

令和 5 年 6 月 1 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2021

課題番号：18H01245

研究課題名（和文）最新の超高解像度電波観測データを使ったブラックホールジェット駆動理論の検証

研究課題名（英文）Examining the mechanism of driving black hole jets by using new data of high-resolution radio observations

研究代表者

当真 賢二（Toma, Kenji）

東北大学・学際科学フロンティア研究所・准教授

研究者番号：70729011

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,100,000円

研究成果の概要（和文）：ブラックホールジェットの高分解像度電波観測結果を利用して、ジェット中の電子の空間分布を推定するという独自の研究を行った。一般相対論的プラズマ粒子シミュレーションを実行し、ギャップ電場による電子陽電子対生成ではジェット中の電子の量を説明できないことを明らかにした。一方で、赤道面の間欠的に起こる磁気リコネクションで十分な量の電子陽電子が生成できることを示した。これは本研究の目的であり長年の謎であったジェット中の粒子起源についての初めての理論的枠組みといえる。他にもEHT Collaborationに参加し、M87ブラックホール影撮像の理論解釈に貢献するなど、非常に実り多い結果となった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

光さえも出てこられない領域であるブラックホールがいかにしてジェット（噴出流）を駆動するのか？という学術的な基本的問題を観測的に検証するためのステップとして、ジェット中の粒子生成の理論的枠組みを構築することに成功した。また、EHTチームでの共同研究を通して、国籍の違いを越えた協力で一つの目標に到達できることを示せたことは社会的意義を持つ。

研究成果の概要（英文）：We performed a unique study on the estimate of spatial distribution of electrons in the jet by using the high-resolution radio images. We performed general relativistic plasma particle simulations, and found that the electron positron pair creation by the gap strong electric field cannot provide a sufficient amount of electrons in the jets. On the other hand, we showed that intermittent magnetic reconnection around the equatorial plane can provide a sufficient amount of electrons in the jets. This is a natural theoretical platform for the particle origin of jets, which is the research target of this project and a long-standing mystery in astrophysics. Furthermore, we joined the Event Horizon Telescope Collaboration to contribute to the theoretical interpretation of the M87 black hole shadow, which has been famous in society in April, 2019. We also studied on jet acceleration mechanism by turbulence and analytic formulation of black hole space-time evolution by jet.

研究分野：宇宙物理学

キーワード：ブラックホール 宇宙ジェット 活動銀河 VLBI観測 PICシミュレーション

1. 研究開始当初の背景

ブラックホールは光さえも出て来られない領域であり、そこから噴出するように見えるプラズマジェットは、天文学における大きな謎の一つである。

- (1) ブラックホール近傍の超高解像度観測は、米独日台を中心とした共同研究チーム Event Horizon Telescope (EHT) Collaboration で進められている。本研究の開始当初は、ジェットを有する近傍の巨大ブラックホール M87 の最初の観測が行われたところで、未だ公開はされていなかった。
- (2) EHT の観測を見据えて、理論的には一般相対論的電磁流体(MHD)シミュレーションが国内外で活発に行われ、ブラックホール近傍の画像モデルがいくつか発表されていた。それとは別の方法であるプラズマ粒子シミュレーションは、パルサー近傍の研究においてのみ実行されており、ブラックホール近傍については実行されていなかった。

2. 研究の目的

(1) MHD シミュレーション(理想 MHD)は、その性質として、そのモデル流体がどう光るのか計算することはできない。それに対して、我々は M87 ジェットの遠方(ブラックホールからその大きさの 100 倍から 1000 倍の場所)の最新観測データを使って、電波で光る電子の空間分布を推定することを目的のひとつとした。また、独自に一般相対論的 MHD シミュレーションを実行し、遠方の観測データから電磁場構造とブラックホールの回転速度を推定することも目指した。

(2) (1)では光る電子の注入機構を現象論的に考えているが、それを第一原理的に理解することを長期的研究目的に据えた。それまでの我々の解析的な一般相対論的プラズマ物理の研究に基づいて時空構造を単純化し、そこでプラズマ粒子と電磁場の発展を解くシミュレーションコードを作成することを目指した。

