

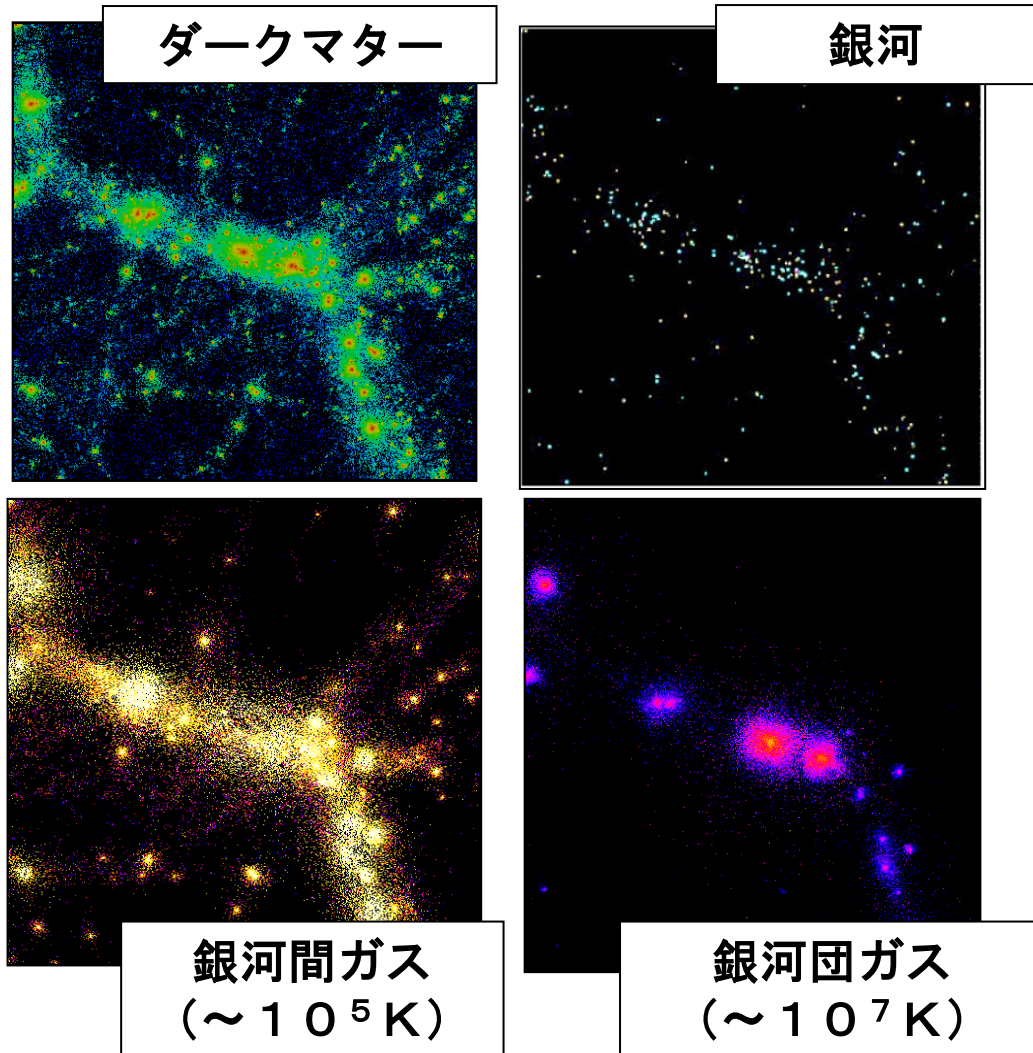
“toothbrush”銀河団1RXS J0603.3+4214 での粒子加速過程

滝沢元和

研究室談話会（2024.6.7）

Introduction

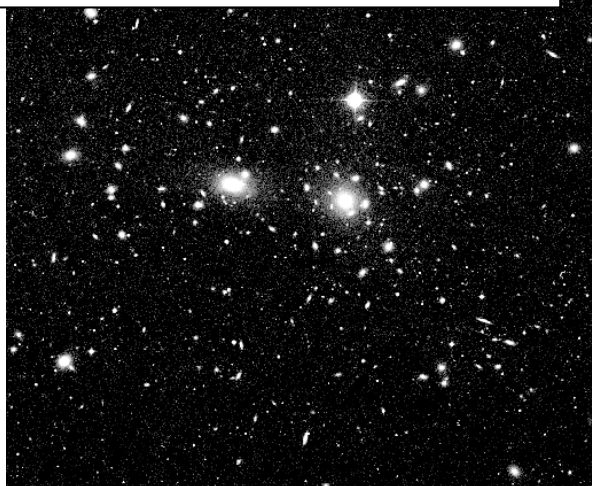
Yoshikawa et al. (2003)



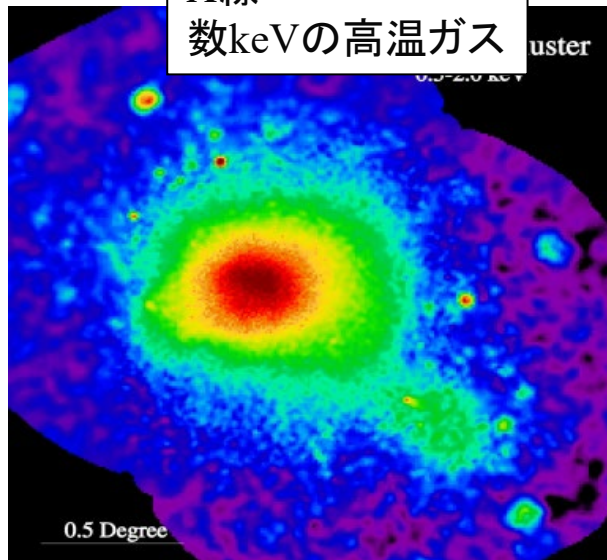
- 標準的な構造形成理論によれば、宇宙の構造は小さなものから大きなものへ (bottom up scenario)
- Cold Dark Matter
 - Dark Halo, filaments
- バリオン (CDMの重力ポテンシャルで加熱)
 - 一部は冷えて銀河、星へ
 - 大部分は高温ガスに (X-ray, SZ効果)

Introduction: 銀河団

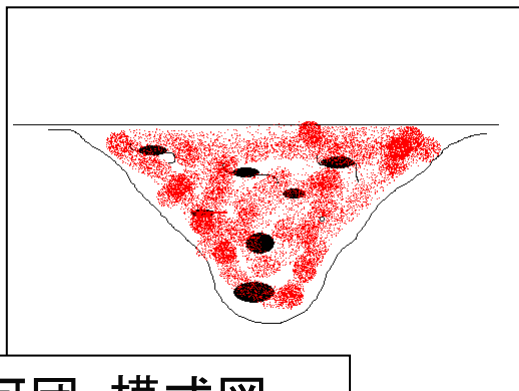
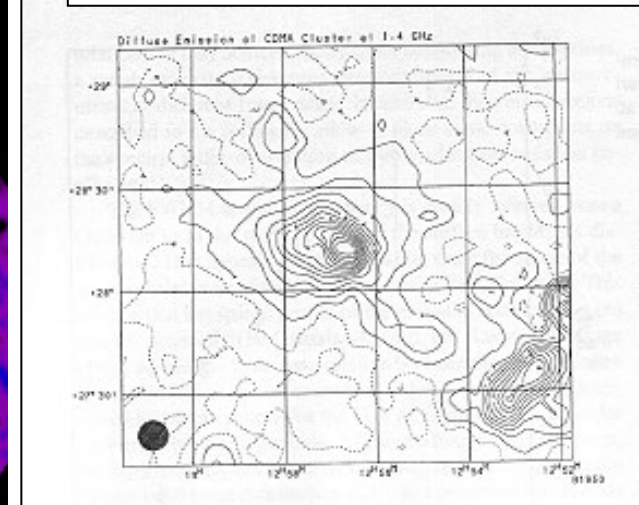
可視光
(数100個の銀河の集まり)



