

令和 5 年 5 月 15 日現在

機関番号：15401

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2022

課題番号：19K14712

研究課題名（和文）ブラックホール磁気圏での電磁カスケード現象の解明

研究課題名（英文）Electromagnetic cascade in a black hole magnetosphere

研究代表者

木坂 将大（Kisaka, Shota）

広島大学・先進理工系科学研究科（理）・助教

研究者番号：10639107

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）：ブラックホールから放出される相対論的ジェット生成機構は未解明であり、宇宙物理における最大の謎の一つである。この機構を明らかにする上で、ジェット内部への荷電粒子の供給過程の解明が不可欠である。そこで本研究では、一般相対論的效果と粒子生成を適切に取り入れた粒子シミュレーションコードを用いてブラックホール近傍で起こる電磁カスケード現象を調べた。結果として、粒子生成に伴って発生するガンマ線の光度といった観測的に検証可能な物理量の定量的な評価を可能にした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

一般相対論的效果が顕著なブラックホールのごく近傍の物理の検証が、電波による直接イメージ観測などで可能になってきた。本研究はもう一つの直接観測の手段である、極めて短時間の変動を示すガンマ線の明るい増光現象をターゲットとし、その観測データから得られる情報の解釈に不可欠なものである。本研究で得られた結果は、ブラックホールから放出される相対論的ジェットに関係する様々な高エネルギー物理現象の解明につながると思われる。

研究成果の概要（英文）：The mechanism of relativistic jets launched from black holes is one of the most mysterious phenomena in astrophysics. To understand this mechanism, it is essential to elucidate the injection process of charged particles to the inside of the jet. In this study, we investigate the electromagnetic cascade phenomena occurring in the vicinity of a black hole using a plasma particle simulation code that appropriately incorporates general relativistic effects and particle creation. As a result, we quantitatively evaluated observably verifiable physical quantities such as the luminosity of gamma rays accompanied with particle creation.

研究分野：高エネルギー天体物理

キーワード：ブラックホール 活動銀河中心核 高エネルギーガンマ線 粒子シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

相対論的速度の物質のアウトフロー現象である相対論的ジェットは、ブラックホール(以下BHと略す)などの宇宙の様々な天体に見られる。しかし、この相対論的ジェットの生成機構は未解明であり、宇宙物理における最大の謎の一つである。相対論的ジェットの駆動機構として、磁場を介してBHの回転エネルギーを電磁場のエネルギーとして外部に運ぶBlandford-Znajek機構が有力である。ただしBHから十分離れた領域では電磁場と粒子のエネルギーは同程度、もしくは粒子のエネルギーが大きいため、どこかで電磁場のエネルギーが粒子のエネルギーに変換されている。この変換過程を明らかにするには、ジェット内部の粒子の供給過程の解明が不可欠である。

相対論的ジェットの周囲からジェット内部へは、強い磁場により荷電粒子が侵入できない。BHのホライズン半径程度の近傍は注入可能であり、その粒子注入機構として次のような粒子加速とそれに伴う粒子生成(電磁カスケード)が期待されている。BH近傍の強磁場とBHの回転により、磁力線に沿った方向に強い電場が誘起される(単極誘導)。この電場が荷電粒子を加速させる。荷電粒子はすぐに十分高エネルギーまで達し、逆コンプトン散乱などの機構でガンマ線を放出する。このガンマ線と低エネルギー光子の衝突により、荷電粒子が対生成する。生成した荷電粒子は電場でまた加速されガンマ線を放出し、このガンマ線からさらなる荷電粒子が生成されるように雪崩的に粒子数が増加する形で、電磁場のエネルギーが粒子のエネルギーに変換される。しかし、電磁カスケードの結果としてジェット内部の粒子数、組成、エネルギー分布、そしてその空間構造が定量的にどう決まるかは未解明である。

