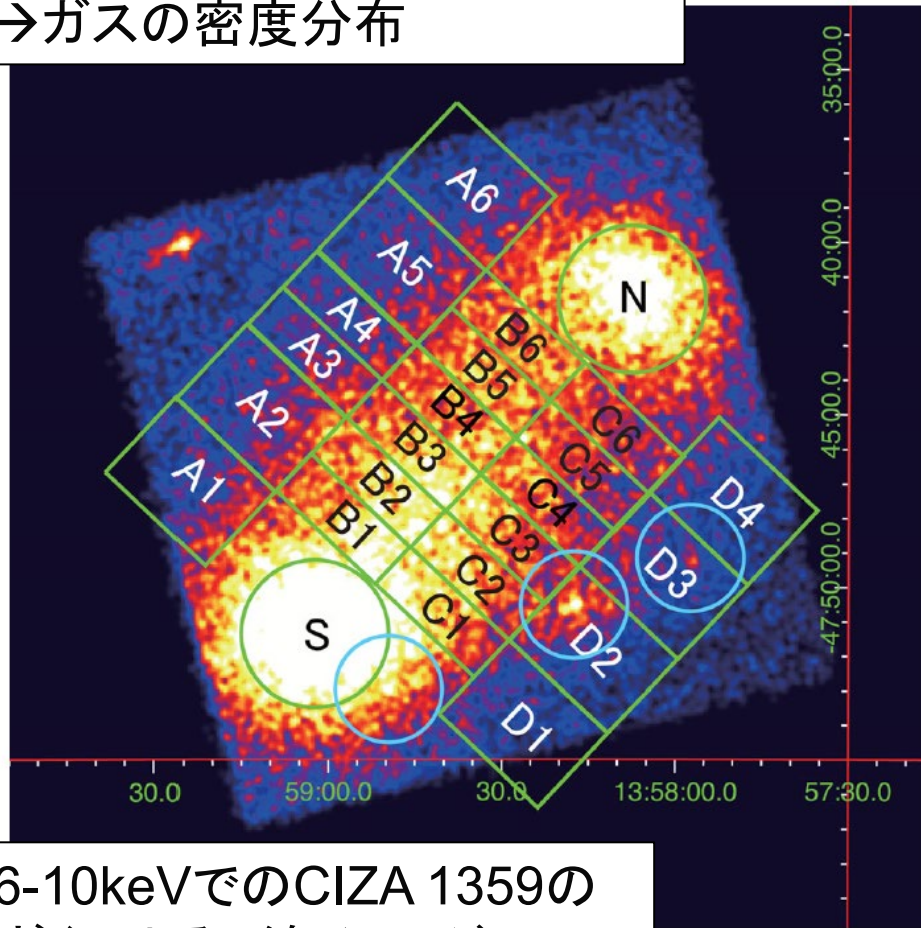
- 衝突が銀河団ガスに与えている影響を詳細に調べるため、すざく衛星で2013 Jan. 21-13に観測。
- 標準的なscreeningの結果、Total exposure は61.7ks
- XMM Newton のアーカイブデータ (2004, Feb. 21)も使用 (~5ks)
- すざく --- 分光能力に優れる。解像度はいまいち
- XMM --- 集光力にすぐれる。まあまあの解像度

X線観測でなにがわかるか

(高温ガスからの熱的X線の場合)