X線
数keVの高温ガス



電波
数GeVの高エネルギー電子+磁場



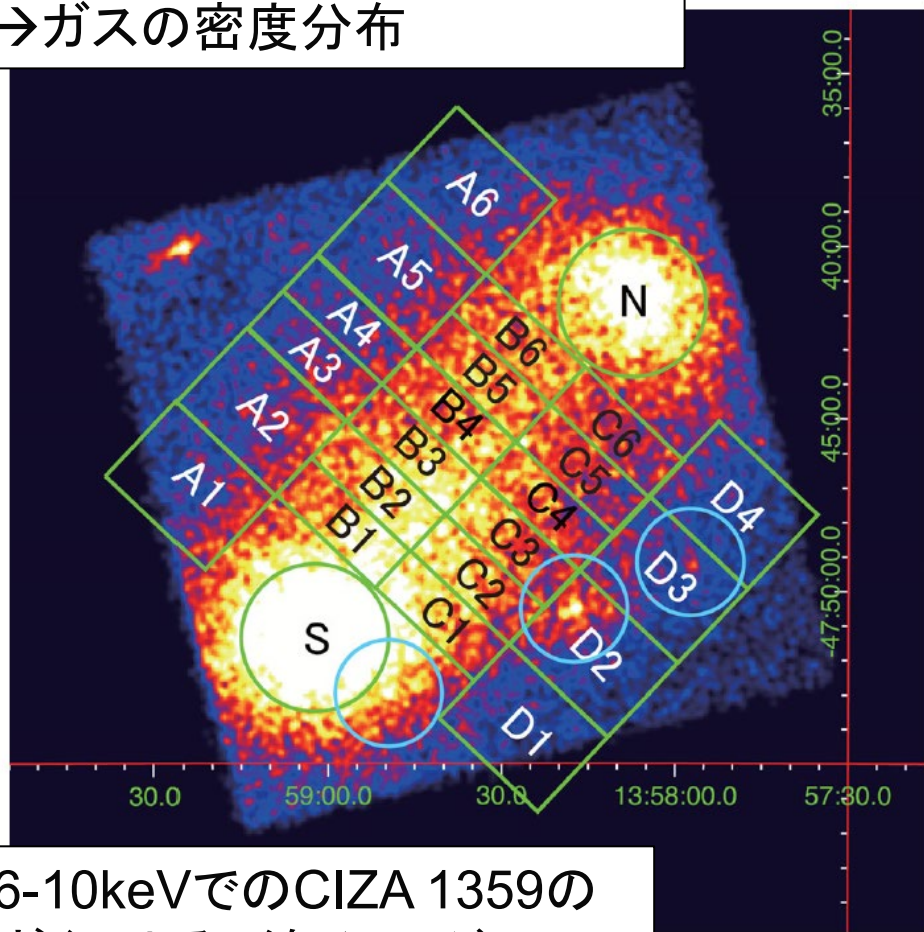
銀河団: 模式図

- 暗黒物質の重力ポテンシャル中に束縛された高温ガス ($n \sim 10^{-3} \text{ cm}^{-3}$, $kT \sim \text{keV}$) 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)

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)

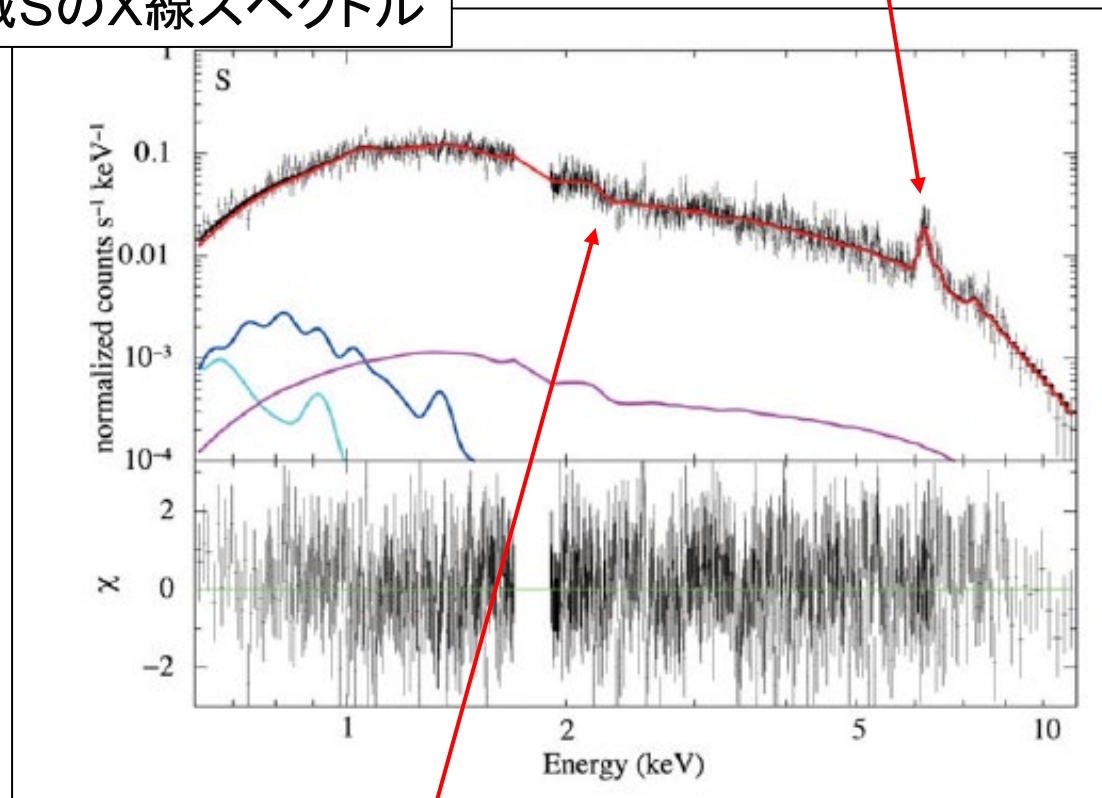
図はKato et al. (2015)より

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



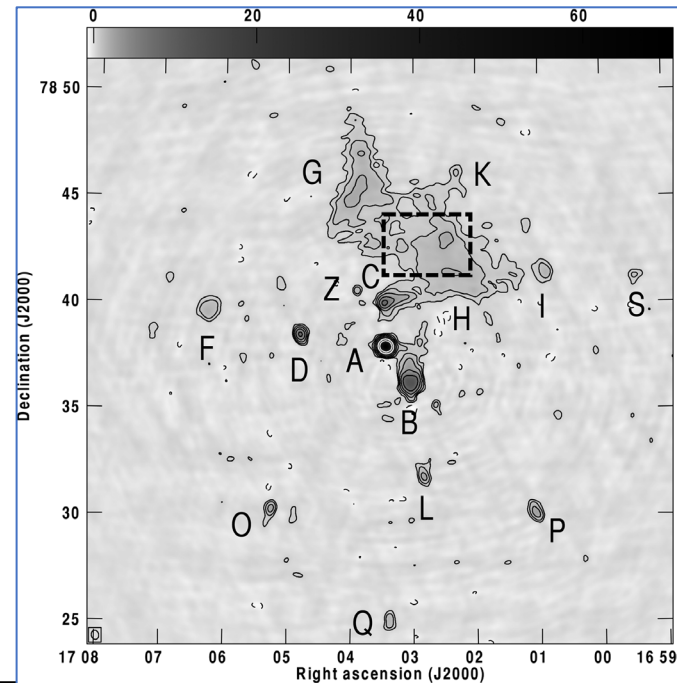
重元素の輝線
→重元素量、赤方変位、
ドップラー変位

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

電波観測でなにがわかるか(シンクロトロン放射の場合)

