

7. 国際ミリ波電波望遠鏡ネットワークで挑む巨大ブラックホール ジェットの生成・加速メカニズム

名古屋市立大学 理学研究科 准教授 秦 和弘

概要

本研究は、活動銀河中心核における巨大ブラックホール (BH) ジェットの生成・加速メカニズム解明を目的とし、最高分解能を有するミリ波 VLBI 観測によって BH ジェット発生領域を直接探査するものである。M87 をはじめとする重要天体の観測から、ジェット加速・収束領域における螺旋状磁場構造の存在を示唆する成果を得るとともに、東アジア地域で 3mm 帯 VLBI 網の構築を推進した。試験受信機による観測では、東アジア地域の 3mm 帯 VLBI としては最長距離となる水沢―石垣間 2300km 基線で相関検出に成功し、さらに雑音温度 90K を下回る冷却受信機の開発も達成した。今後は 3mm 帯本格観測を通じて BH 近傍での磁場構造及び加速プロファイルを解明するとともに、2032 年打ち上げ予定のスペース VLBI 計画 BHEX を見据え、地上観測網の高度化を引き続き推進していく。

背景および目的

活動銀河中心核に存在する巨大ブラックホール (BH) から噴出する相対論的ジェットの生成メカニズムは、現代天文学における長年の未解決問題である。近年の数値シミュレーションの進展により、理論的には「磁場駆動型モデル」が最有力候補として注目されている (引用文献[1])。本モデルでは、回転する BH 近傍で増幅された磁場がジェットを駆動し、磁気エネルギーを運動エネルギーへ変換することで、BH 近傍の約 10~1000 重力半径 (R_g) のスケールにわたり物質の絞り込みと加速が開始されると言われている。したがって、あらゆる観測装置の中でも最高の角分解能を有する VLBI (超長基線電波干渉計) によってこの領域を直接撮像することが、駆動機構解明に向けた鍵となる (図 1)。

そこで本研究では、M87 をはじめとする重要天体を対象に、VLBI による集中的なモニター観測を実施し、世界に先駆けて BH とジェットの接続関係、加速現場、さらに付随する磁場構造の解明を目指す。さらに、日本・韓国・中国を中心とした東アジア地域の連携により、新たな国際ミリ波 VLBI 観測網「86GHz (3mm) 帯 東アジア VLBI ネットワーク (通称 EAVN-high)」の構築を推進する。3mm 帯は従来のセンチ波帯に比べて透過率と空間分解能に優れ、BH 近傍からジェット加速領域へと連続的に繋がるスケールを探索する上で最適なバンドである。本波長帯において、新たに開発する広帯域・低雑音の冷却受信機を EAVN 最北端および最南端に位置する VERA 水沢局・石垣局へ搭載し、より高精度な BH ジェット観測の実現を目指す。

