

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 6 日現在

機関番号：62616

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26800109

研究課題名(和文)新しいVLBI手法による巨大ブラックホールジェット駆動領域の観測的研究

研究課題名(英文) Observational study of jet-formation regions in supermassive black holes with a novel VLBI technique

研究代表者

秦 和弘 (Hada, Kazuhiro)

国立天文台・水沢VLBI観測所・助教

研究者番号：60724458

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：活動銀河中心核の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天文学における最大の難問の1つである。本研究ではジェット生成領域をシュバルツシルト半径に匹敵する空間スケールで探査可能な多周波相対VLBI手法を用いて、M87を始めとする複数のジェット天体のBH周辺構造を詳しく観測した。その結果、M87のジェットはBHごく近傍で増幅された磁気エネルギーによって駆動されている可能性が高いことがわかった。一方M87とは対照的に、BHから比較的遠方の降着円盤からの生成を示唆する天体も存在した。本結果はジェットの駆動機構は天体の個性や環境によって多様性を持つことを示唆している。

研究成果の概要(英文)：Understanding the formation mechanisms of relativistic jets in active galactic nuclei (AGN) is one of central questions in modern astrophysics. In this program, we studied several nearby AGN jets, including M87, by using the multi-frequency phase-referencing VLBI technique. We found that the M87 jet could be powered by the central supermassive black hole with strong magnetic fields. We also found that some other sources, in contrast to M87, could have jets that were launched in the accretion disks. These results suggest that various formation mechanisms are viable in AGN jets depending on their individual properties and surrounding environment.

研究分野：電波天文学

キーワード：電波天文学 超長基線電波干渉計(VLBI) 活動銀河核 ブラックホール 相対論的ジェット

1. 研究開始当初の背景

活動銀河核 (Active Galactic Nuclei; AGN) における相対論的ジェット生成・収束機構は長年に渡り理論・観測両面から活発に研究が進められている。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 (McKinney 2006)。本モデルによると、回転(スピン)する BH 近傍で増幅された磁気エネルギーがジェットを駆動し、螺旋状に巻きついた磁力線の締め付け効果によって、BH 近傍約 10-10000 シュバルツシルト半径(R_s) 以内の場所で物質の絞り込み(収束)が始まると言われている。よってあらゆる観測装置の中で最高分解能を達成する VLBI(超長基線電波干渉計)を用いてこの領域を直接撮像し、ジェットの形状を精密測定することが駆動機構解明に向けて決定的に重要である。

2. 研究の目的

研究代表者はこれまでの研究で、ジェット生成領域の構造をシュバルツシルト半径に匹敵する空間スケールで探査可能な「多周波相対 VLBI」手法を世界に先駆けて実現することに成功した。本研究ではこの手法を更に発展活用、更に様々な天体に適用することで、現在広く信じられている「磁場駆動型モデル」に対する観測的検証を試みる。

3. 研究の方法

本研究では M87 や幾つかの複数のジェット天体について 1GHz から 86GHz まで多周波のマップを解析し、具体的には以下の内容を調べる。

(1) BH位置の精密決定: まず、対象天体を多周波相対VLBI観測し、コアシフトの周波数依存性を精密測定することでジェットの源流地点(=BH地点)を正確に割り出す。

(2) ジェット駆動領域の形状測定: 次に、決定したBH位置からの距離の関数として、BH近傍 $r=10-10000R_s$ 以内におけるジェット形状測定を行う。もし磁場駆動モデルが予想する通りこの領域内に収束現場が存在するならば、BH近傍ではジェットが広い開口角を持ち、その後急速に放物形状へと絞り込まれる形状変化の様子が確認されるはずである。

(3) BH スピンは関与しているか?:更に発展研究として、根元付近で得られたジェット形状をBH位置に外挿(ジェット付け根 $r=0$ の幅を推定)することで、BHスピンの有無を検証する。磁力線への最重要エネルギー供給源の1つがBHの回転エネルギーであると考えられている (Blandford & Znajek 1977)。磁場駆動機構が正しければ、ジェット規模(=磁気エネルギー強さに比例)の大きな天体ほど強いスピンを要求し、逆に小規模ジェットほどスピンは小さくなる(またはゼロ)と予想される (Sikora et al. 2007)。