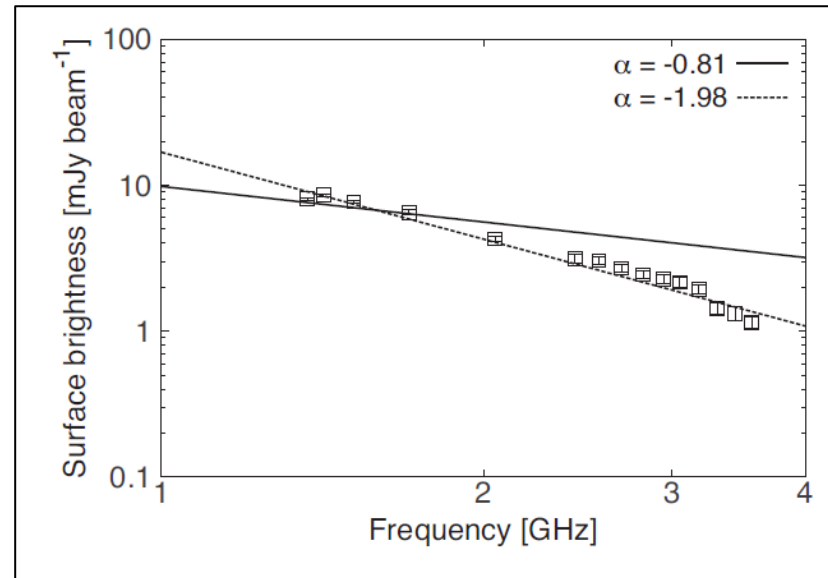
図はOzawa et al.(2015)から

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

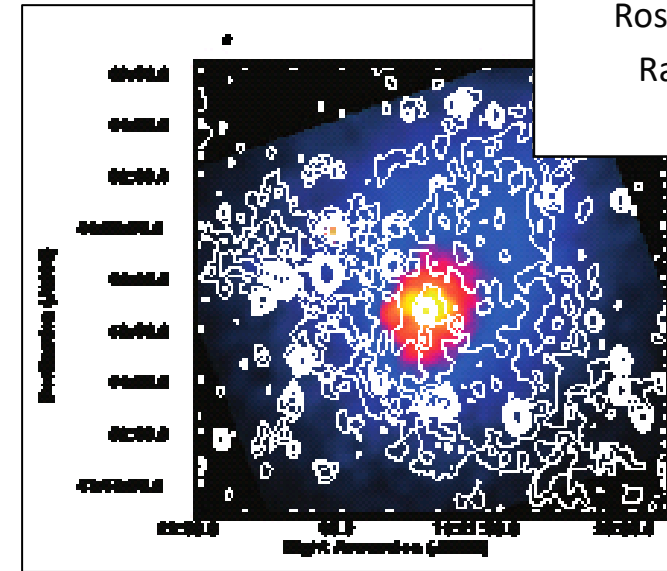
- 偏波方向 → 放射領域での磁場の天球面内成分
- 偏波度 → 磁場の乱雑さ具合
- ファラデー回転 → 放射領域から我々までの熱電子密度および磁場の視線方向成分

Radio Halos / Relics

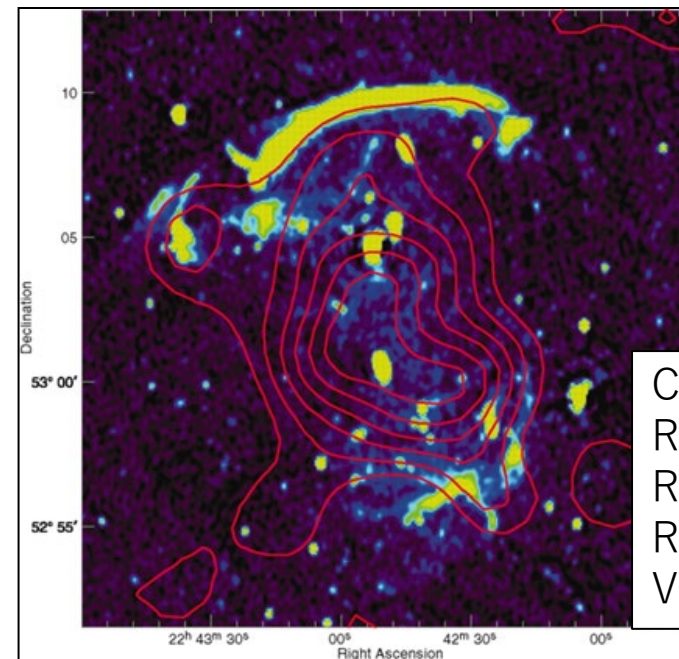
- Some merging galaxy clusters have diffuse non-thermal radio emitting regions.

$$(E_e \sim \text{GeV}, B \sim \mu\text{G})$$

- 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?



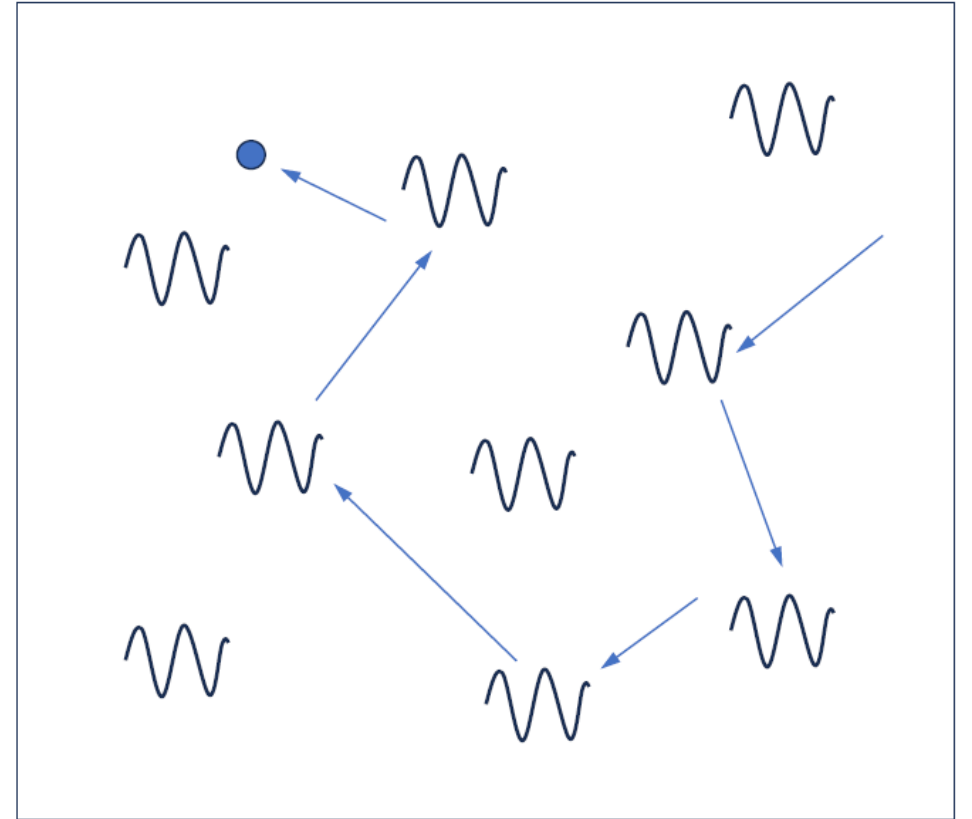
Abell 2319 with Radio Halo
Rosat X-ray image (colors)
Radio image (contours)
Feretti et al. 1997



CIZA J2242.8+5301 with
Radio Relic
Rosat X-ray image (contours)
Radio image (colors)
Van Weeren et al. 2010

