

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 8 月 16 日現在

機関番号：82645

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2012～2016

課題番号：24340042

研究課題名(和文)ブラックホール高精度位置決定による活動銀河核の根源的問題の観測的解明

研究課題名(英文)Precise measurements of black holes for studies of active galactic nuclei

研究代表者

土居 明広(DOI, AKIHIRO)

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・助教

研究者番号：90403641

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 8,800,000円

研究成果の概要(和文)：ブラックホールについて、シュバルツシルト半径( $R_s$ )に匹敵する精度で位置決定+BH周辺を撮像するという組み合わせ手法「多周波相対VLBI」により、AGNにおける「3つの根源的問題」の解決に挑んだ。その結果、(1) Sgr A\* や低光度AGNの主エネルギー発生源は、降着円盤か? ジェットか? (2) プレーザーや電波銀河の線放射領域はBHから何 $R_s$ の地点に存在するか? (3) 降着エネルギー開放の現場であるBH近傍1-10000 $R_s$ での質量降着流の空間構造は? という3つの問題について、観測的アプローチから多くの知見を得た。

研究成果の概要(英文)：We tried to solve the "three fundamental problems" of black holes on active galactic nuclei (AGNs) through the "multi-frequency phase-referencing VLBI" method that implements position determination with accuracy comparable to the Schwarzschild radius ( $R_s$ ) in addition to the direct imaging around black holes. As a result, (1) Is the primary energy source of Sgr A\* and low luminosity AGN accretion disks? Jet? (2) Where is gamma-ray emitting areas in blazars and radio galaxies around black holes? (3) Spatial structure of mass accretion flow at the site near a black hole as the site of energy release? We obtained a lot of findings from the observational approach about the three problems.

研究分野：宇宙物理学

キーワード：ブラックホール 活動銀河 銀河 電波天文学 天文学 干渉計 電波干渉計 位相補償

## 1. 研究開始当初の背景

銀河の中心に存在すると考えられる超巨大質量ブラックホール (BH) 周辺の現象の研究について、以下の3つの根源的問題が残っている。

- (1) Sgr A\*や低光度 AGN の主エネルギー発生源は、降着円盤か？ジェットか？
- (2) ブレーザーや電波銀河の線放射領域は BH から何  $R_s$  の地点に存在するか？
- (3) 降着エネルギー開放の現場である BH 近傍  $1-10^4 R_s$  での質量降着流の空間構造は？

上記の3つの問題は、理論的に活発な考察がおこなわれてきたが、観測的には決着がつかない。Very long baseline interferometry (VLBI) は電波帯で、数百マイクロ秒角の撮像性能と、数10マイクロ秒角の位置精度を提供する。これは、近傍銀河の場合、 $10-100R_s$  の空間分解能と、 $1-10R_s$  の位置精度に相当するため、性能としては、調査がおこなえるはずである。それにもかかわらず、これまで上記3つの問題が解けていないのは、電波写真のなかにおける BH の位置を推定する方法がなかったからである。

2010年春、我々は世界で初めて多周波相対 VLBI 観測を実用として成功させ、M87 の BH の精密位置決定を成し遂げた。シンクロトロン電波放射で見えるジェットの根元は、ある地点より上流は吸収により不透明となっており、透明度は周波数に依存する (Lobanov+1998)。測定される「ジェットの見かけの根元 (=最も上流の明るい場所 "コア")」の位置の周波数依存性 ("コアシフト") の外挿により、ジェットの源流地点 (=BH の位置) を決定できる。ここで重要なポイントは、多周波相対 VLBI 観測は、撮像も同時におこなっているため、放射で見える現象と BH との相対位置関係が、 $1-100 R_s$  のスケール(天体によっては $\sim 1000 R_s$ )の空間構造やその変化・スペクトル分布とともに明らかになる、ということである。

