

衝突初期銀河団 CIZA J1358.9-4750 のX線 & 電波観測

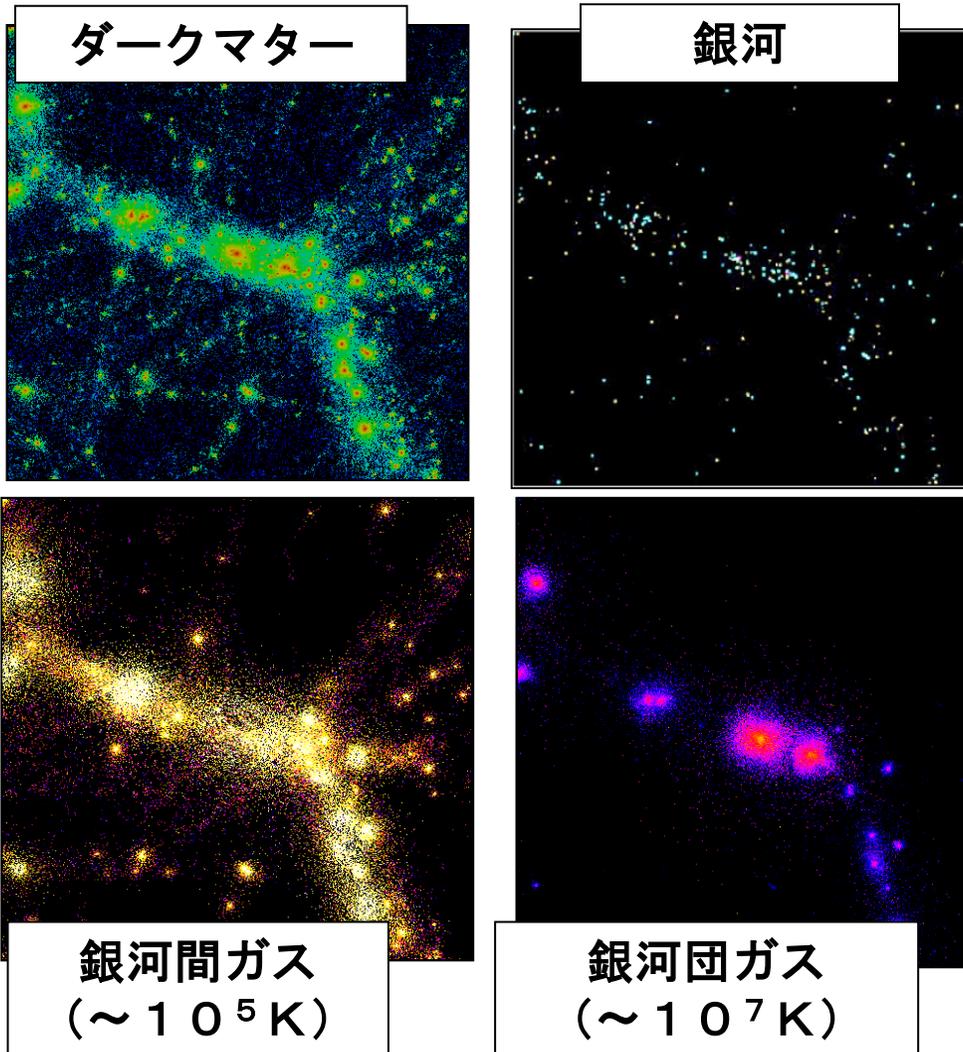
滝沢元和
研究室談話会(2021.6.22)

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

Introduction

Yoshikawa et al. (2003)



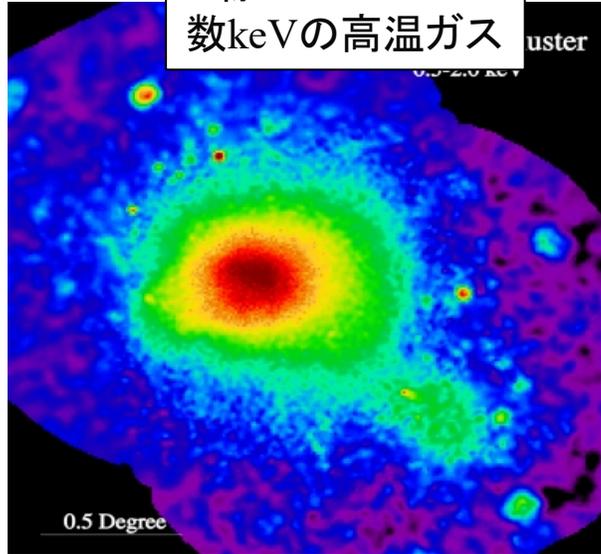
- 標準的な構造形成理論によれば、宇宙の構造は小さなものから大きなものへ (bottom up scenario)
 - Cold Dark Matter
 - Dark Halo, filaments
 - バリオン (CDMの重力ポテンシャルで加熱)
 - 一部は冷えて銀河、星へ
 - 大部分は高温ガスに (X-ray, Sunaev-Zel'dovich効果)

Introduction: 銀河団

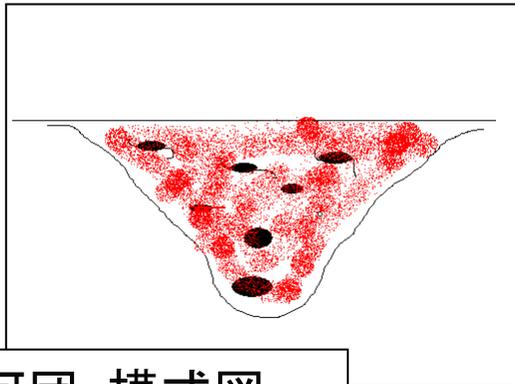
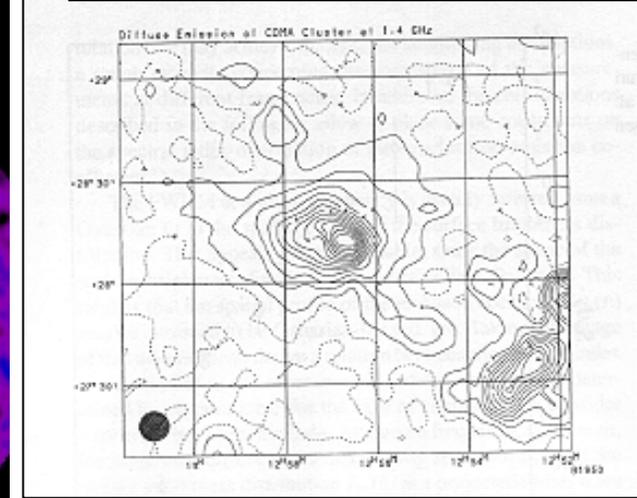
可視光
(数100個の銀河の集まり)