3. 研究の方法

(1) 2.(1)については、解析的なジェット電磁場モデルを用い、粒子からのシンクロトロン放射を数値計算する。それによるモデル画像とジェット遠方の最新観測データを比較し、粒子の空間分布を推定する。また解析的なジェット電磁場モデルの他に、独自に一般相対論的 MHD シミュレーションを実行した結果による電磁場モデルも使う。

(2) 2.(2)については、回転ブラックホール時空を単純化した座標の上で、プラズマ粒子と電磁場の発展を解くシミュレーションコードを開発する計画とした。

4. 研究成果

(1) 2.(1)の研究について、2017年に公開された(当時)最新の M87 銀河の電波超高感度観測で、これまで知られていた明るいジェット外縁部とは別にジェット軸付近が別成分として輝いていることが明らかになった(Hada et al. 2017: 図 1)。我々はそれまでの解析的ジェット電磁場と現象論的電子分布のモデルを拡張し、観測された三叉構造を再現するモデルを構築することに成功した。それによって、外縁部は磁場が強いことから明るくなり、軸付近は相対論的ビーミング効果によって明るくなることわかった。この成果は Ogihara, Takahashi, & Toma (2019, *Astrophysical Journal*)として報告した。

また、協力者の中村雅徳氏(当時 ASIAA)と共同で一般相対論的 MHD シミュレーションを実行し、パラメータサーベイを行った。その結果、ブラックホールの回転速度にあまり依らずに、ジェット外縁の形状が電波高解像度観測の結果と一致することを示した(Nakamura, Asada, Hada, Pu, Noble, Tseng, Toma et al. 2018, *Astrophysical Journal*)。また、ブラックホールを貫く磁束が小さい場合にはジェットが細くなることが示唆された。よって、ブラックホールの近傍から遠方へのジェットの横幅のプロファイルの観測が磁束の推定に使えることがわかった。これは EHT の観測と相補的な情報となりうる。

さらに、ジェット外縁の形状が電波高解像度観測と MHD シミュレーションで同じ結果を示すことを受け、それを仮定した上で解析的な一般相対論的 MHD ジェットモデルの構築に成功した(Ogihara, Ogawa & Toma 2021, *Astrophysical Journal*)。ジェットの形状を仮定せずに一般相対論的 MHD ジェットモデルを作ることは極めて難しいが、今回の方法により、観測との比

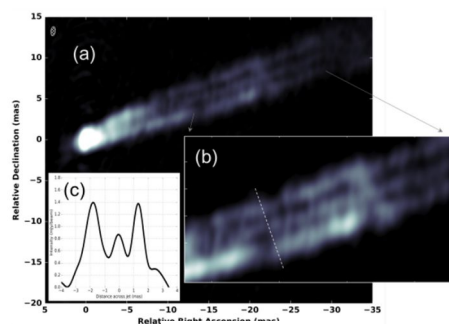


図 1

較に耐えうる解析的 MHD モデルを作ることができた。その結果、ブラックホールの回転速度が大きいほど、粒子数密度がジェット外縁部で大きくなることがわかった(図2)。これは観測でジェットの外縁部が明るいことと整合的である。

(2)2.(2)の研究については、一般相対論的プラズマ粒子シミュレーションのコード開発を4年間通して進める研究計画としていたが、A. Levinson (Tel Aviv 大学)によって先にコードが作られ、論文が発表されてしまった(Levinson & Cerutti 2019)。そこで、長期でコード開発することは断念し、京都に滞在中であった A.

