

# 銀河団 CIZA 1359 と Abell 1060 における 新しい電波構造の発見



藏原 昂平

〈国立天文台水沢 VLBI 観測所 SKA1 サブプロジェクト 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉  
e-mail: k8791902@kadai.jp

銀河団からは、高温ガスから放たれる X 線や、光速に近い速さで運動する粒子（宇宙線）からの電波が検出されます。しかし、どのようにしてこれらの放射が生成されるのか、そのガスの加熱や粒子加速機構はまだ十分に理解されていません。我々は、特徴的な 2 つの銀河団の電波観測と分析を行いました。銀河団衝突の初期段階にあると思われる銀河団 CIZA J1358.9-4750（CIZA 1359）では、衝突中の 2 つの銀河団の間に初めて広がった電波放射を検出しました。この構造は弱い衝撃波によって生成された可能性があり、初期段階の合体銀河団でもマッハ数 1.7 の衝撃波で宇宙線が加速されることを示唆しています。衝突から時間が経った緩和期の銀河団 Abell 1060 においても、同様に新しい電波源を初めて検出しました。これらは、銀河団の進化や宇宙線の加速メカニズムの解明につながる結果です。ここでは私たちの研究成果を中心に、これからの電波を使った銀河団研究における期待も紹介したいと思います。

## 1. はじめに

銀河団は宇宙最大の自己重力系であり、銀河団同士が合体や成長をする過程でその莫大な重力エネルギーを乱流や熱、または粒子加速などのエネルギーに転換させていることが知られています。それゆえ、銀河団は宇宙最大の発電所・粒子加速器として機能し、その研究は銀河団や宇宙の進化と構造形成など宇宙の基本的な物理の理解に重要であると考えられています。

銀河団は大きさ数 Mpc、重さ  $10^{14-15} M_{\odot}$  の天体であり、質量の大部分はダークマターと考えられ、その重力によって多数の銀河や銀河間に存在する高温のガス（銀河団ガス）を閉じ込めた 1 つの系を成しています。これらは、銀河団に所属する銀河の分布や運動を可視光で観測することで確認されています。X 線による観測では、銀河団

ガスからの熱的放射を捉えることができ、実際に多くの銀河団が X 線の観測で見つかっています。この銀河団ガスは銀河の運動から推定されるエネルギーよりも高い温度を持っていることがわかっており、銀河団同士の合体衝突を通してその巨大な重力エネルギーの一部を変換することでガスを選択的に加熱していると考えられています。

しかし、そのエネルギー変換過程は未だよく理解されていません。銀河団の衝突では、各銀河の運動エネルギーだけでなく、銀河間に存在する銀河団ガスが重要です。銀河団同士が衝突することで、ガスが圧縮され巨大な衝撃波が形成されます。この衝撃波はガスを加熱し、数千万度以上もの温度に達する高温プラズマを生成します。また、衝撃波だけでなく、乱流も銀河団衝突によって誘発されます。この乱流が、ガスのエネルギーを広範囲に分散させたり、長時間にわたりガスを

再加熱する役割を果たすと考えられています。また、このような衝撃波や乱流はガスの加熱だけでなく、銀河団ガス中の電子や陽子などの粒子の加速にもエネルギーを使います。加速された粒子はシンクロトン放射や逆コンプトン散乱による放射を生じます。この放射は「非熱的放射」と呼ばれ、銀河団の衝突のエネルギー変換の中核に位置します。

## 2. 電波で見た銀河団

銀河団の中では、衝撃波や乱流によって光速近くまで加速された非熱的電子と周辺磁場が相互作用することでシンクロトン放射が生じ、電波帯で観測されます。これまでは、銀河団衝突の衝撃波（フェルミ1次加速）で形成された電波レリクク\*<sup>1</sup>、乱流（フェルミ2次加速）で形成された電波ハロー\*<sup>2</sup>などが報告されてきました [1]。また、銀河団中の銀河が非常に活発な場合、その銀河も宇宙線電子をたくさん持つため電波で観測することが可能であり、多くの銀河団ではそのような銀河からの電波放射も報告されています。