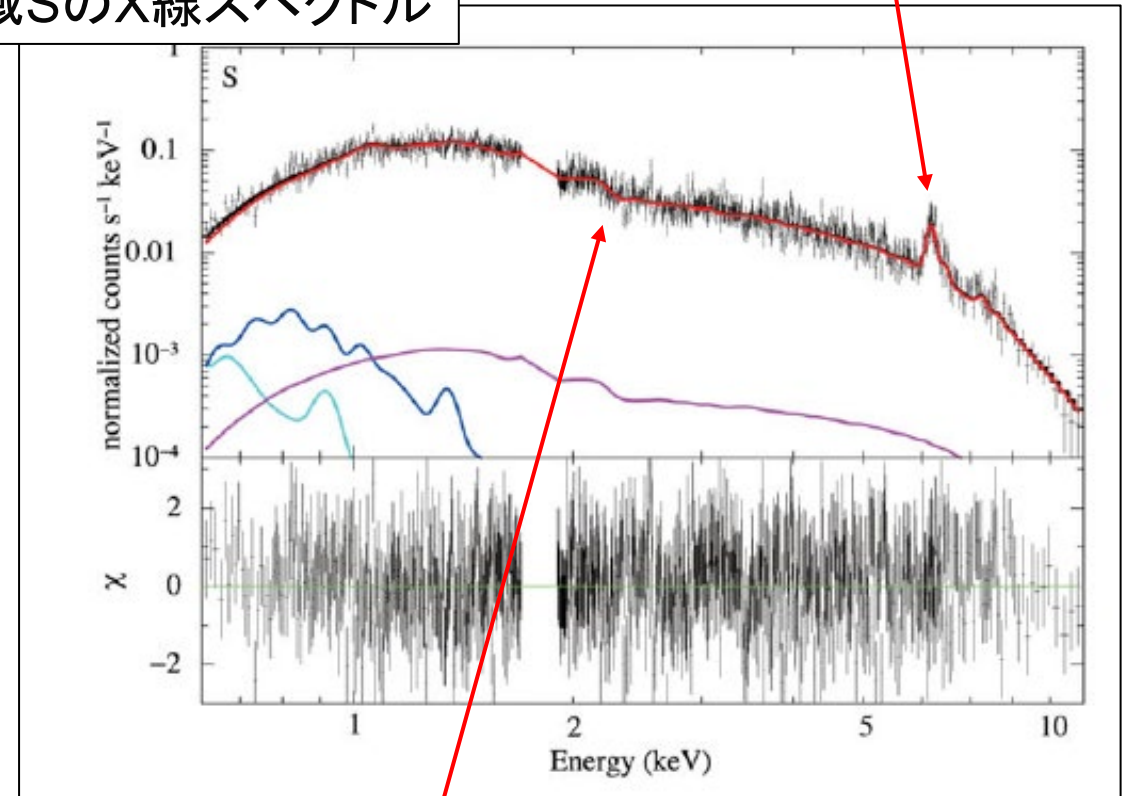
図はKato et al. (2015)より

X線表面輝度 $\propto \int n_e n_i T^{0.5} dl$
→ガスの密度分布



0.6-10keVでのCIZA 1359の
すざくによるX線イメージ

領域SのX線スペクトル



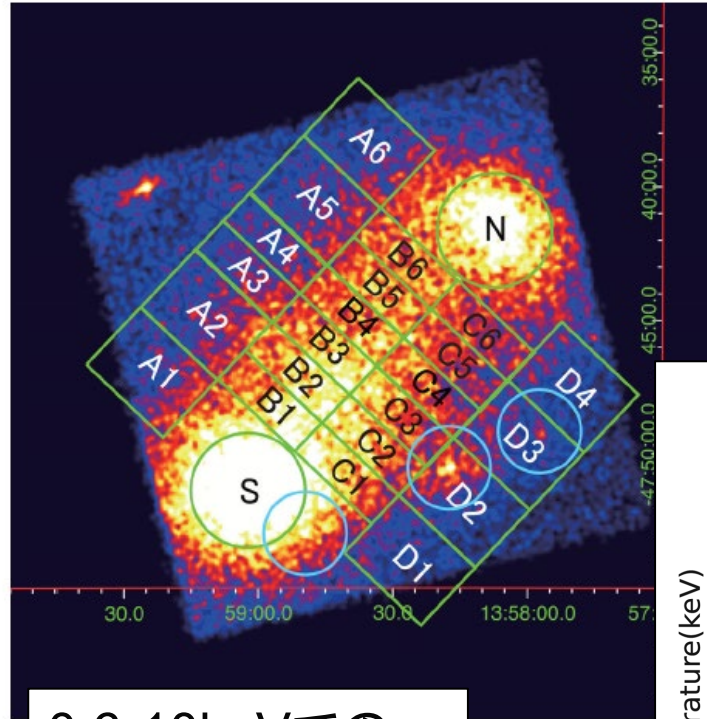
重元素の輝線
→重元素量、赤方変位、
ドップラー変位

連続成分の形→温度
強度→ $\int n_e n_i T^{0.5} dl$

温度分布

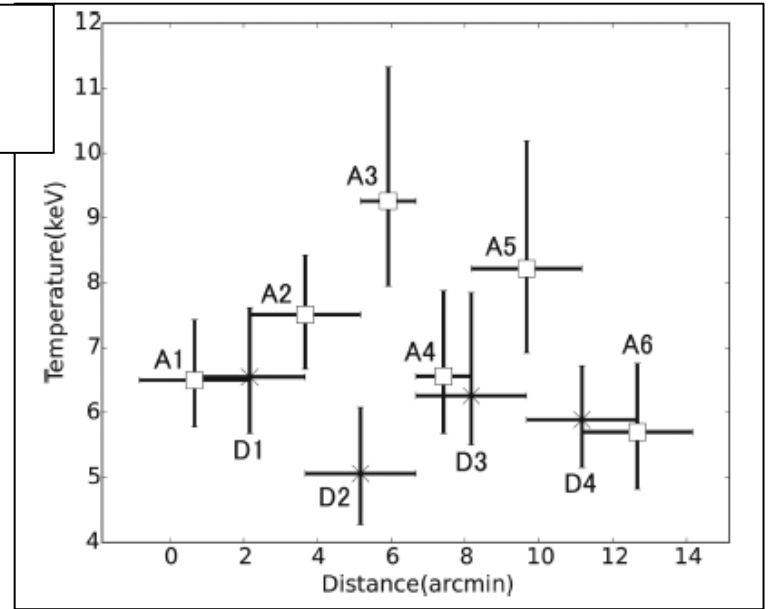
Kato et al.(2015)

- 中央図のように領域分けして、各領域でのスペクトルをモデルフィット。
- X線ピークの間領域 (B1—3, C1—3) に高温な領域。衝撃波の存在を示唆。
- Aでも似たような傾向。ただしエラーは大きい。
- Dでは温度上昇は確認できず

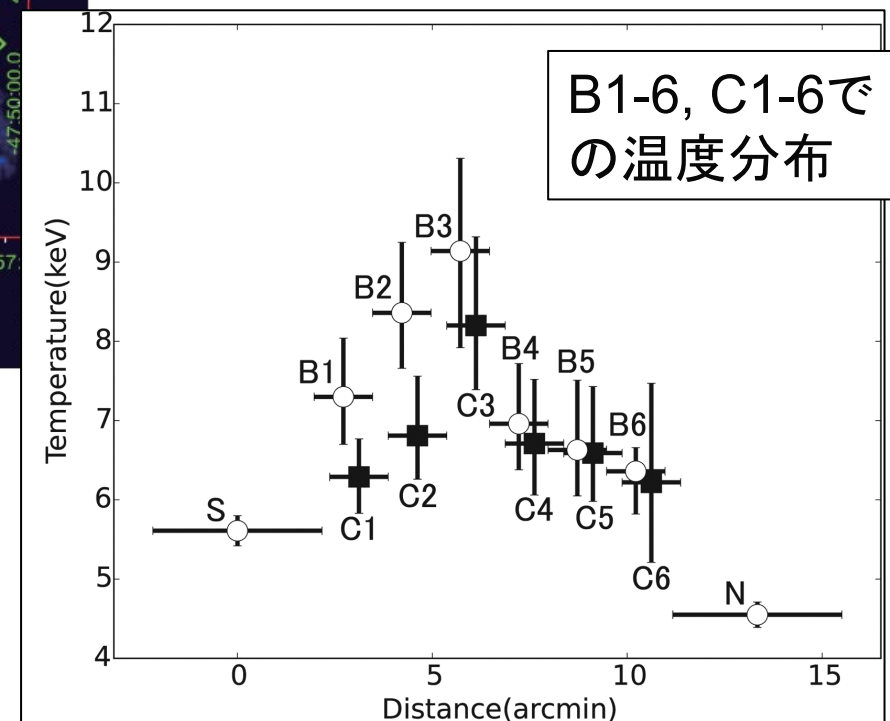


0.6-10keVでの
CIZA1359の
X線イメージ

A1-6, D1-4での
温度分布



B1-6, C1-6で
の温度分布

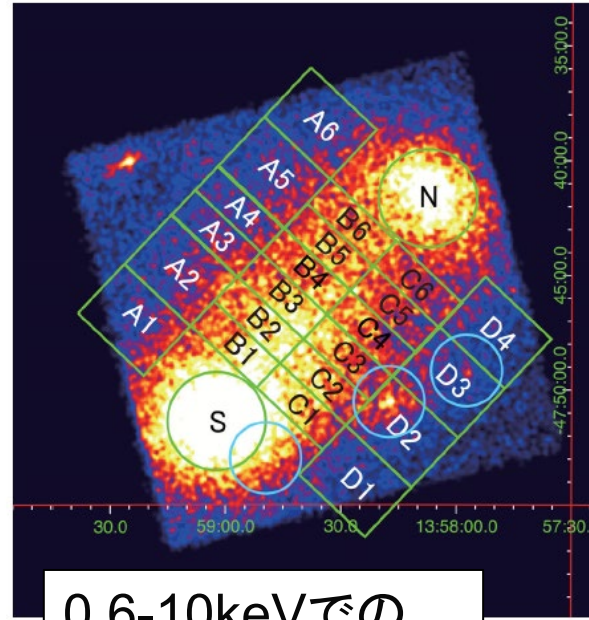
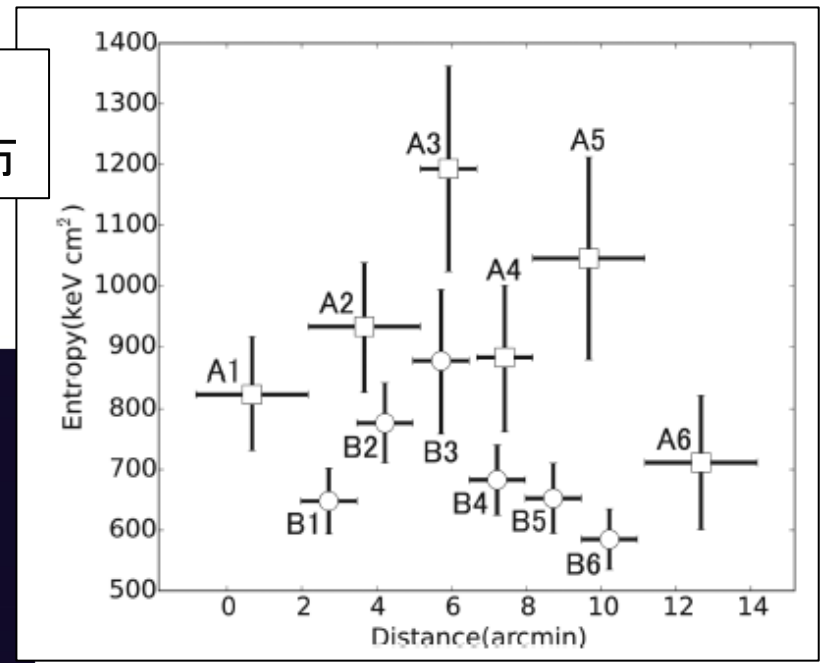


エントロピー分布

Kato et al.(2015)

