

令和 3 年 6 月 9 日現在

機関番号：32613

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K03656

研究課題名（和文）一般相対論的輻射輸送計算と電波VLBI観測で探るブラックホールジェットの駆動機構

研究課題名（英文）Study of driving mechanism of black hole jets by general relativistic radiative transfer and VLBI observations

研究代表者

紀 基樹 (Kino, Motoki)

工学院大学・工学部・講師

研究者番号：70531234

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、宇宙ジェット駆動の鍵と目される物理量のひとつ「ブラックホールのスピン」に制限をつける理論的手法の確立を目指し、単純化されたブラックホールジェットモデルからの電波放射に対して一般相対論的效果を取り入れた輻射輸送計算を行った。その結果、ブラックホールスピンの速い場合、カー時空における慣性系の引きずり効果により、光子リングの中心と回転円盤の最内安定円軌道リングの中心との間に位置ずれが生じ、両リングの間に三日月影の構造が発生することを突き止めた。さらに、スペースVLBIを含む次世代EHTを想定した画像シミュレーションを行い、三日月影の検出可能性を議論した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

私たちイベントホライズンテレスコープ国際コラボレーションは、M87ブラックホールシャドウの電波VLBI観測に成功し、人類が初めて目にするブラックホールシャドウの画像とその科学成果を示す論文を発表した。このM87ブラックホールシャドウの画像は、専門家非専門家を問わず世界中の人々の宇宙やブラックホールに関する関心を大いに高めた。本研究は、まさにこのM87ブラックホールシャドウとそれを縁取る光子リングの成り立ちと、それに深く関連する宇宙ジェットの駆動メカニズムの謎を明らかにすることを目指したものであり、その学術的意義、社会的意義はどちらも極めて高いと言える。

研究成果の概要（英文）：In this study, we performed general relativistic radiation transport calculations for radiation from a simplified black hole jet model, aiming to establish a theoretical method to put a limit on the black hole spin, which is a key physical quantity for driving space jets. We found that when the black hole spin is fast, the dragging effect of the inertial system in Kerr space-time causes an offset between the center of the photon ring and the center of the innermost stable circular orbital ring of the rotating disk, and a dark crescent structure is generated between the two rings. We simulated the theoretical image assuming the next generation EHT including space VLBI, and showed the possibility of detecting the dark crescent.

研究分野：天体物理学

キーワード：ブラックホール 一般相対論 プラズマ ジェット 活動銀河核 VLBI

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

活動銀河中心核から噴出する相対論的ジェットは、その根本にあるブラックホールが動力源と目されているが、その噴出メカニズムは謎に包まれている。研究開始当初は、イベントホライズンテレスコープ(以下 EHT)国際コラボレーションによるブラックホールシャドウの撮影はまだ実現しておらず、ジェット噴出口(根本)の物理状態についてもよく分かっていなかった。そこでまず、私たちは観測されるシンクロトロン放射の自己吸収過程(以下 SSA)に対して不透明となる領域の「磁場エネルギー密度」と「電子エネルギー密度」の縮退を解く手法を確立し、初期 EHT による M87 観測データ(ピジビリティ振幅のみのデータ)に適用した。その結果、ジェット根本では「磁場エネルギー密度」が「電子エネルギー密度」を凌駕していることが分かった(紀他 2015[1])。こうして、ジェット根本の物理量を推定する研究をキックオフした。

2. 研究の目的

先行研究の紀他(2015)[1]に、ブラックホールのスピンによる一般相対論効果は含まれていなかった。そこで、一般相対論効果を考慮に入れた理論モデルを用い、ジェット噴出メカニズムの鍵を握る3つの物理量「ブラックホールのスピン」、「磁場エネルギー密度」、「電子エネルギー密度」の縮退をほどこ理論的な手法を確立することが本研究の目的である。

3. 研究の方法

研究分担者の川島氏が開発した計算コード RAIKOU を用いて一般相対論的輻射輸送計算を実行し、得られる理論予言画像と複数の周波数帯の VLBI 観測データと比較して上述の物理量の縮退をほどこ手法を確立する。計算コードは光子軌道ソルバーと輻射輸送ソルバーの2つのモジュールで構成されている。