乱流加速（Fermi二次加速）

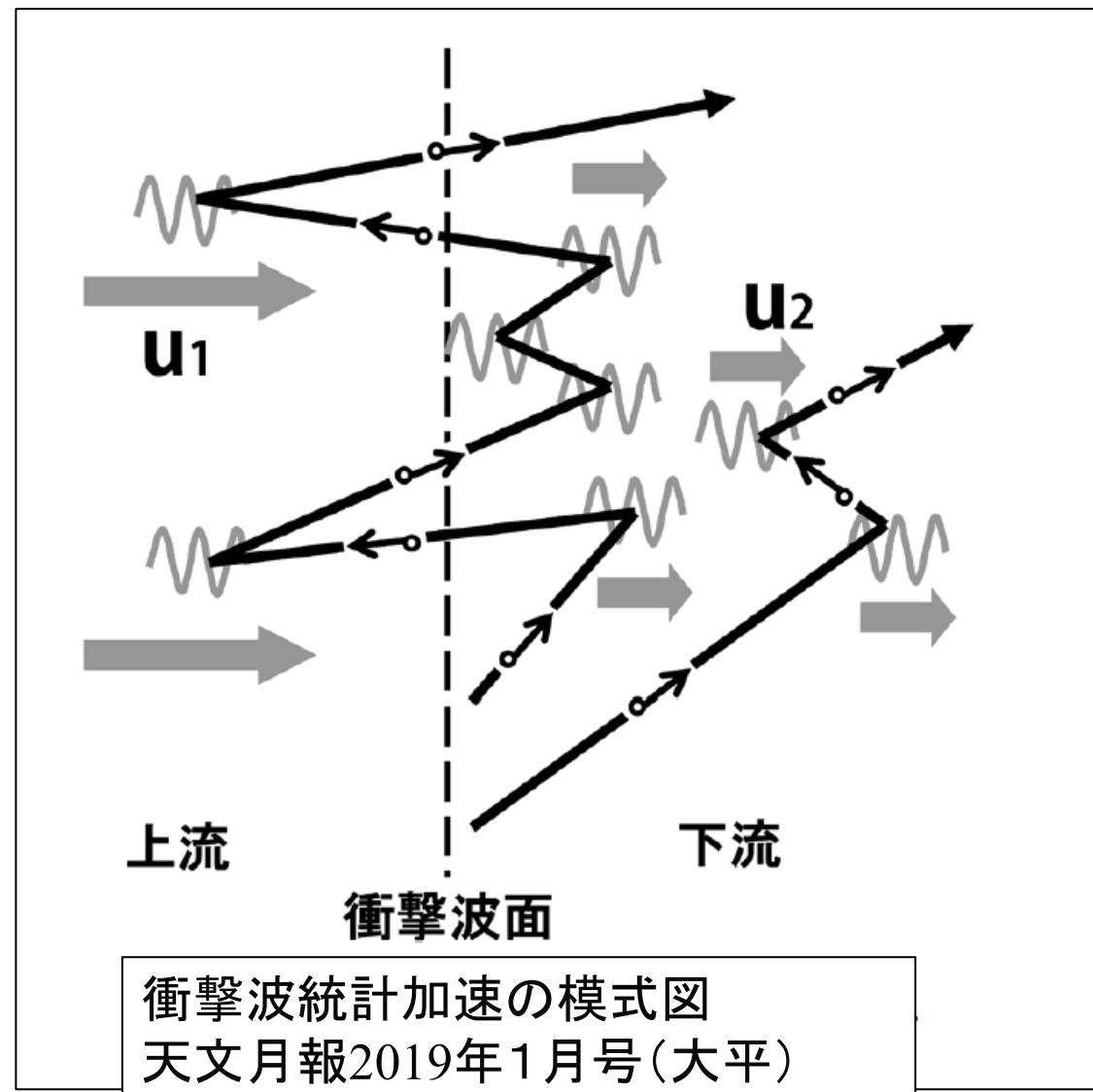
- オリジナルのFermiのアイデアはランダムに運動する散乱体による多重散乱。
- 正面衝突の頻度のほうが追突よりも多くなるために粒子加速がおきる。
- 散乱体として電磁流体乱流中での各種波動との（共鳴）散乱などが考えられているが諸説ある。
- 加速効率はあまりよくない。
- エネルギースペクトルの予測は非自明。



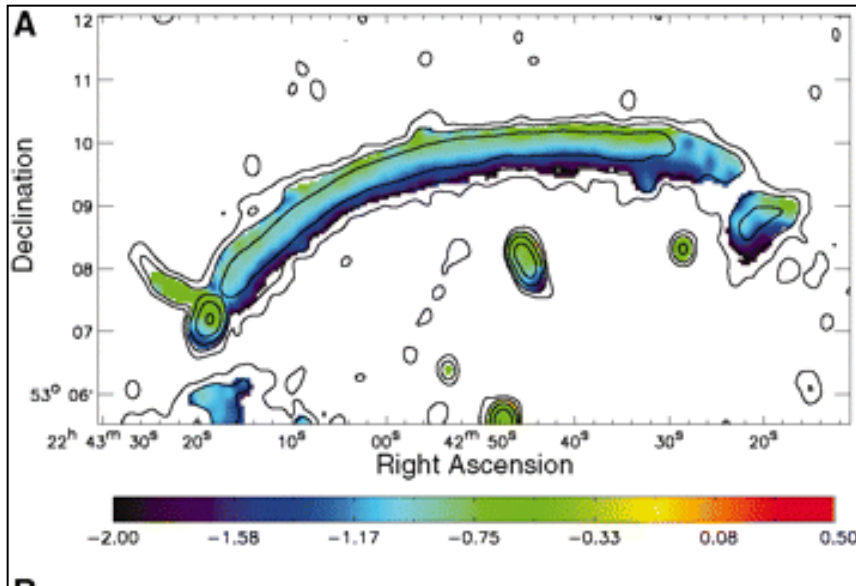
衝撃波統計加速 (Fermi一次加速)

- 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。

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



Mach Number Estimation of Shocks at Radio Relics : Two Methods



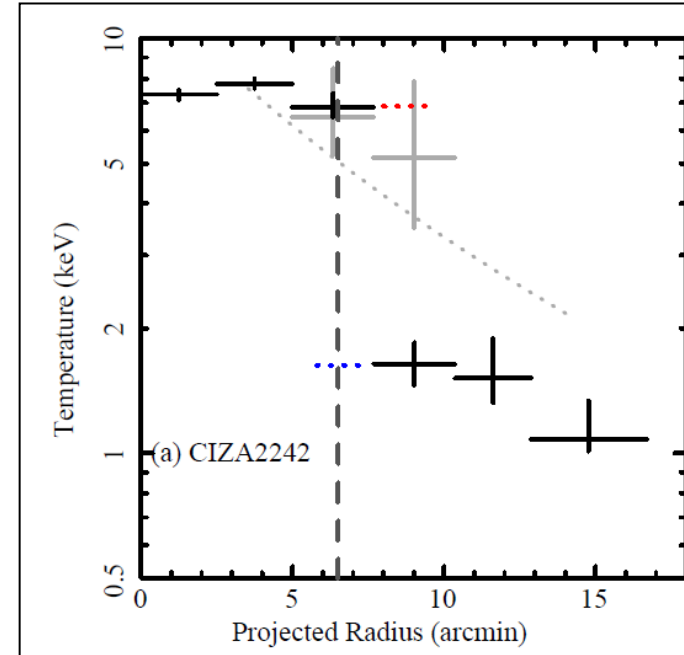
Radio Spectral index map of the relic in CIZA J2242.8+5301 (Van Weeren et al. 2010)

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

With a (simple) diffusive shock acceleration model,

---->

$$M^2 = (2\alpha + 2) / (2\alpha - 2)$$



Temperature Profile across the relic in CIZA J2242.8+5301 (Akamatsu & Kawahara 2013)