## 2. 研究の目的

3つの根源的問題について、以下のような観点での研究を目的にする。

- (1) Sgr A\*や低光度 AGN の主エネルギー発生源は、降着円盤か？ジェットか？

我々の銀河系中心 Sgr A\* をはじめ、宇宙の AGN の大部分は、低質量降着率の BH に駆動されていると考えられている。しかし、電波帯を含めた主なエネルギー放射源は何か、この根源的問題に未だ決着がつかない。ジェット (Falcke+1999) ならば、BH と「ジェットの見かけの根元」との間に、十分に検出可能な位置ズレ (数  $10-100$  マイクロ秒角) が見込まれる。一方、ADAF や RIAF モデルで記述される降着円盤 (Narayan+1994, Yuan+2003) であれば、そのような現象は観測されない。我々は、多周波相対 VLBI の手法を、重要な複数の低光度 AGN に適用することで、世界で初めて、降着円盤 / ジェットの明確な切り分けを試みる。

- (2) ブレーザーや電波銀河の線放射領域は BH から何  $R_s$  の地点に存在するか？

$\gamma$  線観測衛星 Fermi により、多数のブレーザー天体のみならず、M87 を含む電波銀河からも線が検出され、ジェットにおける高エネルギー光子の放射メカニズムをめぐる議論は活発化した。解明の鍵は、線生成場所の BH からの位置を決定することである。本研究では、多周波相対 VLBI の手法を適用し、重要な複数天体について、BH との位置関係を測定しながら、ジェットの最上流 $\sim 10-1000 R_s$  以内の現象を電波帯で直接撮像し、線フラックス変動と合わせて考察し、解明する。

- (3) 降着エネルギー開放の現場である BH 近傍  $1-10^4 R_s$  での質量降着流の空間構造は？

AGN の駆動メカニズムである BH への質量降着という根源的なアイデアは、その現場を観測で直接撮像して観測できた例はまだ無い。低光度 AGN の降着円盤は、幾何学的に厚く光学的に薄い降着プラズマでモデル化されており、その電子密度と電子温度の半径プロファイルが理論的に推定されている。実際に我々は、低光度の電波銀河 NGC 4261 に対して、多周波相対 VLBI の手法を適用し、プラズマによる電波吸収の空間分布と BH との位置関係を決定することに成功し、世界で初めて降着プラズマの空間構造プロファイルを観測的に導きだした (Haga, Doi, Hada, Murata, et al.)。本申請では、この成功例を基に、他に有望な複数天体について研究をおこなう。

## 3. 研究の方法

前に述べた M87 で挙げた我々の成果は、BH を精密位置決定したところまで、の報告で

あった。しかし、この手法は、3つの根源的問題に迫ることのできる強力なアプローチである。我々はこの手法を用い、他の有名天体についても観測し、根源的問題(1)(2)(3)を解明する。

#### 4. 研究成果

##### (1) 初年度

- 当初の計画通り、解析環境と解析チームを編成した。
- 重要3天体(Cen A, 3C 84, Cyg A)の観測時間を獲得した。
- 多くの査読付き論文を出版した。

得られた科学的成果は、当該年度では特に、(2)の問題に迫る研究に主な進展があった。長年の謎となっているBHと線放射領域と電波コアの関係は、画的ではなく、天体によって様々であることが、位置天文を合わせた直接撮像を数多く重ねることにより明らかになってきた。ジェット構造の多層性・磁場形状・見込み角を読み解くことが鍵となり、次世代の高周波VLBI観測への展望が見えてきた。

##### (2) 第二年度

- 低高度AGNの質量降着に関するM104, M87の観測成果について、学術論文として出版した。このうちM104は報道発表される大きな成果となった。
- ジェットの加速収束機構に関する3C 84の観測結果について、学術論文として出版した。
- Workshop "Relativistic jets in AGNs 2013"を主催した(2013年11月22日@国立天文台三鷹)。
- 線天体3C84, M87, PKS 1502+036, Markarian 421について論文出版・提出に至る成果が生まれ、高エネルギー放射の起源についてさらに理解が深まるとともに、ジェットの収束機構の解明に繋がる大きな観測的進展があった。

H25年度では特に(1)のテーマについて、大きな進捗があった。報道発表のM104の成果はその代表にあたり、H24年度のNGC 4258の成果と合わせ、低光度AGN電波放射の主エネルギー源がジェットであることをほぼ解明したと考えられる。また、H24年度にひきつ