4. 研究成果

(1) 本研究期間前半は、最重要天体 M87 の VLBA+GBT 多周波データ解析、特に BH 最近傍 10Rs 領域まで見通せる 86GHz 帯の高解像度データ解析を中心に行った。86GHz 帯データは低周波データと比べ地球大気ゆらぎによる擾乱の影響が大きく、有意な信号を検出するための解析作業が当初想定していたよりもかなり長く時間がかかってしまったが、地道な努力が実り、非常に興味深い結果が得られた。M87 のジェット形状は BH から 100Rs より下流ではシンプルな双曲型で表されるのだが、今回根元側 10-100Rs 領域のジェット形状を詳しく調べたところ、単一の幕では評価できない複雑な絞込形状をしていることを発見した。空間スケールを考えると、これは BH 近傍の降着流とジェットが相互作用をしていると考えたと説明がつく。実際、M87 ジェットが 10Rs 周辺で磁気エネルギー優勢とすると、ジェットの磁気圧と同じ距離における降着流のガスがほぼ同程度という結果が見積もられ、ジェット根元での絞込開始に降着流による閉じ込めが効いている可能性を示唆する最初の観測結果となった。また、測定された M87 ジェットの収束プロファイルを中心エンジン側に外挿すると、ジェット発射地点のサイズは BH とほぼ同程度の大きさになることがわかった。これは M87 ジェットの駆動源が降着円盤ではなく、BH 本体 (Blandford & Znajek タイプ)であることを示唆している。

本結果は米国電波天文台のサイエンスハイライトとしてウェブサイトでも取り上げられるなど、科学的インパクトが確かに大きな内容であったことを示している。

(2) 当初の観測予定天体リストにはなかったが、近年急速に進展するジェット研究分野の最新動向を踏まえ、ターゲットとして新たな天体種族「狭輝線 1 型セイファート銀河 (NLS1)」を盛り込むことを決定した。NLS1 はブレーザー、電波銀河につづいてガンマ線望遠鏡 Fermi によってガンマ線活動が確認された第三の AGN 種族であるが、そのジェットの性質は謎に満ちており、近年この種族の構造探査が非常に大きな注目を浴びている。そこで我々は NLS1 ジェット根元の超精密探査という観点から切り込むべく、最も代表的かつ近傍の NLS1 である J0948+0022 と 1H0323+342 について多周波相対 VLBI 観測を実施した。

J0948+0022 については天候不順等により良いデータが取れなかったが、1H0323+342 については大変興味深い結果が得られた。多周波相対 VLBI を用いてこの天体の BH 位置をまず決定し、BH 位置からの距離の関数としてジェットの収束プロファイル調べたところ、ジェットが数千から数十万 R_s に渡ってパラボラ形状に絞り込まれ、その後コニカル形状に変化して収束領域が終了することを発見した。また、得られた収束プロファイルにも

とづきジェット生成地点のサイズを求めると、BHサイズの数十から数百倍大きいことがわかった。これは NLS1 のジェット生成にとって BH のスピンは必ずしも必要ではなく、降着円盤から駆動されている可能性を示唆している。本結果は最初に調査した M87 ジェット (BH 駆動を示唆) とは対照的であり、巨大 BH ジェットの駆動機構や収束領域、スピンの必要性はジェットの規模や環境によって変化することを示唆するものとなった。

ジェット駆動多様性の観測的示唆が得られたのは今回が初めてであり、現在査読論文にまとめている段階である。

(3) 当初の計画では M87 や NLS1 以外にも、もう数天体研究を完了させる予定であったが、本科研費期間内には達成することができなかった。しかし NGC4261、3C84、M84 等についても観測・解析は進んでおり、実際収束プロファイル等に大変インパクトの大きな結果が出始めている。これらの結果は今後迅速に査読論文にまとめていく予定である。

