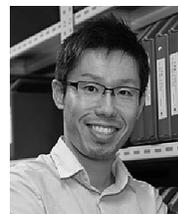


超高解像度電波観測で探る 巨大ブラックホールジェット



秦 和 弘

〈国立天文台 水沢 VLBI 観測所 〒023-0861 岩手県奥州市水沢区星が丘町 2-12〉

e-mail: kazuhiro.hada@nao.ac.jp

巨大ブラックホールから噴出する相対論的ジェットの生成メカニズムは天文学における数十年来の難問である。この問題に観測的にアプローチするうえで、超長基線電波干渉計（VLBI）を用いた高解像度電波観測が威力を発揮する。本稿では最近傍の相対論的ジェット天体 M87 についてわれわれがこれまで取り組んできた VLBI 観測をもとに、巨大ブラックホールジェット根元の観測の最前線について紹介する。後半では近年急速な進展を遂げる二つの国際 VLBI 観測網の紹介とともに、今後の展望について述べる。

1. はじめに

多くの銀河の中心部には太陽の数百万倍から数十億倍の質量をもつ巨大なブラックホールが存在することが知られている^{1), 2)}。ブラックホールは強い重力によってあらゆる物質を吸い込み、光さえ脱出できない天体として有名だ。ブラックホール自体は輝かないが、吸い込まれる物質の重力エネルギーを燃料として、その周辺ではさまざまな活動現象が起こっている。これらの現場を直接観測することはブラックホール本体の性質や活動性、さらには銀河との宇宙論的共進化を解明することにつながるため、天文学における一大分野として活発に研究が進められている。

一部の巨大ブラックホールはその活動性が極めて激しく、物質を吸い込むと同時に強力な「噴出」もしていることが知られている。「ジェット」と呼ばれるこの現象は、電離したガス流（プラズマ）が細く絞られた形状で、しかも相対論的速度（光速の99%を超えることもある）で数千から数万光年にもわたって宇宙空間を突き進む宇宙最大級の高エネルギー現象である（図1）。宇宙に存

在する巨大ブラックホールの約1割において、このような強力なジェットが確認されている。

しかしながらジェットの詳しい形成メカニズムはいまだよくわかっていない。そもそもどうやって巨大ブラックホールの強力な重力場を振り切り

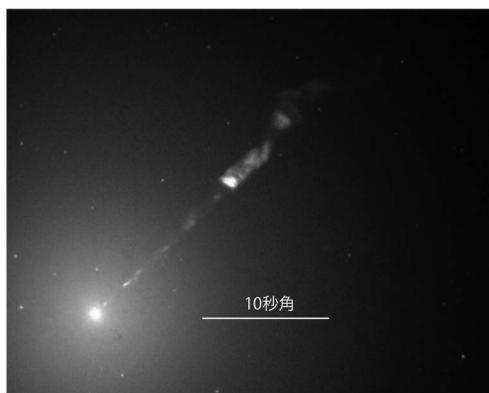


図1 ハッブル宇宙望遠鏡が撮影した有名な M87 ジェット可視光画像。ビーム状の光の筋（ジェット）は差し渡し約5,000光年ほどある。根元の一番明るい領域が巨大ブラックホールが存在する中心核であり、VLBIはこの部分をさらに数百倍以上の解像度で撮影する。（画像クレジット：NASA and the Hubble Heritage Team.）

(a) **形状がわかる**: そのまんまだが、高解像度で画像が取得できるため、細かい形状が精密に決定できる。これはジェットがブラックホール近傍でどのような形で生成され、どこでどのように折り込まれるのかという、収束機構の解明に直結する。

(b) **運動がわかる**: これも高い解像度ゆえの技だが、ジェットが運動する様子を正確に追尾できる。特に高頻度でモニター観測を実施することで、ブラックホール近傍から噴出したジェットがどこでどのように加速されていくのかという、加速機構の解明に直結する。

(c) **偏波がわかる**: 本稿ではあまり触れないが、偏波（偏光）が測定できるのも大きな強みである。現在ではジェットに付随する磁場が駆動・加速・収束にとって極めて重要な役割を担っていると考えられている。VLBIによる高解像度偏波観測は、ジェットの磁力線形状の空間分布の解明に直結する。