電波観測については、2020年代に入って新世代電波望遠鏡の活躍が顕著になってきました。これらの望遠鏡は、周波数1GHz以下の低周波を用いた観測により、これまで検出できていなかった非常に淡い電波構造の検出や、銀河団中の特徴的な細かい構造の検出などが次々報告されています。例えば銀河団 ZwCl 0634.1+4750 では、従来見つかった銀河団中心部の電波ハローに加えて、銀河団外縁部に薄く広がった電波構造（メガハロー）が見つかりました [2]。このメガハローの発見は、銀河団ガスも希薄である銀河団外縁部は中心部と異なり、乱流や磁場といった非熱的成分が構造形成に重要な役割を果たしていることを示唆しています。他にも、衝突銀河団 Abell 3376

では、銀河団ガスで作られた壁に沿って銀河から噴出したジェットが曲げられている様子が発見されました。これは、銀河団の磁場と活動銀河核ジェットが相互作用して形成された構造であると考えられており、近年発展した低周波電波望遠鏡で初めて達成できる高い感度と空間分解能が成した結果です [3]。

上述したように近年では、新世代の高感度低周波電波望遠鏡の活躍によって、これまで見つかっていなかった全く新しい研究・発見の機会が提供されています。これにより、未解決の銀河団の進化史や銀河団ガスの加熱問題について新しい視点から議論することが可能になります。そこで我々は、銀河団は衝突を繰り返す成長の中でガスをどのように加熱しているのかを調べるため、異なる衝突段階にある2つの銀河団について低周波電波観測・解析を行いました。

## 3. 衝突早期型の銀河団：CIZA 1359

CIZA J1358.9-4750 (CIZA 1359) は特徴的なX線構造を持っており、銀河団同士の衝突がまさに今始まろうとしている衝突銀河団です [4]。そのような銀河団を衝突早期型の銀河団と呼び、まさに衝撃波や乱流が形成されつつある段階と言えます。つまり、衝撃波や乱流起源の電波放射を検出できる可能性があることを示唆しており、先行研究 [5] では、早期段階の衝突の証拠を捉えようと、オーストラリアにある電波干渉計 Australia Telescope Compact Array (ATCA) の周波数1-2GHz帯でこの銀河団に付随する広がった電波放射を探索しましたが、見つかりませんでした。これは、CIZA 1359に付随する衝撃波や乱流は形成初期であると考えられるため、強度が十分に強くなく、それらをきっかけとして生成される電波構造もとても淡いことと矛盾しません。

\*<sup>1</sup> 銀河団外縁部に存在する円弧状に広がった電波放射

\*<sup>2</sup> 銀河団中心部に存在する円状に広がった電波放射

これまでに検出された電波放射は、銀河団同士の衝突が十分に進んだ衝突後期の段階の銀河団からが主であり、衝突が始まって間もない衝突早期段階の銀河団からはほとんど見つかっていませんでした。そのため、「粒子加速」のメカニズムがどのような銀河団の進化段階で、どの程度の衝撃波・乱流で機能するのかが大きな謎になっています。

### 3.1 低周波電波観測の実施とデータ解析

そこで本研究では、より淡い電波放射を検出できるようにインドの電波干渉計 upgraded Giant Metrewave Radio Telescope (uGMRT) の周波数 400 MHz 帯を使って CIZA 1359 の観測を行いました。狭帯域モードと広帯域モードと呼ばれる2つの観測モードで同時観測を行いました。後述するように、この2つのモードの観測を組み合わせることで、より高精度な画像が得られます。

この観測の特徴は、1 GHz よりも低い周波数帯を使っていることです。このような低い周波数帯では、空間分解能は悪くなりますが、観測視野が広く、より低いエネルギー帯の電子を観測することができます。低いエネルギー帯の電子は、高いエネルギー帯（高周波数帯）の電子に比べて数が多いため、より明るいシンクロトロン放射として観測されます。しかし、広い視野を持つ観測の場

合、視野内の明るい天体が視野全体の画質を低下させることに注意が必要です。これを防ぐためには、広い視野の各場所における大気や電離層の影響を細かく補正する必要があります。これは方向依存型較正と呼ばれ、その効果を図1に示しました。

我々は、当初は共同研究者が開発していた CASA ベースの解析パイプラインを使い解析していましたが、思っていた感度を達成できずその原因を探っていました。解析を進めるうちに、視野内に非常に明るい天体があり、それが感度を悪化させていることに気づきました。これを解決するためには、最新の解析手法である方向依存型較正を取り入れる必要があると判断しました。そのために、データの解析には Source Peeling and Atmospheric Modeling (SPAM[6]) と呼ばれる解析ツールを新しく使うことにしました。日本ではこのような低周波帯の解析は一般的でなく、インターネット上の情報をもとにソフトウェアのインストールと解析を進めましたが、うまくいきませんでした。そこで、SPAMの開発者にメールで連絡を取ったところ、SPAMで使う AIPS のバージョンが異なる（最新版を使用してはいけない）ことが原因で解析がうまくいかないという、とても単純な問題に長い議論を経て気づきました。そ