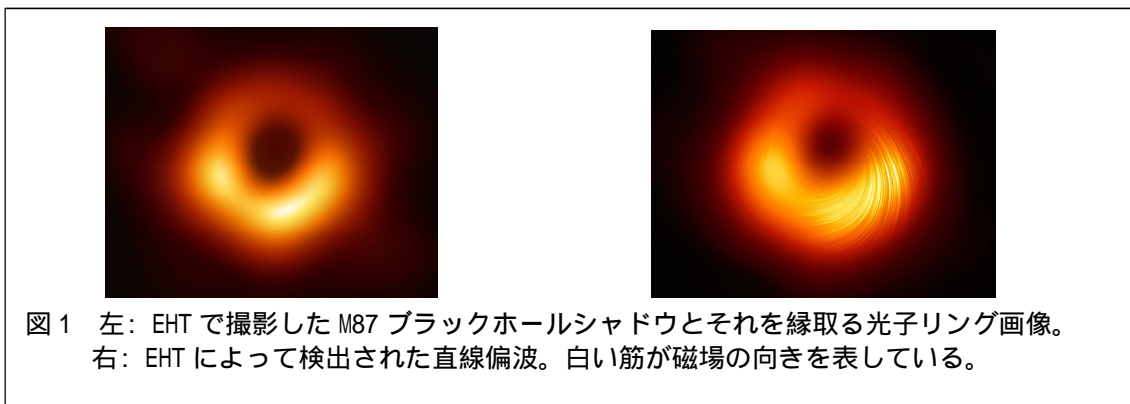
4. 研究成果

(1)EHT による M87 ブラックホールシャドウ撮影と直線偏波の検出：

ブラックホール近傍では光(電波)が曲げられたり捕獲されたりして、中心部に黒い穴(ブラックホールシャドウ)が生じることが理論的に予想されている。これを観測的に捉えるために、楕円銀河 M87 中心部を EHT で観測した。その結果、直径 42 ± 3 マイクロ秒角の非対称な明るい光子リングの撮影に成功した(図1左)。得られた画像はカー・ブラックホールの予想と整合的である。リングサイズから、ブラックホール質量が65億倍太陽質量と推定された。リング光度の非対称性は、ブラックホール周りを回転するプラズマからの放射の相対論的ビーミングで説明できる[2]。

EHT コラボレーションによる解析が継続され、M87 中心部の直線偏波成分が初検出に成功した(図1右)。分解された直線偏波率は、リングの南西部で最大となり、約15%のレベルまで達しており、偏波はほぼ方位角方向に配列されている。本研究では、コンパクトな偏波領域の特性を定量的に測定し、EHT による1週間の観測で偏光した光源構造が時間的に変化していることを明らかにした[3]。

また、この観測で得られた偏波画像と一般相対論的磁気流体力学(GRMHD)シミュレーションの理論予言画像ライブラリとの定量的な比較テストにより EHT 観測の特徴を説明できる物理モデルを特定した。比較テストにパスした GRMHD モデルは、ほぼすべて磁氣的に捕らえられた降着円盤(Magnetically Arrested Disk: 以下 MAD)モデルであった[4]。



(2) 三日月影の理論予言:

一般相対論的輻射輸送計算を行い、230GHz 帯の M87 のブラックホール(BH)影像について、SSA 効果を適切に考慮して調べた。ブラックホールスピンの高い場合、対応する BH 影像は、カー時空における慣性系の引きずり効果により、光子リングの中心と、サブケプラー回転円盤の最内安定円軌道(以下 ISCO)にある SSA に対して不透明のリングの中心との間に位置ずれが生じる。その結果、BH 影像では、光子リングと SSA 厚の ISCO リングの間に、三日月上の影構造が生じることがわかった。三日月影のスケールサイズは BH のスピンに応じて大きくなり、その幅は BH のスピンの最大値の 99.8%のときに重力半径の約 2 倍にまで達する。この三日月影は、高回転の BH の新しい特徴と考えられる。この特徴は、比較的質量降着率の高いフレア状態で現れることが予想される。私たちは、スペース VLBI を含む次世代 EHT を想定して理論画像の再構成をシミュレーションし、次世代 EHT が三日月影を検出できる可能性を示した。円盤内の「磁場エネルギー密度」と「電子エネルギー密度」については、先行研究の紀他(2015)の結論と同様に、ISCO スケールで「磁場エネルギー密度」が「電子エネルギー密度」を凌駕しているという結果を得た。

