

うみへび座銀河団にいたオオコウモリの発見で更に深まる銀河間宇宙線の謎

藏原 昂平*¹
Kurahara Kohei

赤堀 卓也*¹
Akahori Takuya

大宮 悠希*²
Omiya Yuki

中澤 知洋*²
Nakazawa Kazuhiro

大木 愛花*^{1,3}
Oki Aika

1. はじめに

銀河団は数百～数千個の銀河や高温なガスが自己重力によって数 Mpc（パーセク；1 pc=3.26 光年）の範囲に閉じ込められた宇宙最大質量の天体である。銀河団中のガスは 10^8 K ほどの高温であり、熱的制動放射が X 線で観測されている。また、銀河団からは何百 kpc にも広がったシンクロトロン放射も観測されており、銀河団中に高エネルギー宇宙線電子と磁場が存在しているという重要な証拠となっている。この高エネルギー宇宙線電子は銀河団中に存在する衝撃波によるフェルミ 1 次加速、またそれによって励起された乱流によるフェルミ 2 次加速により加速されたものと考えられている。このシンクロトロン放射は主に電波波長帯によって観測されており、乱流加速によって形成された「電波ハロー」や衝撃波加速によって形成された「電波レリック」として分類され、銀河団内の宇宙線分布や磁場を知る手がかりとなっている¹⁾。

更に、銀河団内で生成された宇宙線陽子も銀河団ガスとの非弾性衝突により、ハドロニックな過程を通じて 2 次電子を生成し、これが磁場中でシンクロトロン放射を発生させる。また、銀河団中の宇宙線電子が宇宙背景放射 (CMB) と逆コンプトン散乱を起こすことで、高エネルギーの X 線（ハードテール）が生成され、それらが銀河団内に存在すると考えられているが、それらの検出は未だ確実なものとは得られていない。

銀河団は銀河団同士が何度も衝突・合体すること

で進化すると考えられており、合体する 2 つの系の質量が同程度の場合、それはメジャーマージャーと呼ばれ、宇宙の中でも最も激しく壮大な現象の 1 つである。対して 2 つの系の質量に大きな差がある場合、それはマイナーマージャーと呼ばれ、比較的小となしい現象であるがより頻繁に起こる。このような合体现象は、銀河団内のガスの状態を変化させ、様々な元素を銀河団全体に広げるだけでなく、先述した電子や陽子を加速するための衝撃波や乱流を励起させる。先述した電波レリックは、銀河団のメジャーマージャーによって形成され、しばしば銀河団外縁部に存在する。一方、マイナーマージャーでは、大きな銀河団の中心付近で温度の異なるガスが混ざり合う様子が見られている。この現象は「スロッシング」と呼ばれ、比較的低温の ICM (Intra-Cluster Medium；銀河団を満たす物質) が高温の ICM に移動している状態であり、移動するガスは亜音速で運動するため、衝撃波を形成しないまでも、2 つの ICM の間の温度差「コールドフロント」(前線) を作り出す。また同時にスロッシングは、乱流を形成し、磁場を増幅し、粒子の乱流再加速を駆動することで、しばしば銀河団中心部に電波ハローを形成する²⁾。

銀河団におけるシンクロトロン放射のような非熱的放射の研究は、宇宙の進化過程や銀河団内部の物理的構造の解明において重要な意義を持つと同時に、銀河団内で生成されるアイソトープや宇宙線等がどのように形成されるかを理解する上で重要である。本研究では、うみへび座銀河団 Abell 1060 において新たに発見された拡散電波源「オオコウモリ」

についてその性質と起源を探求することで、基礎的な宇宙全体の物理的性質から、宇宙における元素の生成と循環、そしてシンクロトロン放射をする宇宙線電子や X 線等の放射線がどのように形成されるかを議論する。

2. データ・解析

うみへび座銀河団 Abell 1060 は、北天で最も近傍にある銀河団であるため、研究が盛んに行われている。しかし、この銀河団は過去数十億年の間に衝突や合体があったことが示唆されている一方で、衝突合体に起因した高エネルギーな宇宙線や X 線輝度分布の特異な形状が見つかっていなかった。

筆者らは、インドにある電波干渉計 GMRT のアーカイブデータを使用した。観測周波数は 338 MHz であり、方向依存型較正と呼ばれる最新の解析方法を SPAM³⁾ を用いて適用した。また、電波帯でのエネルギースペクトルを調べるため、より低周波の一般的に公開されている電波カタログ GLEAM⁴⁾ のデータを参照した。