また、多周波相対 VLBI 観測を起点として、様々な派生研究・関連研究が生まれ、多くの重要な関連論文 (すべて本研究代表者が共著に入っている) が出版されたことも本研究の大きな成果の一つであると考えている。

(4) 研究代表者は日本天文学会において 2016 年度研究奨励賞を受賞した。本科研費に基づく研究内容が主要な受賞理由の一つになっており、支援を頂いた日本学術振興会には心から感謝を申し上げます。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 16 件)

Hada, K., The Structure and Propagation of the Misaligned Jet M87, *Galaxies*, 5, 2-9, 2017, 査読有

DOI: 10.3390/galaxies5010002

Nakahara, S., Doi, A., Murata, Y., Hada, K., Nakamura, M., Asada, K., Conical Stream of the Two-Sided Jets in NGC 4261 over the Range of 103-109 Schwarzschild Radii, *Galaxies*, 5, 80-84, 2017, 査読有

DOI: 10.3390/galaxies4040080

Giochetti, M., Marcote, B., Garrett, M. A.; Paragi, Z., Yang, J., Hada, K., Muxlow, T. W. B., Cheung, C. C., FRB 150418: clues to its nature from European VLBI Network and e-MERLIN observations, *Astronomy & Astrophysics*, 593, 16-19, 2016, 査読有

DOI: 10.1051/0004-6361/201629172

Ikeda, S., Tazaki, F., Akiyama, K., Hada, K., Honma, M., PRECL: A new method for interferometry imaging

from closure phase, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 68, 45-1--45-9, 2016, 査読有

DOI: 10.1093/pasj/psw042

Nagai, H., Nakanishi, K., Paladino, R., Hull, C. L. H., Cortes, P., Moellenbrock, G., Fomalont, E., Asada, K., Hada, K., ALMA Science Verification Data: Millimeter Continuum Polarimetry of the Bright Radio Quasar 3C 286, *The Astrophysical Journal*, 824, 132-141, 2016, 査読有

DOI: 10.3847/0004-637X/824/2/132

Koyama, S., Kino, M., Giochetti, M., Doi, A., Giovannini, G., Orienti, M., Hada, K., Ros, E., Niinuma, K., Nagai, H., Savolainen, T., Krichbaum, T. P., Perez-Torres, M. A., Discovery of off-axis jet structure of TeV blazar Mrk501 with mm-VLBI, *Astronomy and Astrophysics*, 586, 113-122, 2016, 査読有

DOI: 10.1051/0004-6361/201526541

Hada, K., Kino, M., Doi, A., Nagai, H., Honma, M., Akiyama, K., Tazaki, F., Lico, R., Giochetti, M., Giovannini, G., Orienti, M., Hagiwara, Y., High-sensitivity 86GHz(3.5mm) VLBI observations of M87: Deep imaging of the jet base at a resolution of 10 Schwarzschild radii, *The Astrophysical Journal*, 817, 131-147, 2016, 査読有

DOI: 10.3847/0004-637X/817/2/131

Niinuma, K., Kino, M., Doi, A., Hada, K., Nagai, H., Koyama, S., Discovery of a wandering radio jet base after a large X-ray flare in the blazar Markarian 421, *The Astrophysical Journal Letters*, 807, 14-18, 2015, 査読有

DOI: 10.1088/2041-8205/807/1/L14

Akiyama, K., Lu, R.-S., Fish, V. L., Doeleman, S. S., Broderick, A. E., Dexter, J., Hada, K., et al., 230GHz VLBI observations of M87: Event-horizon-scale structure during an enhanced very-high-energy gamma-ray state in 2012, *The Astrophysical Journal*, 807, 150-160, 2015, 査読有