このようにVLBIでジェットを観測することで、ジェット生成にかかわる最も根源的な問題についてダイレクトにアプローチできるのである。

3. M87: 巨大ブラックホールジェットの「ロゼッタストーン」

われわれは地球から5,440万光年のところにある巨大電波銀河M87に着目してきた。M87はおとめ座銀河団の中心部に位置する最近傍の活動銀河ジェットの一つとしてとても有名であり、ハッブル宇宙望遠鏡などを用いて中心核から約5千光年にわたりビーム状のジェットが観測されている(図1)。実は1918年に人類が最初に宇宙ジェットを発見した記念すべき天体でもある。

M87の特徴は、中心に太陽質量の約60億倍という宇宙最大級の巨大ブラックホールを抱えていることである⁵⁾。この「近くて大きい」という観測的利点のおかげで、M87は見掛けのブラックホール視直径が天の川銀河中心射手座Aスターに

次いで大きな天体であり、相対論的ジェットをもつブラックホールとしては全天でナンバー1である。それゆえ、ほかのどの天体よりもジェットの細かい構造が分解できるため、世界中の研究者から「巨大ブラックホールジェット研究におけるロゼッタストーン」として長年注目を浴びてきた⁶⁾。

4. ブラックホール位置の精密特定: ジェットの原点であり本研究の原点

それではここから実際にわれわれの観測成果を紹介していこう。ただその前に、ここまで読んでいただいた方の中には率直な疑問を抱いた人もいるだろう。そもそもVLBIという技術は前からあるわけで、しかもM87が重要だとわかっているのなら、もうとっくの昔に研究し尽くされているのでは? と。もっともな疑問である。しかしたった一つのとある事情によって、M87観測は長らく進展がストップしていたのである。

それが「ブラックホール位置問題」というものであった^{7), 8)}。実はこの話題については筆者の過去の天文月報記事(2012年11月号⁹⁾)で解説させてもらったのでここでは詳細は省くが、簡単にいうと、VLBIでどんなに高解像度のジェット画像を得ても、根元ではシンクロトロン自己吸収という効果によって、ある地点より上流の流れは電波で光らなくなるのである。そのため、ブラックホールが鎮座するジェットの源流地点まで見通すことができず、吸収が晴れる流れの途中からしか画像に映らないのである。この「見かけの根元」とブラックホールの位置関係は画像上からは全く判断がつかず、吸収の壁を何らかの方法で克服しない限り、いくら解像度をよくしたところで解決できない問題なのである。そのためM87のブラックホール位置の論争には最大で約1,000 R_s (約7ミリ秒角に相当)もの振れ幅があり^{7), 8)}、これがネックとなってそれ以下の細かいスケールの探査に進むことができなかったのである。

そこでわれわれはM87のブラックホール位置

をより高精度で特定する、というテーマからスタートした。こちらも詳細は長くなるので過去の月報を参照していただくとして、結論のみ述べると、「多周波相対VLBI」という高精度な位置天文手法を駆使して「コアシフト」と呼ばれる現象を超精密に測定することでM87のブラックホール位置を僅か約20マイクロ秒角（僅か数 R_s ）という位置精度で割り出すことについて成功したのである¹⁰⁾。本結果はその後の多くのM87ジェット研究の起点となっている。

ところでこの内容は筆者の初めての査読論文であり、論文が受理されたのが博士論文審査の直前であった。もし観測に失敗するか論文がリジェクトされていたら、今ごろこうやって記事を書くどころか、そもそも路頭に迷っていたらう。当時は毎日（人がいなくなった深夜に）家の近くの神社で神頼みをしていたことを覚えている。筆者の悲惨な院生時代も過去の月報⁹⁾にまとめてあるので興味のある方（特に今の大学院生の方々）は参照されたい。

5. ジェット収束領域の解明

さて、ブラックホール位置問題を突破したことで、長らく停滞していたM87観測はここから一気に進展することになる。位置決定の最も重要な帰結は、ジェットのさまざまな物理量について、ブラックホールからの距離（ここでは z と定義する）の関数として正確に測定できるようになったことである。つまり、収束や加速がブラックホールからどれくらい離れた地点で、どれくらいの距離にわたって、どのように起こり、また磁場や粒子などの空間分布がどのように変化していくか、といった理論研究で先行していた情報がようやく観測で正確に取得できるようになったのである。