2. 研究の目的

本研究は、粒子加速、電磁場放射と粒子生成を適切に扱う粒子シミュレーションを利用し、どのような物理状況に対応するパラメータがBH近傍で起こる電磁カスケード現象を特徴づけるかを明らかにすることを目的とする。同時に、観測データとの比較から相対論的ジェットの根元の物理状態を得るため、電磁カスケードに伴うガンマ線の観測データにBH近傍の情報がどう反映されるかを明らかにする。

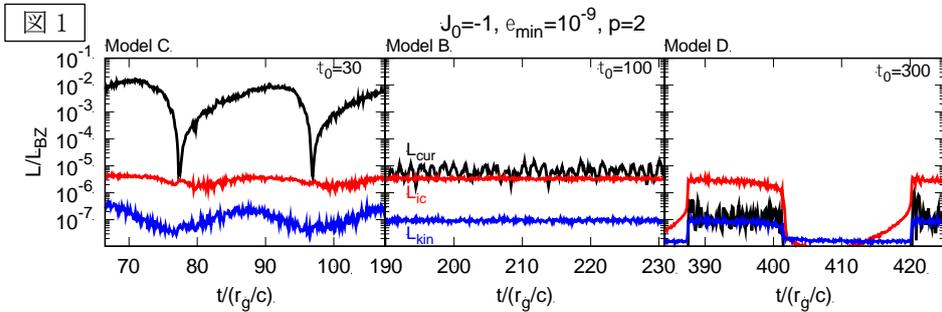
3. 研究の方法

BH磁気圏で電磁カスケード現象はBHのホライズン半径の数倍程度の領域で起こるため、一般相対論的效果を取り入れなければならない。また、粒子生成は粒子のエネルギーに強く依存するため単一のエネルギー分布と見なせないこと、光子から粒子への変換までの平均自由行程がダイナミクスに影響することから、流体近似が困難である。そこで本研究では、一般相対論的效果と粒子生成を適切に取り入れた粒子シミュレーションコードを用いる。これまではごく一部のパラメーター範囲しか調べられていない。例えば、質量は銀河中心ブラックホールの範囲であり、恒星質量ブラックホールの場合はまだ振る舞いがわかっていない。電磁カスケード過程では、高エネルギー電子陽電子が背景光子を逆コンプトン散乱によりガンマ線を出し、この光子と背景光子が反応して粒子が生成することから、背景光子のエネルギー分布に結果が大きく依存すると予想されるものの、まだこの依存性も調べられていない。そこで、特にプラズマ粒子や観測される放射へのエネルギー変換効率に注目してパラメーター依存性を明らかにする。

4. 研究成果

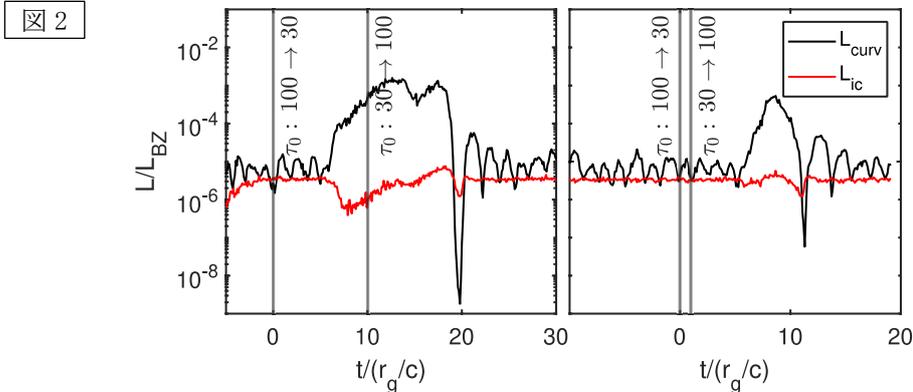
これまでの結果では、粒子加速と粒子生成が準定常的に起こることが指摘されていた。しかし我々がこれまでより長期間のシミュレーションを行った結果、効率の高い粒子加速と生成がある決まった領域で準周期的に起こることがわかった。さらに広範囲のモデルパラメータの調査を行った結果、ブラックホール近傍から放出される粒子のエネルギーや個数といったジェット根元での物理状態に加え、逆コンプトン散乱や曲率放射起源のガンマ線の光度といった観測的に検証可能な物理量の定量的な評価が可能となった。