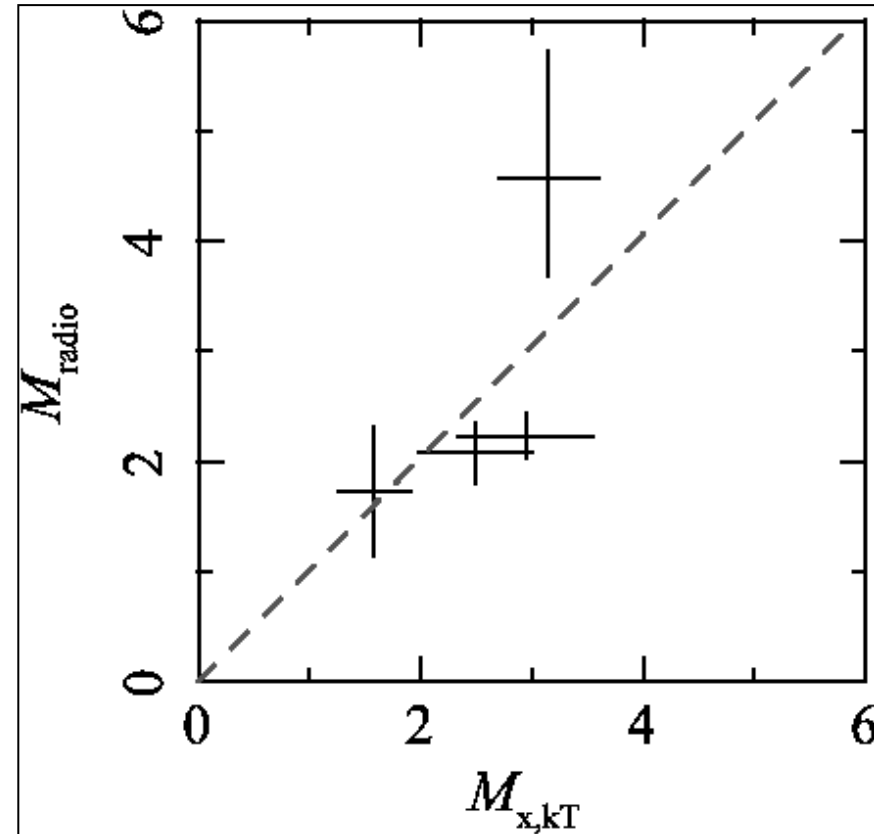
With the RH relation

---->

$$T_{\text{post}}/T_{\text{pre}} = (5M^4 + 14M^2 - 3) / (16M^2)$$

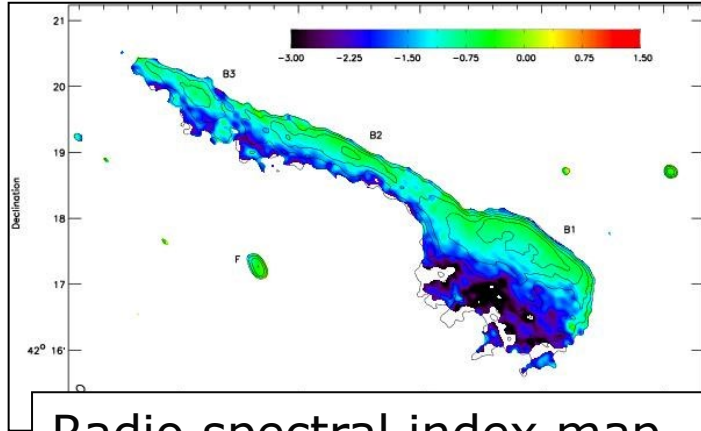
Radio Relics: Mach Number consistency???

- Akamatsu & Kawahara (2013) suggests that M_X and M_{radio} seem to be consistent with each other.
- A simple model of diffusive shock acceleration is correct?
- However, sample size is obviously too small to say something definite.

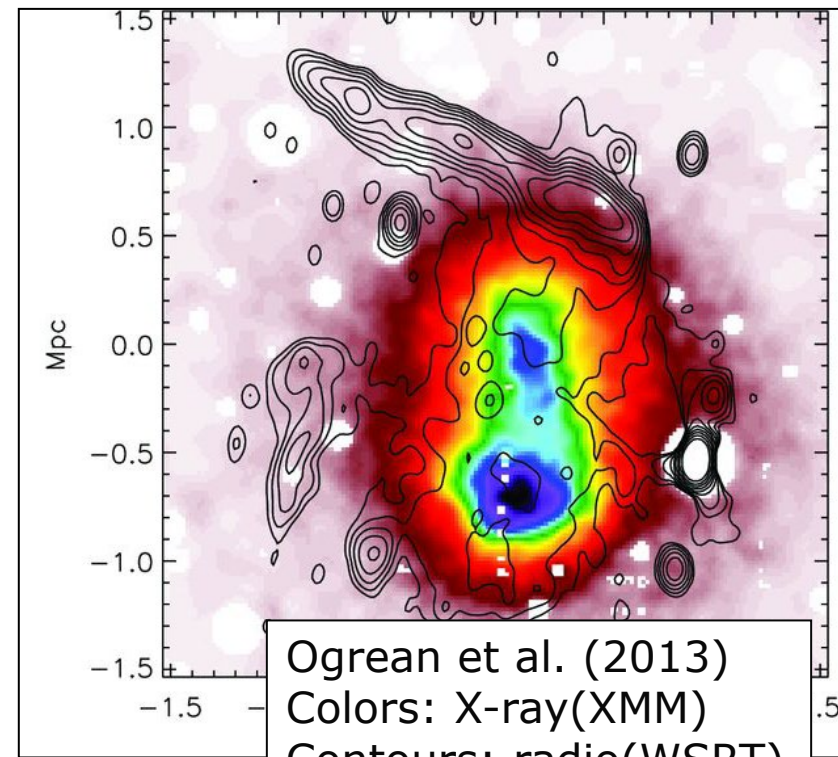


$M_{X,kT}$ vs M_{radio}
Akamatsu&Kawahara (2013)

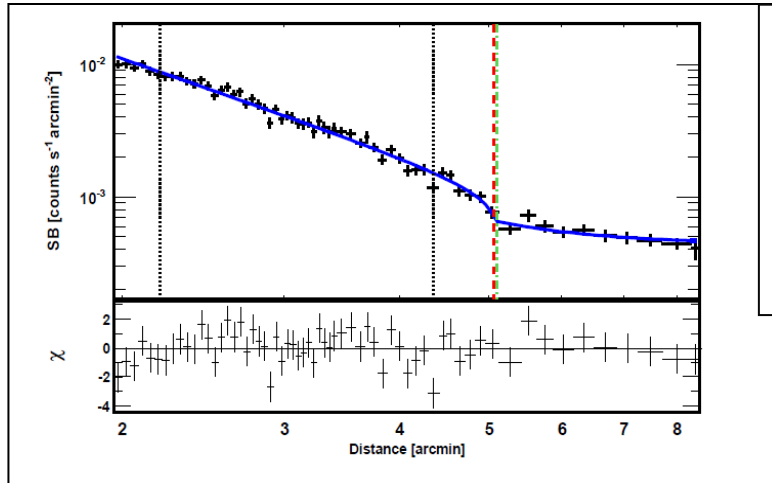
1RXS J0603.3+4214 with “toothbrush-relic”



Radio spectral index map
(van Weeren et al. 2012)
 $\alpha_{inj}=0.6-0.7 \rightarrow M_{radio}=3.3-4.6$



Ogrea et al. (2013)
Colors: X-ray(XMM)
Contours: radio(WSRT)



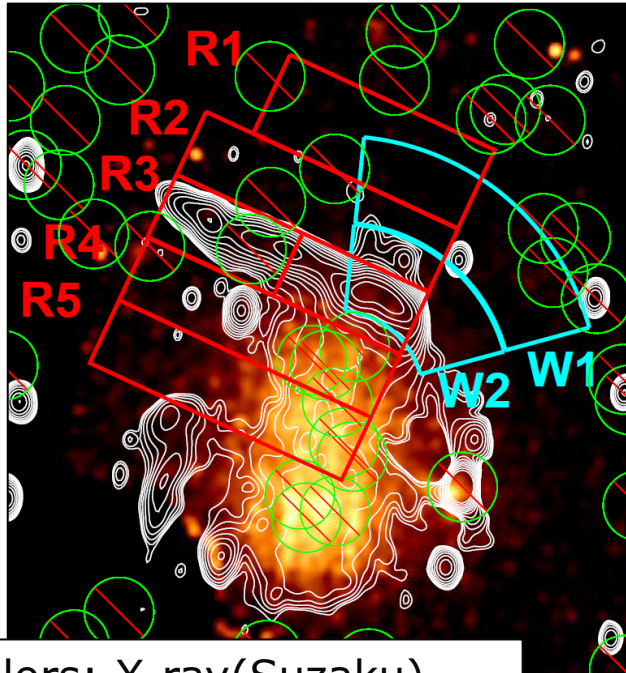
X-ray surface brightness profile across
the relic (Ogrea et al. 2013)

$$M_X = 1.7^{+0.41}_{-0.42}$$

Shock is shifted outward from the relic
outer edge????