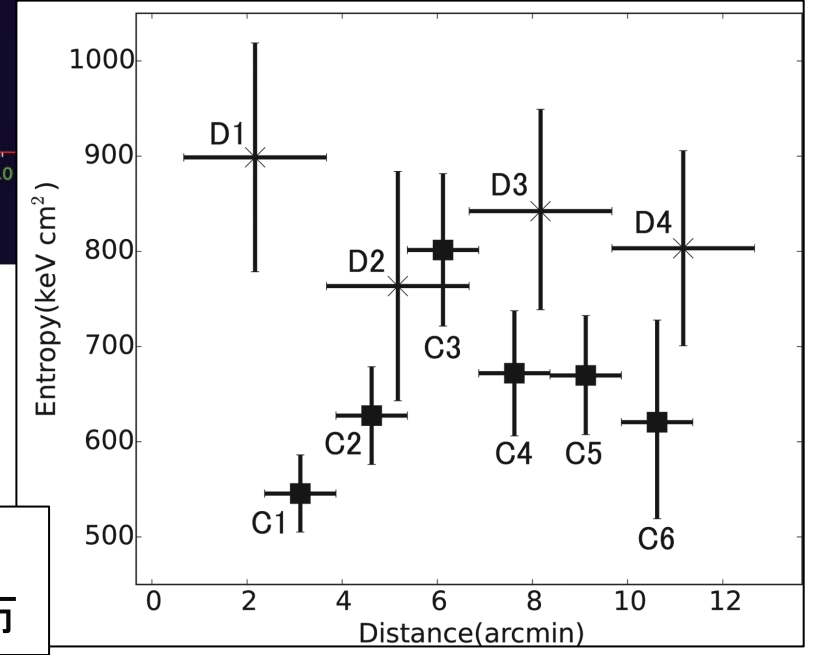
- 温度上昇の原因は断熱圧縮 or 運動エネルギーの散逸?
- Astrophysical entropy ($K = kT/n_e^{2/3}$) の分布を調べた。
- K は断熱過程では保存量
- A, B, C で 3-4 にエントロピーの上昇
--> 衝撃波加熱を示唆

A1-6, B1-6 でのエントロピー分布



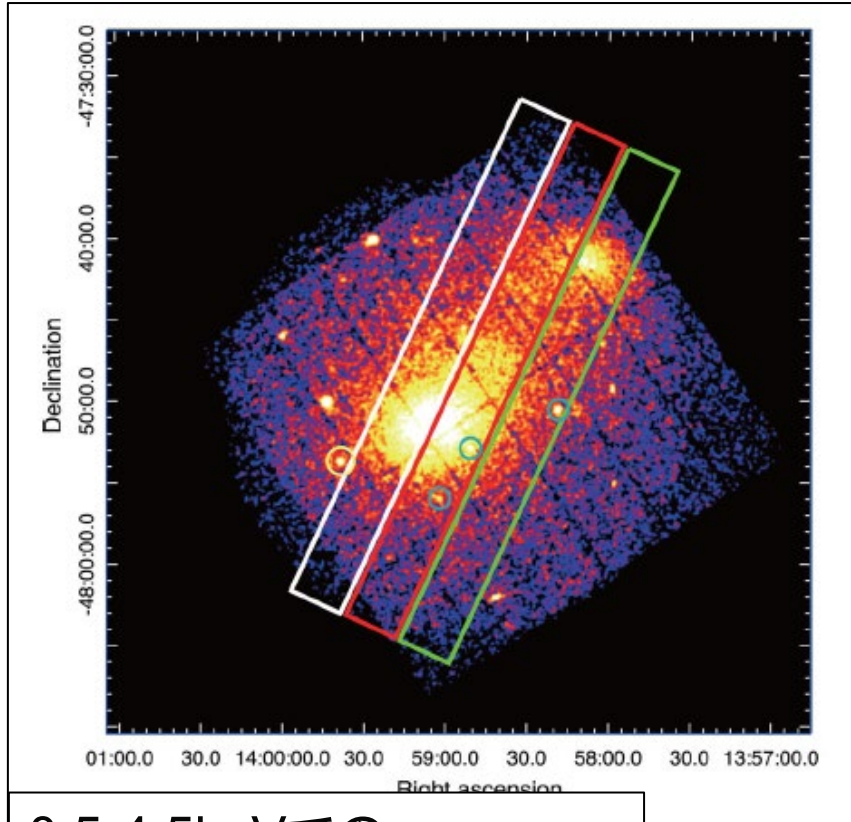
0.6-10keVでのCIZA1359のX線イメージ

C1-6, D1-4 でのエントロピー分布

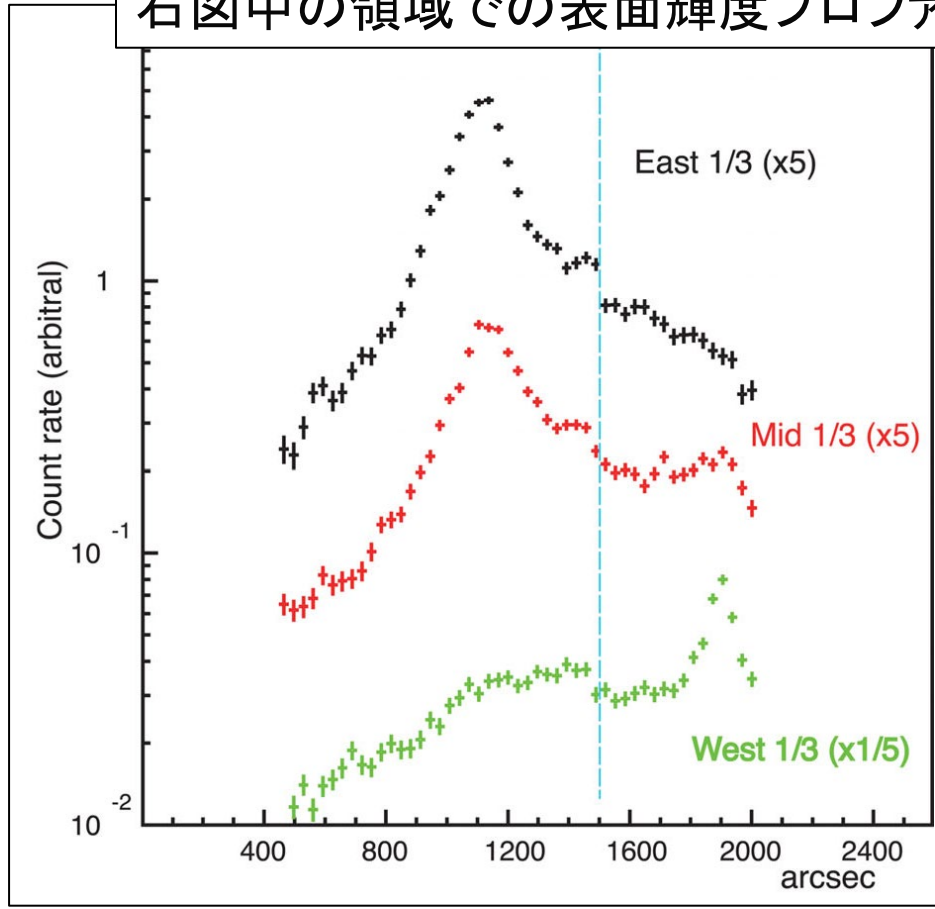


表面輝度分布

Kato et al.(2015)