そこで位置決定を足がかりに真っ先に取り組んだのがM87ジェットの形状測定である¹¹⁾。図2に求めたブラックホール位置からの距離の関数としてジェットの幅を測定した結果を示す（ジェットの

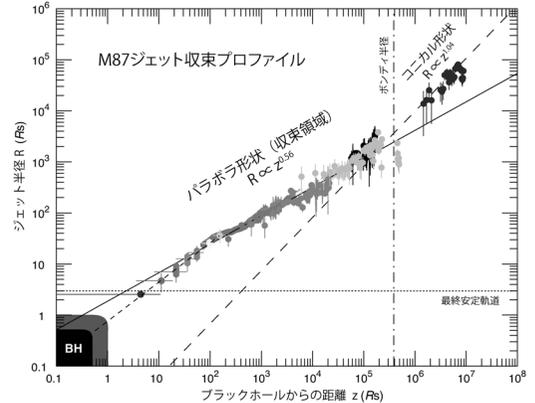


図2 M87のジェット収束プロファイル。横軸が求めたブラックホールからの距離 z 、縦軸が電波画像から測定された各 z におけるジェット断面の半径 R をプロットしている。いずれもシュバルツシルト半径の単位である。この図は文献11, 12の混成プロットであり、ブラックホールジェットにおいて最も詳細に解明された収束プロファイルである。

の収束プロファイル)。実はM87の収束プロファイル測定は台湾中央研究院の浅田圭一・中村雅徳両氏が当時一足先に先駆的に取り組んでいたのだが、われわれのブラックホール位置決定でより精度の高い測定が可能になった。そこでわれわれと両氏のグループが密かに結託？して、世界を出し抜いて一気に測定を推し進め、ブラックホール近傍から遠方まで約7桁もの距離に至る形状測定を一気に完成させてしまったのである。図2はわれわれと浅田・中村氏との合同で作られた集大成ともいべきプロットであり、現在人類が知りうる最も詳細なブラックホールジェット収束プロファイル測定結果である。

その結果、M87の非常に美しいジェット形状が明らかになった。ブラックホールから $z \sim 100 R_s$ から $z \sim 4 \times 10^5 R_s$ の何と3桁以上もの長きにわたり、ジェットが単一のパラボラ形状を維持していたのである。これはジェットがこの間で絶えず細く絞られ続けているという決定的証拠であり、ジェットの収束領域の所在を観測的に特定した初めての

成果である。ちなみに浅田・中村両氏は形状測定をさらに下流側まで推し進め、ジェット形状がちょうどM87のボンディ半径（星間ガスに中心ブラックホールの重力的支配が及ぶ半径） $z \sim 4 \times 10^5 R_s$ を境にパラボラからコニカル形状へと開き始めることも発見した¹²⁾。これはジェット収束形状の維持にとって、ブラックホール重力に束縛された周囲の星間ガスによる閉じ込めが重要な役割を果たしていることを示唆するセンセーショナルな観測結果であり、M87での発見を機に近年では他の天体でも次々と同様の形状変化が見つかり始めている。

一方、ブラックホールから $100 R_s$ より根元側については、精度のよい形状測定をするには至らなかった。というのも当時は観測波長が7 mmよりも長いセンチ波が主流だったため、空間分解能と光学的厚みの限界が根元の形状測定を妨げていたのである。ブラックホール最近傍、ジェット生成直後の形状を明らかにするためには、より短い波長で高解像度・高透過率な撮像を行う必要があった。

6. 3 mm帯VLBIによるジェット根元の史上最高解像度イメージング

そこでわれわれが次に取り組んだのが、波長3 mm帯によるVLBIである¹³⁾。ミリ波帯は解像度が高まる反面、大気の影響などにより信号検出がセンチ波に比べて格段に難しく、これまで品質のよいミリ波帯VLBIマップを得ることができていなかった。ただ幸運にも、幅測定の結果が出始めた頃と相まって、アメリカのグリーンバンク100 m電波望遠鏡（GBT）に3 mm帯受信機が搭載され、VLBAと合同で高感度な3 mm帯VLBI観測ができるようになったのである。われわれはこのチャンスに真っ先に飛びついた。通常GBTを用いたVLBI観測はとんでもなく観測枠が小さく、相当