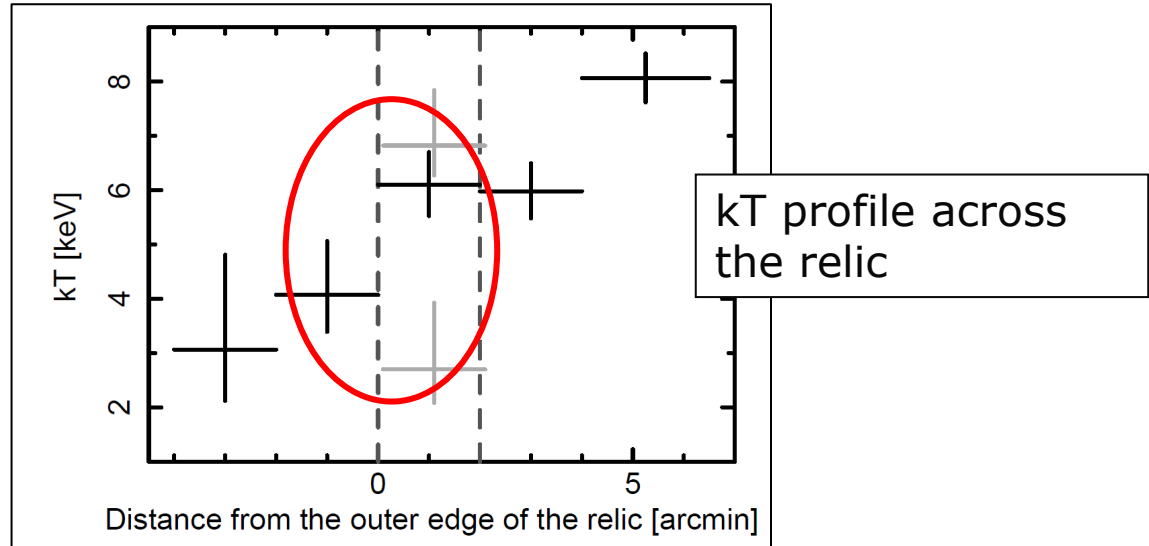
$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{4M_X^2}{M_X^2 + 3}$$

toothbrush-relic: temperature profile across the relic (Itahana et al. 2015)



Colors: X-ray(Suzaku)
Contours: radio(WSRT)

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{5M_X^4 + 14M_X^2 - 3}{16M_X^2}$$

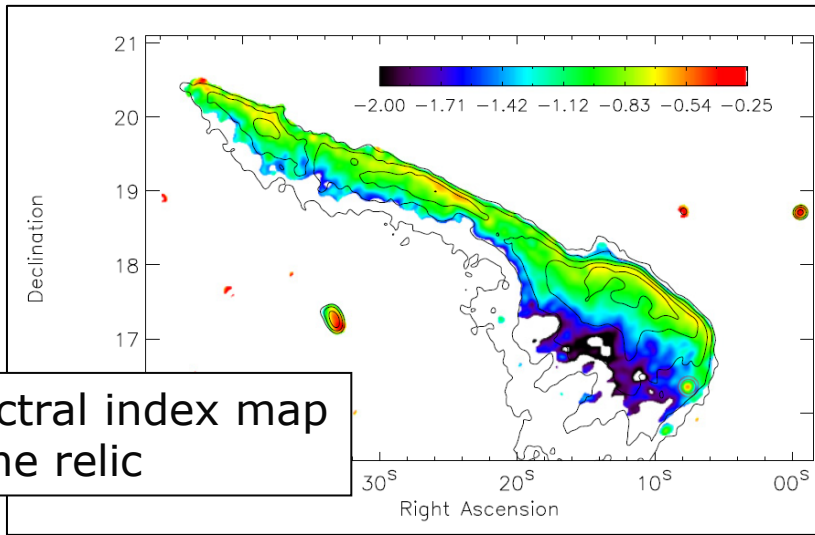


kT profile across the relic

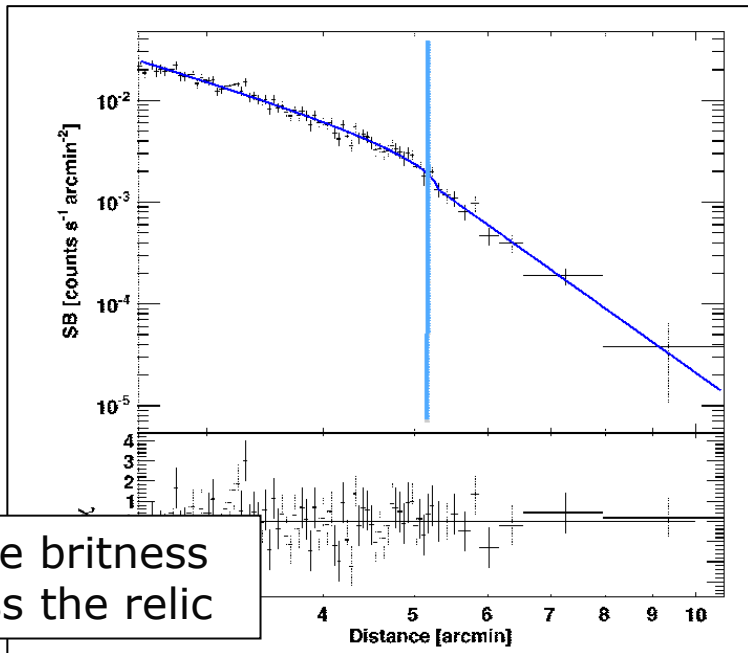
- Obtained Mach number

$$1.50^{+0.37+0.25+0.14}_{-0.27-0.24-0.15}$$
- Similar to the XMM results(Ogreaan et al. 2013, surface brightness analysis), but more robust for uncertanities of line-of-sight structures.
- Inconsistent with radio results.

After our work,,, (van Weeren et al. 2016)



Spectral index map of the relic



X-ray surface brightness profile across the relic

- New radio data (LOFAR+VLA) show steeper spectra.

$$\alpha = -0.8 \pm 0.1$$

$$\mathcal{M} = 2.8^{+0.5}_{-0.3},$$

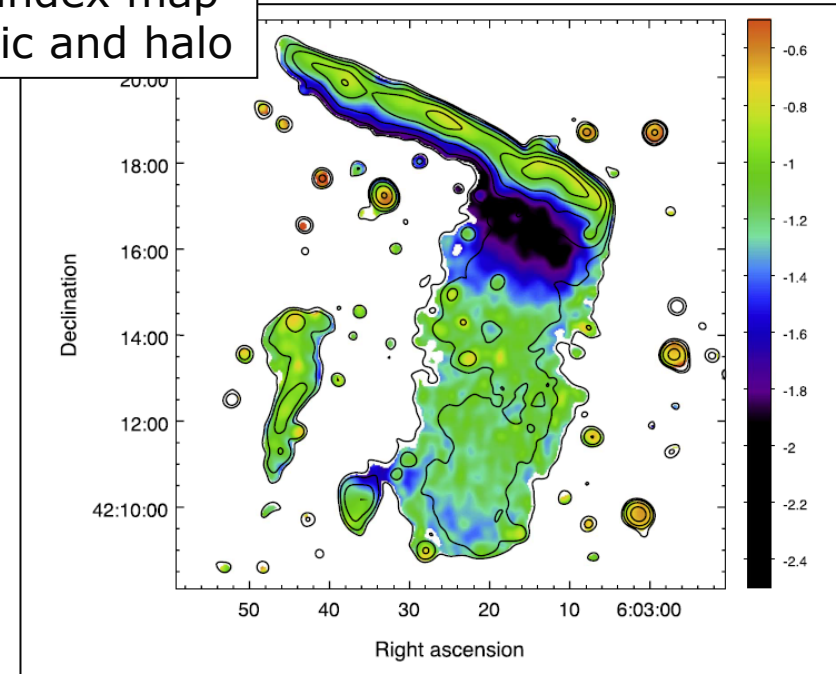
- Chandra X-ray data indicate shock is just at the outer edge of the relic, maybe XMM result is incorrect.