現実的なパラメータを採用して初めて準周期的な振る舞いを明らかにした結果、曲率放射が電磁カスケード現象に与える効果、具体的には曲率放射のガンマ線起源の粒子生成が電磁場構造に支配的な影響を与える条件、ガンマ線観測で検出されうる条件を明らかにした。特に、実際に検出されている電波銀河からの数100GeVの激しい時間変動を見せたフレアが、曲率放射起源である可能性を初めて示した(図1)。



粒子シミュレーションでは現実的な粒子の数を扱うことができないため、シミュレーション上の1つの粒子を多数の粒子の集合とみなす。このため、ある決まった物理的な粒子数に対してシミュレーションで扱う粒子が少ないほど、一般には現実と異なる可能性がある。我々はこの粒子数の効果について調査し、採用すべき最小の粒子数を明らかにした。

ある準定常的に電磁カスケードを起こしている状態からブラックホール周囲の降着円盤からの放射に対するパラメータを変化させることで擬似的にフレアを起こさせ、その応答の特性を調べた。様々なパラメータを変化させた結果として、ほとんどの場合は短い時間で変化後のパラメータの値に対応する準定常状態に遷移することがわかった。しかし、ブラックホール近傍を流れる電流を増加させた場合、プラズマが全体的に不足することで強い電場を誘起し、ごく短期間に限り1桁以上のガンマ線光度の増光が起こることがわかった。また、ブラックホール周囲の降着円盤からの放射の光度が短時間だけ弱くなることでも、電磁カスケードによる磁気圏内のプラズマの供給不足が起きてガンマ線放射光度の急激な増加が起こることを発見した(図2)。この結果は観測されているガンマ線データを再現しうることがわかった。さらに、ガンマ線の放射効率があまりに高いとプラズマの供給不足を補うための時間が長くなることから、明るいガンマ線ほどこれまで考えられているより例えば質量の大きいブラックホールが起源であるなどの新たな示唆も得られた。これらの結果は、将来的に詳細なガンマ線フレアに対する観測データが得られた際に、そのフレアがどのような原因で発生したかに対する理論的解釈を与える上で重要となる。



これまでの銀河中心ブラックホールに対する研究に加えて、星質量ブラックホールを対象とした数値シミュレーションを行い、電磁カスケード起源のガンマ線のエネルギーは質量が小さいほどわずかに低いエネルギー帯域で明るいなどのブラックホール質量依存性を明らかにした。これは、降着率が低くてまだ見つかっていない銀河系内のブラックホール探査に重要となる。

ブラックホール磁気圏を流れる電流の値に対して、高エネルギーガンマ線光度の明るさの極大値が存在することを明らかにした。ガンマ線は粒子の不足に伴い電場が発展して粒子加速が効率的になることで発生するが、電流が弱い場合は注入されるべき粒子数が少なくても構造を維持できることから粒子加速が効率的でなくなること、電流が十分強い場合は流れる電磁を維持するための粒子が数多く存在しており、この粒子が完全に不足して電場が十分に発展する前に粒子が注入されて電場が弱まることに起因する。この結果は、観測されているブラックホールからのガンマ線データからその磁気圏の状態を明らかにする上で非常に有用である。