右図中の領域での表面輝度プロファイル

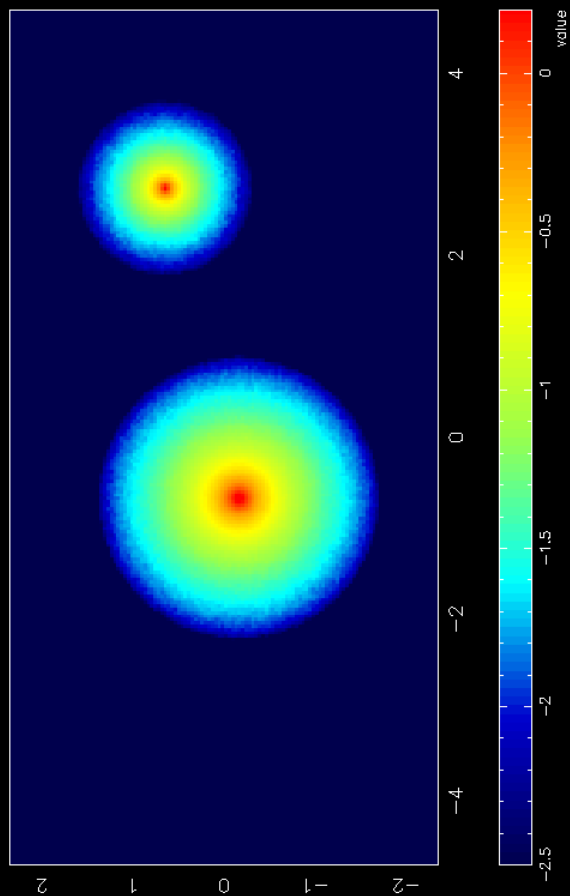


0.5-4.5keVでの
CIZA 1359の
XMMによるX線イメージ

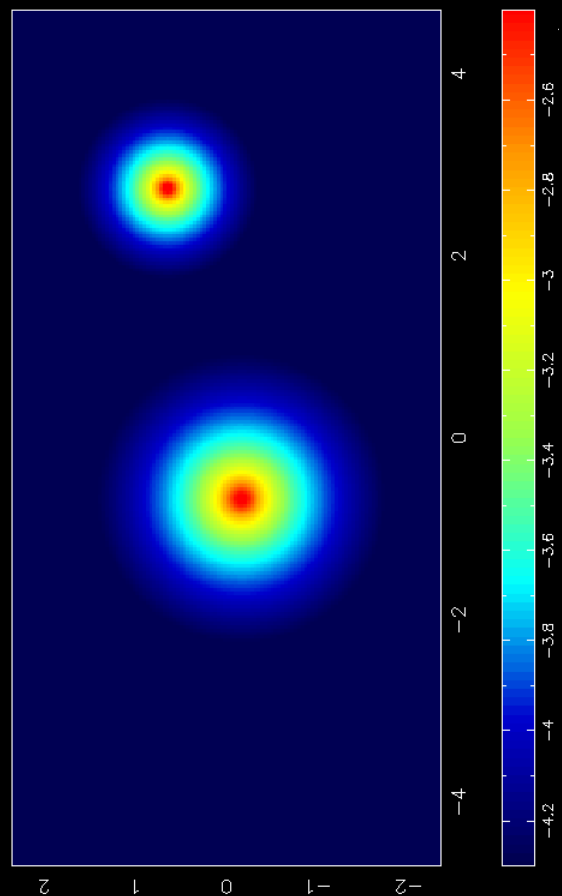
- 解像度のよいXMMのデータで表面輝度を調査
- 温度上昇に対応する場所に表面輝度にjumpを発見-->衝撃波の存在をさらに示唆

参考資料：銀河団衝突のシミュレーション動画

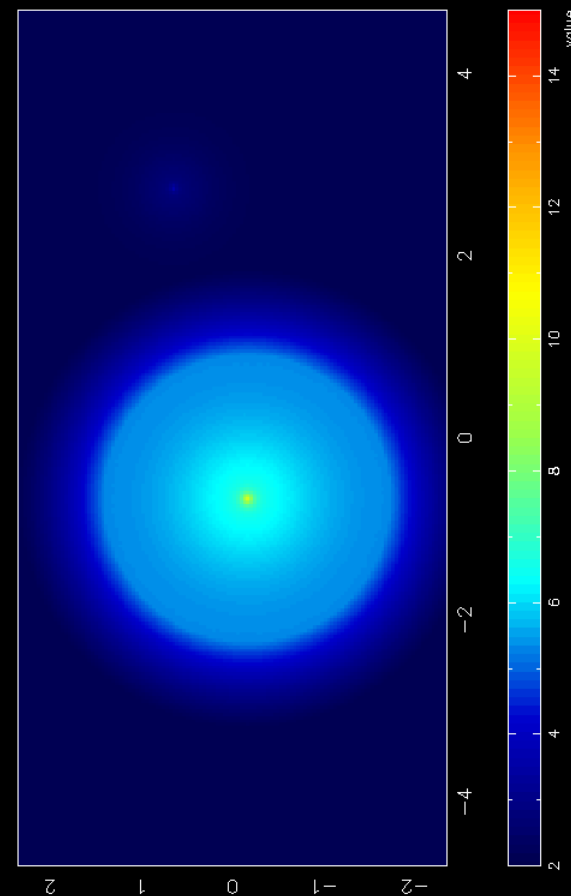
暗黒物質(ダークマター)
面密度



ガス密度



ガス温度



衝撃波の性質および merger geometry

Kato et al.(2015)

- X線表面輝度で二つのピークがあり、その中間部分で温度上昇

---->

衝突の前半期と考えると矛盾ない。

- B4($6.97^{+0.75}_{-0.61}$ keV)とB3($9.14^{+1.17}_{-1.22}$ keV)の温度にRankine-Hugoniotの式

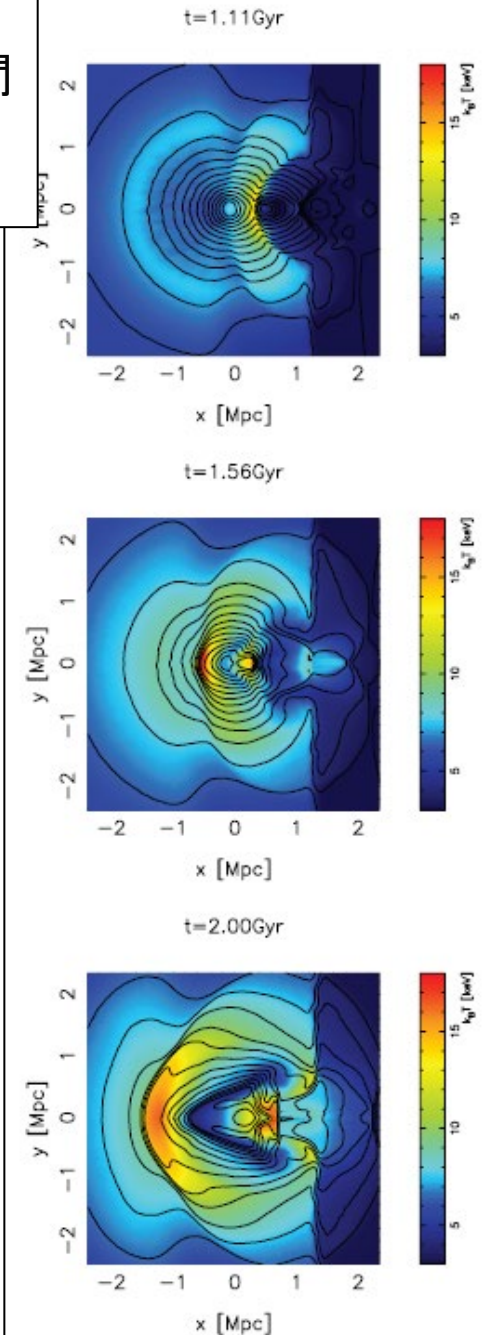
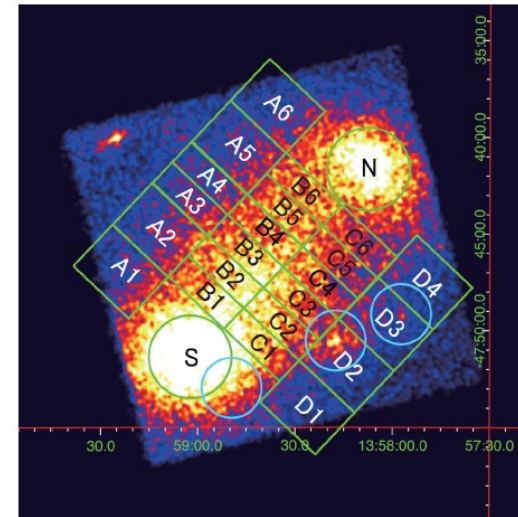
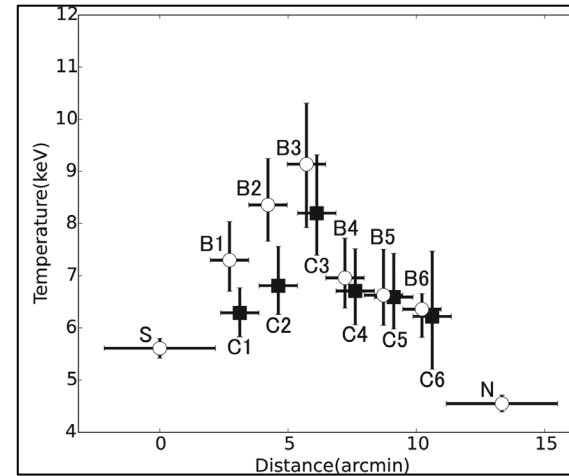
$$\frac{T_{post}}{T_{pre}} = \frac{5M^4 + 14M^2 - 3}{16M^2}$$