$$\mathcal{M} \approx 1.2, \text{ with an upper limit of } \mathcal{M} \approx 1.5$$

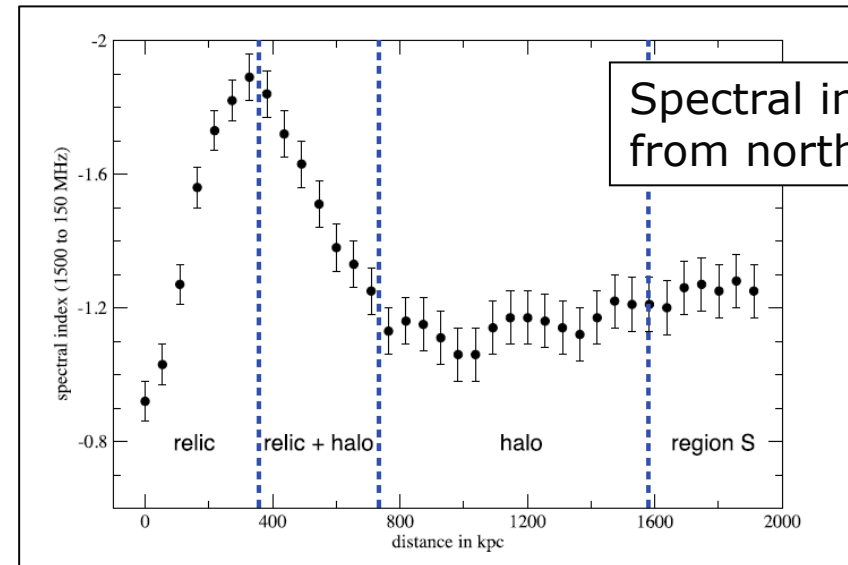
さらにその後 (Rajpurohit et al. 2018)

- VLAでさらに追観測(1-2GHz)。
- レリックからハローにかけての詳細なイメージ&スペクトル
- レリックのスペクトルは若干フラットに
 $-0.70 \leq \alpha \leq -0.80$, $M = 3.78^{+0.3}_{-0.2}$
- ハローでは巾はほぼ一定
 $\alpha = -1.16^{+0.5}_{-0.5}$
- レリックの背後でsteepになったあと、
連結領域で再びフラットになって
ハローにつながる。
- 衝撃波加速
→ 逆コンプトン+シンクロトロン冷却
→ 乱流加速??

Spectral index map
of the relic and halo

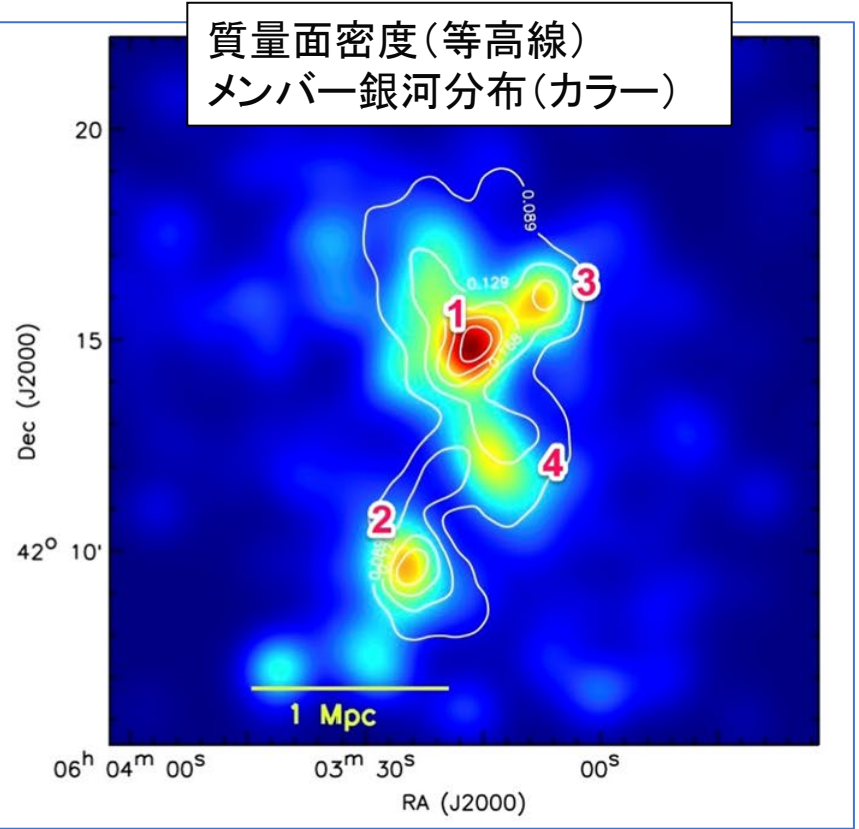
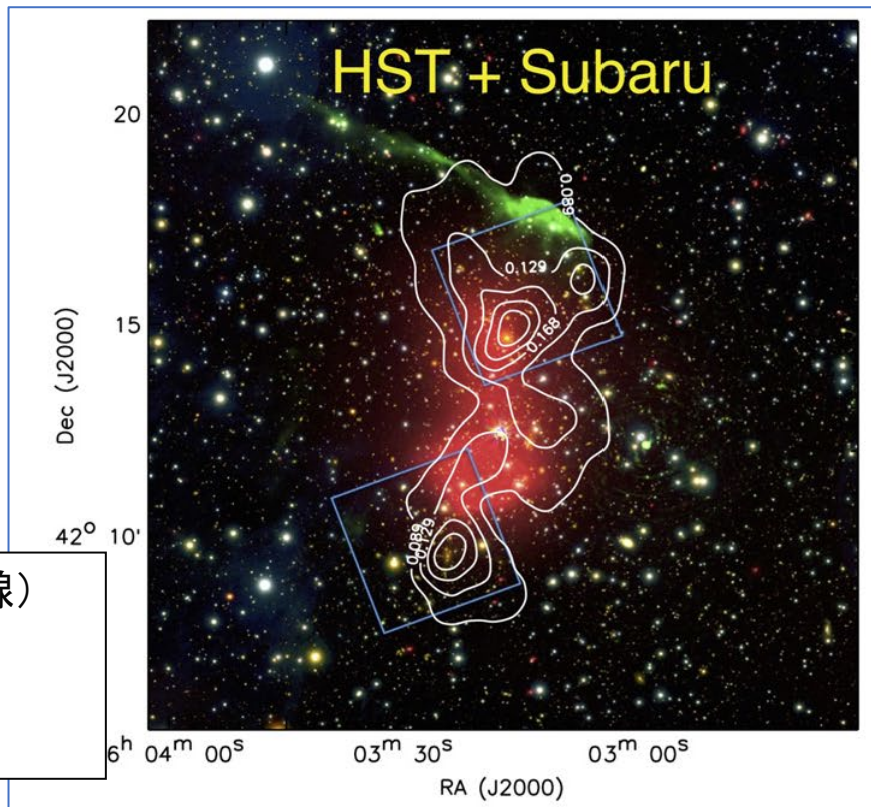


Spectral index profile
from north to south



質量分布など Jee et al.(2016)