(3)よどみ面放射の理論予言:

一般相対論的輻射輸送計算を行い、ジェットファンネル内のよどみ面底部に発生する可能性があるプラズマリング(以下「よどみリング」と呼ぶ)からのシンクロトロン放射が、EHT2017 で観測された M87 のリング像を説明できるかどうかを調べた。この画像は、よどみリングの直接画像と、ブラックホール(BH)の重力による強い偏向を介して形成されたリング画像(我々はこれを「準光子リング」と呼ぶ)から構成されている。BH のスピンの $a=0.99$ のモデルでは、カウンタージェットと準光子リングの直接像は直径約 40 マイクロ秒角の光子リングにほぼ一致し、アプローチジェットはその内側に小さなリング像を作るが、EHT2017 はアレイが疎なため内側のリング像は検出できない。よって、M87 のフォトンリング像によどみリングが重なっている可能性がある。将来、次世代 EHT を用いてよどみリングを観測することによって、ジェットファンネルへのプラズマ注入機構へ制限を与えることが期待される。

(4) EHT と多波長準同時観測で探る磁場強度:

2017 年 4 月の M87 観測では、スペース・地上の複数の望遠鏡と協力して大規模な多波長準同時キャンペーン観測を実施した。これによって得られた最も完全な M87 の多波長準同時観測スペクトルのデータを論文に投稿した(2021 年 4 月に受理)。単一様領域の仮定の元では、観測される線放射は EHT のミリ波帯放射領域で発生するという説が除外され、放射領域が多層構造であることが示唆された [7]。

以上の通り、一般相対論的輻射輸送計算に基づく理論予言画像と VLBI 観測データとの比較によって「ブラックホールのスピン」、「磁場エネルギー密度」、「電子エネルギー密度」の縮退をほどく理論的手法の確立に向けて大きな前進ができた。ただし、本研究の結果はあくまでもブラックホール降着流とジェット噴出流に対して単純化の仮定を課し、さらにブラックホールスピンの速いケースのみに成り立つ方法であることに注意が必要である。

今後の研究においては、1. 単純化の仮定を外したジェット降着流モデル 2. 偏波放射の性質を取り入れたモデル 3. ブラックホールのスピンの小さい天体のモデルへと順次改良と拡張を進めていくことが重要である。

<引用文献>

- [1] Kino, M., Takahara, F., Hada, K., et al. 2015, ApJ, 803, 30.
- [2] Event Horizon Telescope Collaboration, Akiyama, K., Alberdi, A., et al. 2019, ApJL, 875, L1.
- [3] Event Horizon Telescope Collaboration, Akiyama, K., Algaba, J.-C., et al. 2021, ApJL, 910, L12.
- [4] Event Horizon Telescope Collaboration, Akiyama, K., Algaba, J.-C., et al. 2021, ApJL, 910, L13.
- [5] Kawashima, T., Kino, M., & Akiyama, K. 2019, ApJ, 878, 27.
- [6] Kawashima, T., Toma, K., Kino, M., et al. 2021, ApJ, 909, 168.
- [7] EHT MWL Science Working Group, Algaba, J.-C., Anczarski, J., et al. 2021, ApJL, 911, L11.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計43件（うち査読付論文 43件 / うち国際共著 28件 / うちオープンアクセス 11件）