を適用すると衝撃波のマッハ数は

$$M = 1.32 \pm 0.22$$

- 6.97keVでの音速(~1360 km/s)より、衝突速度は~1800 km/s

密度(等高線)と温度(カラー)の時間進化の様子
Takizawa (2008)



1.4GHz帯電波観測

Akahori et al. (2018)

ATCA
wikipediaより



- 衝撃波があれば粒子加速がおきていて電波レリック(or ハロー)があるかもしれない。
- 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
- 2014年6月6-10に観測 (4視野)
- 1.1GHz—3.1GHz

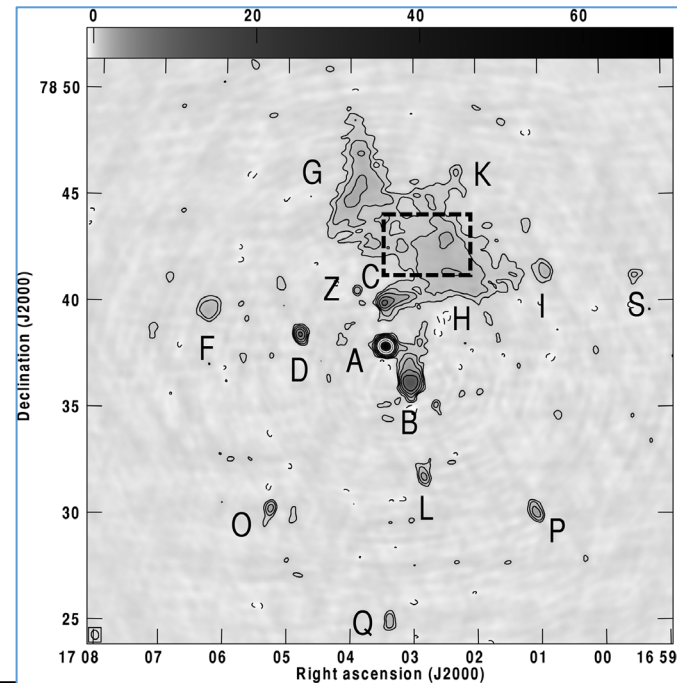
Table 1. Observation log of CZ1359 with the ATCA.

Pointing	Right ascension (J2000.0)	Declination (J2000.0)	Date	Period (UT)	Frequency (MHz)	Bandwidth (MHz)	Exposure (min)
NE	13:59:10.0	-47:41:00.0	2014 June 06	04:58-16:37	1100-3100	2048	560
NW	13:58:10.0	-47:40:00.0	2014 June 08	05:02-17:06	1100-3100	2048	595
SE	13:59:10.0	-47:52:00.0	2014 June 09	04:30-16:36	1100-3100	2048	595
SW	13:58:00.0	-47:51:00.0	2014 June 10	04:31-16:46	1100-3100	2048	560

電波観測でなにがわかるか(シンクロトロン放射の場合)

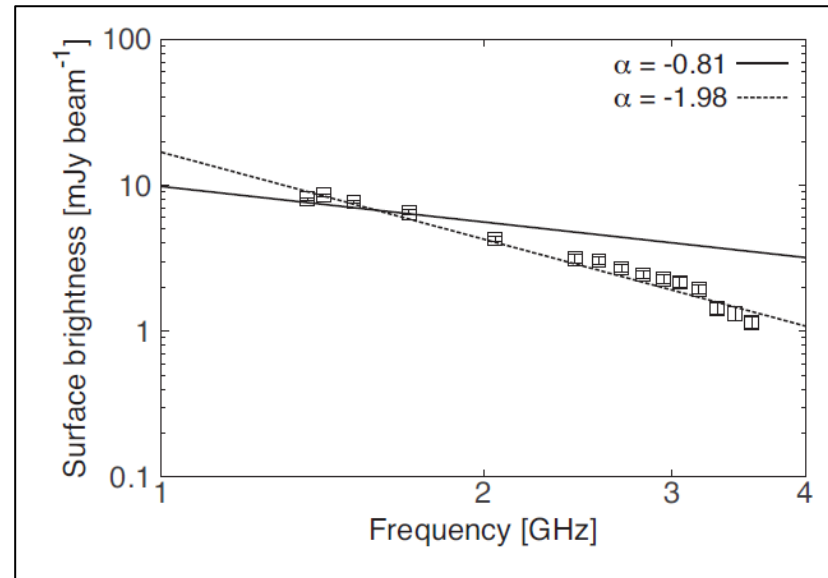
図はOzawa et al.(2015)から

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

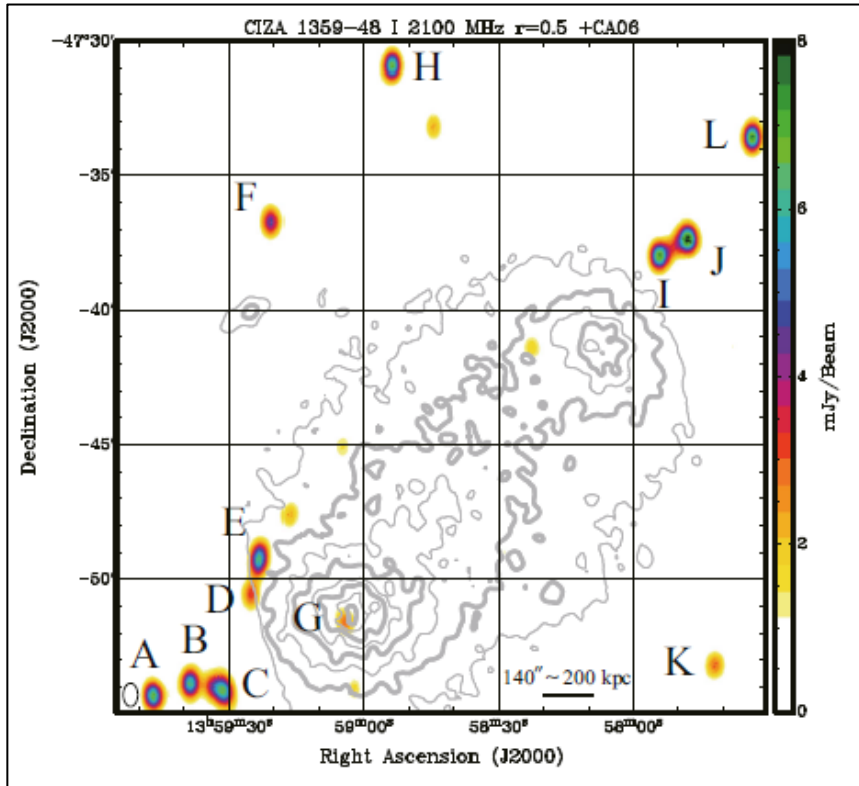
$$F_\nu \propto \nu^\alpha \Leftrightarrow N(E_e) \propto E_e^{2\alpha-1}$$