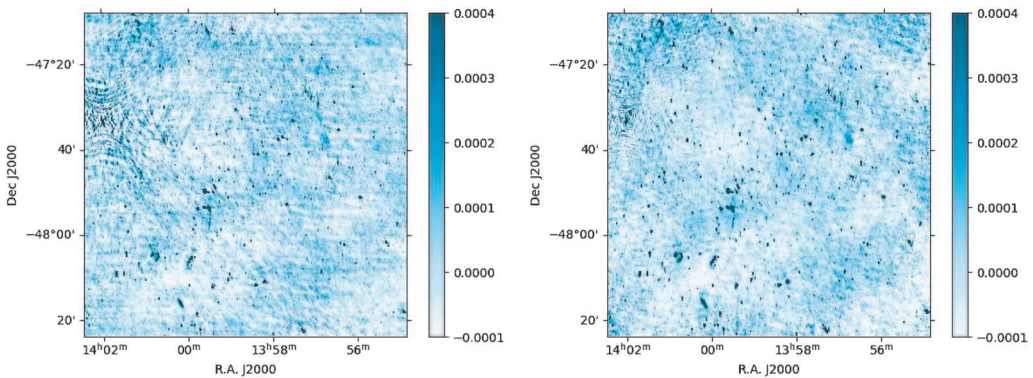


図1 同じ描画パラメータで見る方向依存型較正の前後の電波観測の比較。左は方向依存型較正前の電波画像であり、画像の左側に非常に明るい天体の周りにパターンがあることがわかる。右は方向依存型較正後の電波画像であり、左で見られたパターンが解消されていることがわかる。

して正しく SPAM で解析をすると、ついに、予想に近い感度を達成できました。

本解析は、先述した2つの観測モードのデータを利用し、2段階に分けて行いました。最初に狭帯域モードの観測データを解析し、それらの結果を使って広帯域モードの観測データをより精度よく解析します。狭帯域モードの解析では、同じ周波数帯ですでに作成されている天体カタログ TIFR GMRT Sky Survey (TGSS[7]) を用いて視野内の明るい点源リストを作成し、それをもとに背景 (sky) モデルを構築して方向依存型較正を行います。解析したデータの可視化においては、最終的に得られた FITS 画像に対して the Python Blob Detector and Source Finder (PyBDSF[8]) を適用し、観測視野における天体の新しいカタログを作成しました。この新しいカタログは、広帯域データの解析に利用されます。

広帯域データの解析にも狭帯域データと同様に、SPAM を用いた解析を行います。その際に狭帯域データで作成した新しい天体カタログを最初から使います。これによって、TGSS カタログで検出できていなかったような少し暗い天体についても、方向依存型較正を適用できるようになり、

画像の質が向上します。

### 3.2 広がった電波放射の発見

図2に uGMRT によって得られた CIZA 1359 の電波強度分布とスペクトル冪指数分布を示します。ATCA の先行研究 [5] で検出されたコンパクトな電波源はいずれも高い SN で検出されました。また、今回広がっていると考えられる天体候補が新たに 11 個検出されました。その中でも、2つの銀河団の間にある電波源は最も広がった大きな電波構造であり、これ以降はこの広がった電波源に注目します。

まず最初に、この広がった電波源が確かな電波源として検出されているのか、または、たまたまノイズの振る舞いでそのように見えているのかを確かめました。我々は電波源の広がった成分に注目したため、点状電波源を差し引き、フラックス密度を測定しました。その結果、広がった成分のフラックス密度は  $24.04 \pm 2.48$  mJy であり、誤差に対して有意に大きい値を持っていることがわかりました。また、算出した電波フラックス密度を電波パワーの単位に書き換え、銀河団によく適用される X 線光度 - 電波パワー関係と照らし合わせると、他の銀河団に付随する電波構造 (レリッ