X線
数keVの高温ガス



電波
数GeVの高エネルギー電子+磁場

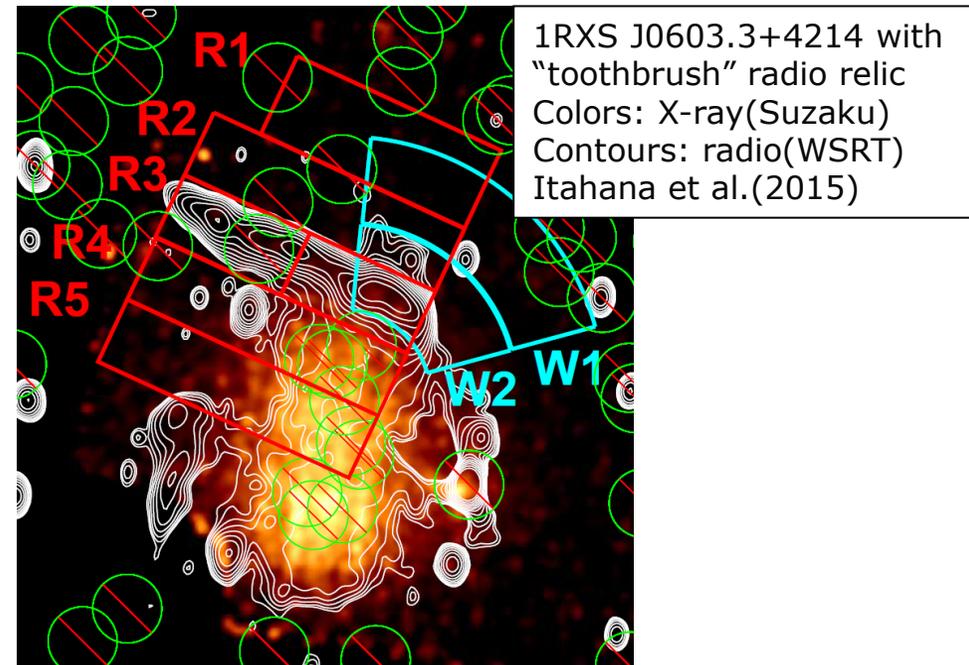
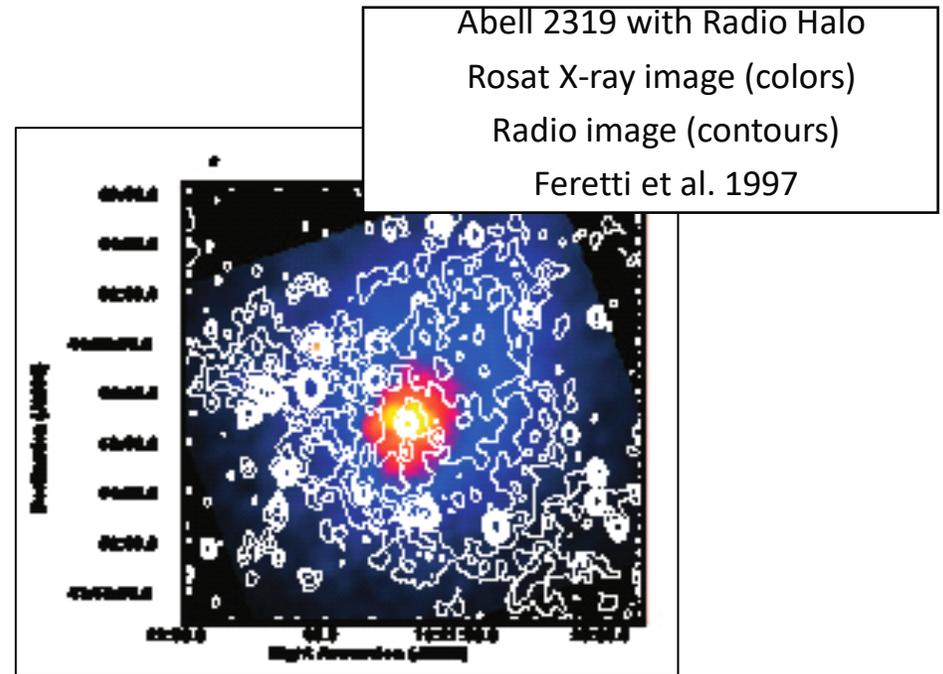


銀河団: 模式図

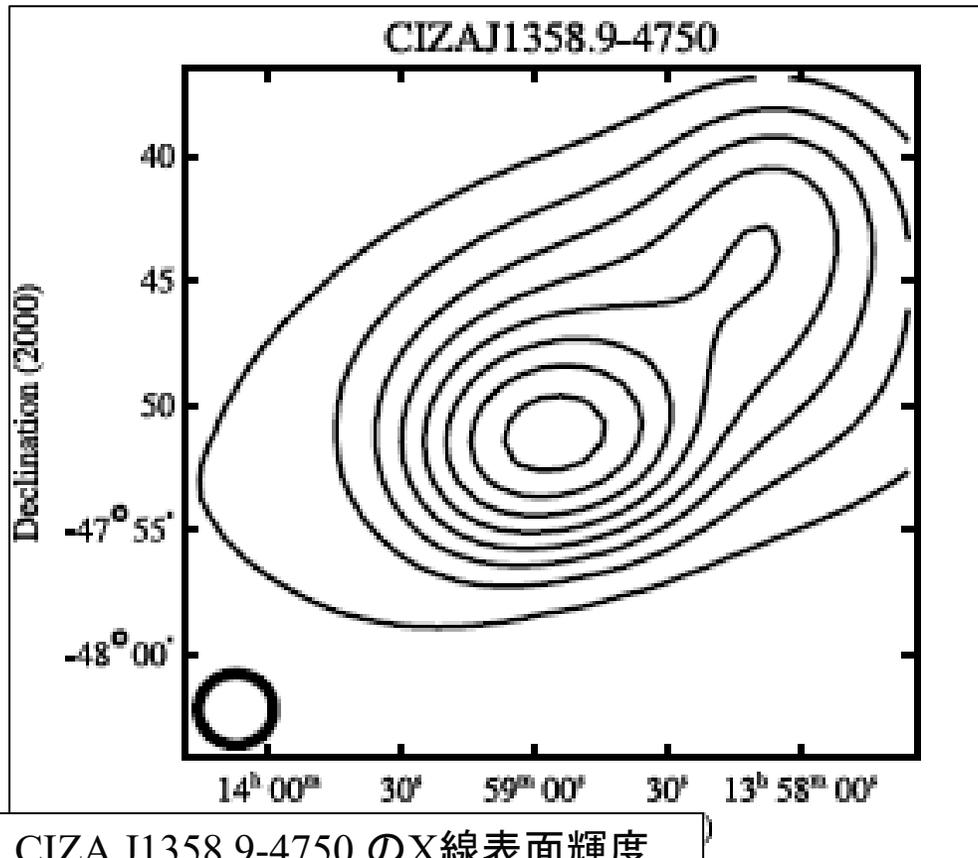
- 暗黒物質の重力ポテンシャル中に束縛された高温ガス ($T \sim 10^7 - 8 \text{ K}$) と銀河のかたまり。
- 宇宙で最大のビリアライズした天体
($R \sim \text{Mpc}$, $M \sim 10^{14-15}$ 太陽質量)
- 宇宙の構造形成の (観測可能な) 現場
- プラズマ物理の実験場 (理想的な無衝突プラズマ)
- 暗黒物質の実験場 (重力レンズ、**self-interacting dark matter** など)

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?



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。

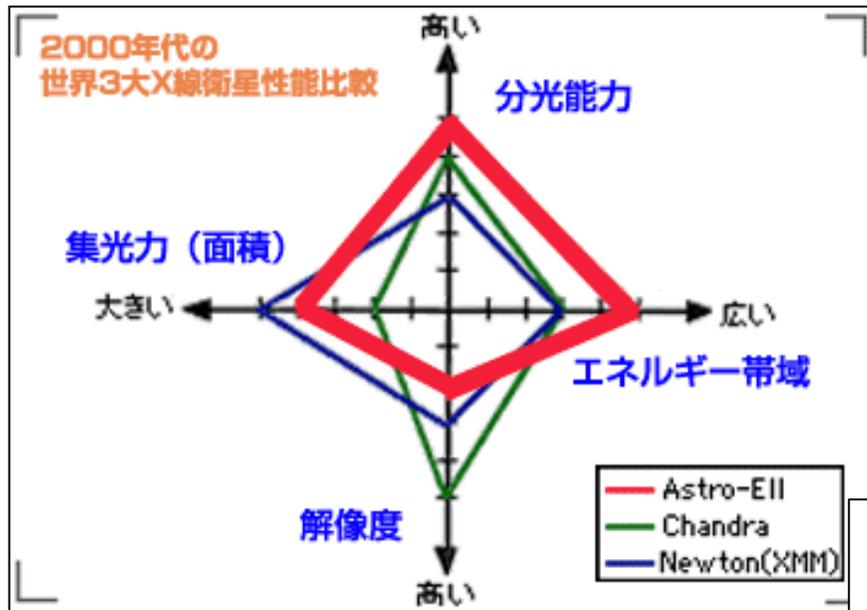
X線観測

Kato et al.(2015)

すざく
(日本 2005--2015)



ニュートン(欧)

