

# 銀河団に付随する電波放射 電波レリックの起源解明を目指して



赤松 弘規

〈SRON Netherlands Institute for Space Research Sorbonnelaan 2, 3584 CA Utrecht, the Netherlands〉

e-mail: h.akamatsu@sron.nl

電波レリックとは、銀河団外縁部に存在する円弧状に広がった淡い電波放射のことである。その形状から構造形成に伴う銀河団同士の衝突、大規模構造からの物質降着により発生した衝撃波によって形成された、と考えられてきた。しかしながら、電波レリックは典型的に外縁部に位置し、銀河団プラズマの個数密度が極めて低いことから観測が困難であり、その起源は長い間謎のままであった。このような状況の中、筆者らは日本のX線天文衛星「すざく」が誇る安定した低い検出器バックグラウンドに着目し、電波レリック周辺の銀河団プラズマの特性を詳細に評価することで、その起源に迫った。「すざく」の観測から、電波レリックを挟み、銀河団プラズマの温度、表面輝度が有意に低下することを多くの電波レリックで確認した。これは衝撃波の存在を意味し、上に述べた形成シナリオを強く支持する観測的成果である。さらにX線、電波観測データをもとに、衝撃波加速機構に関わる問題点を明らかにした。これらの問題点を解くために、現在、理論、電波観測を巻き込み、活発な議論が行われている。加えて近年の電波観測技術の進展（特に低周波帯域）は目まぐるしいものがあり、電波レリックに対する研究は新たな段階を迎えようとしている。

## 1. 衝突合体して成長する銀河団

銀河団は数十から数千もの銀河の集合体であり、宇宙で最も巨大な天体の一つと位置づけられている。大規模構造形成理論に基づくと、宇宙初期に存在した密度揺らぎが自己重力により周辺物質を引き寄せ、より大きな構造へと成長していく。そのため、銀河団は衝突合体、降着を通じ成長し、ピリアル半径まで熱化が進むと考えられている。ここで銀河団の深い重力ポテンシャルに捕われた物質（バリオン）は、数千万度まで加熱された高温プラズマとして存在する。このような高温プラズマは熱的なX線を強く放射するため、銀河団の研究においてはX線による観測が有効である。

（小規模の銀河群、銀河団との）衝突現象は、

$10^{64}$  ergもの重力エネルギーを解放するため、銀河団の成長、そのエネルギー収支を理解するうえで無視することのできない過程である。解放されたエネルギーは、衝撃波、乱流などを通じ、熱的エネルギー、非熱的エネルギーに分配される。

### 1.1 銀河団外縁部：銀河団研究のフロンティア

銀河団の年齢は宇宙年齢に匹敵するため、ピリアル半径付近（以後、銀河団外縁部と呼ぶ）は、より小さいサブハローとの衝突現象の痕跡、大規模構造からの継続的な降着流といった、その成長過程の情報を保持していると考えられる。銀河団がどのように進化してきたのかを理解するうえで重要な領域である。しかしながら、銀河団の外縁部領域ではプラズマの密度が $10^{-5} \text{ cm}^{-3}$ 個に達するほど希薄であるため、X線表面輝度が中心部の $1/10^4$ 以下まで落ち込む（そもそも中心部において

も、平均密度 $\sim 10^{-2} \text{ cm}^{-3}$ 程度である). そのため、銀河系由来の軟X線放射、観測装置のバックグラウンドが問題となる. 特に、従来のX線衛星では、検出器バックグラウンドの再現性の問題からピリアル半径の半分程度までの観測にとどまり<sup>2)-4)</sup>、外縁部で銀河団プラズマがどのような状態で存在しているか、ということは明らかにされていなかった. つまり、銀河団外縁部はその進化過程を理解するうえで重要な観測対象であるにもかかわらず、十分な観測が行われていない銀河団研究のフロンティア領域であるといえる. 余談であるが、近年、

「すぎく」による成果からその重要性が再認識され、欧米のX線天文台Chandra, XMM-Newtonでも銀河団外縁部への挑戦的な観測が行われ始めている<sup>5)</sup>.