1. 著者名 Roelofs F. et al.	4. 巻 636
2. 論文標題 SYMBA: An end-to-end VLBI synthetic data generation pipeline	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Astronomy & Astrophysics	6. 最初と最後の頁 A5 ~ A5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/0004-6361/201936622	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Wajima Kiyooki, Kino Motoki, Kawakatu Nozomu	4. 巻 895
2. 論文標題 Constraints on the Circumnuclear Disk through Free-Free Absorption in the Nucleus of 3C 84 with KaVA and KVN at 43 and 86 GHz	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 35 ~ 35
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab88a0	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Broderick Avery et al.	4. 巻 897
2. 論文標題 THEMIS: A Parameter Estimation Framework for the Event Horizon Telescope	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 139 ~ 139
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab91a4	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Gold Roman et al.	4. 巻 897
2. 論文標題 Verification of Radiative Transfer Schemes for the EHT	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 148 ~ 148
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab96c6	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kim Jae-Young et al.	4. 巻 640
2. 論文標題 Event Horizon Telescope imaging of the archetypal blazar 3C 279 at an extreme 20 microarcsecond resolution	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Astronomy & Astrophysics	6. 最初と最後の頁 A69 ~ A69
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/0004-6361/202037493	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Isobe Naoki, Sunada Yuji, Kino Motoki, Koyama Shoko, Tashiro Makoto, Nagai Hiroshi, Pearson Chris	4. 巻 899
2. 論文標題 Herschel SPIRE Discovery of Far-infrared Excess Synchrotron Emission from the West Hot Spot of the Radio Galaxy Pictor A	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 17 ~ 17
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab9d1c	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Doi Akihiro, Kino Motoki, Kawakatu Nozomu, Hada Kazuhiro	4. 巻 496
2. 論文標題 The radio-loud narrow-line Seyfert 1 galaxy 1H 0323+342 in a galaxy merger	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 1757 ~ 1765
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/staa1525	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Wielgus Maciek et al.	4. 巻 901
2. 論文標題 Monitoring the Morphology of M87* in 2009?2017 with the Event Horizon Telescope	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 67 ~ 67
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/abac0d	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Lee Jee Won, Lee Sang-Sung, Algaba Juan-Carlos, Hodgson Jeffrey, Kim Jae-Young, Park Jongho, Kino Motoki, Kim Dae-Won, Kang Sincheol, Yoo Sungmin, Kim Sang Hyun, Gurwell Mark	4. 巻 902
2. 論文標題 Interferometric Monitoring of Gamma-Ray Bright AGNs: OJ 287	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 104 ~ 104
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/abb4e5	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Psaltis Dimitrios et al.	4. 巻 125
2. 論文標題 Gravitational Test beyond the First Post-Newtonian Order with the Shadow of the M87 Black Hole	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 1104-1104
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.125.141104	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Park Jongho, Hada Kazuhiro, Nakamura Masanori, Asada Keiichi, Zhao Guangyao, Kino Motoki	4. 巻 909
2. 論文標題 Jet Collimation and Acceleration in the Giant Radio Galaxy NGC 315	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 76 ~ 76
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/abd6ee	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kawashima Tomohisa, Toma Kenji, Kino Motoki, Akiyama Kazunori, Nakamura Masanori, Moriyama Kotaro	4. 巻 909
2. 論文標題 A Jet-bases Emission Model of the EHT2017 Image of M87*	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 168 ~ 168
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/abd5bb	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Akiyama Kazunori et al.	4. 巻 910
2. 論文標題 First M87 Event Horizon Telescope Results. VII. Polarization of the Ring	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Letters	6. 最初と最後の頁 L12 ~ L12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/abe71d	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Akiyama Kazunori et al.	4. 巻 910