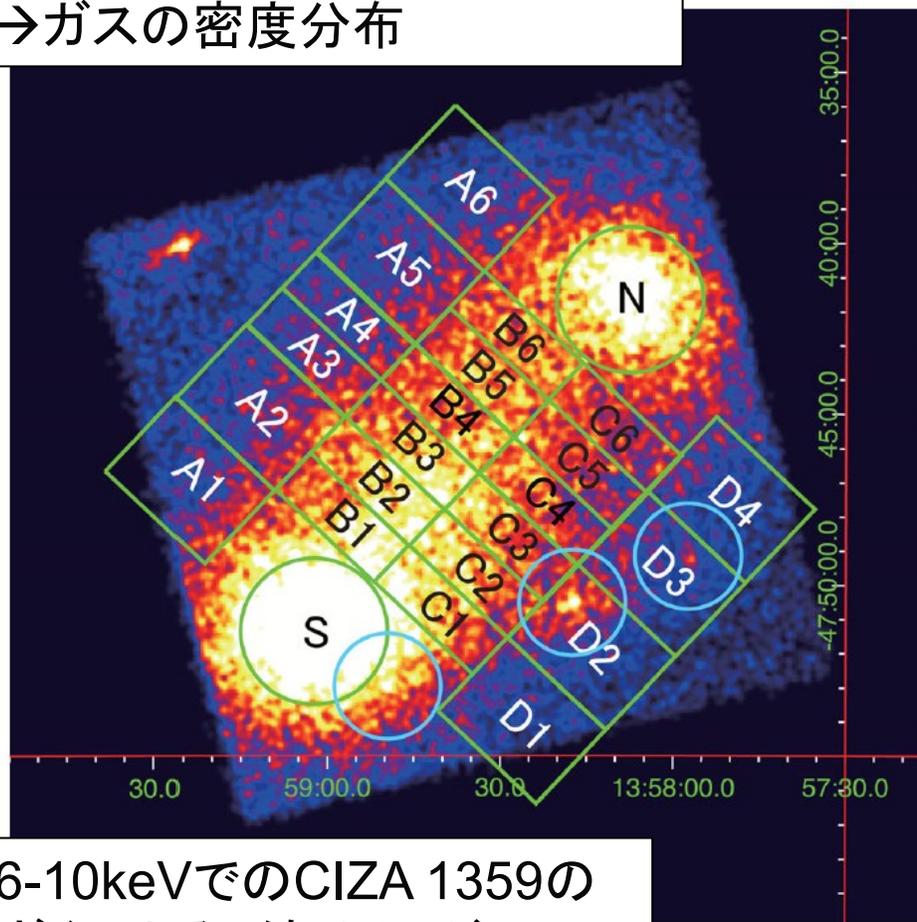


- 衝突が銀河団ガスに与えている影響を詳細に調べるため、すざく衛星で2013 Jan. 21-13に観測。
- 標準的なscreeningの結果、Total exposure は61.7ks
- XMM Newton のアーカイブデータ (2004, Feb. 21)も使用 (~5ks)
- すざく --- 分光能力に優れる。解像度はいまいち
- XMM --- 集光力にすぐれる。まあまあの解像度

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)