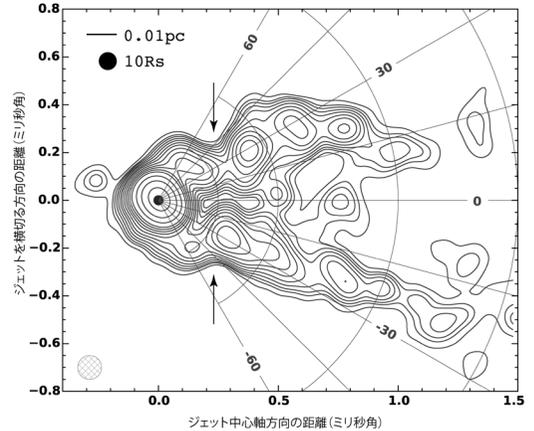


図3 VLBA+GBT 3 mm帯VLBIによって撮影されたM87ジェット根元の電波画像（文献13）。ブラックホール近傍約 $10 R_s$ の領域まで分解された、現在最も解像度の高いブラックホールジェットの画像である。

な科学的インパクトが認められない限り門前払いが常である。しかしわれわれの提案は向こうにとても気に入ってもらったらしく、光栄にもGBTを投入した3 mm帯VLBI観測をわれわれが世界で最初にさせてもらうことが決まったのである。

観測は2014年2月に行われ、大きなトラブルもなく天候にも恵まれた。その結果、「これが本当にミリ波か？」と思わず疑うほど信号雑音比の高いデータが得られたのである。GBT様様であった。われわれは急ピッチでデータ解析に取り掛かり、ついに3 mm帯で初のM87 VLBI画像を得ることができた。その結果が図3である。約80マイクロ秒角（シュバルツシルト半径にして $11 R_s$ ）というかつてない解像度でジェット駆動領域を撮影することに成功した。2017年7月現在、これがブラックホールに最も近いスケールまでジェットを写真撮影できた史上最高解像度画像である^{*3}。

この画像から根元 $100 R_s$ 以内の形状を詳しく解析したところ、センチ波画像で見られた下流側のパラボラ形状が $100 R_s$ 以内でも大局的には続いて

*3 後述するが、2017年4月に得られた更に高解像度な1.3 mm帯VLBIデータの解析が現在進められており、この記録はもう間もなく塗り替えられるだろう。

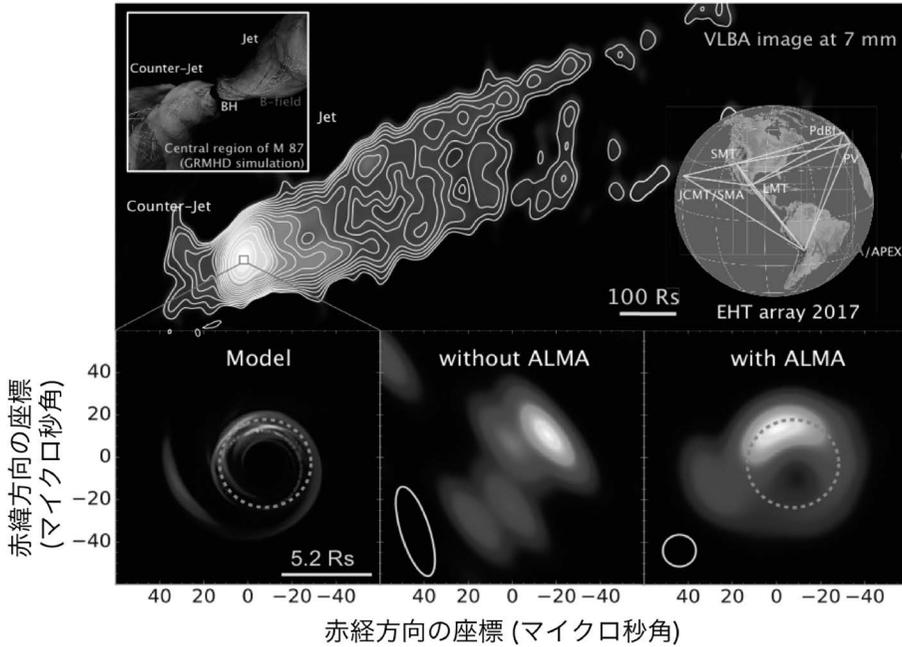


図4 Event Horizon TelescopeによるM87の観測の概要。ジェット根元に潜む巨大ブラックホールの「シャドー(影)」の撮影に挑む。下段はイメージングシミュレーション画像であり、ALMAを含めたEHT観測により、下段右のような写真が撮れると期待されている(画像クレジット: EHT Consortium)。