得られた数値シミュレーション結果を再現する準解析的モデルを構築した。これにより、様々なパラメータ範囲でのガンマ線の明るさなどを推定することが可能となった。このモデルを基にして、降着率が低いなどでまだ見つかっていない銀河系内の星質量の孤立ブラックホールの検出可能性を明らかにした。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計13件（うち査読付論文 13件 / うち国際共著 7件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Yamazaki R., Matsukiyo S., Morita T., Tanaka S. J., Umeda T., Aihara K., Edamoto M., Egashira S., Hatsuyama R., Higuchi T., Hihara T., Horie Y., Hoshino M., Ishii A., Ishizaka N., Itadani Y., Izumi T., Kambayashi S., Kakuchi S., Katsuki N., Kawamura R., Kawamura Y., Kisaka S. et al.	4. 巻 105
2. 論文標題 High-power laser experiment forming a supercritical collisionless shock in a magnetized uniform plasma at rest	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 025203-025203
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevE.105.025203	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 Kojima Yasufumi, Kisaka Shota, Fujisawa Kotaro	4. 巻 511
2. 論文標題 Magnetic field sustained by the elastic force in neutron star crusts	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 480 ~ 487
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stac036	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 Eie Sujin, Terasawa Toshio, Akahori Takuya, Oyama Tomoaki, Hirota Tomoya, Yonekura Yoshinori, Enoto Teruaki, Sekido Mamoru, Takefuji Kazuhiro, Misawa Hiroaki, Tsuchiya Fuminori, Kisaka Shota, Aoki Takahiro, Honma Mareki	4. 巻 73
2. 論文標題 Multi-frequency radio observations of the radio-loud magnetar XTE J1810-197	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 1563 ~ 1574
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psab098	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 Enoto Teruaki, Ng Mason, Hu Chin-Ping, Guver Tolga, Jaisawal Gaurava K., O' Connor Brendan, Gugus Ersin, Lien Amy, Kisaka Shota et al.	4. 巻 920
2. 論文標題 A Month of Monitoring the New Magnetar Swift J1555.2-5402 during an X-Ray Outburst	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Letters	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/ac2665	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 Shibata Shinpei, Kisaka Shota	4. 巻 507
2. 論文標題 On the angular momentum extraction from the rotation powered pulsars	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 1055 ~ 1063
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stab2206	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 Kojima Yasufumi, Kisaka Shota, Fujisawa Kotaro	4. 巻 506
2. 論文標題 Magneto-elastic equilibrium of a neutron star crust	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 3936 ~ 3945
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stab1848	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 Enoto Teruaki, Terasawa Toshio, Kisaka Shota, Hu Chin-Ping, Guillot Sebastien, Lewandowska Natalia, Malacaria Christian, Ray Paul S., Ho Wynn C.G., Harding Alice K. et al.	4. 巻 372
2. 論文標題 Enhanced x-ray emission coinciding with giant radio pulses from the Crab Pulsar	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Science	6. 最初と最後の頁 187 ~ 190
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1126/science.abd4659	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 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 Kojima Yasufumi, Kisaka Shota, Fujisawa Kotaro	4. 巻 502
2. 論文標題 Evolution of magnetic deformation in neutron star crust	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 2097 ~ 2104
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/staa3489	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 Sezer A, Ergin T, Cesur N, Tanaka S J, Kisaka S, Ohira Y, Yamazaki R	4. 巻 492
2. 論文標題 Suzaku and Fermi view of the supernova remnant 3C 396	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 1484 ~ 1491
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stz3571	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., Murase Kohta, Ioka Kunihiro, Kisaka Shota, Fang Ke, Meszaros Peter	4. 巻 887
2. 論文標題 Up-scattered Cocoon Emission in Short Gamma-Ray Bursts as High-energy Gamma-Ray Counterparts to Gravitational Waves	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 L16 ~ L16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/ab59e1	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 Enoto Teruaki、Kisaka Shota、Shibata Shinpei	4. 巻 82
2. 論文標題 Observational diversity of magnetized neutron stars	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Reports on Progress in Physics	6. 最初と最後の頁 106901 ~ 106901
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6633/ab3def	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21件 (うち招待講演 8件 / うち国際学会 7件)