DOI: 10.1088/0004-637X/807/2/150

Haga, T., Doi, A., Murata, Y., Sudou, H., Kamenoi, S., Hada, K., Determination of central engine position and accretion disk structure in NGC4261 by core shift measurements, *The Astrophysical Journal*, 807, 15-29, 2015, 査読有

DOI: 10.1088/0004-637X/807/1/15
Koyama, S., Kino, M., Doi, A., Niinuma, K., Hada, K., Nagai, H., Honma, M., Akiyama, K., Giroletti, M., Giovannini, G., et al., Probing the precise location of the radio core in the TeV blazar Mrk 501 with VERA at 43 GHz, Publications of the Astronomical Society of Japan, 67, 1-11, 2015, 査読有

DOI: 10.1093/pasj/psu144

Kino, M., Takahara, F., Hada, K., Akiyama, K., Nagai, H., Sohn, B. W., Magnetization Degree at the Jet Base of M87 Derived from the Event Horizon Telescope Data: Testing the Magnetically Driven Jet Paradigm, The Astrophysical Journal, 803, 30-41, 2015, 査読有

DOI: 10.1017/S174392131500246X

Niinuma, K.; Lee, S.-S., Kino, M., Sohn, B.-W., Akiyama, K., Zhao, G.-Y., Sawada-Satoh, S., Trippe, S., Hada, K., et al., VLBI observations of bright AGN jets with the KVN and VERA Array (KaVA): Evaluation of imaging capability, Publications of the Astronomical Society of Japan, 66, 103-118, 2015, 査読有

DOI: 10.1093/pasj/psu104

Hada, K., Giroletti, M., Kino, M., Giovannini, G., D'Ammando, F., Cheung, C. C., Beilicke, M., Nagai, H., Doi, A., Akiyama, K., et al., A Strong Radio Brightening at the Jet Base of M 87 during the Elevated Very High Energy Gamma-Ray State in 2012, The Astrophysical Journal, 788, 165-177, 2014, 査読有

DOI: 10.1088/0004-637X/788/2/165

Kino, M., Takahara, F., Hada, K., Doi, A., Relativistic Electrons and Magnetic Fields of the M87 Jet on the ~ 10 Schwarzschild Radii Scale, The Astrophysical Journal, 786, 5-12, 2014, 査読有

DOI: 10.1088/0004-637X/786/1/5

Nagai, H., Haga, T., Giovannini, G., Doi, A., Orienti, M., D'Ammando, F., Kino, M., Nakamura, M., Asada, K., Hada, K., Giroletti, M., Limb brightened Jet of 3C 84 Revealed by the 43 GHz Very Long Baseline Array Observation, The Astrophysical Journal, 785, 53-58, 2014, 査読有

DOI: 10.1088/0004-637X/785/1/53

[学会発表](計 20 件)

秦和弘, 高解像度電波観測による活動銀河ジェットの研究, 日本天文学会

2017 春季年会, 2017 年 03 月 15 日~ 03 月 18 日, 九州大学伊都キャンパス(福岡県、福岡市)

秦和弘, 高感度 VLBI 電波観測による M87 ジェットの spine-sheath 構造の検出, 日本天文学会 2017 春季年会, 2017 年 03 月 15 日~ 03 月 18 日, 九州大学伊都キャンパス(福岡県、福岡市)

Hada, K., The East Asian VLBI Network, Black Hole Astrophysics with VLBI - Past, Present and Future, 2017 年 03 月 27 日-03 月 29 日, 国立天文台三鷹(東京都、三鷹市)

Hada, K., An improved view of the M87 jet: radio imaging of the spine-sheath structure, Challenges of AGN Jets, 2017 年 01 月 17 日-01 月 20 日, 国立天文台三鷹(東京都、三鷹市)

Hada, K., Millimeter VLBI with ALMA and Its User Support, ALMA/45m/ASTE Users Meeting 2016, 2016 年 12 月 19 日-12 月 20 日, 国立天文台三鷹(東京都、三鷹市)