### 1.2 銀河団外縁部に存在する電波レリック

ここで少し話を変え、銀河団に付随する電波放射に関して述べる. 銀河団にはさまざまな電波放射が存在している. 表1に大まかな区分を示した. ここでは、研究対象である電波レリック (radio relic) と呼ばれる、銀河団外縁部に存在する円弧状の電波放射に関して話を絞る. 典型的な例として、衝突銀河団Abell 3667に存在する電波放射を図1に示す. このような電波放射を引き起こす相対論的電子の寿命は短いため、銀河団中心部のAGN、電波銀河から伝播すると考えるのは難しい. 電波レリックの位置におけるその場での加速機構が必要である. 電波レリックの成因として、その形状と特性から、以下のようなプロセスで進

表1 銀河団に存在する電波放射の(大まかな)区分<sup>1)</sup>.

種類	形状	位置	偏光度	代表例
ハロー	球状	中心部	数%	Coma
ミニハロー	球状	中心部	数%	Perseus
フェニックス	円弧状	外縁部	$\sim 10\text{-}30\%$	Abell 85
AGNレリック	円弧状	母銀河周辺	$\sim 20\%$	Abell 133
レリック	円弧状	外縁部	$\sim 30\text{-}50\%$	Abell 3667

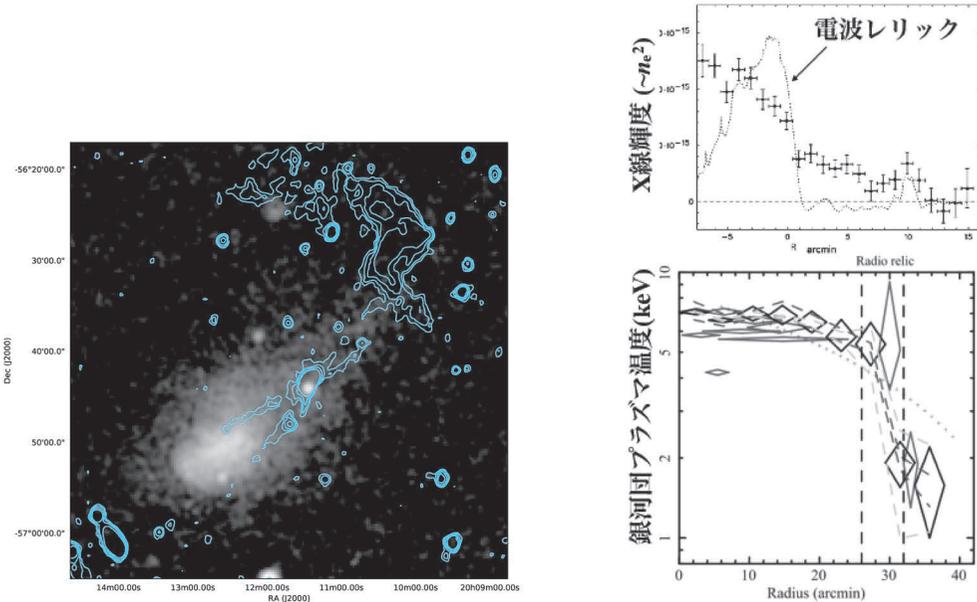


図1 左: 衝突銀河団Abell 3667のROSAT衛星によるX線イメージにMolonglo Observatory Synthesis Telescopeによる843 MHzの電波放射を等高線(シアン)で示したもの. X線で明るい中心部から離れた位置に電波レリックが存在している. 右上: XMM-NewtonによるX線表面輝度分布<sup>13)</sup>. 十字, 点線がX線, 電波を示している. 横軸は、電波レリックの端で規格化されている. 右下:「すぎく」による銀河団プラズマの温度分布<sup>13)</sup>. 縦点線が電波レリックの幅を示す.