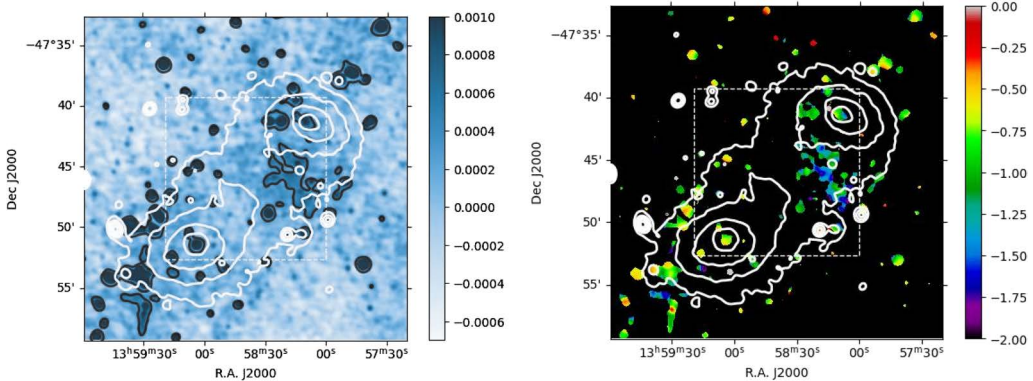


図2 (左) CIZA 1359 の広帯域 uGMRT 電波強度分布. 背景画像は、中心周波数 400 MHz、バンド幅 200 MHz の全電波強度分布を示す。分解能は  $14.''8 \times 5.''2$  であり、黒線は  $0.4 \text{ mJy beam}^{-1}$  の強度分布線を示し、25 秒角の分解能で平滑化した場合の雑音の 4 倍に相当する。白線は、すぐくの X 線表面輝度分布 [4] を、1.81, 3.64, 5.46, 7.28 の間隔で任意単位で示したものである。白破線は、図3で示す領域。(右) CIZA 1359 のスペクトル冪指数分布。白線、白破線は左図と同じである。(オンラインは右図がカラー)

クやハロー)の相関関係と大体一致することがわかりました。これらの結果から、広がった電波源はノイズ起源の構造ではなく、実際の電波天体であり、さらには、電波レリックや電波ハローのような銀河団由来の電波構造であると考えられます。

### 3.3 広がった電波源の起源は？

広がった電波源に関して、(1)位置、(2)構造、(3)電波エネルギー、(4)磁場の強さの観点からその起源を議論しました。まず、広がった電波源の位置は、X線で示される銀河団ガスの2つのサブクラスターの連結領域にあり、高温領域から示唆される北側の衝撃波位置(図3中の白線部分)[9]と一致しています。さらに、高温ガス領域の北西側(画像上で右上方向)は、CIZA 1359の高温ガス中で最もマッハ数<sup>\*3</sup>の高い( $M=1.7$ )領域であり、この領域のみから電波放射が検出されたことは、マッハ数が高いほど電子を加速しやすいという理論予測と一致する結果です。この電波源の構造は、南西-北東方向に伸びた形をしており、さらにはX線で示された衝撃波の前線によく沿っています。これは、広がった電波源が衝撃波によって形成された構造であること

を示唆しています。また、この広がった電波源の構造に注目すると、斑な強度・スペクトル冪指数分布をしていることがわかります。広がった電波源中には、7つの点源が含まれ、そのうち4つはCIZA 1359と赤方偏移の近い銀河だと同定されました。これらの状況から、銀河団内に存在する銀河による種電子の供給があったことが期待されます。

CIZA 1359に関する研究をまとめると、広がった電波源を初めて発見し、その構造は銀河団衝突によって励起した衝撃波や乱流によって、銀河から供給された種電子を再加速して作られたものである可能性を示しました。これは、CIZA 1359のような衝突早期の弱い衝撃波や乱流によっても粒子加速が可能であることを明らかにし、銀河と銀河団ガスの相互作用を再確認する重要な結果です。

## 4. 超近傍銀河団：Abell 1060

次に、1億光年あまりという比較的近い距離にあるうみへび座銀河団(Abell 1060)で見つけた電波構造についてもご紹介します。Abell 1060は可視光やX線の観測によって、過去数十億年の間