え、数 R_s スケールでジェット生成の瞬間が史上初めて撮影できると期待されている。これはジェット駆動機構の最も根源的な問題のいくつかを解決する可能性がある。一つは「ジェットの究極の駆動源はブラックホール本体か(Blandford & Znajek機構¹⁵⁾; 通称BZ)? あるいは降着円盤内縁か(Blandford & Payne機構¹⁶⁾; 通称BP)?」という論争である。これはわれわれが3ミリより長波長で取り組んできたジェット収束形状測定にEHTデータをプラスすることで直接検証できる。もしジェットの付け根がブラックホールに突き刺さる様子が見えようものなら、BZ駆動を示す初めての決定的証拠となるだろう。二つ目が「ジェット駆動領域の磁力線形状」である。理論的には磁力線はジェットの生成・加速・収束に不可欠な要素とされているが、実際にブラックホール周辺での磁場を観測することはこれまで不可能であった。EHTによって初めて観測的に磁場形状が捉

えられ、理論モデルの妥当性を直接比較することが可能になるだろう。

これらはEHTで目指すサイエンスの一例である。筆者は現在EHTを用いたM87サイエンスの取りまとめ役を担当しており、このほかにもエックス線・ガンマ線など他波長と協力してEHTを用いた新たなサイエンス展開を検討中である。いずれにしても、EHTデータから画像を復元しないことには始まらない。現在EHTグループではデータの解析作業が急ピッチで進められており、早ければ今後数カ月以内にも何らかの初期成果が報告できるかもしれない。

9. 東アジアVLBIネットワーク (EAVN)

筆者が現在推進中のもう一つのVLBI計画が東アジアVLBIネットワーク(The East Asian VLBI Network; 通称EAVN)というものである。EAVN