づき(2)の課題についても特徴的な進展がみられ、3C 84における多層ジェットの直接撮像による発見、M87のジェット収束・加速機構の現場を位置天文観測の手法も活かして切り込んだ成果など、本研究手法を活かしたユニークなアプローチが結実した年度でもあった。また、高速度アウトフローを伴った遠方の活動銀河核についても2編の成果が挙がり、課題(3)の解明に向けて、準備的なステップを踏めた。

##### (3) 第三年度

- 質量降着流の空間構造に直接撮像で迫る研究に関するNGC 4261と3C84の観測結果について学術論文として出版した。
- ジェット径の空間発展プロファイルとガンマ線放射源調査のアプローチから、ジェットの加速・収束メカニズムに迫る研究について、Mrk 501, Mrk 421の成果について学術論文として発表した。M87については新たなデータを取得できた。
- 3C120について時間領域を加えたアプローチで研究をおこない学術論文として出版・学会発表をおこなった。また、230GHzでのVLBI観測からM87のBH近傍におけるジェットの理論的研究で学術論文として出版した。また、ALMAでの低光度AGNについての観測を新たにおこなった。

H26年度では、課題(3)についての研究がNGC 4261についておこなわれ、学術論文が受理された。この結果は、光学的に厚く幾何学的に薄い円盤が内縁が欠落した状態で存在し、光学的に薄く幾何学的に厚い高温降着流が同時に存在するという、理論モデルで提唱されてきたことが直接的に観測で初めて明らかになることができたという、大きな成果である。また、課題(1)についても新たにM84について、低光度AGN電波放射の主エネルギー

一源がジェットであることをほぼ解明した。さらに、課題(2)についても、M87 および 3C120 について、線放射領域についてこれまででない定量的な結果を得ることができたとともに、Mrk 421, Mrk 501 での研究により新たな興味深い現象を提示することができた。

#### (4) 第4年度

- ガンマ線放射 AGN のジェット位置天文観測についての成果が結実し、MRK501, MRK 421, 3C84, OJ287 についての学術論文が出版された。
- 狭輝線セファート1型のVLBI観測結果についても学術論文の出版に至った (MRK1388, VLBI サーベイ)

H27年度では、課題(2)(3)についてさらなる進展があった。ブラックホールのシュバルツシルト半径の10倍もの空間分解能での調査にまでおよび、またブラックホール近傍を時間の次元と空間の次元の組み合わせから迫る手法においても成果をあげた。

#### (5) 第5年度

- ALMA 観測を用いた研究について、NGC985 のコロナ放射領域の電波放射の検出の可能性について結果が得られ、論文出版に至った。
- 活動銀河核ジェットのエネルギー源について、BH スピンの可能性を検証した研究について、論文出版に至った。

H28年度では、課題(1)の降着流におけるエネルギー放射について新たな展開があった。すなわち、電波帯からコロナ領域の現象についてアプローチできた可能性が得られた。これは新たな観測装置 ALMA による更なる研究の進展が見込まれる研究成果である。

#### 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 60 件)

[1] Doi, Akihiro; Oyama, Tomoaki; Kono, Yusuke; Yamauchi, Aya; Suzuki, Syunsaku; Matsumoto, Naoko; Tazaki, Fumie, A Radio Detection Survey of Narrow-Line Seyfert 1 Galaxies using Very-Long-Baseline Interferometry at 22 GHz, Publications of the Astronomical Society of Japan, Volume 68, Issue 5, id.73 7 pp. (2016), DOI: 10.1093/pasj/psw040

[2] Doi, Akihiro; Inoue, Yoshiyuki, High-frequency excess in the radio continuum spectrum of the type-1 Seyfert galaxy NGC 985, Publications of the Astronomical Society of Japan, Volume 68, Issue 4, id.56 10 pp., (2016), DOI: 10.1093/pasj/psw052

[3] Koyama, S.; Kino, M.; Giroletti, M.; Doi, A.; Giovannini, G.; Orienti, M.; Hada, K.; Ros, E.; Niinuma, K.; Nagai, H.; Savolainen, T.; Krichbaum, T. P.; Pérez-Torres, M. Á., Discovery of off-axis jet structure of TeV blazar Mrk 501 with mm-VLBI, Astronomy & Astrophysics, Volume 586, id. A113, 10 pp., (2016), DOI: 10.1051/0004-6361/201526541