2. 論文標題 First M87 Event Horizon Telescope Results. VIII. Magnetic Field Structure near The Event Horizon	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Letters	6. 最初と最後の頁 L13 ~ L13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/abe4de	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Goddi Ciriaco et al.	4. 巻 910
2. 論文標題 Polarimetric Properties of Event Horizon Telescope Targets from ALMA	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Letters	6. 最初と最後の頁 L14 ~ L14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/abee6a	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 The Event Horizon Telescope Collaboration, Akiyama Kazunori et al.	4. 巻 875
2. 論文標題 First M87 Event Horizon Telescope Results. I. The Shadow of the Supermassive Black Hole	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 L1 ~ L1
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/ab0ec7	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 The Event Horizon Telescope Collaboration, Akiyama Kazunori et al.	4. 巻 875
2. 論文標題 First M87 Event Horizon Telescope Results. II. Array and Instrumentation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 L2~L2
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/ab0c96	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 The Event Horizon Telescope Collaboration, Akiyama Kazunori et al.	4. 巻 875
2. 論文標題 First M87 Event Horizon Telescope Results. III. Data Processing and Calibration	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 L3~L3
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/ab0c57	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 The Event Horizon Telescope Collaboration, Akiyama Kazunori et al.	4. 巻 875
2. 論文標題 First M87 Event Horizon Telescope Results. IV. Imaging the Central Supermassive Black Hole	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 L4~L4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/ab0e85	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 The Event Horizon Telescope Collaboration, Akiyama Kazunori et al.	4. 巻 875
2. 論文標題 First M87 Event Horizon Telescope Results. V. Physical Origin of the Asymmetric Ring	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 L5~L5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/ab0f43	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 The Event Horizon Telescope Collaboration, Akiyama Kazunori et al.	4. 巻 875
2. 論文標題 First M87 Event Horizon Telescope Results. VI. The Shadow and Mass of the Central Black Hole	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 L6 ~ L6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/ab1141	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Park Jongho, Lee Sang-Sung, Kim Jae-Young, Hodgson Jeffrey A., Trippe Sascha, Kim Dae-Won, Algaba Juan-Carlos, Kino Motoki, Zhao Guang-Yao, Lee Jee Won, Gurwell Mark A.	4. 巻 877
2. 論文標題 Ejection of Double Knots from the Radio Core of PKS 1510?089 during the Strong Gamma-Ray Flares in 2015	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 106 ~ 106
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab1b27	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Kawashima Tomohisa, Kino Motoki, Akiyama Kazunori	4. 巻 878
2. 論文標題 Black Hole Spin Signature in the Black Hole Shadow of M87 in the Flaring State	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 27 ~ 27
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab19c0	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Lee Taeseok, Trippe Sascha, Kino Motoki et al.	4. 巻 486
2. 論文標題 Jet kinematics of the quasar 4C+21.35 from observations with the KaVA very long baseline interferometry array	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 2412 ~ 2421
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stz970	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Doi Akihiro, Nakahara Satomi, Nakamura Masanori, Kino Motoki, Kawakatu Nozomu, Nagai Hiroshi	4. 巻 487
2. 論文標題 Radio jet structures at ~ 100 parsec and larger scales of the γ -ray-emitting narrow-line Seyfert 1 galaxy PMN J0948+0022	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 640-649
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stz1290	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Porth Oliver, Chatterjee Koushik, Narayan Ramesh and EHT collaboration	4. 巻 243
2. 論文標題 The Event Horizon General Relativistic Magnetohydrodynamic Code Comparison Project	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Supplement Series	6. 最初と最後の頁 26 ~ 26