銀河団ガスとの相互作用等を議論するために、天文衛星 XMM-Newton⁵⁾ のデータもアーカイブシステムから取得して解析し、使用した。また、構成銀河との位置関係等を把握するため、可視・赤外データである天文衛星 WISE⁶⁾ と全天のデジタルデータベース DSS2-IR⁷⁾ も用いた。

3. 結果

図 1 は GMRT の観測によって得られた、うみへび座銀河団 Abell 1060 の電波強度分布である。筆者らは、銀河団中心付近に拡散電波源（図 1 白枠線部分）があることを発見した。この電波源は、淡く細長い形をしており、中央部が明るく、対角線上に棒のような構造を持っている。筆者らは、その見た目から発見した電波構造をオオコウモリ（The Flying Fox）と呼ぶことにした。

このオオコウモリの頭は南西を向いており、両翼の全長（長軸）は約 235 秒角（約 66 kpc）、身長（短軸）は約 100 秒角（約 28 kpc）の大きな蝙蝠である。左翼先端（リング構造の北西端）には楕円銀河 NGC 3309 が重なっており、NGC 3309 の中心に点

状の電波構造が確認できる。オオコウモリ全体について、電波の平均スペクトル指数 α は -1.4 となり、同様の低周電波カタログの天体の典型値 -0.77 に比べて著しく急峻であることが分かった。この北天最近傍銀河団 Abell 1060 におけるこの新しい発見は、従来の代表的な電波観測（ ~ 1.4 GHz 程度）に比べてより低い周波数（338 MHz）でのみ明るいことから、この急峻なスペクトル指数と矛盾ない。また、これらの計算に使った電波カタログは十分な空間分解能がなく、スペクトル指数の空間分布は得られなかった。

オオコウモリ以外に検出された天体についても簡単に報告する。最も明るい電波源は銀河団中心にある楕円銀河 NGC 3309 の AGN（活動銀河核）から放出された電波ジェットであり、スペクトル指数は -1.12 程度である。画像の南東部にある渦巻き銀河 NGC 3312 は 2 番目に明るい電波源であり、銀河の渦状腕と電波の細長いリング形状が一致していることから、NGC 3312 の拡散放射であると考えられる。同様に測られたスペクトル指数は -0.48 であった。これらは、それぞれ電波ジェット、円盤銀河で観測される電波構造として妥当な明るさ、スペクトル指数であり、筆者らの観測・解析やオオコウモリの検出が適切であることを保証している。

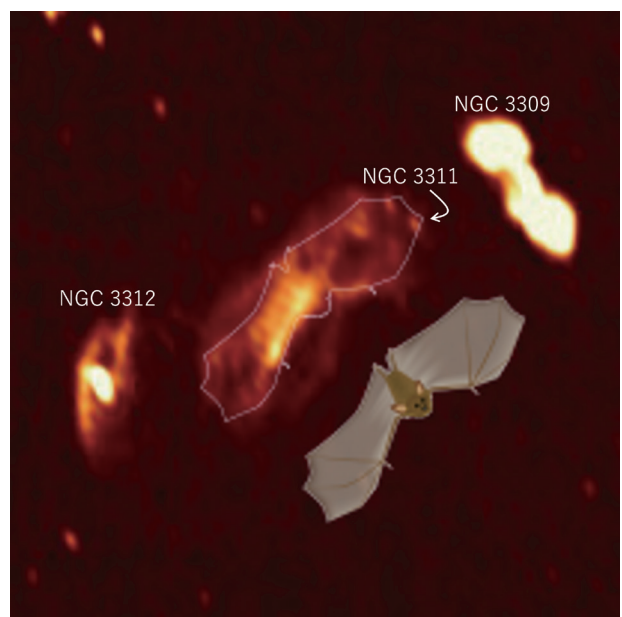


図 1 うみへび座銀河団 (Abell 1060) 中に見つかったオオコウモリ。右下のオオコウモリはイラスト

背景カラーは GMRT で観測された電波強度を示している。図面で上が北、右が西である (© 国立天文台)

4. 議論

では、今回新たに発見されたオオコウモリの起源は何であるのか。観測的特徴は急峻なスペクトルを持っていることであり、これはオオコウモリが年寄りであることを示唆している。一方で、その形はAGN ジェットの電波ローブを彷彿とさせ、この場合、比較的若いことが示唆され、統一された解釈が難しい。ここでは、急峻なスペクトル、オオコウモリの形、各銀河の運動等の観点から、オオコウモリが今まで知られている銀河団電波構造分類の何に属するのかを考えていく。