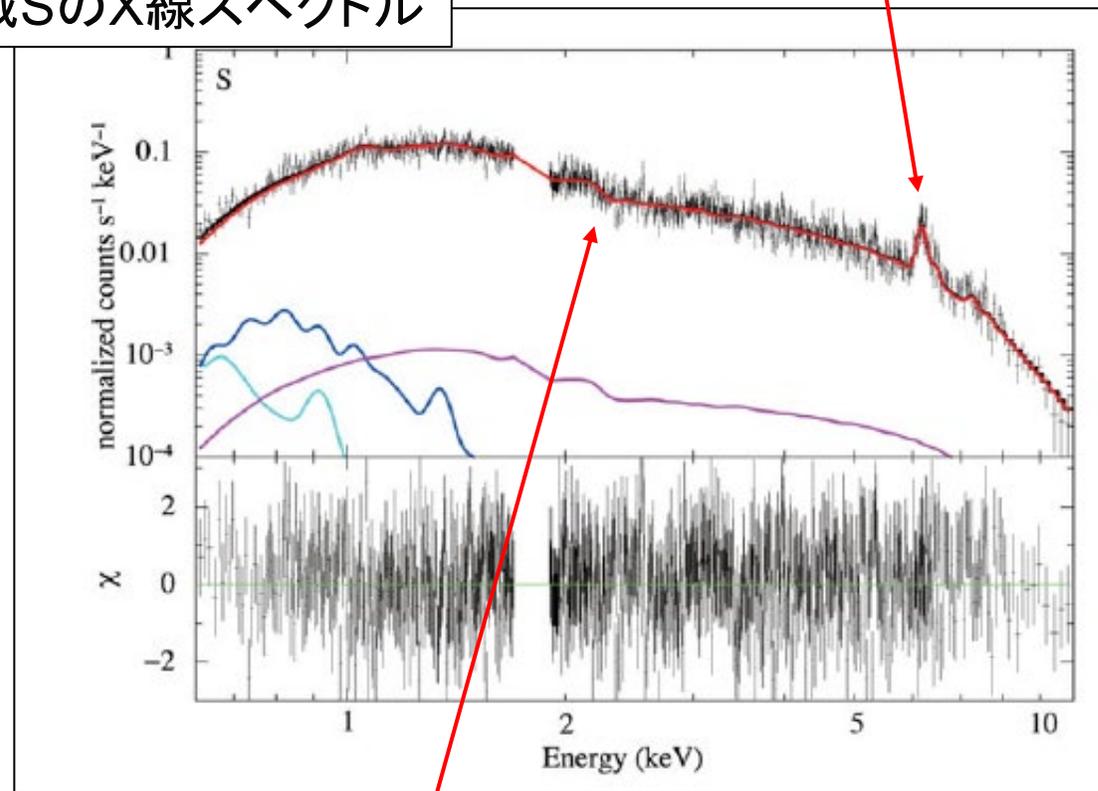
図はKato et al. (2015)より

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



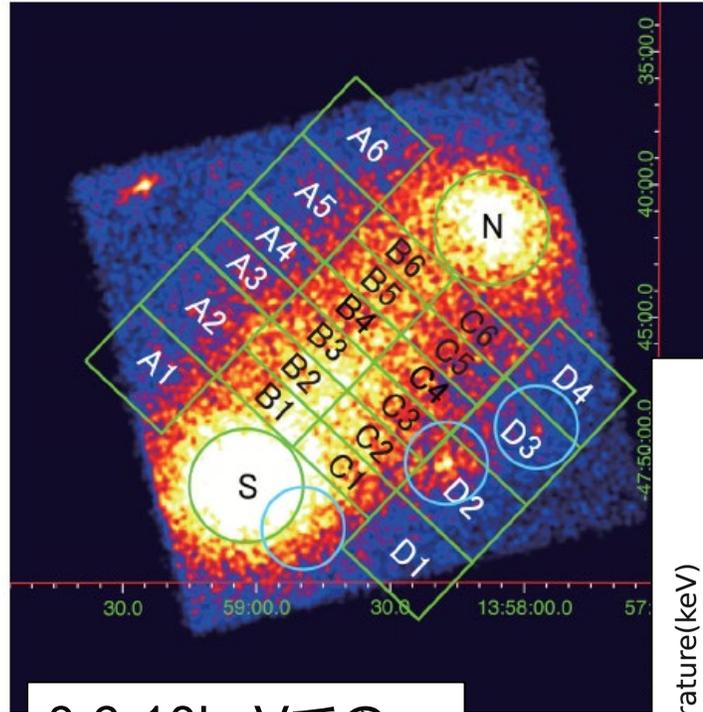
重元素の輝線
→重元素量、赤方変位、
ドップラー変位

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

温度分布

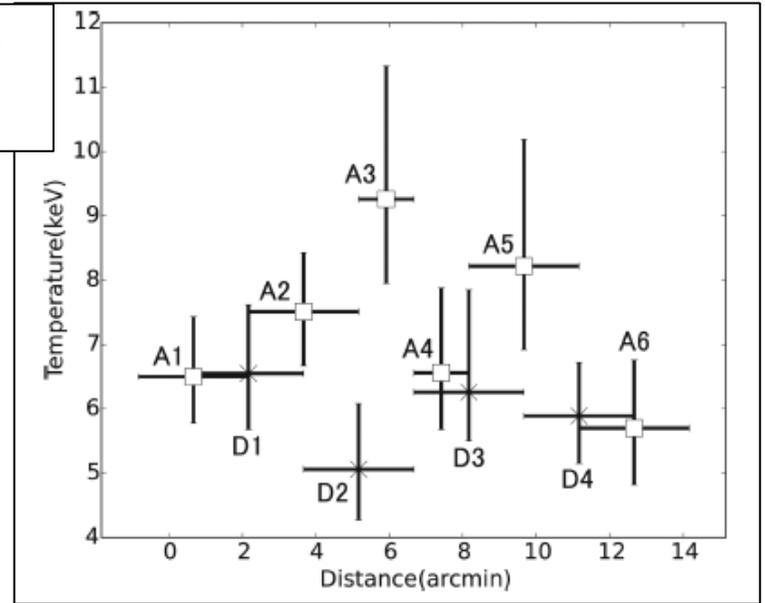
Kato et al.(2015)

- 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

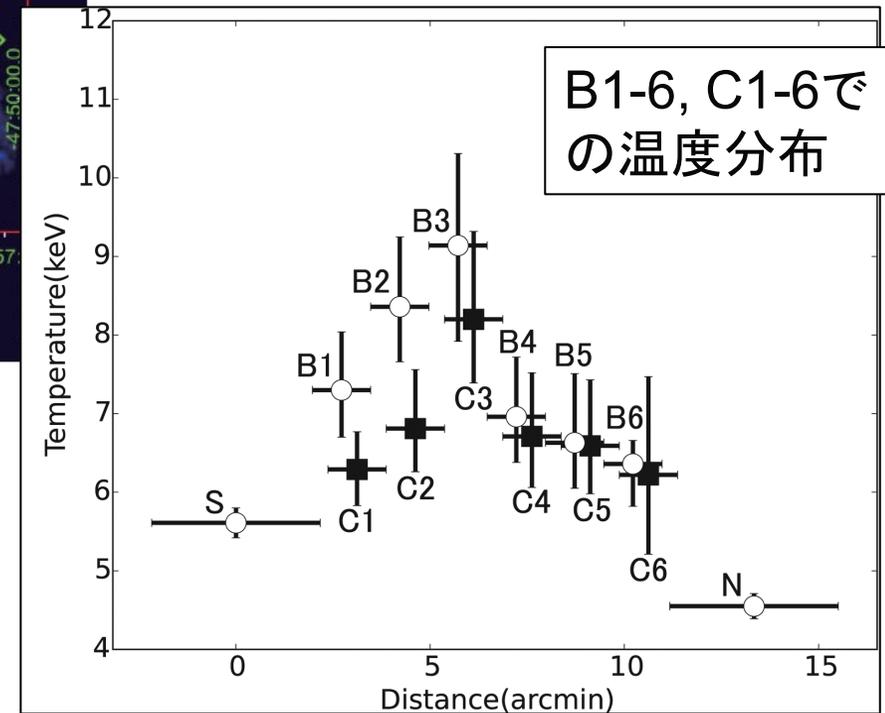


0.6-10keVでの
CIZA1359の
X線イメージ

A1-6, D1-4での
温度分布



B1-6, C1-6での
温度分布

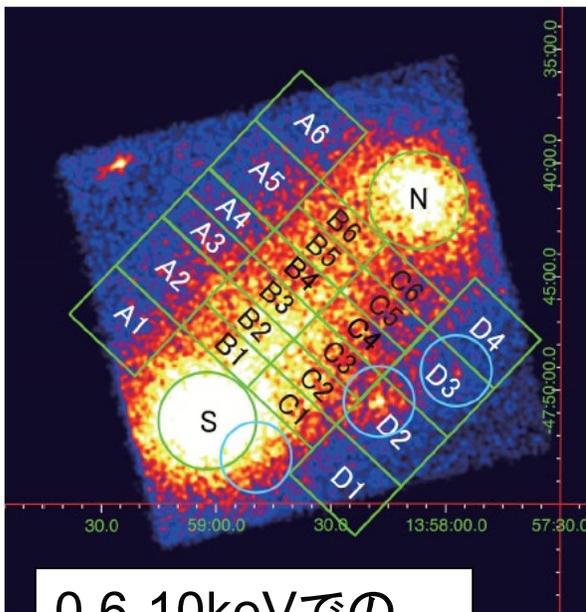
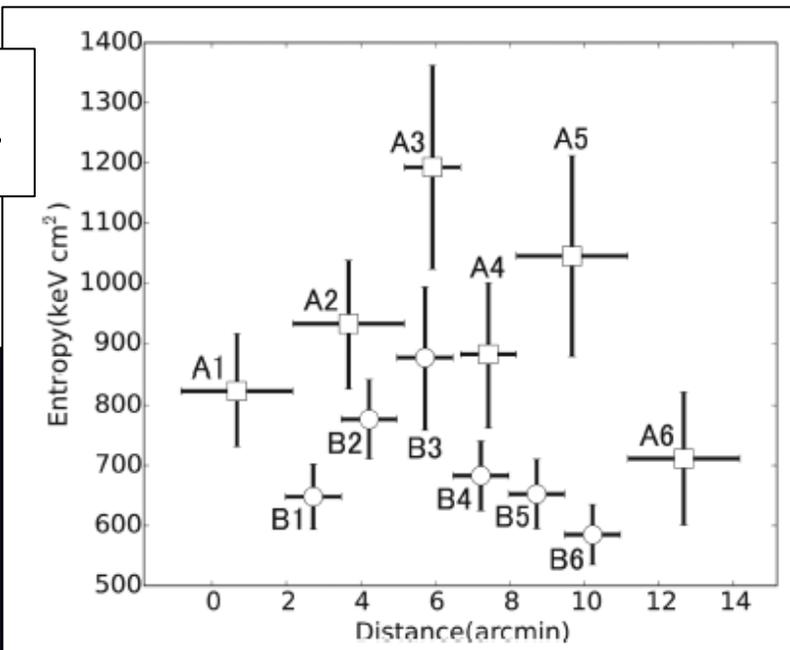


エントロピー分布

Kato et al.(2015)

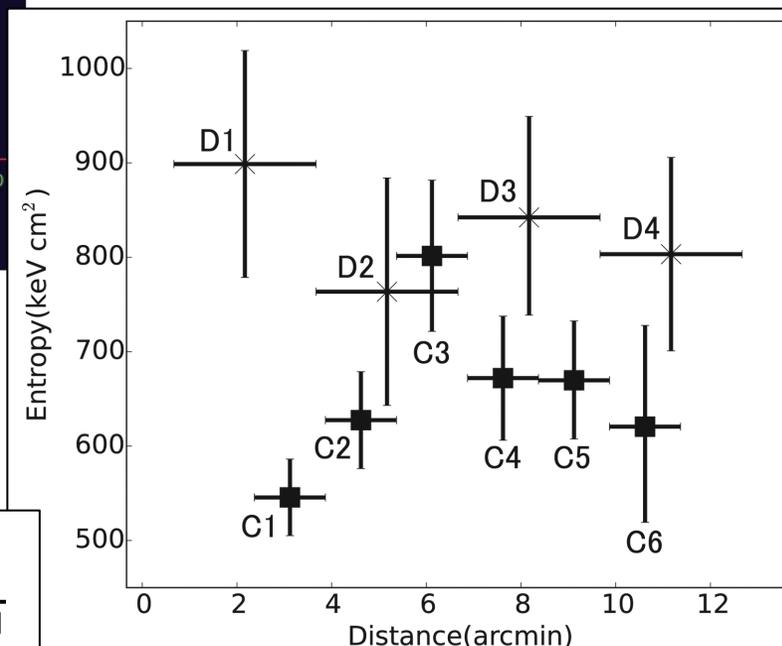
- 温度上昇の原因は断熱圧縮 or 運動エネルギーの散逸?
- Astrophysical entropy ($K = kT/n_e^{2/3}$)の分布を調べた。
- K は断熱過程では保存量
- A,B,Cで3-4にエントロピーの上昇
-->衝撃波加熱を示唆