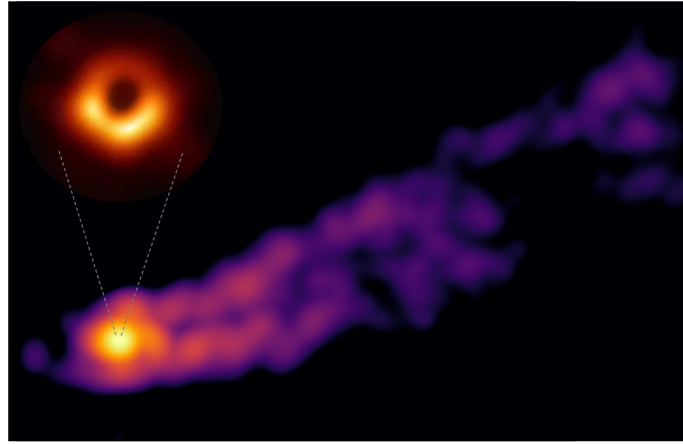


図 1. 巨大ブラックホールとそこから噴出するジェット（画像クレジット：EHT Collaboration, EAVN Collaboration）。

成果

我々の究極的な目標は、3mm 帯 EAVN を用いた BH ジェットの直接探査である。その実現に向けた準備研究として、まず波長の長いセンチ波帯 VLBI を用い、重要天体に対する詳細な観測研究を進めてきた。発表論文[1]では、米国 VLBI 観測網による高感度両偏波観測を通じて、M87 ジェットの 1000～10000R_g スケールをこれまでにない解像度で捉え、加速・収束領域における磁場構造の空間分布を明らかにした(図 2)。その結果、有力理論が予言する螺旋状磁場の存在を示唆する初めての強い観測的証拠を得た。さらに発表論文[3]および[4]では、M87 より活動性の低い天体のジェットを対象に観測を行い、ジェットの絞り込みが長距離にわたり維持されず、比較的短命に終わる傾向を示した。これは、BH の活動性とジェットの強度との間に強い相関が存在する可能性を示す重要な知見である。これら一連の成果は、3mm 帯 VLBI によるジェット根元領域の直接観測の重要性を、観測的により強固に裏付けるものである。

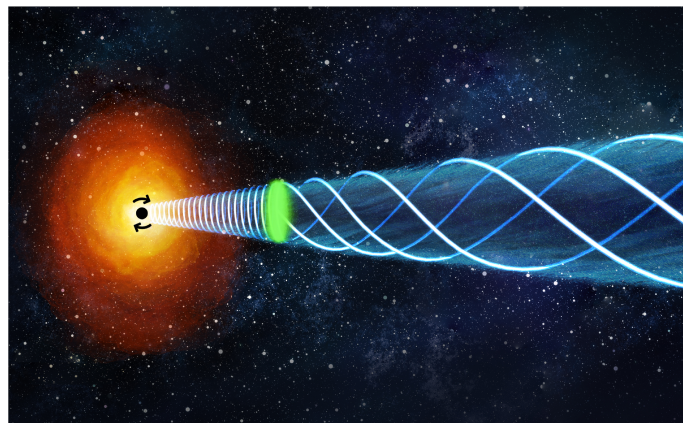


図 2. 発表論文[1]によって得られた観測成果。M87 のジェット加速・収束領域には理論が予言する螺旋状の磁場構造が存在することを明らかにした。

EAVN 3mm 帯の推進においては、冷却受信機の本格運用に先立ち、水沢局および石垣局へ常温動作の 3mm 帯テスト受信機を搭載し、野辺山 45m 局および韓国 KVN 局との合同試験観測を実施した。その結果、東アジア地域における 3mm 帯 VLBI としては最長となる 2300km の基線長（水沢-石垣）において相関信号の検出に成功した。観測対象は、強力なジェットを有する巨大ブラックホール天体 J0423-01 である。さらに、石垣局に搭載す

る冷却受信機の開発を進め、目標性能であった受信機雑音温度 90K を下回る高性能受信機の実現にも成功した(図 3)。このように受信機開発は順調に進展していたものの、冷凍機に不具合が発生し長期間の修理を要したため、本研究期間内に当初目標としていた冷却受信機を用いた VLBI 観測の実施には至らなかった。しかしながら、助成期間中には上記の通り多くの技術的・観測的進展が得られ、今後の研究展開に向けた重要な基盤を確立することができた。