4.1 メンバー銀河の電波ローブ？

全体的な形態と中心の明るい構造から、オオコウモリはAGN ジェットの電波ローブ（例えば図1中右上にある天体NGC3309）に似ていると考えられる。これは、活動的な銀河の中心核から放射されるジェットによって形成されるため、天体の中心に銀河が存在することが期待される。しかし、光・赤外線から、オオコウモリの中心には明確な母銀河がないことが分かる（図2）。最も近くにある明るい銀河NGC3311はオオコウモリの端に位置しているため、このシナリオには適応しない。

一方で、オオコウモリがNGC3311からたなびい

たジェットである可能性がある。このシナリオはX線観測結果（図3）でも支持され、X線観測から分かる温度と金属量の分布はスロッシング構造を暗示し、オオコウモリはNGC3311によって作られた高温で金属が豊富な領域に一致している。しかし、このシナリオではNGC3311が北西方向に移動している必要があるが、現状そのような証拠は見つかっていない。更にNGC3311はメンバー銀河の視線速度分布の中心に位置し、ほぼ動いていないことを示唆している。また、近くの銀河NGC3312とNGC3314が北東方向に動いていることが他の観測から示唆されており、NGC3311の期待される動きとは一致しない。したがってオオコウモリは、最も近いNGC3311によって作られたと考えることは難しい。

オオコウモリの急峻なスペクトルは、これが古い天体であることを示唆しているため、少し離れたNGC3309がオオコウモリを形成できる可能性がある。この場合、NGC3309が銀河団中心の周りを時計回りまたは反時計回りに運動していることが期待されるが、現在のNGC3309に付随する電波ローブは、そのような円運動の痕跡を示していない。では残るNGC3312によって形成されたのだろうか。もし過去に、NGC3312が銀河団の中心を通過していた場合、オオコウモリはこの通過時に励起された乱流によって加速された宇宙線電子による放射である