む形成シナリオがもっともらしい、と考えられていた。

—銀河団衝突や大規模構造からの降着による衝撃波の形成

—衝撃波により銀河団プラズマが相対論的エネルギーまで加速（衝撃波統計加速機構）

—相対論的電子が銀河団磁場に巻きつき、シンクロトロン放射を起し電波帯域で輝く

このシナリオを検証するうえで、電波放射に対応する衝撃波の同定が必須である。電波観測情報のみでは、そもそも電波放射が銀河団に対応しているのか、というところから疑問が生じる。衝撃波による加速で電波レリックスが形成されているとすると、電波レリックスの端に衝撃波が位置するはずである。つまり、電波レリックス周辺の銀河団プラズマの特性を評価し、衝撃波の有無を確認できれば、上記形成シナリオが支持される。しかしながら、電波レリックスは銀河団外縁部に位置し、これまでのX線衛星では観測が困難であった。そこで、われわれは、日本のX線天文衛星「すざく」の優れた利点に着目し、この問題に取り込んだ。

### 1.3 X線天文衛星「すざく」

「すざく」(ASTRO-E2)<sup>6)</sup>は、日本の5代目のX線天文衛星である。X線マイクロカロリメータ(X-Ray Spectrometer; XRS)<sup>7)</sup>、X線CCDカメラ(X-ray CCD camera; XIS)<sup>8)</sup>、そして硬X線検出器(Hard X-ray Detector; HXD)<sup>9)</sup>を保持し、0.2-600 keVまでの広エネルギー範囲を一度にカバーするという特徴をもつ。XRSについては、液体ヘリウムの消失から実観測には至らなかったものの、極低温検出器による高性能X線分光は、「すざく」に続く「ひとみ」によって達成された<sup>10)</sup>。詳しくは、一連の論文、他の記事を参照願いたい。「すざく」に戻ると、XISは地球低軌道、低エネルギー側での高い感度、継続的な、かつ精度の良い検出器特性の校正という特徴を武器として、広がった低輝度X線放射(例として、銀河団、超新星残骸)に対して大きな成果を上げてき

た。「すざく」の成し遂げた成果に関しては、天文月報で特集が組まれているので、そちらを参照いただきたい。

## 2. 電波レリックスと衝撃波

### 2.1 無衝突衝撃波

ここで銀河団プラズマは、密度が低く(典型的な電子密度 $\sim 10^{-3}-10^{-5} \text{ cm}^{-3}$ )、磁場の影響も小さいため( $B \sim \mu\text{G}$ , ベータ値 $\beta \sim 100$ )、ほぼ理想気体とみなすことができる。そのため、銀河団中で発生する衝撃波は、無衝突衝撃波といえる。観測的に電波レリックスに対応する衝撃波の同定がなされれば、衝撃波特性の評価、電波観測との組み合わせから加速、加熱機構に関しての知見を得ることができる。無衝突衝撃波は、地球近傍、太陽系内、超新星残骸、ガンマ線バースト、銀河団、そして構造形成に至るまでのすべての階層で普遍的に発生している現象である(表2)。普遍的な現象にかかわらず、具体的な発生メカニズムはいまだ解明されておらず、関連する物理過程にも未解明な部分が多く残されている。そのため、観測、理論、天体を問わず精力的な研究が続けられている。

電波レリックスに対応する衝撃波の存在の有無を明らかにすることは、銀河団の成長過程におけるエネルギー収支を理解するだけでなく、無衝突衝撃波というプラズマ物理学、宇宙物理学への波及効果が期待されている。

### 2.2 X線観測による衝撃波の同定

ここでX線観測でどのように衝撃波を同定する

表2 宇宙における無衝突衝撃波の例。

	太陽系内	超新星残骸	銀河団	構造形成*
電子密度 ( $\text{cm}^{-3}$ )	$\sim 10$	$\sim 1 \sim 10^{-3}$	$\sim 10^{-5}$	
電子温度 (K)	$\sim 10^5$	$\sim 10^7$	$10^7-10^8$	$\sim 10^6$
伝播速度 ( $\text{km s}^{-1}$ )	$\sim 300$	$\sim 4,000$	$\sim 1,500$	$\sim 3,000$
磁場強度 ( $\mu\text{G}$ )	$\sim 30$	$\sim 5$	0.1-5	0.01-0.1
ベータ値	1-5	$\sim 1$	100	100
マッハ数 ( $\mathcal{M}$ )	5-10	$\sim 100$	1.5-3	10-100