図 3. 開発した 86GHz 帯冷却受信機。

今後の展望および課題

上述の通り、準備研究および 3mm 帯観測ネットワークのアップグレードにおいて多くの進展が得られた。今後の喫緊の課題は、冷却受信機を用いた 3mm 帯 EAVN 観測を本格軌道に乗せ、重要天体のモニター観測へと移行することである。これにより、準備研究で示唆されたジェット下流域における螺旋状磁場構造が、より BH 近傍のどの領域から形成・発達し始めるのかを直接検証できると期待される。さらに長期的な展望として、近年急速に具体化が進むミリ波スペース VLBI ミッションへの対応が挙げられる。現在、米国・日本を中心に 2032 年の打ち上げを目標としたミリ波スペース VLBI 衛星計画 (Black Hole Explorer: 通称 BHEX ミッション: 引用文献 [2,3]) が進行している(図 4)。BHEX では主バンドである 1mm 帯に加え、本研究で推進してきた 3mm 帯がセカンドバンドとして搭載される予定である。スペース VLBI は宇宙機と地上局の長大基線による干渉計観測であり、その成功には高性能な地上局網の整備が不可欠である。このような状況下で、東アジア地域に 3mm 帯地上局を整備することは BHEX ミッションの実現において極めて重要であり、同時にジェット駆動メカニズム研究を飛躍的に前進させる強力な推進力となる。したがって、本研究で構築した基盤を足がかりとして、今後 10 年を見据えたさらなる研究発展を目指し、引き続き観測ネットワークの整備と高度化を推進していく。

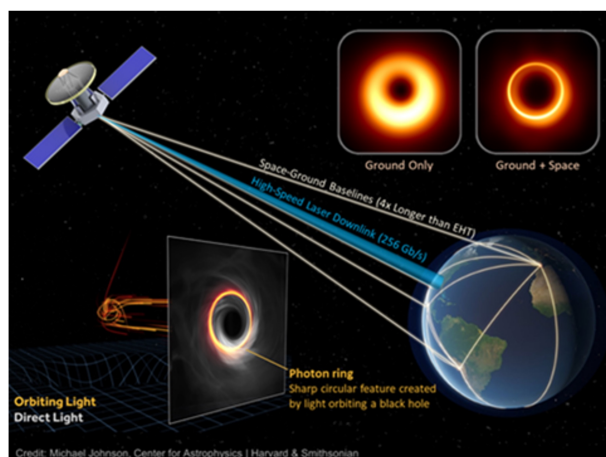


図 4. Black Hole Explorer (BHEX)計画 (画像クレジット：引用文系[2])。

(完)

発表論文

- 1) Park, J., Takahashi, K., Toma, K., **Hada, K.**, et al. "Helical Magnetic Field in the Acceleration-Collimation Zone of the M87 Jet", ApJ Letters, 996, 22 (2026)
- 2) Michail, J.M., von Fellenberg, S.D., Keating, G. K., Rao, R., Roychowdhury, T., Willner, S.P., Ford, N.M., Haggard, D., Markoff, S., Philippov, A., Ripperda, B., Sanchez-Maes, S., Sumners, Z., Witzel, G., Balakrishnan, M., Chandra, S., **Hada, K.**, et al. "First Mid-infrared Detection and Modeling of a Flare from Sgr A*. II. Mid-infrared Spectral Energy Distribution and Millimeter Polarimetry", ApJ, 997, 282 (2026)
- 3) Yan, X., Cui, L., **Hada, K.**, et al. "Subparsec Acceleration and Collimation of NGC 4261's Twin Jets", ApJ, 991, 75 (2025)
- 4) Fariyanto, E.P., **Hada, K.**, et al. "Jet Collimation Profile of the Low-luminosity Active Galactic Nucleus M84: Insight into the Jet Formation in the Low-accretion Regime", ApJ, 991, 13 (2025)
- 5) **Hada, K.**, Asada, K., Nakamura, M., Kino, M. "M87: a cosmic laboratory for deciphering black hole accretion and jet formation", A&A Review, 32, 5 (2024)

引用文献

- 1) Cruz-Orsorio, A., et al. "State-of-the-art energetic and morphological modeling of the launching site of the M87 jet", Nature Astronomy, 6, 103 (2022)
- 2) Johnson, M., et al. "The Black Hole Explorer: motivation and vision", SPIE, 13092, 2DJ (2024)
- 3) Akiyama, K., Niinuma, K., **Hada, K.**, et al. "The Japanese vision for the Black Hole Explorer mission", SPIE, 13092, 2EA (2024)