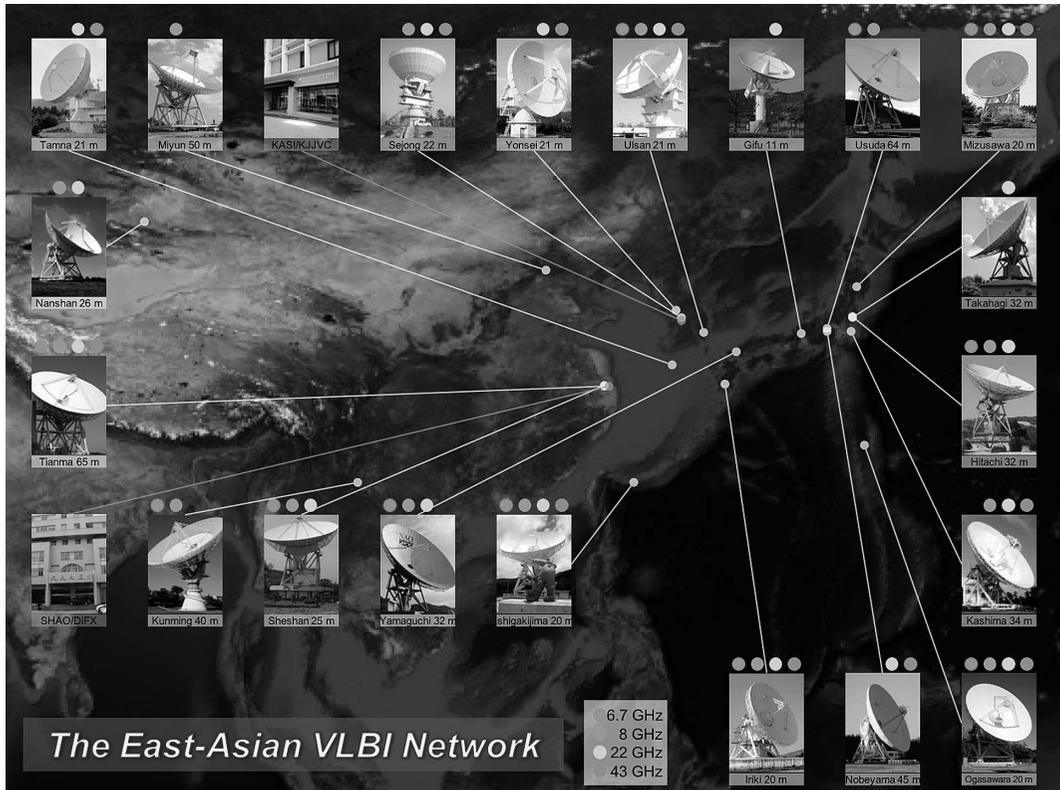


図5 東アジアVLBIネットワークの概要。東アジア地域はVERA, KVN, JVN, CVNという個々のVLBIネットワークが乱立していることからわかるとおり、世界一電波望遠鏡が密集した動物園地帯である。EAVNはこれら合計20台前後の電波望遠鏡群を一つにまとめることで、ほかのセンチ波VLBIネットワークを凌駕する観測網を目指す（画像は韓国天文研究院輪島清昭氏のご厚意による提供である）。

は日本・韓国・中国をはじめとする東アジア地域に分布するたくさんの電波望遠鏡（主にセンチ波帯）を合成し、この地域で一つの巨大なVLBIネットワークを構築する国際プロジェクトである（図5）。今をときめくEHTと比べるとやや地味に見えるのは否めないが、後述のとおり完成すればこちらでも世界トップクラスのVLBI網となる。何と言ってもアジア地域のわれわれにとって「マイテレスコープ」であることが大きい。筆者のこれまでの研究はどちらかという外国の望遠鏡によるところがあったが、地道で挑戦的な、多くの観測時間を費やすようなテーマに取り組もうと思うと、やはりマイテレスコープがあるかどうかが大きく勝敗を分ける。

EAVNの中核となるアレイは日本のVERAと韓国KVNからなるKaVA（The KVN and VERA Array）である。KaVAは2014年から定常運用を開始したばかりであるが、ブラックホールジェット観測のみならず、レーザーを用いた星形成領域の観測や晩期型星、銀河系位置天文計測においても着々と研究成果が出始めている。KaVAの強みはほぼ年間を通して高頻度にモニター観測が可能という点である。これはブラックホールジェットの相対論的運動を正確に追尾するためには特に大きなメリットであり、世界的に見ても現在KaVAが最も成功している強みである。われわれは日韓合同で活動銀河・ブラックホールサイエンスチームを形成し、KaVAの優れた機動性を活かして、

ブラックホールジェット駆動領域の加速プロフィールおよびそのメカニズムを解明すべく、特にM87の高頻度モニターに力を注いでいる。年間100時間超を費やす個別観測としては非常に巨大なプログラムであり、マイテレスコープでなければ到底実現できないテーマである。われわれは2014年からM87のモニター観測を開始し、大変興味深いことに、ジェットが噴出して間もないブラックホール近傍数百 R_g 以内ですでに複数の超光速運動成分を発見した¹⁷⁾。これは過去に低頻度のVLBAモニターによってM87根元の速度は極めて遅いと言われていた定説¹⁸⁾を大きく改めるものであり、KaVAによる高頻度モニターの重要性を証明する結果となった。現在も着々とモニターデータが蓄積しており、さらに精密に加速プロフィールを決定すべく解析を進めている。

KaVAはこのように順調に進んでいるが、これはEAVN構築に向けた第一歩にすぎない。われわれがいま最も力を入れているのは、中国との連携である。中国では上海、北京、ウルムチ、昆明に計5台の電波望遠鏡が稼働しており、これらはいずれもEAVNの性能向上に欠かせない。例えば東アジア最西端のウルムチ局を合成することで日韓に比べて東西方向の解像度が2倍以上向上し、また上海には口径65 mという大型望遠鏡が稼働しており、EAVNの集光力を大きく押し上げてくれる。中国局を含めたEAVN試験はここ1-2年で大幅に進展し、上海やウルムチを含めてようやく定常的にマップが描けるようになってきた。まだ解決すべき性能評価項目やバグ出しが残っているものの、定常運用開始まであと一歩というところまできている。

東アジアおよび周辺地域は現在電波望遠鏡の建設ラッシュに沸いており、EAVNは今後もますます規模を拡大していく予定である。例えばタイには今後数年のうちに電波望遠鏡ネットワークが誕生し、EAVNへの参加が見込まれている。これにより観測網全体の感度や南北方向の空間分解能が