\*構造形成に関しては理論値

かについて少し触れる。すでに述べたように銀河団プラズマは、ほぼ理想気体とみなすことができる。理想気体中の衝撃波の定義は、圧力不連続面である<sup>11)</sup>。つまり銀河団プラズマの圧力分布を観測的に導き出し、電波レリク周辺で不連続面が存在することを確認すれば良いことになる。銀河団プラズマの圧力は、温度、密度から見積もることができ、それぞれの物理量はX線分光、表面輝度分布から導出することができる。ここで電波レリクが銀河団外縁部に位置し、X線表面輝度が淡く、従来のX線天文衛星では分光解析はおろか、プラズマからの信号を十分な有意度で検出することさえ難しいという問題が立ちふさがっていた。

このような状況の中で特筆すべき結果が報告された。欧州のX線天文台XMM-Newtonが、近傍に位置し衝突銀河団の代表格であるAbell 3667において、電波レリクと衝撃波の対応を確認したというのである<sup>12)</sup>。この結果はのちに筆者らのグループにより、より統計が良く、感度の高い「すざく」衛星の観測データから追確認された(図1)。

この結果を礎として、筆者らのグループは「すざく」による電波レリクの系統的な観測を開始した。「すざく」の優れた性能をもってしても、電波レリク周辺の銀河団プラズマの特性評価は困難を極めた。特に、銀河系由来のX線バックグラウンド、角度分解の制限からくる分光情報の希釈化に悩まされた。時間は掛かったものの、「すざく」による深観測データから、これまでに10を超える電波レリクで、銀河団プラズマの温度、表面輝度が有意に低下することを確認した<sup>13)-19)</sup>。これは衝撃波の存在を意味し、上に述べた電波レリクの形成シナリオを強く支持する観測的結果である。

### 2.3 衝撃波特性(マッハ数)の食い違い

このように電波レリクと対応する衝撃波が同定されたことで、電波レリクが衝撃波統計加速機構(Diffusive shock acceleration<sup>20), 21)</sup>; DSA)で

加速された電子によって輝いている、という見方が強まった。本当だろうか？

ここでDSAを仮定すると、電波スペクトルのべき指数( $\alpha$ )から衝撃波のマッハ数( $M$ )を見積もることができる。同様にX線観測からは、ランキン-ユゴニオ方程式<sup>11)</sup>を用いることで温度比からマッハ数を評価できる：X線、電波観測から求めたマッハ数は独立であるため、DSAが電波レリクを担う相対論的電子の加速機構である場合、各々の波長から求めた衝撃波の特性(マッハ数)は一致するはずである。

この作業仮説のもと、われわれはX線-電波観測によるマッハ数比較を行った。一例として、CIZA J2242.8+0818銀河団に付随する電波レリクの例を挙げる。この電波レリクは、2010年に新たに報告されたもので、これまでで最も幅が狭く、2 Mpcもの広がりを持ち、その形状から“Sausage relic”(ソーセージレリク)という愛称がついている<sup>22)</sup>(ほかにもtoothbrush: 歯ブラシなどと呼ばれるレリクもある<sup>23)</sup>)。加えて、Mpcにわたる範囲で、60%に至る一様な偏向度が確認されている。電波スペクトル指数の空間分布もDSAによる加速を考えた場合の予測とよく一致しており、強い衝撃波の存在が期待された。実際に、電波レリクの端におけるスペクトル指数は $-0.6$ と非常になだらかで、DSAに基づいて求めたマッハ数は $M_{\text{radio}} \sim 4.6$ と、実在すれば銀河団中にでもっとも強い衝撃波となる(現在までに観測的に確認された銀河団中の衝撃波で最も強度が大きいもので $M \sim 3$ である<sup>24)</sup>)。

このような衝撃波が存在するかを確認するため、著者のグループは「すざく」による深観測を申請し、採択された。バックグラウンドとなる銀河系X線放射、宇宙X線背景放射を評価するためのオフセット観測を含め、約5日間にわたる観測データを詳細に解析することで、電波レリクを含む銀河団外縁部領域の銀河団プラズマの温度分布を導出することに成功した。図2に「すざく」で得