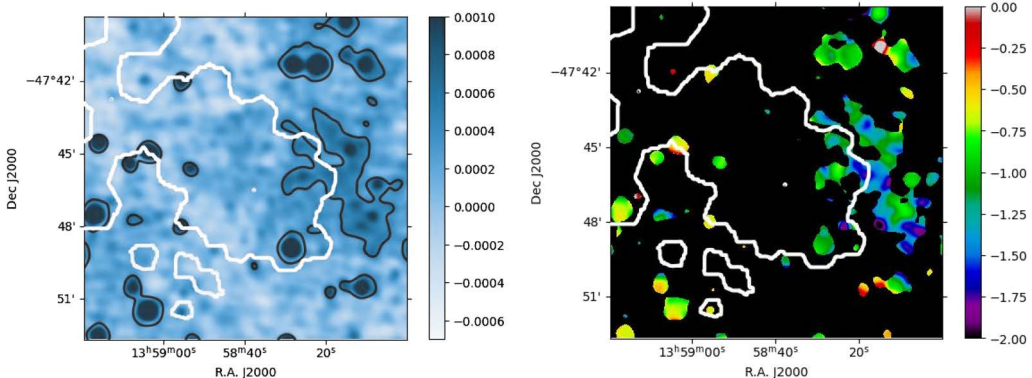


図3 広がった電波源を拡大した電波強度分布(左)とスペクトル冪指数分布(右)。黒線は図2と同じであり、白線はXMM-NewtonのX線観測[9]から推定された6 keV以上の温度を持つ高温領域を示している。(オンラインは右図がカラー)

<sup>\*3</sup> 流体の流れの速さと音速との比で定義される無次元数

に銀河団同士が衝突した痕跡が見ついているにもかかわらず、電波の観測では衝突の影響が見られないという謎がありました。

#### 4.1 低周波電波アーカイブデータの解析

我々は、電波観測から宇宙線電子や磁場の観測的証拠を掴もうと、世界中の低周波電波望遠鏡のアーカイブデータを解析しました。その結果、GMRTの2010年12月の観測データに、今まで報告されたことのない広がった電波放射が銀河団の中心付近に存在することを発見しました。この観測は、TGSSカタログに新しく見つかった電波源候補を長時間追観測したデータでしたが、結果については報告されていませんでした。我々の解析では、先述した最新の解析手法を用いることでより高い感度を達成し、今回の発見に繋がったと考えられます。

#### 4.2 未知の電波放射（オオコウモリ）の発見

図4に我々が解析したGMRTの結果と、一般に公開されているアーカイブデータGLEAM, RACSの電波画像を並べて示しています。我々はGMRTの電波画像で2つの明るい電波放射の間に、明確に輪のように淡く広がる放射を新しく発見しました。当初、この新しい天体は十分に明るかったため、特に新しいものでもないなど思っていたのですが、結果を共同研究者と共有し議論しているうち

に、これは新しい発見だ！ということに気づき盛り上がりました。その後、まずは議論をしやすいように愛称を決めようということになり、いくつか候補を考えました。当初は「鼓」や「繭」なども名前の候補にありましたが、最終的には、その形から「オオコウモリ (Flying Fox)」と名づけました。オオコウモリは、海外では「ジップライン (zip line)」というケーブルやロープに取り付けられた滑車を使って、高い地点から低い地点へ滑り降りるアトラクションのことを意味します。我々も当初はジップラインを想定していたのですが、議論が進むにつれて、有名なコウモリマークにも見えるのでは?! そちらの方がイメージが近いのでは?! と考えるようになり、最終的に動物をイメージした愛称を使うことにしました。

オオコウモリが本当に存在するのかを確認するため、より低い周波数の観測が可能な Murchison Widefield Array (MWA) のデータも調査したところ、同様の放射があることを見つけ、その存在に確信を持ちました。しかし、より周波数の高い Australian Square Kilometre Array Pathfinder (ASKAP) のデータには、同様の放射を見つかることができませんでした。このことから、オオコウモリは高い周波数で急激に暗くなる特徴をもっていることが示唆されます。明るさの周波数依存