Levinson にコンタクトを取り、彼と共同研究を立ち上げた。本研究経費で雇用した研究支援者の木坂将大氏がそのシミュレーションコードを使いこなすことに成功し、Levinson & Cerutti (2019)より広いパラメータ領域のシミュレーションを実行し、また物理的理解を深めることができた。具体的には、ブラックホール近傍において電荷密度がゼロになる面で磁場に平行な電場が生じ、MHD 条件が破れることを見出した。そしてそれが起こる条件を明らかにし、解析的にも理解できた。また Levinson & Cerutti (2019)で考えられている電流とは反対向きの電流で生じやすいこともわかった。この成果は Kisaka, Levinson & Toma (2020, Astrophysical Journal)として報告した。

シミュレーション研究をさらに進め、ブラックホール近傍に入射する低エネルギー光子の量が変化することでガンマ線フレアを起こすことができることを示した(図3)。低エネルギー光子量とガンマ線光度の関係を説明する準解析的モデルも構築した(Kisaka, Levinson, Toma & Niv 2022, Astrophysical Journal)。

一方で、このような電荷密度ゼロ面で生じる電場の粒子加速による電子陽電子対生成では、ジェットの電波放射を説明するのに十分な粒子量を達成できないことも明らかになった。

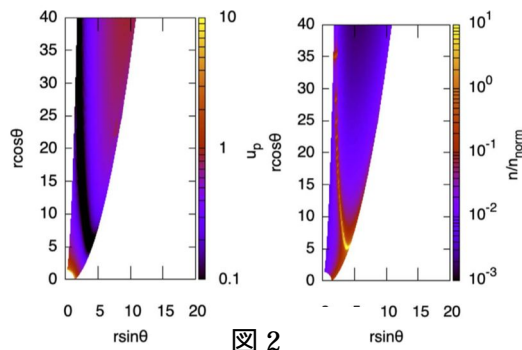


図2

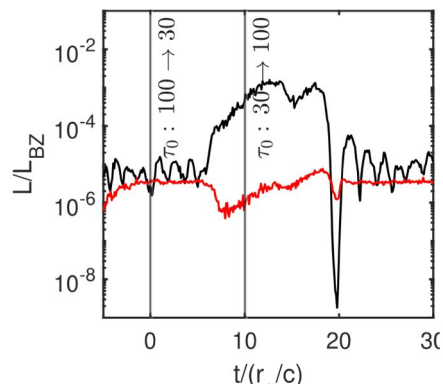


図3

(3)上述した(1)と(2)の計画研究とは別に、並行して、受け入れていた学振 PD の木村成生氏と共同研究を行った。まず、M87 銀河からの謎のガンマ線がジェットを取り巻く降着流で作られるという解析的モデルを構築した(Kimura & Toma 2020, Astrophysical Journal)。これによって、降着流起源の光子による電子陽電子対生成の量を上げることができたが、依然としてジェットの電波放射が要する量には足りないことがわかった。

ところが、最新の MHD シミュレーションでブラックホールの側で磁気リコネクションが間欠的に起こることを受けて、それによる電子陽電子対生成量を計算したところ、これまでのシナリオの 10^5 倍以上も高い値を得た(図4)。考えられる最大のエネルギー散逸量を最小の領域で解放し、粒子生成につなげるため、このシナリオがこのシステムの最大限の粒子生成量を与える。そしてこの量はジェットの電波放射が要する粒子量と整合的であり、ジェットの外縁部が光ることとも相性が良い。ついに、長年の謎であるブラックホールジェットの粒子の起源について、物理的に自然な理論的枠組みを得たと言える。これは Kimura, Toma, Noda & Hada (2022)として Astrophysical Journal Letters 誌で報告できた。

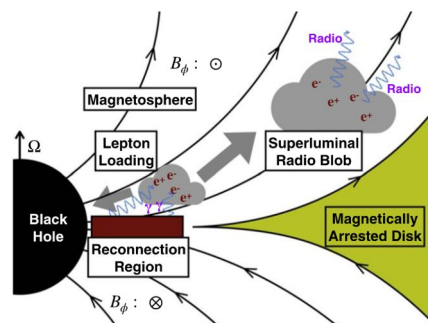


図4

(4)上述の成果の他に、連携研究者の誘いもあって EHT Collaboration に参加し、2019年4月の公開で社会的にも有名になった M87 ブラックホール影撮像の理論解釈に貢献した(The EHT Collaboration 2019a-e, 2021a-c)。特に、2019eの論文内で、ジェットの遠方の観測データも組み合わせ合わせてブラックホールの回転速度に制限を与える議論の一部を執筆した。また、EHT が観測したリング放射にジェットの放射も含まれている可能性を指摘した(Kawashima, Toma et al. 2021, Astrophysical Journal)。