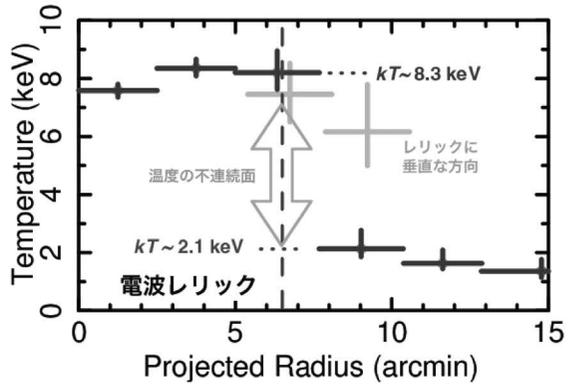
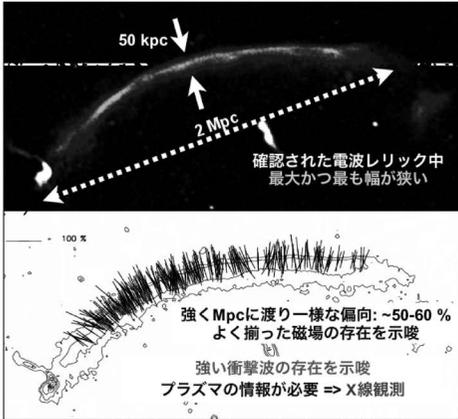


図2 左上: GMRT望遠鏡による Sausage relicの電波イメージ. Mpcにもわたり, 50 kpcの幅しかない電波放射が広がっている. 左下: VLA望遠鏡 (4.6 GHz) による電場ベクトル分布<sup>22)</sup>. 右: 「すざく」による Sausage relic 周辺の銀河団プラズマの温度分布. 縦点線が電波レリックの位置を示している<sup>16)</sup>.

た温度分布を示す. 破線で示す電波レリックを挟み, 銀河団プラズマの温度が不連続に変化していることがわかる. 電波レリックが存在しない方向の温度分布にはそのような特徴が見られないことから, この温度不連続面は電波レリックと対応していると考えるのが妥当である. この温度不連続面を用いて求めたマッハ数は $M_x \sim 3.0$ と, 銀河団中の衝撃波としては強い分類になるが, 電波観測から求めたマッハ数 $M_{radio} \sim 4.6$ とは食い違う結果を得た. このようなマッハ数の不一致は, その他の電波レリックでも確認された. ここで, この食い違いがどのような影響をもつのか考える. 電波観測から求めたマッハ数が正しいと考えると, X線観測は衝撃波上流 (下流) の温度を約2.5倍程度過剰 (過小) 評価していることになる. これは衝撃波の伝播速度 $v$ で約2倍程度, 衝撃波が伝播するエネルギー流速 ( $F_{shock} \propto v^3$ ) においては約8倍の違いに相当する. これはそのまま加熱, 加速へ用いられるエネルギーに直結するため, 銀河団衝突におけるエネルギー分配だけでなく加速効率を議論する際に問題となる<sup>25)</sup>. 加えて, X線で確認したような衝撃波の強度では, 観測された電波輝度を説明するほどの相対論的電子を作り出すこ

とが困難: 加速効率の不足. という問題点も明らかになった<sup>26), 27)</sup>.

#### 2.4 観測?, 理論?

このような問題点を解決するために, X線, 電波, 理論を問わず活発な研究が現在進められている. ここでいくつかその例を紹介するが, 大まかに観測にまつわる不定性と理論的な解の2種類に分類することができる.

—X線観測にまつわる不定性<sup>28)</sup>

- 角度分解能の制限からくる温度の平均化: 正しい加熱領域の温度を測定していない
  - イオン-電子二温度構造: 現状では電子温度のみ測定可能なため, プラズマ温度を過小評価
- 電波観測にまつわる不定性
- インジェクション時のスペクトル指数の見積もり間違い
  - 電波スペクトラル指数を導出する際の beam (角度分解能に相当) の取り扱いの問題

—理論的な解

- 投影効果: X線, 電波で効き方が異なる<sup>29), 30)</sup>
- 銀河団プラズマ, 衝撃波構造の非一様性を起因とする加速効率の非線形性<sup>31)</sup>
- すでに加速を受けている電子の再加速<sup>32), 33)</sup>