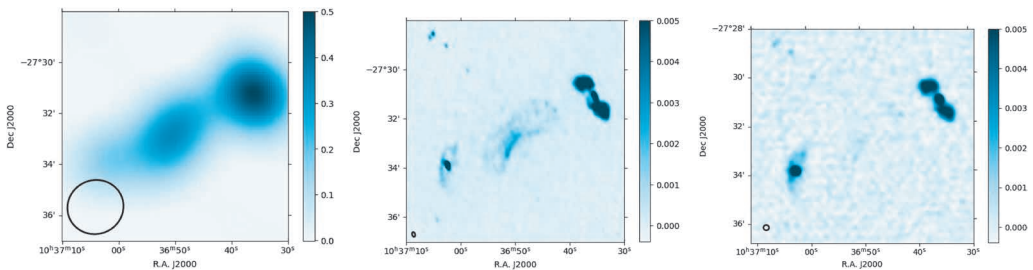


図4 (左) GLEAMデータ中のAbell 1060の電波強度分布。中心周波数は200 MHz、バンド幅60 MHzである。空間分解能は $2.2' \times 2.1'$ であり、図中左下の黒丸で示している。(中) GMRTで得られたAbell 1060の電波強度分布。背景画像は、中心周波数338 MHz、バンド幅33 MHzの全電波強度分布を示す。分解能は $13.1'' \times 7.2''$ であり、図中左下の黒丸で示している。(右) RACSデータ中のAbell 1060の電波強度分布。中心周波数は887 MHz、バンド幅は288 MHzの全電波強度分布を示す。分解能は $13.6'' \times 12.9''$ であり、図中左下の黒丸で示している。GLEAMやGMRTの画像中央部の構造がオオコウモリである。

性を確かめるため、オオコウモリを検出した2つのデータで明るさを比較しスペクトル冪指数を調査したところ、 $-1.4$ 程度と他の典型的な電波放射( $-0.8$ 程度)に比べて非常に急峻な値を持つことがわかりました(図5左)。また、このオオコウモリは不思議なことに可視光やX線観測結果での明確な対応天体がないという特徴を持っていました(図5右)。これは、オオコウモリの形成シナリオを考える上でやっかいな特徴です。

### 4.3 オオコウモリの起源は？

#### 4.3.1 銀河団を構成する銀河によって作られたのか？

オオコウモリの輪構造と中央の棒状の構造は、銀河ジェットの電波ローブに似ていると考えられるため、ここではオオコウモリ近くの銀河がオオコウモリの起源である可能性について考えてみます。

NGC 3311は輪構造の端に位置しており(図5右参照)、オオコウモリはNGC 3311からたなびいた形の電波ジェットであり、明るいバーはジェット末端に見られるホットスポットによって形成されている可能性が示唆されます。このシナリオではNGC 3311が北西方向に移動していることを示唆します。ところが、NGC 3311はAbell 1060を構成する銀河集団の視線速度分布の中心付近に位置しており、X線表面輝度の中心付近にあること

から銀河団中をほぼ動いていないと予想できます。

では近くにあるもう一つの銀河NGC 3309はどうでしょうか。銀河団ガスとNGC 3309の相対運動が銀河団衝突などの影響によって時計回りまたは反時計回りの円運動をする場合、NGC 3309は過去にオオコウモリの位置に近い場所にあったと考えることも可能です。しかし、NGC 3309のジェットや電波ローブには明確なたなびき構造がないため、NGC 3309がそのような円運動をしている可能性は低いと考えられます。

最後に、NGC 3312によって形成されたというシナリオも議論します。NGC 3312はAbell 1060の手前側に位置し、その速度構造から私たちに向かって移動していることが示唆されています。NGC 3312がすでにAbell 1060の3次元的中心付近を通過したと仮定すると、オオコウモリはこの通過時に形成された可能性があります。しかし、このシナリオの場合、密度の高い銀河団中心を通る必要があるため、その痕跡がX線観測で検出されてもよいはずですが、同じ領域にX線輝度と温度の明確な上昇はありません。さらに、そもそもNGC 3312が近地点通過前でAbell 1060の背後に位置している場合、オオコウモリはNGC 3312と関連しません。