さらに、田中周太氏(青山学院大)と乱流によるジェットの加速機構(Tanaka & Toma 2020, MNRAS)や木村匡志(当時立教大)ジェットによるブラックホール時空変化の解析的定式化(Kimura, Harada, Naruko & Toma 2021, PTEP)の研究も行った。本研究の当初の目的であったジェットの粒子起源だけでなく、様々なトピックの研究で実り多い活動となった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計16件（うち査読付論文 16件 / うち国際共著 11件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Kisaka Shota, Levinson Amir, Toma Kenji	4. 巻 902
2. 論文標題 Comprehensive Analysis of Magnetospheric Gaps around Kerr Black Holes Using 1D GRPIC Simulations	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 80 ~ 80
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/abb46c	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 Asano Katsuaki, Murase Kohta, Toma Kenji	4. 巻 905
2. 論文標題 Probing Particle Acceleration through Broadband Early Afterglow Emission of MAGIC Gamma-Ray Burst GRB 190114C	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 105 ~ 105
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/abc82c	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 Kimura Shigeo S., Toma Kenji	4. 巻 905
2. 論文標題 Hadronic High-energy Emission from Magnetically Arrested Disks in Radio Galaxies	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 178 ~ 178
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/abc343	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, 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 該当する

1. 著者名 Ogihara Taiki, Ogawa Takumi, Toma Kenji	4. 巻 911
2. 論文標題 Matter Density Distribution of General Relativistic Highly Magnetized Jets Driven by Black Holes	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 34 ~ 34
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/abe61b	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 The Event Horizon Telescope Collaboration	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 The Event Horizon Telescope Collaboration	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 Ogihara Taiki, Takahashi Kazuya, Toma Kenji	4. 巻 877
2. 論文標題 A Mechanism for the Triple-ridge Emission Structure of AGN Jets	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 19 ~ 19
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab1909	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 Urata Yuji, Toma Kenji, Huang Kuiyun, Asada Keiichi, Nagai Hiroshi, Takahashi Satoko, Petitpas Glen, Tashiro Makoto, Yamaoka Kazutaka	4. 巻 884
2. 論文標題 First Detection of Radio Linear Polarization in a Gamma-Ray Burst Afterglow	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 L58 ~ L58
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/ab48f3	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 Tanaka Shuta J, Toma Kenji	4. 巻 494
2. 論文標題 Efficient acceleration of cylindrical jets: effects of radiative cooling and tangled magnetic field	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 338-348
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/staa728	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 Nakamura Masanori, Asada Keiichi, Hada Kazuhiro, Pu Hung-Yi, Noble Scott, Tseng Chihyin, Toma Kenji, 他14名	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 Bulla M., Covino S., Kyutoku K., Tanaka M., Maund J. R., Patat F., Toma K., Wiersema K., Bruten J., Jin Z. P., Testa V.	4. 巻 3
2. 論文標題 The origin of polarization in kilonovae and the case of the gravitational-wave counterpart AT 2017gfo	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Nature Astronomy	6. 最初と最後の頁 99 ~ 106
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41550-018-0593-y	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 Kimura Masashi, Harada Tomohiro, Naruko Atsushi, Toma Kenji	4. 巻 2021
2. 論文標題 Backreaction of mass and angular momentum accretion on black holes: General formulation of metric perturbations and application to the Blandford-Znajek process	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	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) 10.1093/ptep/ptab101	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 Kisaka Shota, Levinson Amir, Toma Kenji, Niv Idan	4. 巻 924
2. 論文標題 The Response of Black Hole Spark Gaps to External Changes: A Production Mechanism of Rapid TeV Flares?	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 28 ~ 28
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac35da	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 Kuze Riku, Kimura Shigeo S., Toma Kenji	4. 巻 935
2. 論文標題 High-energy Gamma Rays from Magnetically Arrested Disks in Nearby Radio Galaxies	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 159 ~ 159
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac7ec1	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 Kimura Shigeo S., Toma Kenji, Noda Hirofumi, Hada Kazuhiro	4. 巻 937
2. 論文標題 Magnetic Reconnection in Black Hole Magnetospheres: Lepton Loading into Jets, Superluminal Radio Blobs, and Multiwavelength Flares	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Letters	6. 最初と最後の頁 L34 ~ L34
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/ac8d5a	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 -