Hada, K., Radio Imaging of M87 at low frequencies, EHT Collaboration meeting 2016, 2016 年 11 月 29 日-12 月 03 日, AC Hotel Boston Cambridge (米国、ボストン)

Hada, K., Report on EAVN test imaging observations and future prospects, The 9th EAVN Workshop, 2016 年 11 月 07 日-11 月 11 日, Forest Moon Hotel (中国、貴陽)

秦和弘, EAVN ステータス, 第 14 回水沢 VLBI 観測所ユーザーズミーティング, 2016 年 10 月 03 日-10 月 04 日, 国立天文台三鷹(東京都、三鷹市)

秦和弘, 超高解像度で電波撮像する巨大ブラックホールとジェット, ブラックホールジェット小研究会, 2016 年 09 月 28 日, 東北大学青葉山キャンパス(宮城県、仙台市)

Hada, K., The Structure and Propagation of the Misaligned Jet M87, Blazars through sharp multi wavelength eyes, 2016 年 05 月 30 日-06 月 03 日, Hotel Pueblo Camino Real (スペイン、マラガ)

Hada, K., M87 jet imaged at highest sensitivity: an improved view of the transverse structure, M87 Workshop, 2016 年 05 月 23 日-05 月 27 日, 台湾中央研究院(台湾、台北)

秦和弘, 日韓合同 VLBI 観測網 KaVA による M87 ジェット加速領域の高頻度・高解像度モニター, 日本天文学会春季年会, 2016 年 03 月 14 日-03 月 17 日, 首都大学東京(東京都、八王子市)

Hada, K., Imaging the central $<10R_s$ of

the M87 nucleus with high-sensitivity 86GHz VLBI, ALMA Workshop "Ultra-high-resolution observation with phased-ALMA", 2016年01月13日-01月14日, 国立天文台三鷹(東京都三鷹市)
Hada, K., KaVA: The KVN and VERA Array, IRA colloquium at INAF-IRA, 2015年11月23日, Institute of Radio Astronomy (イタリア、ボローニャ)
秦和弘, VLBI で探る巨大ブラックホールジェット根元観測の最前線 秦和弘, 第30回ブラックホール地平面研究会, 2015年10月10日-10月11日, 山口大学(山口県、山口市)
秦和弘, Science cases with mmVLBI, 第13回水沢 VLBI 観測所ユーズミーティング, 2015年09月24日-09月25日, 国立天文台水沢(岩手県、奥州市)
秦和弘, Progress report on KaVA M87 monitor project, 第13回水沢 VLBI 観測所ユーズミーティング, 2015年09月24日-09月25日, 国立天文台水沢(岩手県、奥州市)
秦和弘, EVN および VLBA を用いた M87 ジェットにおける活動的ノット HST-1 の長期運動モニター, 日本天文学会秋季年会, 2015年09月09日-09月11日, 甲南大学(兵庫県、神戸市)
秦和弘, Imaging the jet base of M87: witnessing the collimation and acceleration site, 8th East-Asia VLBI Workshop, 2015年07月08日-07月10日, 北海道大学(北海道、札幌市)
秦和弘, 秋山和徳, VLBI で探る超巨大ブラックホール探査の最前線, 長野ブラックホール天文教育研究会, 2015年05月30日-05月31日, 長野高専(長野県、長野市)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

取得状況(計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:

種類:
番号:
取得年月日:
国内外の別:

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

秦 和弘 (HADA, Kazuhiro)
国立天文台・水沢 VLBI 観測所・助教
研究者番号: 60724458

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

()

研究者番号:

(4) 研究協力者

本間 希樹 (HONMA, Mareki)
国立天文台・水沢 VLBI 観測所・助教
研究者番号: 20332166

土居 明弘 (DOI, Akihiro)
宇宙科学研究所・助教
研究者番号: 90403641

紀 基樹 (KINO, Motoki)
韓国天文研究院・上席研究員
研究者番号: 70531234

ジオバニーニ ガブリエレ (GIOVANNINI, Gabriele)

ボローニャ大学・教授
研究者番号: なし