また、一般的に近くの銀河がこのような電波構

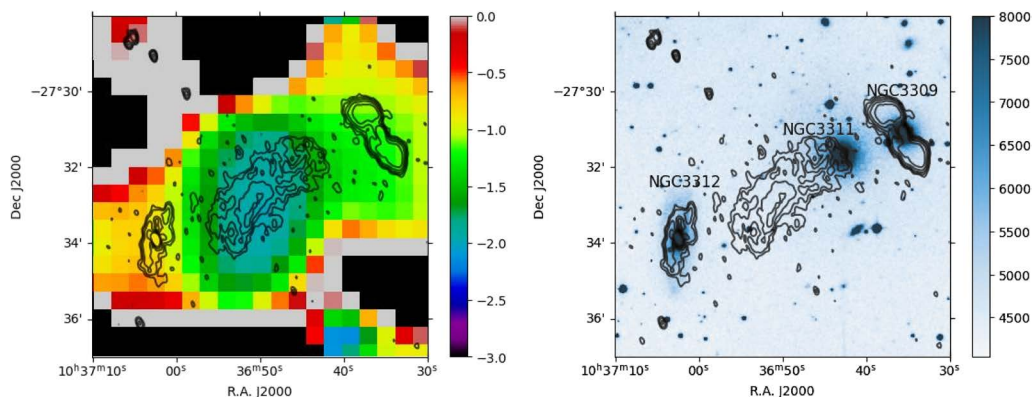


図5 (左) オオコウモリのスペクトル冪指数の分布。(右) 可視光の画像。両図とも黒線はGMRTで観測された電波強度分布を示しており、可視光画像には明るい領域に対応する銀河の名称を記載した。

造を作った場合、その銀河自体が光、赤外で観測されるはずですが、オオコウモリの中心付近に明確な銀河の対応天体は確認されていません。つまり、オオコウモリが近くに存在する銀河のジェットなどによって形成された可能性は薄いと考えられます。

#### 4.3.2 銀河団同士の衝突によってつくられたのか？

先述した通り、銀河によるオオコウモリの形成は考えにくいことから、次に銀河団由来の構造である可能性を議論します。Abell 1060のX線で観測される温度と金属量分布は、ある領域に高温・金属豊富な領域を持つことを示しています。これは銀河団同士の衝突によって加熱またはガスが混ぜられた結果であると考えられており、オオコウモリがこの高温・金属豊富な領域と一致していることから、銀河団衝突によって発生する古典的な銀河団の拡散電波放射、例えば電波ハローやレリックである可能性が考えられます。

NGC 3311の北東約500 kpcの位置には、よく知られた銀河群HCG 48が存在しています。HCG 48がかつてAbell 1060に衝突し、ガスをかき乱したのであれば、オオコウモリはその残骸である可能性があります。オオコウモリは天球面上で銀河団中心から約24 kpcしか離れておらず、電波ハローが銀河団中心に見られる特徴と一致します。しかし、オオコウモリのスペクトル冪指数は一般的な電波ハローよりも急峻な値であり、かつ、オオコウモリの細長い形状は電波ハローのものとは異なります。

電波レリックは一般的に銀河団外縁部で見られるため、銀河団中心近くにあるように見えるオオコウモリの特徴とは大きく異なります。一方で、視線方向の衝突によって電波レリックが形成される場合、オオコウモリが銀河団外縁部に位置し、合体速度が音速を超えるため衝撃波が発生するはずですが、その場合に予想されるX線での衝突の痕跡の兆候はなく、また、銀河の動きとも矛盾する点があります。さらに、Abell 1060の中心部分のガス密度が比較的均一なことから、

HCG 48はAbell 1060の中心部に大きな影響を与えていないことが示唆されます。例えばHCG 48がAbell 1060の外縁部を周回している場合、その痕跡としてオオコウモリを説明可能な場合もありますが、急峻なスペクトル冪指数などの特徴が一般的に観測される電波レリックの特徴とは異なることに注意が必要です。つまり、オオコウモリが銀河団同士の衝突起源である可能性も高くはないといえます。結果として、銀河団に従来見つけていた電波構造とは特徴が異なる新しい電波源を初めて見つけた可能性があります。

## 5. おわりに

### 5.1 新発見のまとめ

本稿では、我々が近年発見した銀河団中の新しい電波構造について紹介し、その起源を多角的に議論しました。簡単にまとめると、衝突早期型の銀河団CIZA 1359では、uGMRTによる高感度な観測と方向依存型校正によって達成した高いダイナミックレンジの電波画像から広がった電波源を発見しました。これは衝突早期の弱い衝撃波や乱流によっても銀河団ガス粒子が加速や加熱されることを示すものでした。近傍銀河団Abell 1060では、銀河団中心に低周波のみで見られるオオコウモリを発見しましたが、これまで観測されてきた銀河団に關係する電波天体には分類されないことが分かりました。これらの研究については、最新の電波／X線観測の双方向の協力によって効率的に研究が進みました。特に、銀河団の運動や力学的状態をX線観測結果から推測し、その痕跡を電波観測でさらに詳細化・定量化することで、より質の高い研究成果に結びつけられたと思っています。

### 5.2 今後の展望

研究を通して私は、銀河団研究では特にX線と電波の協力によって研究の新展開を生み出せることに気づきました。今後は、精密X線分光衛星X-Ray Imaging and Spectroscopy Mission (XRISM) と2020年代後半に本格運用が開始さ