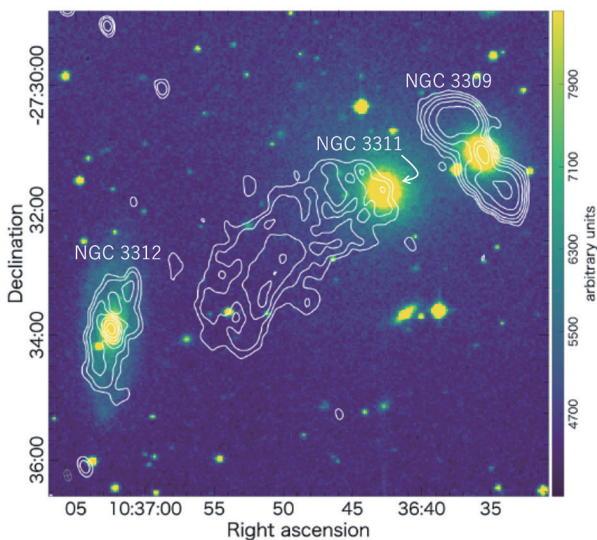


図2 オオコウモリを中心とした、うみへび座銀河団（Abell 1060）のDSS2近赤外画像（背景カラー）

主に銀河等が明るく見えている。白等高線は図1と同じ電波強度分布を示しており、電波の検出限界（ 3σ ）以上を表示している

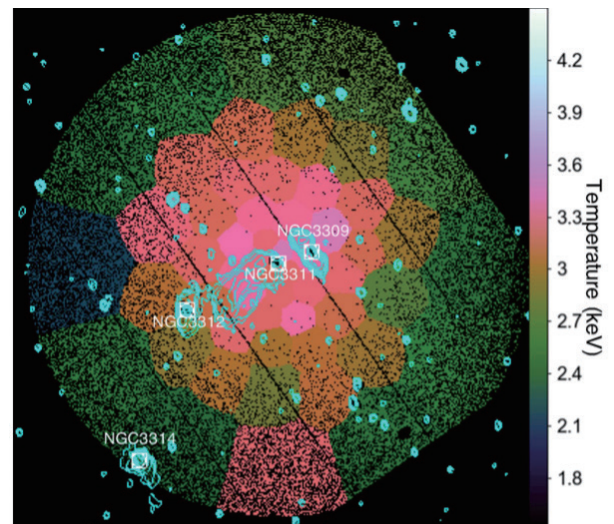


図3 X線観測から推定された、オオコウモリを中心としたうみへび座銀河団（Abell 1060）ICMの温度分布

青等高線は図2同様

かもしれない。しかしこの場合、銀河団ガスの分布や温度構造の変化が期待されるが、X線観測からそのような形跡は見られていない。

これらの議論から、うみへび座銀河団 Abell 1060 中の銀河によってオオコウモリが形成された可能性は薄いと結論づけられる。

4.2 電波遺物かハローか？

では、オオコウモリは典型的な銀河団由来の拡散電波源であるのか。この場合、銀河団に典型的に観測される、電波ハロー、電波レリックがオオコウモリの起源の候補に挙がる。電波ハロー、電波レリックの形成には一般的に銀河団同士の衝突や相互作用が必要である。うみへび座銀河団には北東約 500 kpc の距離に、HGC 48 という銀河群が存在する。もし HGC 48 が過去に Abell 1060 のガスを乱したとすれば、オオコウモリはこの銀河群との衝突によって形成されたかもしれない。

電波レリックは銀河団同士の衝突で励起した衝撃波によって形成されると考えられており、実際これまで観測されている多くの電波レリックには、X線観測から分かるガスの不連続面（＝衝撃波）が同定されている。図3に示す Abell 1060 の X線観測では、オオコウモリに関連する温度分布の顕著な不連続面は見られない。したがって、オオコウモリを電波レリックとして説明するのは難しい。また、オオコウモリは銀河団中心から約 24 kpc しか離れていない。この位置は、電波レリックがよく銀河団の外縁部で観測されるという性質とは大きく異なる。

オオコウモリが電波ハローであるとするシナリオは、HGC 48 が Abell 1060 の中心部を通過する必要がある。この衝突によって中心ガスの乱流が形成され、乱流(再)加速によって宇宙線が加速され、電波ハローが励起する。オオコウモリのスペクトル指数は古典的な電波ハローよりも急峻であるが、最近の観測では急峻なスペクトルを持つものが報告されている。しかし、オオコウモリの細長い形態は電波ハローの円形的特徴とは異なり、また、銀河団中心ガスには HGC 48 が中心を通ったような顕著な証拠は見られない。

4.3 電波の輪？

これまで議論したように、オオコウモリの起源は

はっきりしない。これは、オオコウモリが全く新しい分類の電波構造である可能性を示唆している。

近年、ORC (Odd Radio Circle) と呼ばれる新しい電波構造が発見されている。現時点では、ORC は数個しか報告されておらず、そのスペクトル指標は $-0.7 \sim -1.1$ である⁸⁾。ORC の起源として、中心銀河からの衝撃波、銀河風による衝撃波、二重電波ローブ、銀河同士の相互作用、ワームホールの喉等が議論されている。オオコウモリと ORC の明確な違いは、ORC が円形の形態を示すのに対し、オオコウモリは比較的細長いことである。もう1つの相違点は、オオコウモリは急峻なスペクトルであるのに対し、ORC はそうではないということである。ORC は観測が少ないため、統計的に有意に急峻なスペクトルを持たないとは結論されておらず、1つの可能性として、オオコウモリは古くなった ORC で、NGC3311 と北西方向にスロッシングしたガスによって東西方向に引き伸ばされた可能性がある。

5. まとめ

筆者らは、うみへび座銀河団の中心に、これまで見つかっていなかった電波構造オオコウモリを発見した。このオオコウモリは、電波ローブやその残骸、銀河団の拡散放射、ORC 等の既知の電波源では明確に説明できない。今後、光学・赤外望遠鏡によるホスト銀河の探査が、オオコウモリの起源を理解する助けになるだろう。また、偏光マップは磁場構造を明らかにする。これらの情報もまた、オオコウモリの起源と性質を理解する上で極めて重要である。

参考文献

- 1) van Weeren, R. J., *et al.*, *Space Sci. Rev.*, **215**, 16 (2019)
- 2) Markevitch, M., *et al.*, *Phys. Rep.*, **443**, 1 (2007)
- 3) Intema, H. T., *ASICS*, **13**, 469 (2014)
- 4) Hurley-Walker, N., *et al.*, *MNRAS*, **464**, 1146 (2017)
- 5) Jansen, F., *et al.*, *A&A*, **365**, L1 (2001)
- 6) Wright, E. L., *et al.*, *AJ*, **140**, 1868 (2010)
- 7) McLean, B. J., *et al.*, *ASPCS*, **216**, 145 (2000)
- 8) Norris, R. P., *et al.*, *MNRAS*, **513**, 1300 (2022)

(*1 国立天文台, *2 名古屋大学, *3 東京大学)