A1-6, B1-6での
エントロピー分布



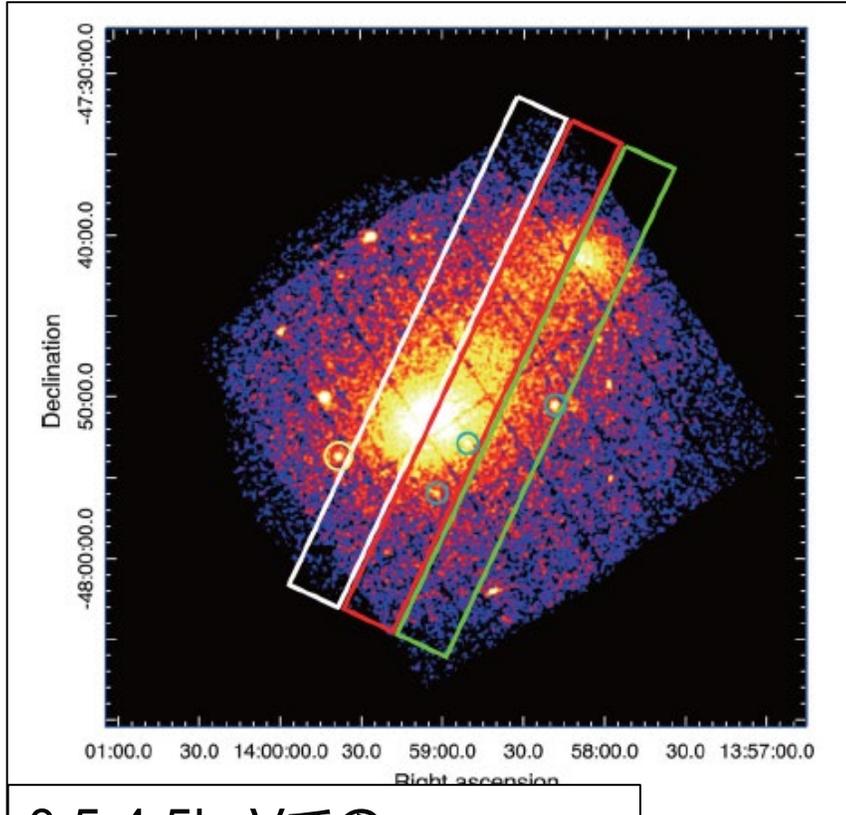
0.6-10keVでの
CIZA1359の
X線イメージ

C1-6, D1-4での
エントロピー分布



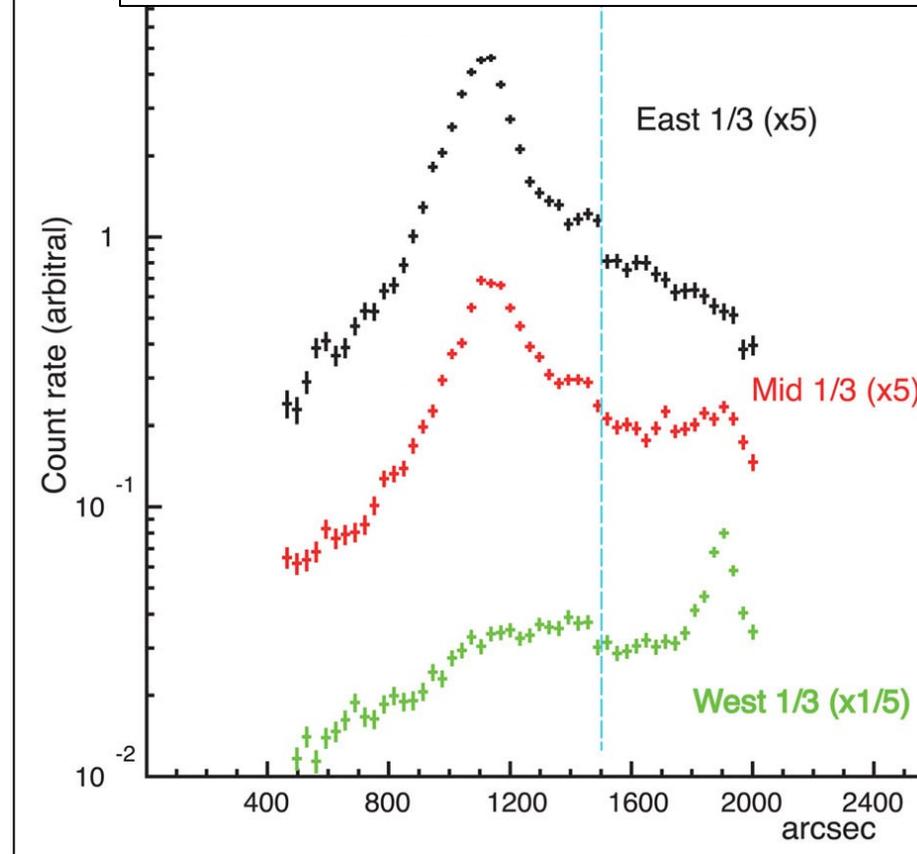
表面輝度分布

Kato et al.(2015)



0.5-4.5keVでの
CIZA 1359の
XMMによるX線イメージ

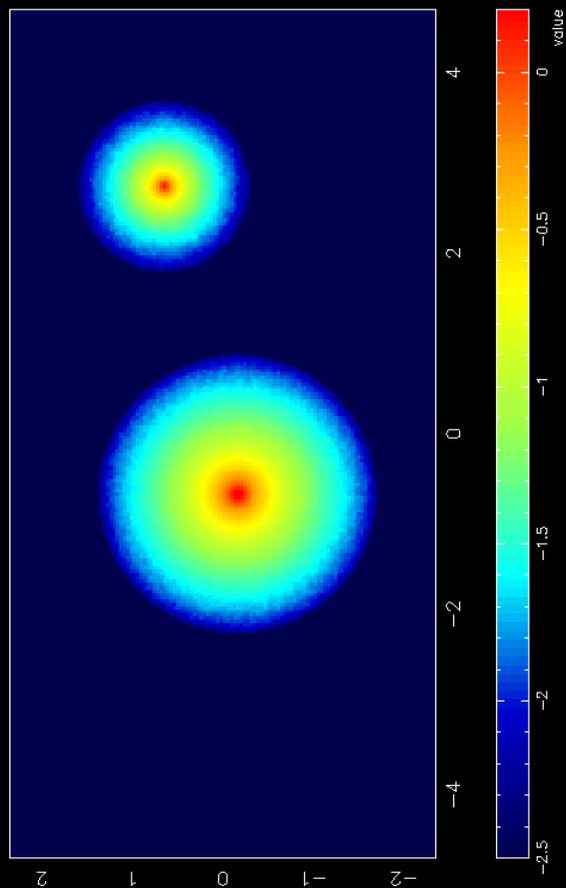
右図中の領域での表面輝度プロファイル



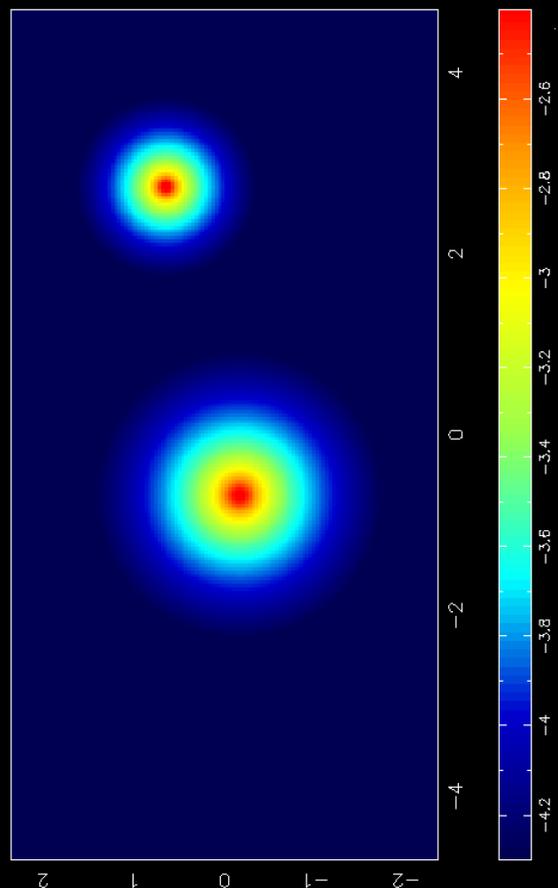
- 解像度のよいXMMのデータで表面輝度を調査
- 温度上昇に対応する場所に表面輝度にjumpを発見-->衝撃波の存在をさらに示唆