• さらに偏波からは以下のような情報が得られる

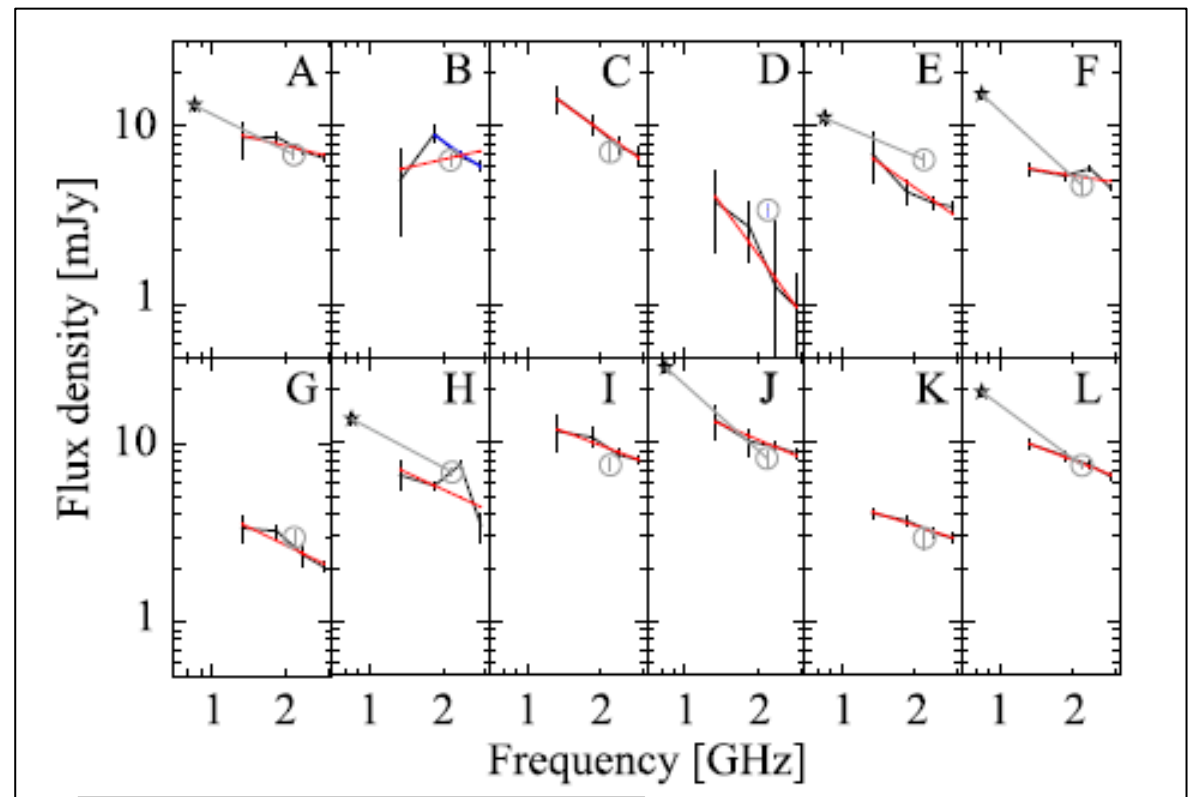
- 偏波方向 → 放射領域での磁場の天球面内成分
- 偏波度 → 磁場の乱雑さ具合
- ファラデー回転 → 放射領域から我々までの熱電子密度および磁場の視線方向成分

Radio sources

Akahori et al.(2018)



2100MHzでのCIZA1359領域の電波強度マップ(カラー)
等高線はX線表面輝度(Kato et al. 2015)

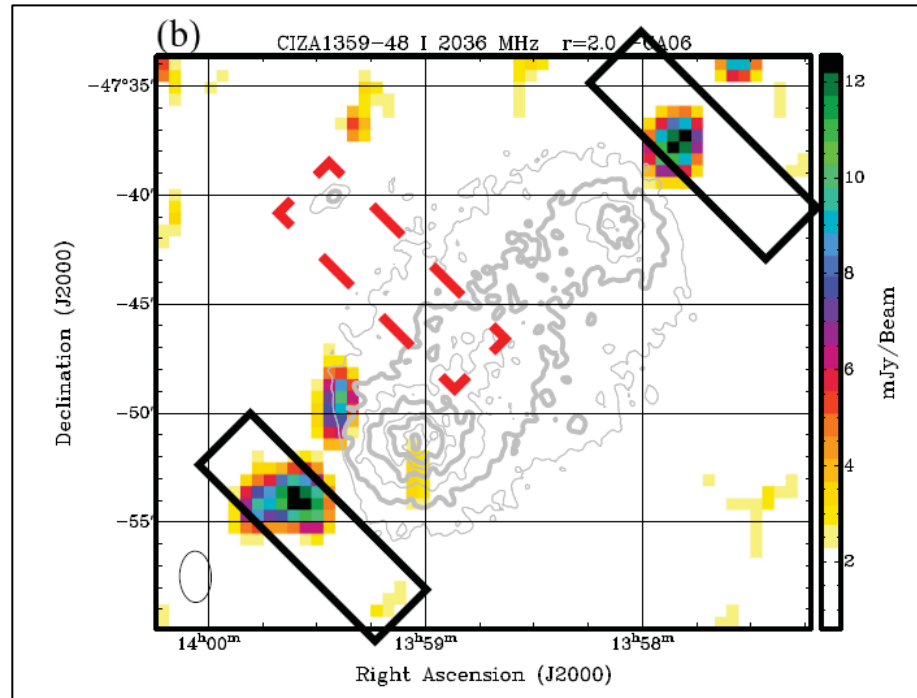


点源の電波スペクトル

- CIZA1359領域の電波強度マップを作成。
- 12の点源を検出。各点源についてスペクトルも作成
- 広がった成分は有意な検出はなし。

議論

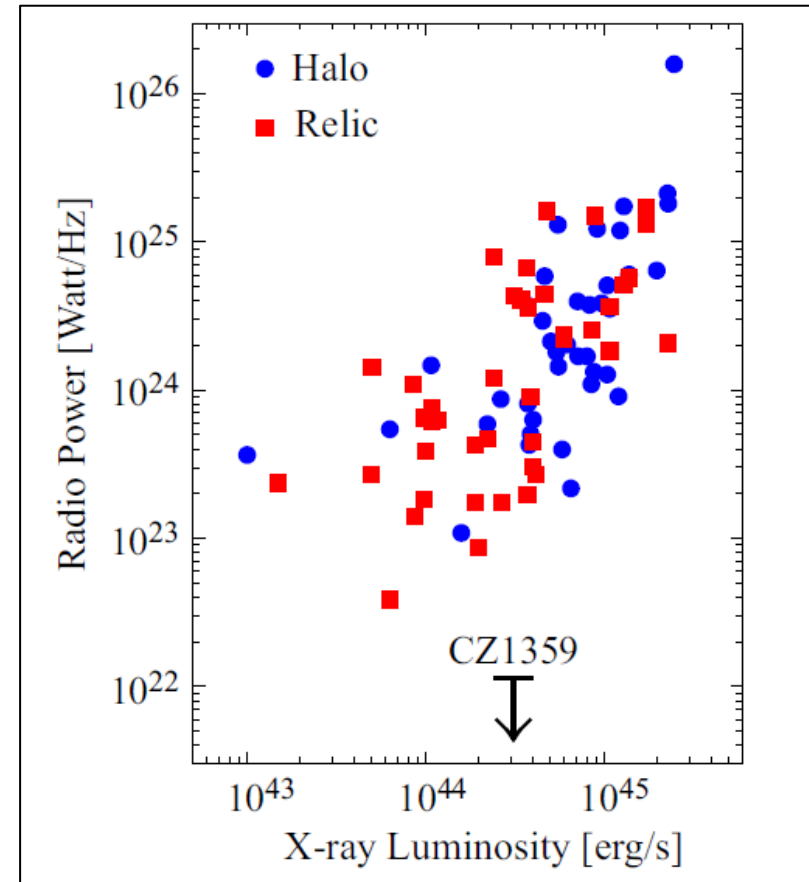
Akahori et al.(2018)



2100MHzでのCIZA1359領域の電波強度マップ(カラー):
ノイズレベルを下げるために空間分解能を下げている。

赤四角はKato et al.(2015)で見つかった衝撃波候補領域

黒四角は、衝突後半期の場合に衝撃波が存在すると予想される領域



電波強度(1.4GHz)とX線光度(0.1-2.4keV)
の相関関係(Feretti et al. 2012)との比較

今回得た電波強度の上限値はX線光度が
同程度のもものと比べて1-2桁小さい。

——> 少なくとも典型的な明るさの電波レ
リックはない

300-500MHz帯電波観測

Kurahara et al. (2023)