[4] Hada, Kazuhiro; Kino, Motoki; Doi, Akihiro; Nagai, Hiroshi; Honma, Mareki; Akiyama, Kazunori; Tazaki, Fumie; Lico, Rocco; Giroletti, Marcello; Giovannini, Gabriele; Orienti, Monica; Hagiwara, Yoshiaki, High-sensitivity 86 GHz (3.5 mm) VLBI Observations of M87: Deep Imaging of the Jet Base at a Resolution of 10 Schwarzschild Radii, The Astrophysical Journal, Volume 817, Issue 2, article id. 131, 17 pp. (2016), DOI: 10.3847/0004-637X/817/2/131

[5] Doi, Akihiro; Wajima, Kiyooki; Hagiwara, Yoshiaki; Inoue, Makoto, A Fanaroff-Riley Type I Candidate in Narrow-Line Seyfert 1 Galaxy Mrk 1239, The Astrophysical Journal Letters, 798, L30, 5pp., (2015), DOI: 10.1088/2041-8205/798/2/L30

[6] Doi, Akihiro, An obscured narrow-line Seyfert 1 galaxy candidate, Mrk 1388 with nonthermal jets, Publications of the Astronomical Society of Japan, 67, id.157 pp., (2015), DOI: 10.1093/pasj/psu147

[7] Tanaka, Y. T.; Doi, A.; Inoue, Y.; Cheung, C. C.; Stawarz, L.; Fukazawa, Y.; Gurwell, M. A.; Tahara, M.; Kataoka, J.; Itoh, R., Six Years of Fermi-LAT and Multi-Wavelength Monitoring of the Broad-Line Radio Galaxy 3c 120: Jet Dissipation At Sub-Parsec Scales from the Central Engine, The Astrophysical Journal

Letters, 799, L18, 6 pp., (2015), DOI: 10.1088/2041-8205/799/2/L18

[8] Koyama, Shoko; Kino, Motoki; Doi, Akihiro; Niinuma, Kotaro; Hada, Kazuhiro; Nagai, Hiroshi; Honma, Mareki; Akiyama, Kazunori; Giroletti, Marcello; Giovannini, Gabriele; Orienti, Monica; Isobe, Naoki; Kataoka, Jun; Paneque, David; Kobayashi, Hideyuki; Asada, Keiichi, 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, id.6711 pp., (2015), DOI: 10.1093/pasj/psu144

[9] 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, Volume 807, Issue 1, article id. L14, 5 pp. (2015), DOI: 10.1088/2041-8205/807/1/L14

[10] Izumi, Takuma; Kohno, Kotaro; Aalto, Susanne; Doi, Akihiro; Espada, Daniel; Fathi, Kambiz; Harada, Nanase; Hatsukade, Bunyo; Hattori, Takashi; Hsieh, Pei-Ying; Ikarashi, Soh; Imanishi, Masatoshi; Iono, Daisuke; Ishizuki, Sumio; Krips, Melanie; Martín, Sergio; Matsushita, Satoki; Meier, David S.; Nagai, Hiroshi; Nakai, Naomasa; Nakajima, Taku; Nakanishi, Kouichiro; Nomura, Hideko; Regan, Michael W.; Schinnerer, Eva; Sheth, Kartik; Takano, Shuro; Tamura, Yoichi; Terashima, Yuichi; Tosaki, Tomoka; Turner, Jean L.; Umehata, Hideki; Wiklind, Tommy, ALMA Observations of the Submillimeter Dense Molecular Gas Tracers in the Luminous Type-1 Active Nucleus of NGC 7469, The Astrophysical Journal, Volume 811, Issue 1, article id. 39, 15 pp. (2015), DOI: 10.1088/0004-637X/811/1/39

[11] Takafumi Haga, Akihiro Doi, Yasuhiro Murata, Hiroshi Sudou, Seiji Kamenoi, Kazuhiro Hada, Determination of Central Engine Position and Accretion Disk Structure in NGC 4261 by Core Shift Measurements, The Astrophysical Journal, 807, id.15, (2015), DOI: 10.1088/0004-637X/807/1/15