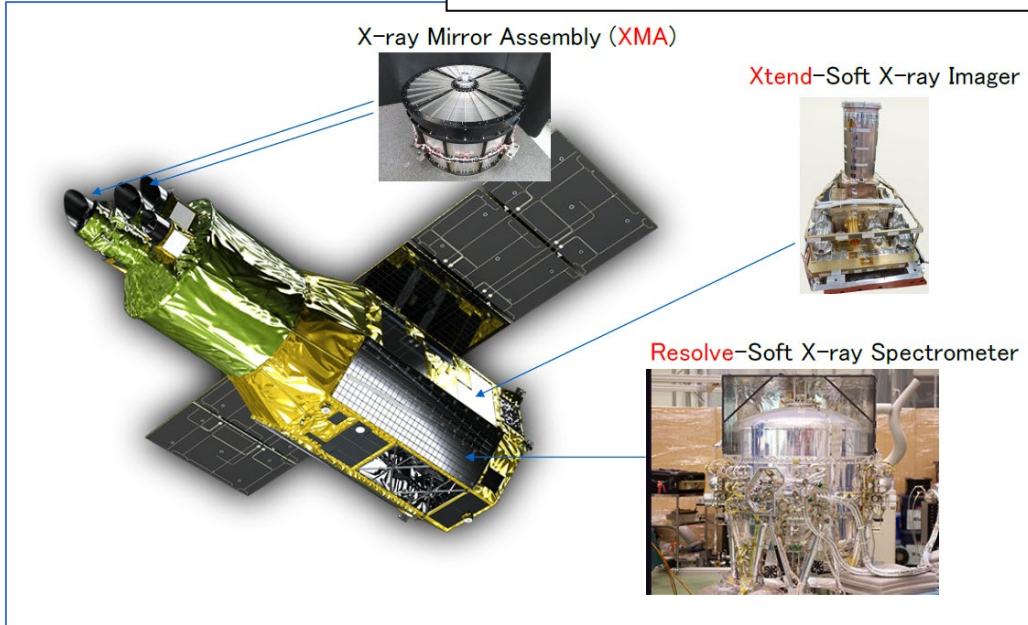
質量面密度(等高線)
X線(赤)
電波(緑)
可視(カラー)



- HST (高空間分解能) と Subaru (広視野) のデータを使って弱重力レンズ解析。
- 南北のメインの質量ピーク (質量比3:1) + 小規模なピーク 2つ。
- 南の質量ピークはX線ピークより南にずれている。
- 質量分布と銀河の分布はよく一致。

XRISM

XRISM Quick Reference より



- 高エネルギー分解能X線観測を主目的とした日米共同開発の衛星
- 2023年9月7日打ち上げ、同年10月first light
- ゲートバルブが開かない不具合が発生 (Resolveの2keV以下はほぼアウト)
- 現在PV観測中。GO1の公募が4月に締め切られて選考中。

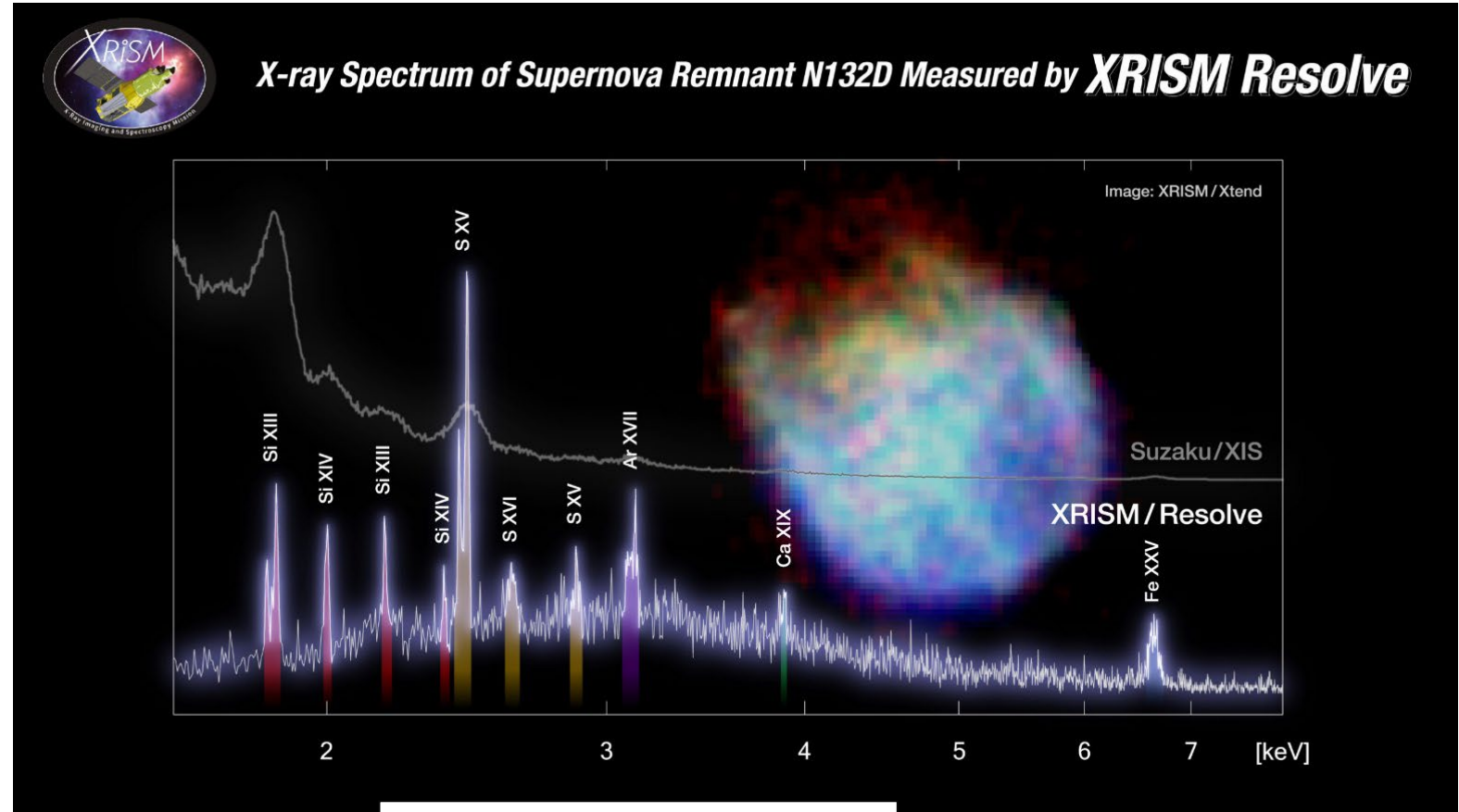
Table 1 Key parameters and performance requirement of the XRISM observatory (Tashiro et al. 2018)

Parameters	Resolve	Xtend
X-ray mirrors	Conically approximated Wolter I optics (203 nested)	
Focal length	5.6 m	
Angular resolution	≤ 1.7 arcmin (HPD ^{*1})	
Detector technology	X-ray micro-calorimeter	X-ray CCD
Effective area	≥ 210 cm ² @ 6keV, ≥ 160 cm ² @ 1keV	≥ 300 cm ² @ 6 keV
Field of View	$\geq 2.9 \times 2.9$ arcmin ²	$\geq 30 \times 30$ arcmin ²
Energy range	0.3 – 12 keV	0.4 – 12 keV
Absolute energy scale	≤ 2 eV	-
Energy resolution	≤ 7 eV FWHM @ 6keV	≤ 250 eV @ 6keV (EOL)
Non X-ray background	$\leq 2 \times 10^{-3}$ c/s/keV/array	$\leq 1 \times 10^{-6}$ c/s/keV/arcmin ² (in 5–10 keV)
Time tagging accuracy	≤ 1 ms	-

*1 Half Power Diameter

CCDとの比較

- 超新星残骸N132Dのスペクトル。
- 白色で示したスペクトルはResolveで取得されたもの。
- 灰色で示したスペクトルはSuzaku(CCD)で取得されたもの (Bamba et al., 2018)。
- 背景の画像はXtendによるX線イメージ。



XRISMホームページより

まとめ

- 銀河団にはひろがった非熱的電波放射領域（radio halo, radio relic, radio mini halo）を持つものがある。
- Radio haloとmini haloについては乱流加速が、radio relicについては衝撃波加速が有望な粒子加速過程として考えられている。
- 銀河団1RXS J0603.3+4214は特異な形状をした”toothbrush”電波レリックと電波ハローを持つ。
- “toothbrush”電波レリックでは電波とX線から決めた衝撃波のマッハ数が一致しない問題がある。
- “toothbrush”電波レリックから電波ハローにかけての電波の巾指数分布から、衝撃波で加速された粒子が冷却した後に乱流で再加速されていることが示唆される。
- XRISM GO1に乱流の測定を主目的とした1RXS J0603.3+4214の観測を提案中。