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4365/ab29fd	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Nagai H., Onishi K., Kawakatu N., Fujita Y., Kino M., Fukazawa Y., Lim J., Forman W., Vrtilek J., Nakanishi K., Noda H., Asada K., Wajima K., Ohya Y., David L., Daikuhara K.	4. 巻 883
2. 論文標題 The ALMA Discovery of the Rotating Disk and Fast Outflow of Cold Molecular Gas in NGC 1275	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 193 ~ 193
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab3e6e	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Koyama Shoko, Kino Motoki, Doi Akihiro, Niinuma Kotaro, Giroletti Marcello, Paneque David, Akiyama Kazunori, Giovannini Gabriele, Zhao Guang-Yao, Ros Eduardo, Kataoka Jun, Orienti Monica, Hada Kazuhiro, Nagai Hiroshi, Isobe Naoki, Kobayashi Hideyuki, Honma Mareki, Lico Rocco	4. 巻 884
2. 論文標題 Stable Radio Core of the Blazar Mrk 501 during High-energy Active State in 2012	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 132 ~ 132
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab4260	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Algaba J. C., Rani B., Lee S. S., Kino M., Park Jongho, Kim Jae-Young	4. 巻 886
2. 論文標題 Exploring the Morphology and Origins of the 4C 38.41 Jet	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 85 ~ 85
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab4b45	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Park Jongho, Hada Kazuhiro, Kino Motoki et al.	4. 巻 887
2. 論文標題 Kinematics of the M87 Jet in the Collimation Zone: Gradual Acceleration and Velocity Stratification	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 147 ~ 147
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab5584	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Zhao, Guang-Yao; Jung, Taehyun; Sohn, Bong Won; Kino, Motoki et al.	4. 巻 52
2. 論文標題 Source-Frequency Phase-Referencing Observation of AGNS with KAVA Using Simultaneous Dual-Frequency Receiving	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of the Korean Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 23-30
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5303/JKAS.2019.52.1.23	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Park Jongho, Hada Kazuhiro, Kino Motoki, Nakamura Masanori, Ro Hyunwook, Trippe Sascha	4. 巻 871
2. 論文標題 Faraday Rotation in the Jet of M87 inside the Bondi Radius: Indication of Winds from Hot Accretion Flows Confining the Relativistic Jet	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 257 ~ 257
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aaf9a9	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Issaoun S., Johnson M. D., Blackburn L. et al.	4. 巻 871
2. 論文標題 The Size, Shape, and Scattering of Sagittarius A* at 86 GHz: First VLBI with ALMA	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 30 ~ 30
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aaf732	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Nakamura Masanori, Asada Keiichi, Hada Kazuhiro, Pu Hung-Yi, Noble Scott, Tseng Chihyin, Toma Kenji, Kino Motoki et al.	4. 巻 868
2. 論文標題 Parabolic Jets from the Spinning Black Hole in M87	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 146 ~ 146
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aaeb2d	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Takahashi Kazuya, Toma Kenji, Kino Motoki, Nakamura Masanori, Hada Kazuhiro	4. 巻 868
2. 論文標題 Fast-spinning Black Holes Inferred from Symmetrically Limb-brightened Radio Jets	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 82 ~ 82
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aae832	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Hiura Koichiro, Nagai Hiroshi, Kino Motoki, Niinuma Kotaro, Sorai Kazuo, Chida Hikaru, Akiyama Kazunori, D'Ammando Filippo, Giovannini Gabriele, Giroletti Marcello, Hada Kazuhiro, Honma Mareki, Koyama Shoko, Orienti Monica, Orosz Gabor, Sawada-Satoh Satoko	4. 巻 70
2. 論文標題 VERA monitoring of the radio jet 3C784 in the period of 2007?2013: Detection of non-linear motion	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 id.83
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psy078	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Kim Dae-Won, Trippe Sascha, Lee Sang-Sung, Kim Jae-Young, Algaba Juan-Carlos, Hodgson Jeffrey, Park Jongho, Kino Motoki, Zhao Guang-Yao, Wajima Kiyooki, Lee Jee Won, Kang Sincheol	4. 巻 480
2. 論文標題 Exploring the nature of the 2016 γ -ray emission in the blazar 1749+096	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 2324 ~ 2333