参考資料：銀河団衝突のシミュレーション動画

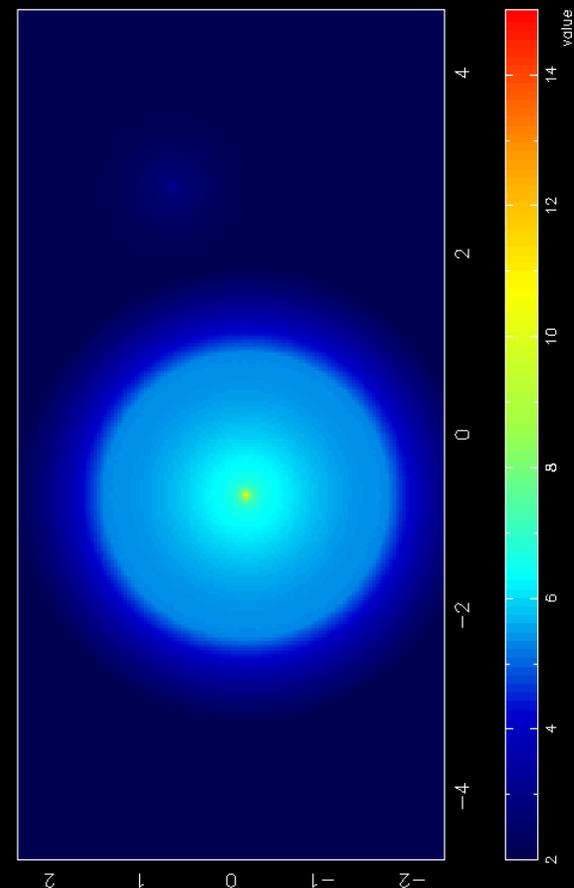
暗黒物質(ダークマター)
面密度



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

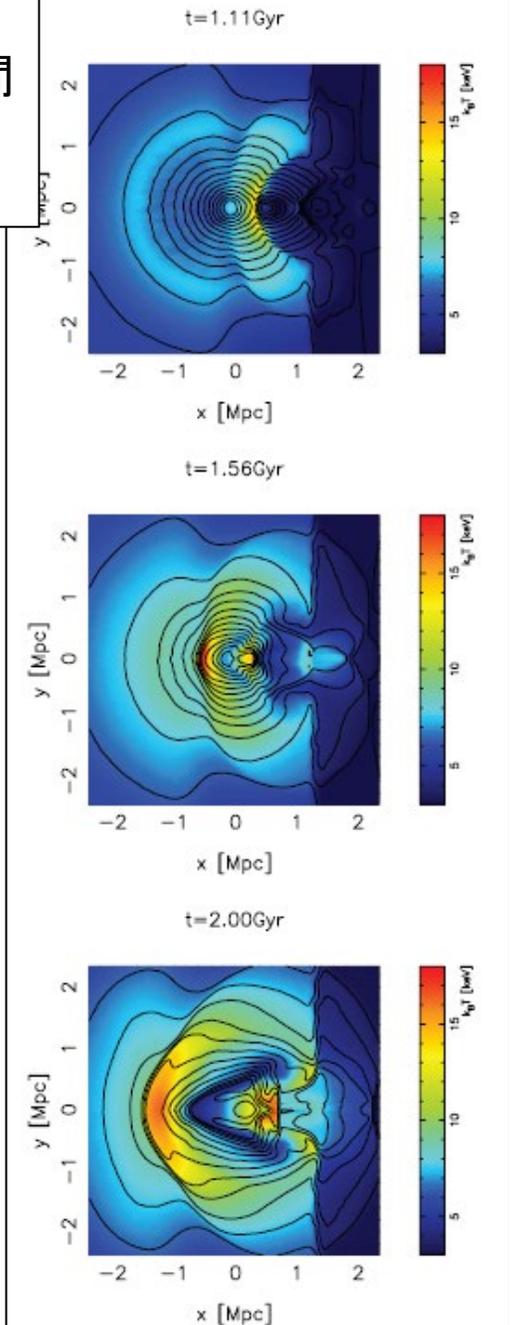
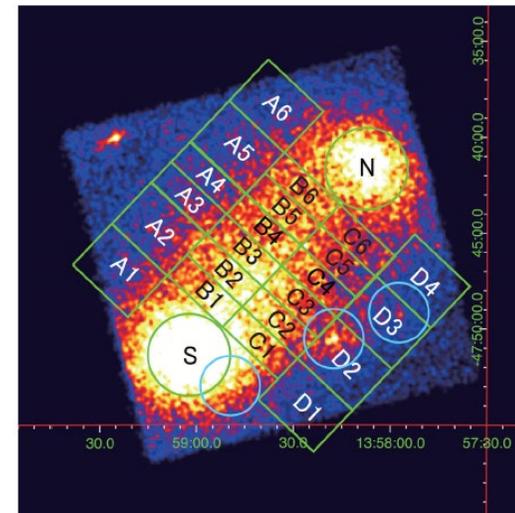
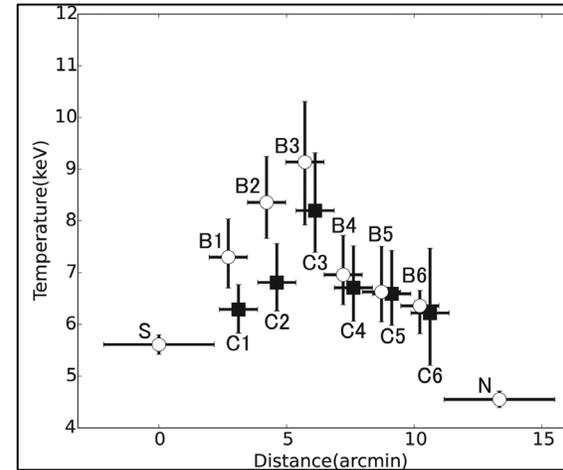
$$\frac{T_{post}}{T_{pre}} = \frac{5M^4 + 14M^2 - 3}{16M^2}$$

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)



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

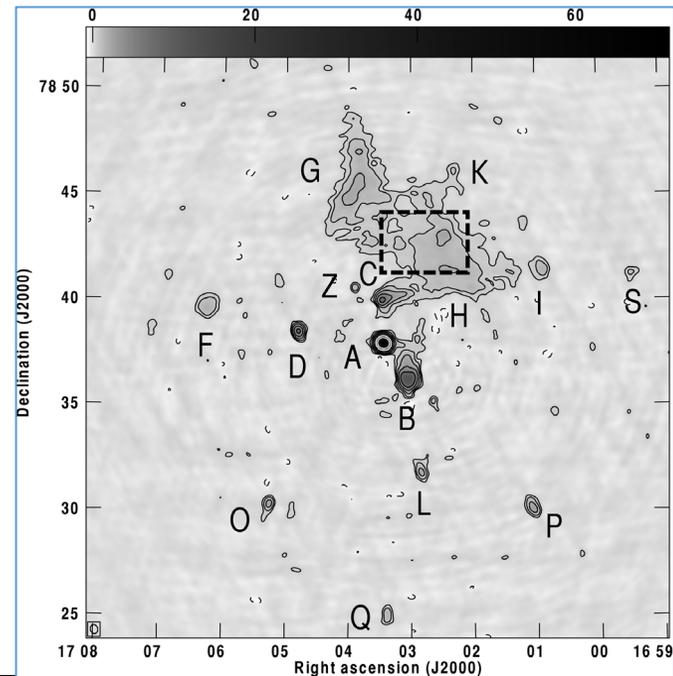
Table 1. Observation log of CZ1359 with the ATCA.