れる次世代電波干渉計 Square Kilometer Array (SKA) の協力によって、今までに考えもしなかった事実が見られると期待しています。

XRISMは2023年に打ち上げに成功した日本のX線天文衛星であり、これまでのX線天文衛星に比べてそのスペクトル分解能が高いことが特徴です。この特徴を活かして、銀河団ガスの乱流の強さを直接測定したり、銀河団ガスの3次元的な運動をより詳細に決定したりすることが可能になります。これを用いてCIZA 1359については、衝突銀河団においてどのくらいの衝突エネルギーが衝撃波や乱流へ転換されているのかを定量的に算出し、Abell 1060についてはオオコウモリの起源を知るために銀河団ガスと銀河の相互作用をより詳細に調査したいと思います。

SKAは現状合計で16カ国が参加を表明しており、約10年前に天文月報でSKAが紹介された時[10]に比べて1.5倍以上の国数です。また、SKAの建設が2023年から始まり、初期観測が2026年から開始されることが予定されているため、この低周波電波観測の分野は今、世界的に盛り上がりを見せています。SKAは本稿で紹介したような周波数1 GHz以下の低周波帯でも観測が可能であり、その圧倒的な電波画像の感度と質によって新しい発見が期待されています。もちろん日本においても、日本SKAコンソーシアム (SKAJP) や国立天文台水沢VLBI観測所SKA1サブプロジェクト (SKAJ) が主導して、SKA参加へ向けた準備を進めています。私もその一員として、微力ながら貢献中です。皆さんも、今後SKAが開拓する多くの新発見にぜひ期待しててください。

## 謝 辞

本稿の内容は、筆者らが発表した論文に基づいています [11, 12]。また、本研究は主にJSPS科研費JP21H01135の助成を受けたものであり、他一部JP20H00157, 17H01110からの助成を受けて進められた研究です。両関連論文に共通して、

一緒に研究を進めていただいた国立天文台の赤堀卓也氏、X線解析について協力していただき、かつ多くの助言をいただいた名古屋大学 中澤知洋氏、大宮悠希氏にこの場を借りて深謝申し上げます。最後に、この記事を作成するにあたって、たくさん相談にのっていただき助言いただいた天文月報編集委員の小山翔子氏、校閲・助言いただいた同委員の志達めぐみ氏にお礼申し上げます。

## 参考文献

- [1] van Weeren, R. J., et al., 2019, *Space Sci. Rev.*, 215, 16
- [2] Cuciti, V., et al., 2022, *Nature*, 609, 911
- [3] Chibueze, J. O., et al., 2021, *Nature*, 593, 47
- [4] Kato, Y., et al., 2015, *PASJ*, 67, 71
- [5] Akahori, T., et al., 2018, *PASJ*, 70, 53
- [6] Intema, H. T., 2014, *Astronomical Society of India Conference Series*, 13, 469
- [7] Intema, H. T., et al., 2017, *A&A*, 598, A78
- [8] Mohan, N., & Rafferty, D., 2015, *PyBDSF: Python Blob Detection and Source Finder*, *Astrophysics Source Code Library*, record ascl:1502.007
- [9] Omiya, Y., et al., 2023, *PASJ*, 75, 37
- [10] 赤堀卓也, 2013, *天文月報*, 106, 539
- [11] Kurahara, K., et al., 2023, *PASJ*, 75, S138
- [12] Kurahara, K., et al., 2024, *PASJ*, 76, L8

## Discovery of Diffuse Radio Emission in CIZA 1359 & Abell 1060

Kohei KURAHARA

*National Astronomical Observatory of Japan, Mizusawa VLBI Observatory, SKA1 promotion Group, 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan*

**Abstract:** We performed radio observations and analysis of two characteristic galaxy clusters. In the early phase merging galaxy cluster CIZA 1359, we detected for the first time a diffuse radio emission between the two sub-structures. A weak shock may have produced this structure, implying that cosmic rays can be accelerated even at Mach numbers of 1.7 in early-phase merging clusters. For the relaxing galaxy cluster Abell 1060, we also detected for the first time a diffuse radio source in the central region which has an ultra-steep radio spectrum without any counterpart. In this article, we would like to share the radio properties of these two galaxy clusters and discuss the role of the non-thermal component in the structure formation of galaxy clusters.