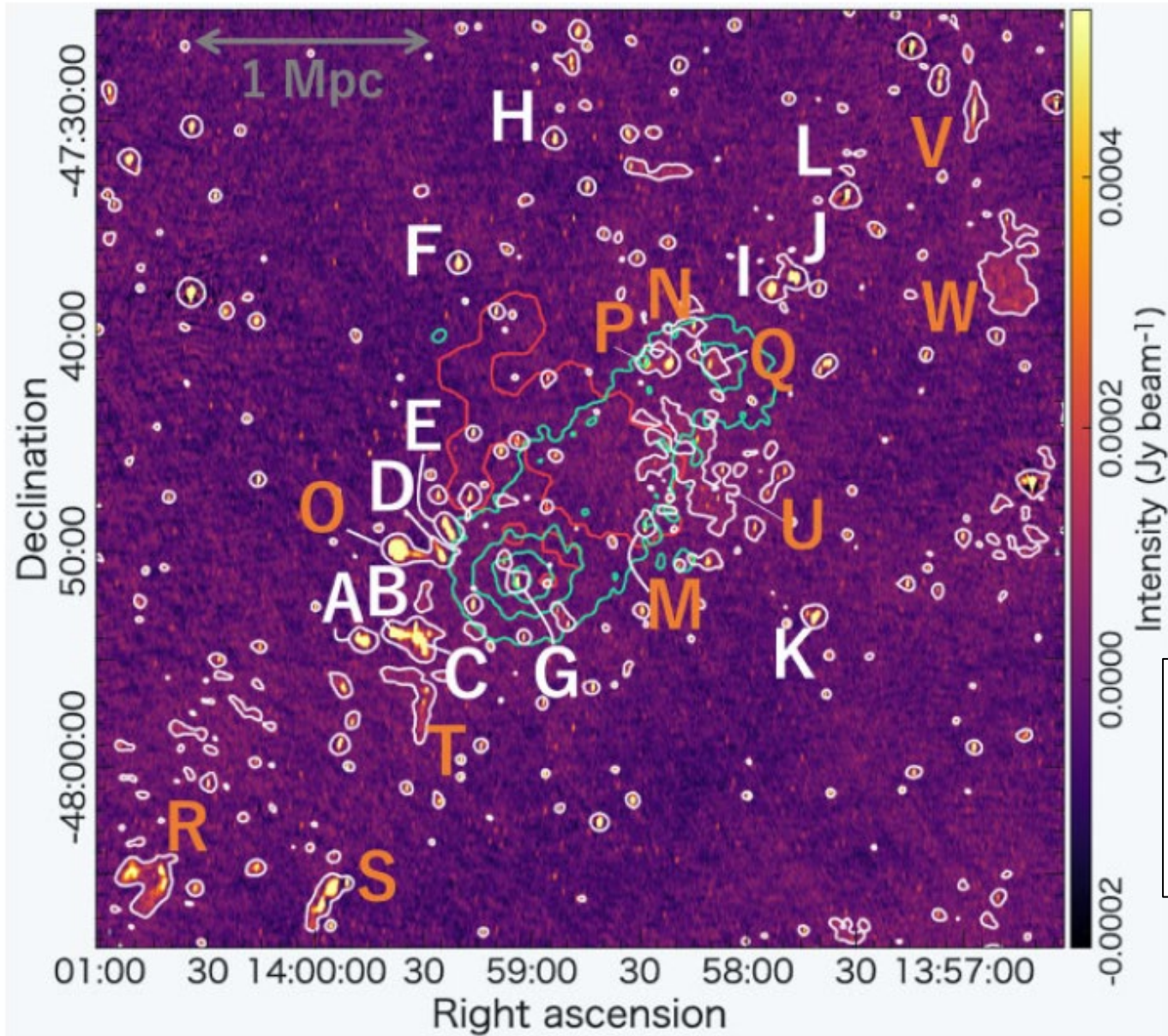
GMRT
wikipediaより



- 低周波ならば電波レリック(or ハロー)を検出できるかもしれない。
- GMRT(Giant Metrewave Radio Telescope)で観測
- GMRT---口径45m × 30台の電波干渉計、インドなので南天でもなんとか
- 2021年1月13-14(196min), 2月24-25日(141min)に観測。しかしデータの質の問題で1/13-14のみを使用

Table 2. Radio maps in this paper.

Label	Frequency (MHz)	BW (MHz)	RMS (mJy beam ⁻¹)	Beam size (″ × ″)	Beam PA (°)	Figure
Narrow-band	317	33	8.2×10^{-2}	21.0 × 6.9	-0.1	—
Wide-band	400	200	3.7×10^{-2}	14.8 × 5.2	-6.2	1
Sub-band 01	317	33	8.6×10^{-2}	22.8 × 5.7	1.6	7
Sub-band 02	350	33	1.7×10^{-1}	15.1 × 5.0	-0.5	7
Sub-band 03	385	33	8.1×10^{-2}	17.8 × 5.6	-0.3	7
Sub-band 04	417	33	5.7×10^{-2}	16.2 × 5.4	1.6	7
Sub-band 05	450	33	5.0×10^{-2}	14.7 × 4.9	-1.1	7
Sub-band 06	481	33	1.1×10^{-1}	12.7 × 4.6	-1.4	7
Smoothed Wide-band	400	200	1.0×10^{-1}	25 × 25	0.0	1, 2, 3, and 7



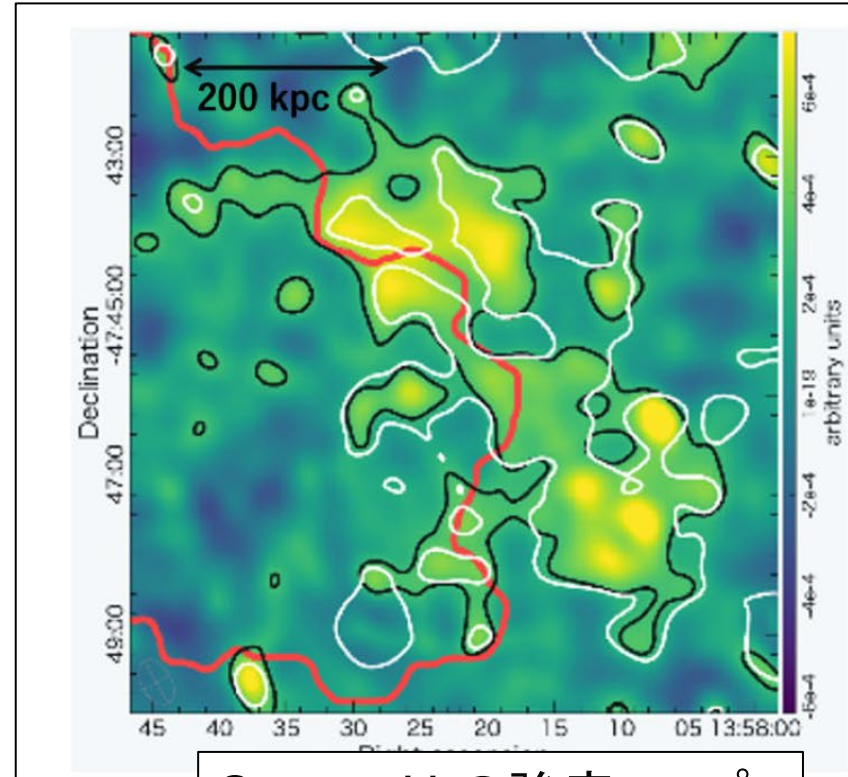
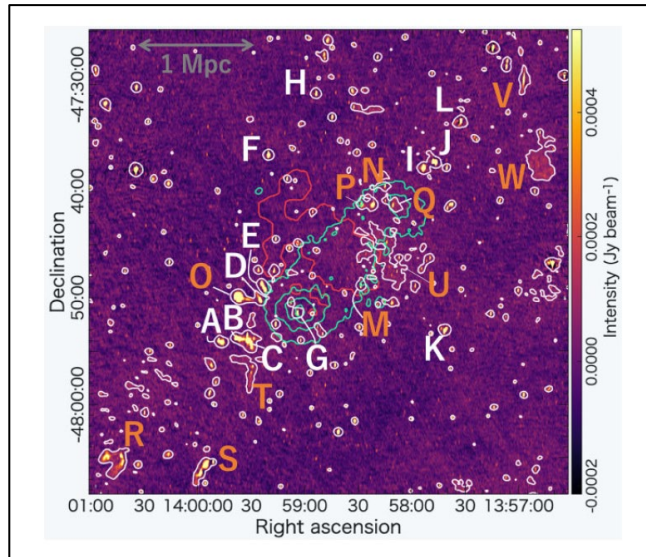
Radio sources

Kurahara et al.(2023)