1. 発表者名 Shota Kisaka
2. 発表標題 The response of black hole spark gaps to external changes: A production mechanism of rapid TeV flares?
3. 学会等名 Black Hole Astrophysics with VLBI 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shota Kisaka
2. 発表標題 The electromagnetic cascade in neutron star and black hole magnetospheres
3. 学会等名 High Energy Density Science 2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 木坂 将大, Amir Levinson, 当真賢二
2. 発表標題 低光度AGNのTeVガンマ線光度とその時間変動
3. 学会等名 日本天文学会 2021年秋季年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 木坂 将大
2. 発表標題 X線-電波モードチェンジングモデル
3. 学会等名 研究会「中性子星・超新星残骸及び関連天体」
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 木坂 将大
2. 発表標題 電波銀河のTeVフレア機構
3. 学会等名 第34回理論懇シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 木坂 将大
2. 発表標題 低光度AGNのTeVフレアの起源
3. 学会等名 高エネルギー宇宙物理学研究会 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 木坂 将大
2. 発表標題 Transition of polar cap activity
3. 学会等名 ～中性子星の観測と理論～研究活性化ワークショップ 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名	木坂将大, 榎戸輝揚, 寺澤敏夫, Chin-Ping Hu, 村田泰宏, 竹内央, 岳藤一宏, 関戸衛, 米倉覚則, 三澤浩昭, 土屋史紀, 青木貴弘, 徳丸宗利, 本間希樹, 亀谷收, 小山友明, 浅野勝晃, 柴田晋平, 田中周太, Zaven Arzoumanian, Keith C. Gendreau, and the NICER collaboration
2. 発表標題	かにバルサーの巨大電波パルスに伴うX線超過の理論モデル
3. 学会等名	日本天文学会 2021年春季年会
4. 発表年	2021年

1. 発表者名	Shota Kisaka
2. 発表標題	Energy conversion efficiency in magnetospheric gaps around Kerr black holes
3. 学会等名	Black Hole Astrophysics with VLBI: Multi-Wavelength and Multi-Messenger Era (国際学会)
4. 発表年	2021年

1. 発表者名	木坂将大
2. 発表標題	高速電波バーストのブレイクスルー
3. 学会等名	第33回 理論懇シンポジウム (招待講演)
4. 発表年	2020年

1. 発表者名	木坂将大
2. 発表標題	GRPモデル再考
3. 学会等名	研究会「中性子星および関連現象～興味ある課題を検討しよう～」
4. 発表年	2020年

1. 発表者名 木坂将大
2. 発表標題 Magnetospheric gaps around stellar mass black holes
3. 学会等名 高エネルギー宇宙物理学研究会2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 木坂将大, Amir Levinson, 当真賢二, Benoit Cerutti
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 2020年秋季年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 木坂 将大
2. 発表標題 ブラックホール磁気圏
3. 学会等名 小研究会「相対論的現象で探る宇宙の進化I」(招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 木坂 将大
2. 発表標題 パルサーからの硬X線放射
3. 学会等名 研究会「高感度・広帯域X線天文衛星FORCEで探る高エネルギー宇宙」(招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Shota Kisaka
2. 発表標題 Particle acceleration in a starved magnetosphere of a Kerr black hole
3. 学会等名 "Active Galactic Nucleus Jets in the Event Horizon Telescope Era" (AGN Jet Workshop 2020) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 木坂 将大
2. 発表標題 ブラックホール磁気圏での粒子加速領域
3. 学会等名 高エネルギー宇宙物理学研究会2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shota Kisaka
2. 発表標題 Scattered Short Gamma-Ray Bursts as Electromagnetic Counterparts to Gravitational Waves
3. 学会等名 Gamma-ray Bursts in the Gravitational Wave Era 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shota Kisaka, Kunihiro Ioka, Kazumi Kashiyama, Takashi Nakamura
2. 発表標題 Scattered short gamma-ray bursts as electromagnetic counterparts to Gravitational Waves
3. 学会等名 Ioffe Workshop on GRBs and other transient sources: 25 Years of Konus-Wind Experiment (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shota Kisaka
2. 発表標題 Pair multiplicity in the black hole magnetosphere
3. 学会等名 Workshop to bring together experts on High Energy Astrophysics from Japan and Israel (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 木坂 将大
2. 発表標題 中性子星連星合体から得られる電磁波放射の理論解釈
3. 学会等名 原子核物理でつむぐrプロセス -Nuclear physics of the r process- (招待講演)
4. 発表年 2019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

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 "Active Galactic Nucleus Jets in the Event Horizon Telescope Era" (AGN Jet Workshop 2020)	開催年 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