[12] 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, id. 53, 6 pp., (2014), DOI: 10.1088/0004-637X/785/1/53

[13] Inoue, Yoshiyuki; Doi, Akihiro, Unveiling the nature of coronae in active galactic nuclei through submillimeter observations, Publications of the Astronomical Society of Japan, 66, id. L86 pp., (2014), DOI: 10.1093/pasj/psu079

[14] Kino, M.; Takahara, F.; Hada, K.; Doi, A., Relativistic Electrons and Magnetic Fields of the M87 Jet on the  $\sim 10$  Schwarzschild Radii Scale, The Astrophysical Journal, 786, id. 5, 8 pp., (2014), DOI: 10.1088/0004-637X/786/1/5

[15] Hada, K.; Giroletti, M.; Kino, M.; Giovannini, G.; D'Ammando, F.; Cheung, C. C.; Beilicke, M.; Nagai, H.; Doi, A.; Akiyama, K.; Honma, M.; Niinuma, K.; Casadio, C.; Orienti, M.; Krawczynski, H.; Gomez, J. L.; Sawada-Satoh, S.; Koyama, S.; Cesarini, A.; Nakahara, S.; Gurwell, M. A., 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, id.165, 13 pp., (2014), DOI: 10.1088/0004-637X/788/2/165

[16] Niinuma, Kotaro; Lee, Sang-Sung; Kino, Motoki; Sohn, Bong Won; Akiyama, Kazunori; Zhao, Guang-Yao; Sawada-Satoh, Satoko; Trippe, Sascha; Hada, Kazuhiro; Jung, Taehyun; Hagiwara, Yoshiaki; Dodson, Richard; Koyama, Shoko; Honma, Mareki; Nagai, Hiroshi; Chung, Aeree; Doi, Akihiro; 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, id.10316 pp., (2014), DOI: 10.1093/pasj/psu104

[17] Itoh, Ryosuke; Tanaka, Yasuyuki T.; Akitaya, Hiroshi; Uemura, Makoto; Fukazawa, Yasushi; Inoue, Yoshiyuki; Doi, Akihiro; et al., Variable optical polarization during high state in  $\gamma$ -ray loud, narrow-line Seyfert 1 galaxy 1H 0323+342, Publications of the Astronomical Society of Japan, 66, id.1088 pp., (2014), DOI: 10.1093/pasj/psu095

〔学会発表〕(計 38 件)

[1] 土居明広、田中康之、井上芳幸, 3C 120: ブラックホールと線放射領域とジェット生成領域と電波コアの位置関係, 日本天文学会, 2015年03月19日~2015年03月22日, 国際基督教大学

[2] 秦和弘, 紀基樹, 永井洋, 本間希樹, 秋山和徳, 田崎文得, 萩原喜昭, 土居明広,

G.Giovannini, M.Giroletti,  
VLBA+GBT@86GHz による M87 ジェット生成領域  
の高分解能・高解像度, 日本天文学会, 2015  
年 03 月 19 日~2015 年 03 月 22 日, 国際基督  
教大学

[3] 土居明広「超巨大ブラックホールと電波  
ジェット活動の関係」、日本天文学会春季年  
会、2013 年 3 月 22 日、埼玉大学

[4] 土居明広、秦和弘、「ALMA cycle-0 で捉  
えたソンプレロ銀河 (M104) の超巨大質量  
ブラックホール周辺 10 シュバルツシルト  
半径付近からの電波放射」、日本天文学会春  
季年会、2013 年 3 月 21 日、埼玉大学

〔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: なし

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

土居 明広 (DOI, Akihiro)

宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・  
助教

研究者番号: 90403641

### (2) 研究分担者

永井洋 (NAGAI, Hiroshi)

国立天文台・チリ観測所・特任准教授

研究者番号: 00455198

### (3) 連携研究者

萩原喜昭 (HAGIWARA Yoshiaki)

東洋大学・文学部・准教授

研究者番号: 60399300

### (4) 研究協力者

( )