- ・ショックドリフト加速<sup>34), 35)</sup>
- ・DSA以外の加速機構 (例: 乱流加速)<sup>35), 36)</sup>

ここでそれぞれ代表的な可能性を簡単に説明する。

**イオン-電子二温度構造:** 銀河団プラズマ中の運動量は、主にプラズマを構成するイオンによって運搬されるため、イオンが選択的に加熱される。その後、一定の時間を要しながら、何らかのエネルギー散逸過程を経て熱平衡状態に緩和していく。この熱的緩和の時間中に衝撃波は外向きに進むため、衝撃波 (ここでは電波レリック) 周辺では、イオンと電子の温度が異なる温度をしている状態が予想される (イオン-電子二温度構造)。衝撃波直後の加熱されたプラズマの真の温度を評価するには、イオン温度を測定する必要がある。イオン温度は、イオンの運動で定義される温度である。運動しているイオンの放つ輝線は、その運動によるドップラーシフトから輝線幅が広がるため、その幅を測定することでイオン温度を評価することが可能である。しかしながら、例えば、1億度の高温プラズマ中の鉄イオンの熱的速度幅は~km/sと小さいため、現状のX線分光器でのイオン温度の測定は困難である。そのため、加熱されたプラズマの特性を見誤っている可能性が棄却

できない。この可能性は、~2028年打ち上げ予定の欧州のX線天文台 Athena 衛星によって検証されるであろう。

**インジェクション時のスペクトル指数の見積もり間違い:** 衝撃波統計加速機構 (DSA) により形成された相対論的電子は、放射冷却などを通じ直ちにエネルギーを失う (図3左)。その間にも衝撃波は銀河団外縁部へ向かって伝播していくので、電波レリック周辺はなだらか、中心部に向かって連続的にべきが急になっていく、と期待される。電波観測から衝撃波の特性を評価するためには、冷却などで変化する前 (インジェクション時) の電波スペクトルのべき指数の情報が必要である。このエネルギー損失の影響は、高周波帯域でより顕著であるため、低周波でかつ高角度分解能の電波観測が必須となる。

先述の出した Sausage relic では、レリックの端から銀河団中心部に向かって、スペクトルのべきが急さになっていくのが観測され、電子がエネルギーを失っていく現場が確認されている (図3右)。このような冷却による影響を受ける前のスペクトルが確認された電波レリックは、低周波電波観測の困難から現在までに数天体しかなく、今後の観測に期待される。

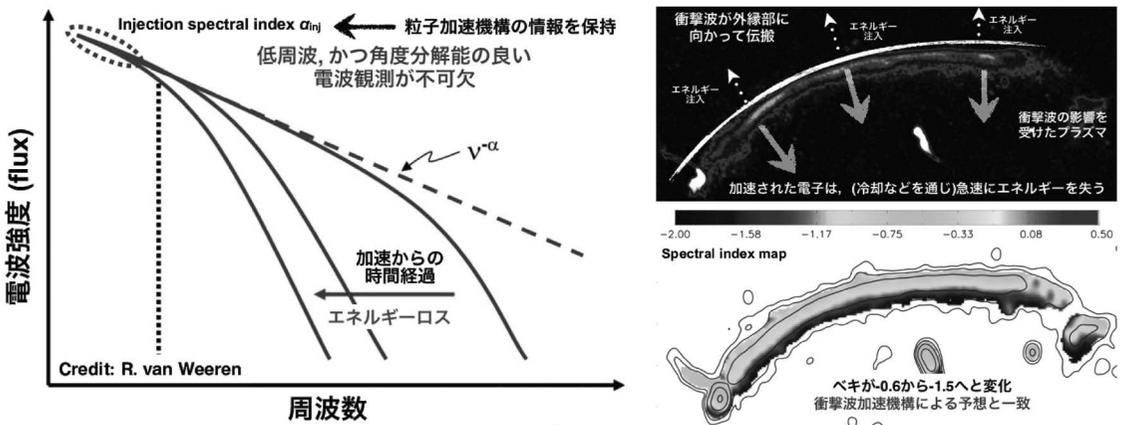


図3 左: スペクトル空間上での衝撃波加速を受けた粒子の振る舞いの模式図 (Dr. van Weeren からの提供)。右上: 電波レリックイメージ上での模式図。右下: 観測された電波スペクトルのべき分布<sup>22)</sup>。