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)

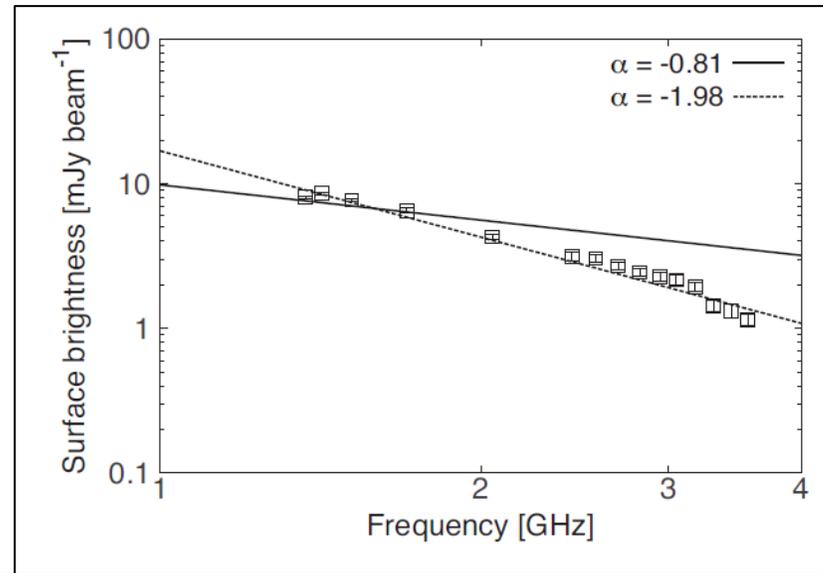
図はOzawa et al.(2015)から

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

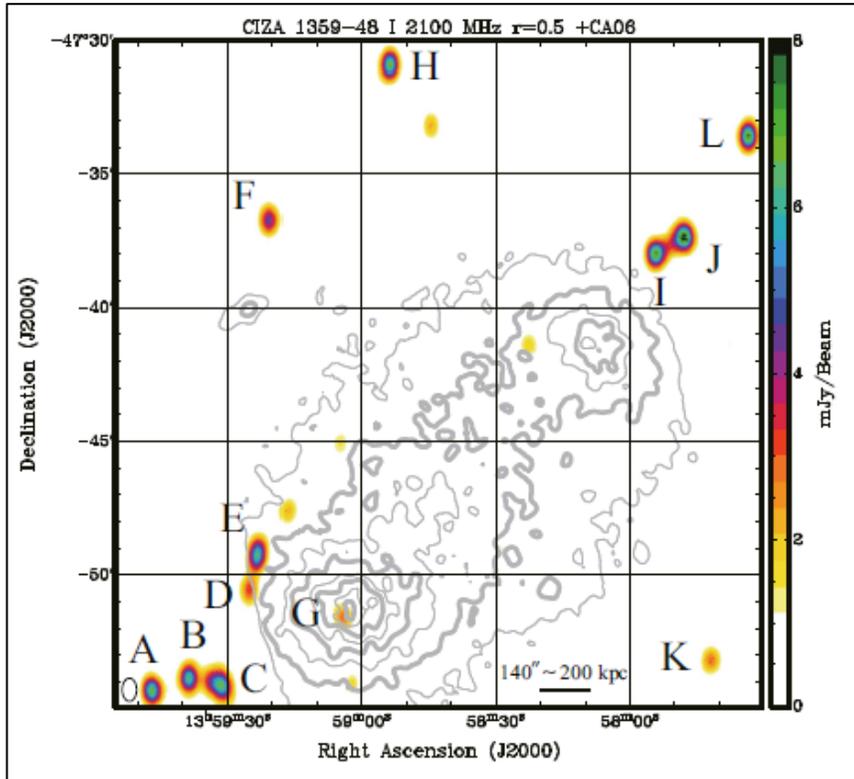
$$F_\nu \propto \nu^\alpha \Leftrightarrow N(E_e) \propto E_e^{2\alpha-1}$$

• さらに偏波からは以下のような情報が得られる

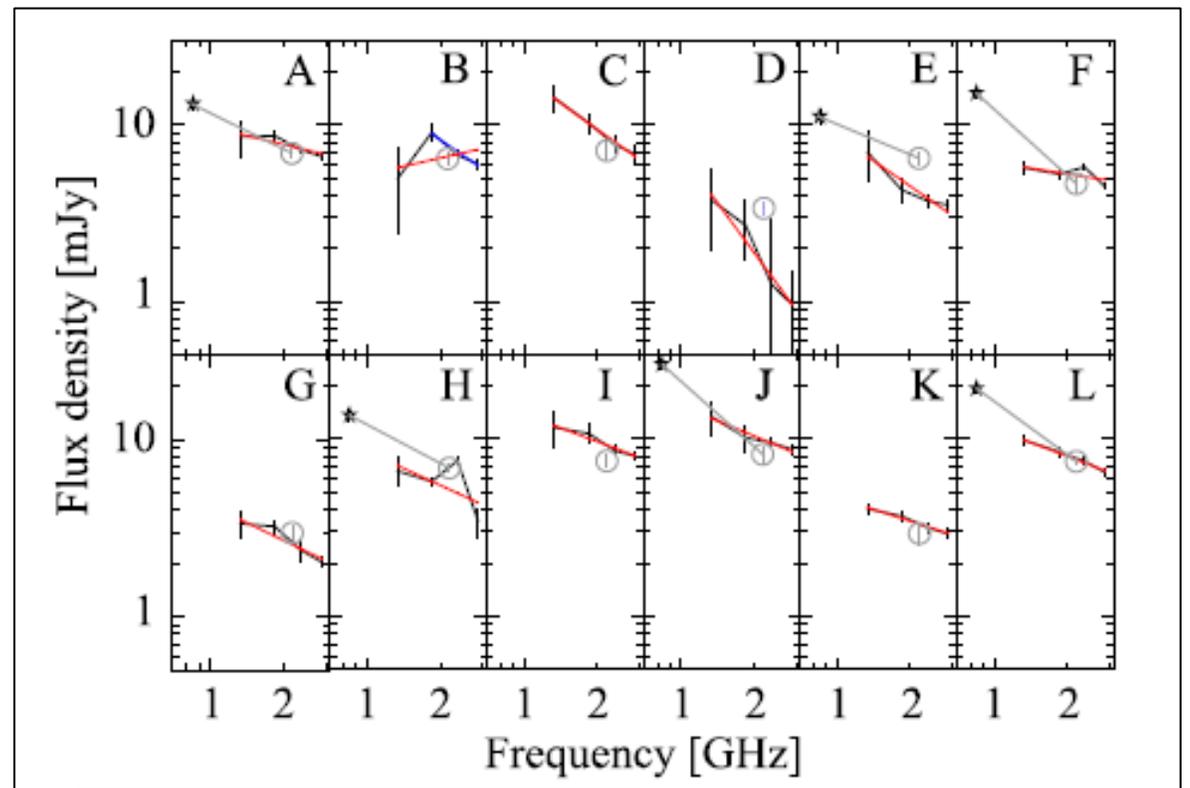
- 偏波方向 → 放射領域での磁場の天球面内成分
- 偏波度 → 磁場の乱雑さ具合
- ファラデー回転 → 放射領域から我々までの熱電子密度および磁場の視線方向成分

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)