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/sty1993	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Johnson Michael D., Narayan Ramesh, Psaltis Dimitrios, Blackburn Lindy, Kovalev Yuri Y., Gwinn Carl R., Zhao Guang-Yao, Bower Geoffrey C., Moran James M., Kino Motoki, Kramer Michael, Akiyama Kazunori, Dexter Jason, Broderick Avery E., Sironi Lorenzo	4. 巻 865
2. 論文標題 The Scattering and Intrinsic Structure of Sagittarius A* at Radio Wavelengths	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 104 ~ 104
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aadcff	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Kino M., Wajima K., Kawakatu N., Nagai H., Orienti M., Giovannini G., Hada K., Niinuma K., Giroletti M.	4. 巻 864
2. 論文標題 Evidence of Jet-Clump Interaction: A Flip of the Radio Jet Head of 3C 84	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 118 ~ 118
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aad6e3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Park Jongho, Kam Minchul, Trippe Sascha, Kang Sincheol, Byun Do-Young, Kim Dae-Won, Algaba Juan-Carlos, Lee Sang-Sung, Zhao Guang-Yao, Kino Motoki, Shin Naeun, Hada Kazuhiro, Lee Taeseok, Oh Junghwan, Hodgson Jeffrey A., Sohn Bong Won	4. 巻 860
2. 論文標題 Revealing the Nature of Blazar Radio Cores through Multifrequency Polarization Observations with the Korean VLBI Network	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 112 ~ 112
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aac490	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Algaba Juan-Carlos, Lee Sang-Sung, Rani Bindu, Kim Dae-Won, Kino Motoki, Hodgson Jeffrey, Zhao Guang-Yao, Byun Do-Young, Gurwell Mark, Kang Sin-Cheol, Kim Jae-Young, Kim Jeong-Sook, Kim Soon-Wook, Park Jong-Ho, Trippe Sascha, Wajima Kiyooki	4. 巻 859
2. 論文標題 Exploring the Variability of the Flat-spectrum Radio Source 1633+382. II. Physical Properties	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 128 ~ 128
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aac2e7	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Giovannini G., Savolainen T., Orienti M., Nakamura M., Nagai H., Kino M. et al.	4. 巻 2
2. 論文標題 A wide and collimated radio jet in 3C84 on the scale of a few hundred gravitational radii	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Nature Astronomy	6. 最初と最後の頁 472 ~ 477
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41550-018-0431-2	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Doi Akihiro, Hada Kazuhiro, Kino Motoki, Wajima Kiyooki, Nakahara Satomi	4. 巻 857
2. 論文標題 A RecoIlimation Shock in a Stationary Jet Feature with Limb-brightening in the Gamma-Ray-emitting Narrow-line Seyfert 1 Galaxy 1H 0323+342	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 L6 ~ L6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/aabae2	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計3件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 紀基樹
2. 発表標題 日韓合同VLBI観測網で探るM87ジェット速度場のプロファイル計測
3. 学会等名 日本天文学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 紀基樹
2. 発表標題 AGN Science working group overview
3. 学会等名 12th East Asian VLBI workshop 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 紀基樹
2. 発表標題 On the angular velocity of magnetic field lines in M87
3. 学会等名 BZ77研究会2019 (招待講演)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>多波長同時観測でさぐるM87巨大ブラックホールの活動性と周辺構造 - 地上・宇宙の望遠鏡が一致団結 - https://www.miz.nao.ac.jp/eht-j/c/pr/pr20210414 https://www.kogakuin.ac.jp/news/2021/041501.html イベント・ホライズン・テレスコープ・プロジェクトがM87ブラックホールごく近傍の磁場の画像化に成功 https://www.miz.nao.ac.jp/eht-j/c/pr/pr20210324 https://www.kogakuin.ac.jp/news/2020/2021032501.html 紀基樹が中学2、3年生・高校1、2年生に、ブラックホールシャドウに関する講義を実施 https://www.js.kogakuin.ac.jp/news/2019070302.html 信州大学フレッシュキャンパスセミナー https://www.shinshu-u.ac.jp/faculty/general/event/2019/07/8992.html 日比谷カレッジ「人類が初めて見た銀河中心の巨大ブラックホール」 https://www.library.chiyoda.tokyo.jp/information/20191002-post_215/ 紀基樹客員研究員が参画した研究が「2019 BREAKTHROUGH OF THE YEAR」に選出 https://www.kogakuin.ac.jp/news/2019/122512.html 史上初、ブラックホールの撮影に成功 楯円銀河M87に潜む巨大ブラックホールに迫る https://www.nao.ac.jp/news/sp/20190410-eht/article.html 史上初！工学院大学 紀基樹 客員研究員らの国際研究チームが “ブラックホール” の撮影に成功 https://www.kogakuin.ac.jp/archive/fbb28u000000boav-att/20190412.pdf 史上初！工学院大学 紀基樹客員研究員らの国際研究チームが “ブラックホール” の撮影に成功 https://www.atpress.ne.jp/news/181759 Astronomers Capture First Image of a Black Hole https://eventhorizontelescope.org</p>

6. 研究組織			
	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	川島 朋尚 (Kawashima Tomohisa) (90750464)	国立天文台・天文シミュレーションプロジェクト・特任助教 (62616)	