すでに加速を受けている電子の再加速：銀河団周辺部にはいくつものAGN，電波銀河が放出した相対論的電子が完全には冷えきらずに存在し，それらの準相対論的電子が衝撃波などによって再加速される，という考え方である．この機構の利点は，衝撃波統計加速と同程度の粒子加速効率を考えた場合でも，容易に観測された相対論的電子の総量を作り出すことができ，前述の加速効率問題を避けることができる，という点である．銀河団中の電子の衝撃波による再加速に関しては，次の節で述べるように，2017年に観測的に確認された．

### 2.5 近年の進展

**新しい低周波電波天文台の稼働：**オランダにある低周波電波天文台LOW Frequency Array (LOFAR)は，低周波帯域でこれまでにない角度分解能と感度を誇る電波天文台であり，銀河団の加速機構に関しても大きなインパクトをもつと期待されていた．しかしながら，銀河団に付随するような比較的淡い電波放射を評価するためには，地球電離層の揺らぎの影響を十分に取り除く必要があり，これに時間を要した．長年のLOFARチームの努力から，校正方法が確立され，2014年辺りからLOFARによる銀河団観測結果が報告され始めた．現在，北半球のサーベイが行われており，数年のうちに低周波電波観測データの公開が予定されている（ある領域はすでに公開されている<sup>38)</sup>）．

**銀河団中の電子再加速の現場：**Nature astronomy 初刊の表紙を飾ったのでご存じの方もいるかと思うが，銀河団中における電子の再加速の現場が観測的に確認された．これは先に述べた銀河団中の加速効率問題の解になりえ，画期的な発見である．しかしながら，1) 再加速されている範囲が小さいこと，2) 例えば，Sausage relicのようなMpcものrelicを説明するには，一様な電子が分布している必要があること，3) 再加速機構の詳細がまだまだ不明，といった問題点が存在する．先に述べたように，LOFARによるサーベイから同

様の天体が多く見つかるかと予測されている．今後，上記の問題点に関しても理解が進むと期待されている．

### 3. まとめと展望

「すぎく」による電波レリックの研究は，X線観測による衝撃波の同定とともに，電波レリックとよばれる電波放射が銀河団衝突による衝撃波によって加速された電子によって形成された，というシナリオを強く支持する観測的結果を示した．長年の謎であったレリックと衝撃波の対応関係を明らかにするだけでなく，X線観測から得たマッハ数と電波観測から求めたマッハ数が一致しない，という加速機構に関して新たな問題点も露わにした．今後，電波レリックの研究は，どのような発展を見せるだろうか．一つは，現在オランダで観測が進む低周波電波天文台LOFAR, 2020年代初頭に稼働が予定されている次世代電波天文台Square Kilometer Arrayによる新しい電波レリックのサンプル増加である．また，～2018年打ち上げ予定のSRG衛星搭載eROSITA検出器により，X線による対応天体の確認が進むと考えられる．加えて，X線代替機，そして現在筆者が読み出し技術開発の主要チームメンバーとして携わっている欧州のAthena衛星による高分解能X線分光により，銀河団プラズマに対する理解が深まり，結果として加熱，加速機構に対し，より深い知見，描像が得られると確信している．銀河団で観測されるような低マッハ数の衝撃波による粒子加速は，いまだ謎な部分が多く，また，星間現象，太陽風による加速とも関係するため，その理解は銀河団にとどまらず，関連領域にも大きなインパクトを与えうるだろう．

### 謝辞

本稿の内容は，2012–2018年に筆者らが発表した投稿論文，「すぎく」Key projectによる成果が基となっています．詳しくはそれらをご覧ください

けると幸いです。指導教官であった石崎欣尚氏をはじめ、共同研究者である河原創氏、大橋隆也氏、J. S. Kaastra氏、良き友人であり LOFAR cluster team の中心人物である R. J. van Weeren 氏ほか共同研究者の方々に深く感謝いたします。