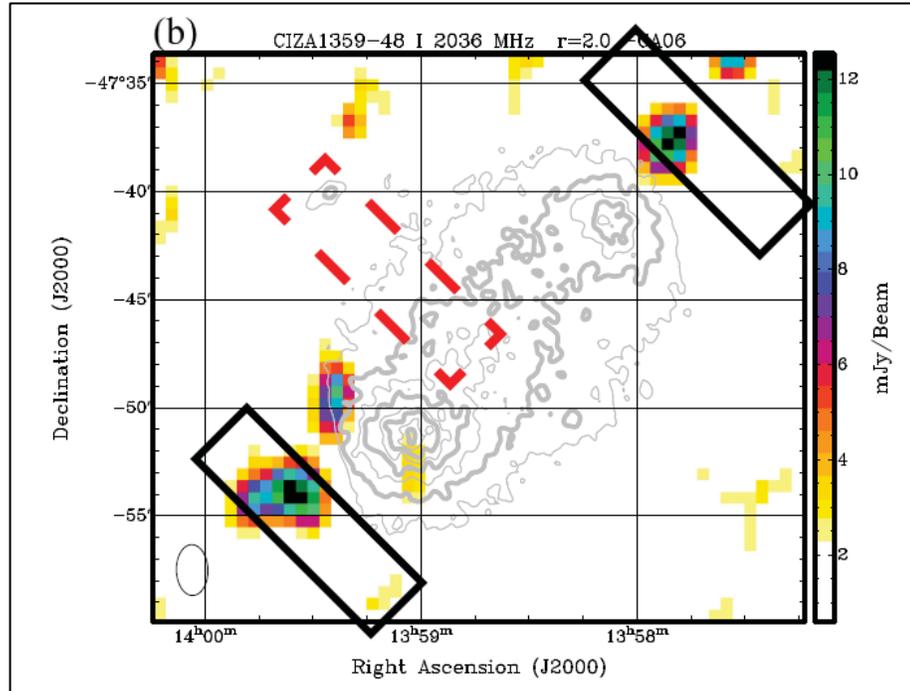


点源の電波スペクトル

- 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

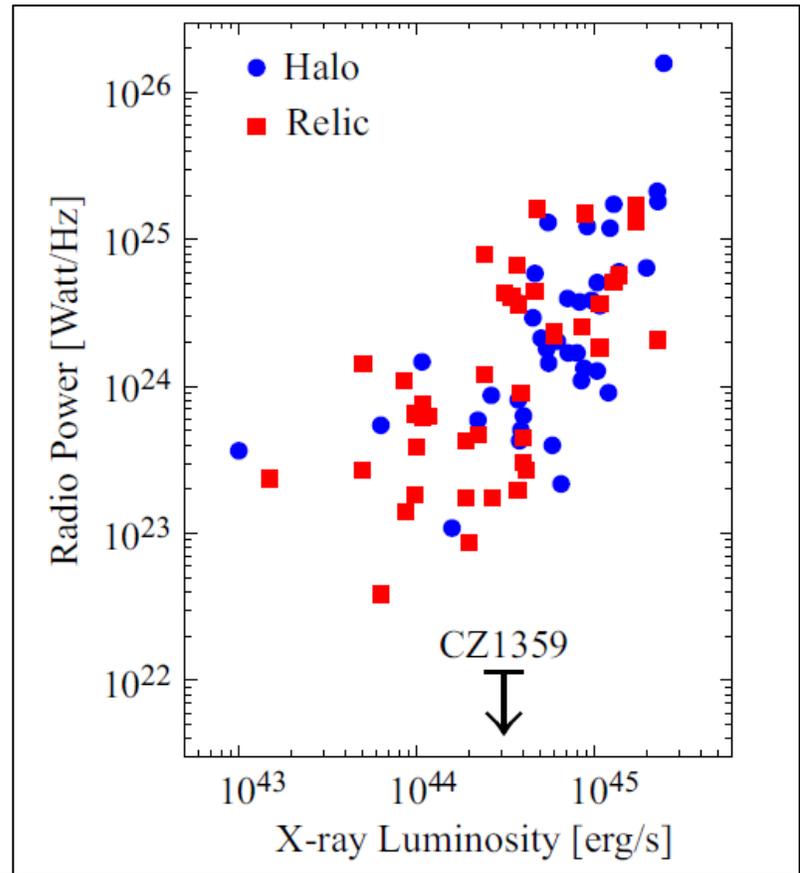
Akahori et al.(2018)



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



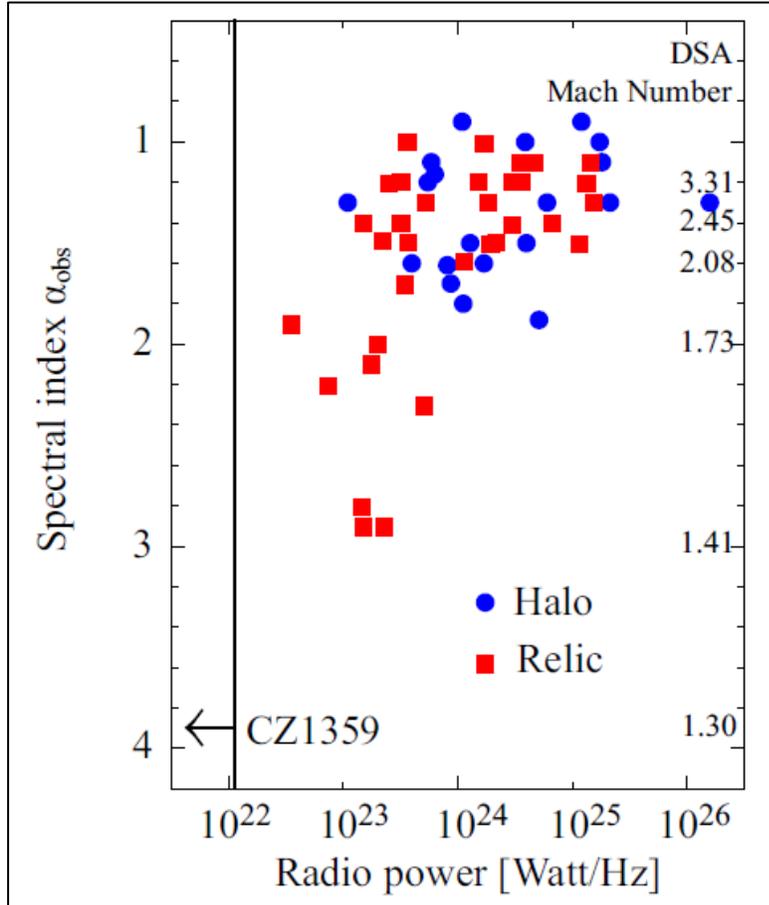
電波強度(1.4GHz)とX線光度(0.1-2.4keV)
の相関関係(Feretti et al. 2012)との比較

今回得た電波強度の上限値はX線光度が
同程度のもの比べて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

議論 (つづき)

Akahori et al.(2018)



電波強度(1.4GHz)とスペクトル指数の
相関関係(Feretti et al. 2012)との比較

- 標準的な衝撃波粒子加速モデルでは衝撃波のマッハ数 M と加速粒子エネルギースペクトルの巾指数 $p(N(E) \propto E^{-p})$ とに以下のような関係がある。

$$\frac{M^2+1}{M^2-1} = \frac{p}{2}$$

- 加速が冷却(シンクロトロン+逆コンプトン)とバランスしていると粒子スペクトルは巾が1きつくなる($N(E) \propto E^{-p-1}$)。この場合観測される電波の巾($P_\nu \propto \nu^{-\alpha}$)は

$$\alpha = \frac{p}{2}$$

- Kato et al.(2015)の結果($M \sim 1.3$)を使うと
 $\alpha \sim 3.9$
- 電波強度とスペクトル指数の相関関係との比較から典型的な電波ハロー/レリックの領域にはないことがわかる。
--->粒子加速がおきるのにはある程度高いマッハ数が必要か？

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。
- X線観測(Kato et al. 2015)
 - すざく衛星によるX線観測データから、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。
 - XMMのアーカイブデータを調べたところ、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。
- 電波観測(Akahori et al. 2018)
 - ATCAによる電波観測からは点源のみの検出で、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。
 - X線観測から予想されるマッハ数は、典型的な電波ハロー/レリックよりも低く、低マッハ数の衝撃波で粒子加速がすすんでいないことを示唆する。