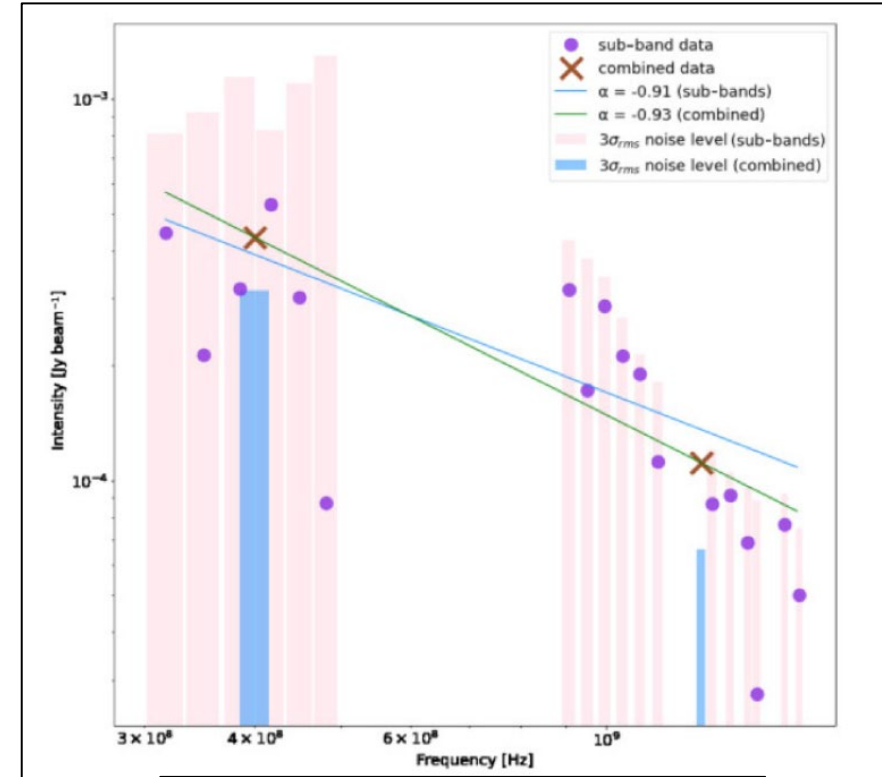
400MHzでの電波強度マップ(白等高線)
 緑等高線はX線表面輝度(Kato et al. 2015)
 A~Wはdiffuse radio source candidate
 A~LはAkahori et al.(2018)でも検出

Source U

Kurahara et al.(2023)



Source U の強度マップ



Source U のスペクトル

- 2つのX線ピークの間 diffuse source candidate (wide band dataで 4.5σ なので、自信を持って検出とは言いづらい)
- 場所的には衝撃波と一致しているように見える
- MeerKAT(1280MHz)でも (一応) 検出 (Kale et al. 2022)
- 400—1280MHzでのスペクトル指数は -1.22 ± 0.33

Discussion

Kurahara et al.(2023)

- 再び、電波強度(1.4GHz)とX線光度(0.1-2.4keV)の相関関係(Feretti et al. 2012)とを比較。

- ただし、400MHzでの強度からスペクトル指数 -1.22 で外挿した値を利用。

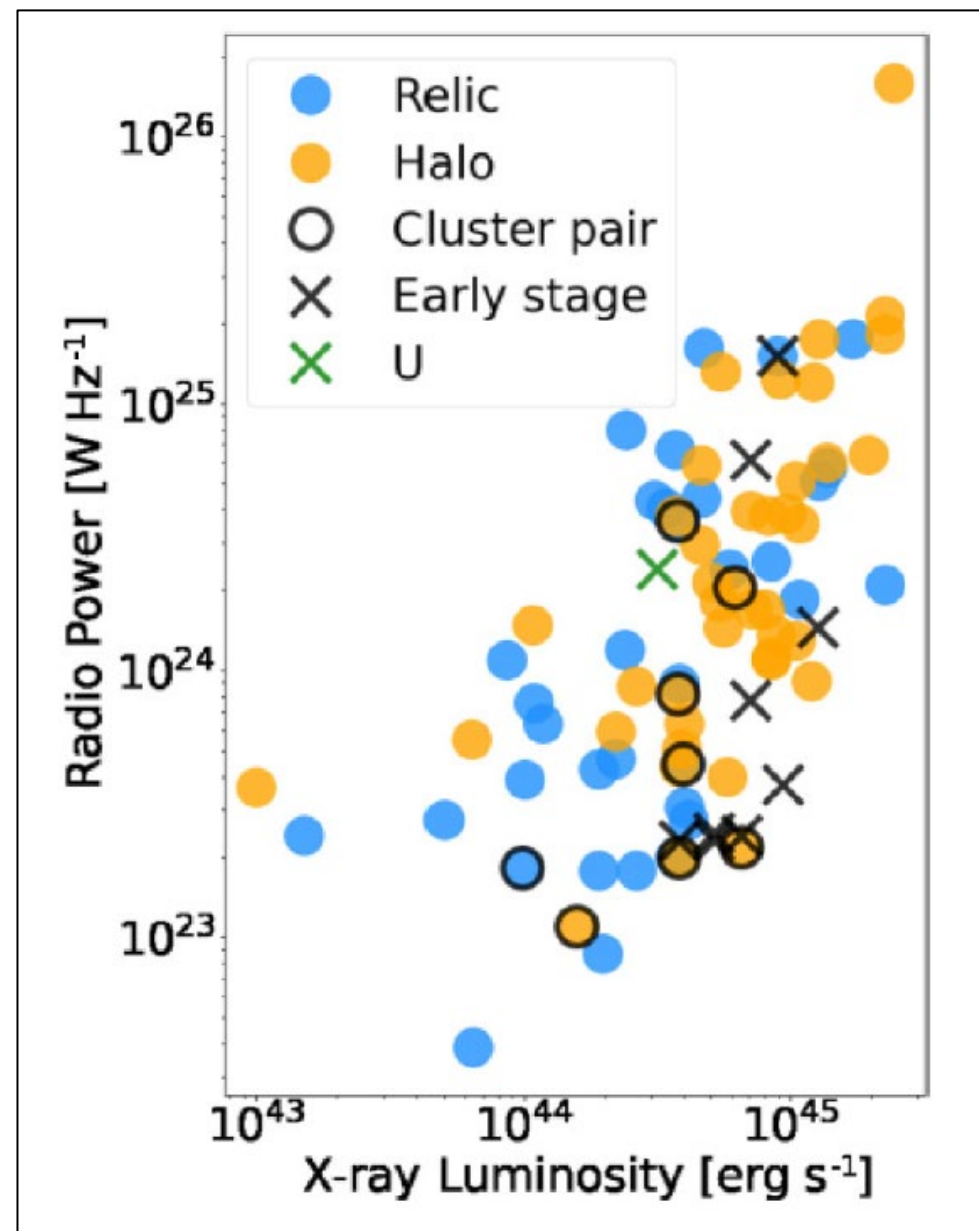
- 典型的な電波強度に、ただ、ATCAでは受かっていない

----->

スペクトルのべきがきつい？カットオフがある？

----->

粒子加速が始まったばかりで1.4GHzではまだ暗い??



まとめ

- 衝突前半期と思われる銀河団CIZA J1358.9-4750をX線及び電波で観測した。
- すぎくとXMMによるX線観測(Kato et al. 2015)
 - 2つのX線ピークの間部分に高温かつ高エントロピーな領域が見つかった。
 - 高温領域に対応してX線表面輝度にとびが見られた。
 - 温度の結果にRankine-Hugoniot関係を適用すると衝撃波のマッハ数は ~ 1.3 、衝突速度は ~ 1800 km/sとなった。
- ATCAによるGHz帯電波観測(Akahori et al. 2018)
 - 点源のみの検出で、広がった放射の有意な検出はなかった。
 - 広がった電波放射の上限値は、典型的な電波ハロー/レリックよりも1 – 2桁小さかった。
- GMRTによる300-500MHz帯電波観測(Kurahara et al. 2023)
 - 2つのX線ピークの間diffuse source candidate($\sim 4.5\sigma$)を見つけた。
 - MeerKAT(1280MHz)でも検出されていて400—1280MHzでのスペクトル指数は -1.22 ± 0.33 。
 - 上記のべきで1.4GHzに外挿すると、典型的な電波ハロー/レリックの強度になる。
 - Akahori et al.(2018)との比較より、1.4GHz帯でべきがきついか、カットオフがある可能性があり、粒子加速が始まったばかりの状態をみているのかもしれない。