本研究は、「すぎく」という素晴らしい衛星なくしては成り立ちませんでした。開発、運用に携わったすべての皆様に感謝いたします。加えて、本稿の執筆を助めていただいた馬場彩編集委員、遅々として進まない原稿に忍耐強く付き合っていたいただいた岡部、山田両編集委員に深く御礼申し上げます。本研究を遂行するうえで、日本学術振興会、オランダ科学研究機構からご支援いただきました。

### 参考文献

- 1) Ferrari, C., et al., 2008, SSRv, 134, 93F
- 2) Markevitch, M., et al., 1998, ApJ, 503, 77
- 3) Vikhlinin, A., et al., 2005, ApJ, 628, 655
- 4) Pratt, G. W., et al., 2007, A&A, 461, 71
- 5) The XMM Cluster Outskirts Project (X-COP): <https://arxiv.org/abs/1611.05051>
- 6) Mistuda, K., et al., 2007, PASJ, 59, S1
- 7) Kelley, R., et al., 2007, PASJ, 59, S77
- 8) Koyama, K., et al., 2007, PASJ, 59, S23
- 9) Takahashi, T., et al., 2007, PASJ, 59, S35
- 10) Hitomi collaboration, 2016, Nature, 535, 117
- 11) Landau, L. D., & Lifshitz, E. M., 1959, Fluid mechanics (Oxford: Pergamon Press)
- 12) Finoguenov, A., et al., 2010, ApJ, 715, 1143
- 13) Akamatsu, H., et al., 2012a, PASJ, 64, 49
- 14) Akamatsu, H., et al., 2012b, PASJ, 64, 67
- 15) Akamatsu, H., et al., 2013, PASJ, 65, 89
- 16) Akamatsu, H., & Kawahara, H., 2013, PASJ, 65, 16
- 17) Trasatti, M., et al., 2015, A&A, 575, A45
- 18) Akamatsu, H., et al., 2015, A&A, 582, A87
- 19) Itahana, M., et al., 2015, PASJ, 67, 113

- 20) Bell, A. R., 1987, MNRAS, 225, 615
- 21) Blandford, R., et al., 1987, Phys. Rep., 154, 1
- 22) van Weeren, R. J., et al., 2010, Science, 330, 347
- 23) van Weeren, R. J., et al., 2012, A&A, 546, A124
- 24) Markevitch, M., et al., 2002, ApJ, 567, L27
- 25) Donnert, J. M. F., et al., 2017, MNRAS, 471, 4587
- 26) Pinzke, A., et al., 2013, MNRAS, 435, 1061
- 27) Kang, H., et al., 2012, ApJ, 756, 97
- 28) Akamatsu, H., et al., 2017, A&A, 600, A100
- 29) Skillman, S. W., et al., 2013, ApJ, 765, 21
- 30) Hong, S. E., et al., 2015, ApJ, 812, 49
- 31) Hoeft, M., & Brüggén, M., 2007, MNRAS, 375, 77
- 32) Markevitch, M., 2005, ApJ, 627, 733
- 33) Kang, H., et al., 2012, ApJ, 756, 97
- 34) Guo, X., et al., 2014a, ApJ, 794, 153
- 35) Guo, X., et al., 2014b, ApJ, 797, 47
- 36) Fujita, Y., et al., 2015, ApJ, 815, 116
- 37) Fujita, Y., et al., 2016, PASJ, 68, 34
- 38) Shimwel, T., et al., 2017, A&A, 598, 104S

## Chasing the Origin of Diffuse Radio Emissions in Galaxy Clusters

Hiroki AKAMATSU

*SRON Netherlands Institute for Space Research  
Sorbonnelaan 2, 3584 CA Utrecht, the Netherlands*

Abstract: Radio relics, which are elongated diffuse radio emission located at outskirts of galaxy clusters, are believed to be formed via shock accelerations induced by cluster merging activities. Since X-ray emission at cluster outskirts are very faint, previous studies could not provide solid evidence of the presence of shock structure at radio relic locations. Together with *Suzaku*, we challenge to solve this problem. We overview the results from *Suzaku* and current status of the research topics.