〔学会発表〕 計16件（うち招待講演 10件 / うち国際学会 8件）

1. 発表者名 Kenji Toma
2. 発表標題 Polarimetric Studies of GRBs, AGN Jets, and Axion Dark Matter
3. 学会等名 IAU Symposium 360: Astronomical Polarimetry 2020 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 木坂将大
2. 発表標題 粒子シミュレーションで探るブラックホール磁気圏での電磁カスケード現象
3. 学会等名 日本天文学会秋季年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 荻原大樹
2. 発表標題 活動銀河核ジェットにおける一般相対論的理想電磁流体近似解の構築
3. 学会等名 日本天文学会秋季年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 木村成生
2. 発表標題 電波銀河研究の新展開：強磁場降着流からのガンマ線とニュートリノ
3. 学会等名 日本天文学会秋季年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kenji Toma
2. 発表標題 M87 black hole shadow image and its connection with the radio jet
3. 学会等名 High Energy Astrophysics Japan Israel Workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kenji Toma
2. 発表標題 GRB polarization: an overview
3. 学会等名 Gamma-Ray Bursts in the Gravitational Wave Era (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kenji Toma
2. 発表標題 Recent Topics in High Energy Astrophysics
3. 学会等名 14th Asia-Pacific Physics Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 當真賢二
2. 発表標題 ブラックホールジェット研究の新展開
3. 学会等名 第49回天文・天体物理若手夏の学校 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 當真賢二、他EHT Collaboration
2. 発表標題 EHTによるM87*の観測成果 V: 非対称リング放射構造の理論的解釈
3. 学会等名 日本天文学会秋季年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kenji Toma
2. 発表標題 Formation and dissipation mechanisms of AGN jets
3. 学会等名 Jet and Shock Breakouts in Cosmic Transients (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kenji Toma
2. 発表標題 GRB prompt emission polarization: an overview
3. 学会等名 Shedding new light on gamma-ray bursts with polarization data (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 當真賢二
2. 発表標題 AGN jet physics on the horizon scale
3. 学会等名 宇宙線研究所共同利用小研究会「高エネルギー天体現象の多様性」(招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 眞眞賢二
2. 発表標題 Blandford-Znajek過程における時空の時間变化
3. 学会等名 日本天文学会春季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 眞眞賢二
2. 発表標題 相対論的ジェットの駆動・加速・放射の基礎理論と諸問題
3. 学会等名 ブラックホールジェット・降着円盤・円盤風研究会2022（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kenji Toma
2. 発表標題 Emission from Black Hole Jets
3. 学会等名 Extreme Outflows in Astrophysical Transients（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kenji Toma
2. 発表標題 Hadronic emission in disk and pair-creation gap in jets
3. 学会等名 Polarized Radiation near Supermassive Black Holes（国際学会）
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
連携研究者	秦 和弘 (Hada Kazuhiro) (60724458)	国立天文台・水沢VLBI観測所・助教 (62616)	
連携研究者	本間 希樹 (Honma Mareki) (20332166)	国立天文台・水沢VLBI観測所・教授 (62616)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計1件

国際研究集会	開催年
Active Galactic Nucleus Jets in the Event Horizon Telescope Era	2020年～2020年

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
イスラエル	Tel Aviv University			
その他の国・地域 台湾	ASIAA	National Central University		
米国	MIT	University of Illinois	University of Waterloo	