さらに改善し、ジェットの内部構造についてより詳細なイメージを取得することが可能になる。また、低周波においては中国貴陽に世界最大の電波望遠鏡FAST(口径500メートル!)が誕生したばかりであり、いずれFASTもEAVNの1局として合成することができれば、SKA(Square Kilometer Array)に匹敵する感度でミリ秒角スケールの観測が可能になり、(ジェットに限らず)全く新しい天文学を東アジアから切り開くことができるようになるだろう。

10. おわりに

本稿では巨大ブラックホールジェットの観測について、筆者のこれまでの研究と今後の展望について紹介してきた。今後の展開について一言追加だが、最近ではEHTの華々しい台頭もあり、VLBIによるブラックホール観測はEHTさえあればEAVNやVLBAはもう不要なのでは? という声もあったりする。しかしそれは間違いである。EHTは解像度こそ圧倒的だが、感度や画質・機動性ではセンチ波VLBIに比べるとどうしても劣るため、例えば加速メカニズムなどはEHTのみでは解決しないだろう。結局のところジェットは中心エンジンから何桁もの距離にわたる伝播現象であるため、上流から下流までend-to-endで観測できることが完全な理解に向けて重要である。

ゆえにEHTとセンチ波VLBIはお互い非常に相補的な役割を担っており、両者が共存するこれからの時代がジェット研究にとって本当の意味でスタート地点である。その先駆けとして、われわれは今年の春のM87のEHT観測に合わせ、EAVNでもM87の同時観測を実施した。ミリ波VLBIとセンチ波VLBIが同時にブラックホールジェットを観測した記念すべき初イベントとなり、早速ブラックホールから下流まで一度に調査可能なデータがそろいつつある。

来年は1918年にカーティスがM87で宇宙ジェットを発見してからちょうど100年を迎える。まさ

にこの節目に、ブラックホールジェット研究は大きく加速し、収束に向かうかもしれない。

謝 辞

このたび2016年度日本天文学会研究奨励賞というたいへん栄誉ある賞をいただきました。大学院生時代にほとんど何も結果が出ず迷惑をかけるばかりだった筆者がこのような賞をいただけたのは、これまで長きにわたり我慢強く支えていただいた多くの共同研究者の方々、そして水沢 VLBI 観測所の皆様のおかげです。この場を借りて心より感謝申し上げます。

参考文献

- 1) Ford H. C., et al., 1994, ApJ 435, L27
- 2) Miyoshi M., et al., 1995, Nature 373, 127
- 3) McKinney J. C., 2006, MNRAS 368, 1561
- 4) Komissarov S., et al., 2007, MNRAS 380, 51
- 5) Gebhardt K., Thomas J., 2009, ApJ 700, 1690
- 6) Junor W., Biretta J. A., Livio M., 1999, Nature 401, 891
- 7) Biretta J. A., Junor W., Livio M., 2002, New Astron. Rev. 46, 239
- 8) Ly C., Walker R. C., Junor W., 2007, ApJ 660, L200
- 9) 秦和弘, 2012, 天文月報 105, 695
- 10) Hada K., et al., 2011, Nature 477, 185
- 11) Hada K., et al., 2013, ApJ 775, 70
- 12) Asada K., Nakamura M., 2012, ApJ 745, L28
- 13) Hada K., et al., 2016, ApJ 817, 131
- 14) Di Matteo et al., 2003, ApJ 582, 133
- 15) Blandford R. D., Znajek R. L., 1977, MNRAS 179, 433
- 16) Blandford R. D., Payne D. G., 1982, MNRAS 199, 883
- 17) Hada K., et al., 2017, PASJ in press
- 18) Kovalev Y. Y., et al., 2007, ApJ 668, L27

Probing the Relativistic Jets in Supermassive Black Holes with High-Resolution Radio Observations

Kazuhiro HADA

Mizusawa VLBI Observatory, National Astronomical Observatory of Japan, 2-12 Hoshigaoka-cho, Mizusawa, Oshu, Iwate 023-0861, Japan

Abstract: The formation, collimation and acceleration of relativistic jets in active galactic nuclei is one of the central questions in high-energy astrophysics. High-resolution VLBI is a powerful tool to address this issue, since it allows us to directly image the formation regions of a jet near the supermassive black hole. Here we describe our recent VLBI studies on the radio galaxy M87, the nearest AGN jet that allows us to access the vicinity of the central black hole. The studies have made an important step towards a better understanding of the AGN jet-formation mechanisms.