

令和 6 年 5 月 24 日現在

機関番号：32686

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2023

課題番号：19K03876

研究課題名（和文）原始ブラックホールのスピンの理論的予言

研究課題名（英文）Theoretical prediction for the spin of primordial black holes

研究代表者

原田 知広（Harada, Tomohiro）

立教大学・理学部・教授

研究者番号：60402773

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：研究期間中に我々は原始ブラックホールのスピンの理論的予言に関する3編の論文を査読学術誌に発表した。そのうちの最初の論文では、輻射優勢期に生成される原始ブラックホールに関して、先行論文の誤りを正しつつ、無次元カーパラメーターが0.001程度になることを示した。つづいて、この研究に基づいて、原始ブラックホールが連星になった場合の有効スピンパラメータと質量比とチャープ質量の相関関数などの統計的性質を導出した。3編目の論文では、量子色力学相転移を念頭にこの解析を輻射より柔らかい状態方程式の場合にまで拡張し、原始ブラックホールのスピンの輻射の場合に比べて大きくなることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

宇宙はどのように生まれたのかという問いは全人類共通の謎である。この問いに実証的に答えるには、宇宙の過去の姿を伝える化石を調べていくのが正攻法であろう。そこで重力波観測の進展に相まって注目されているのが原始ブラックホールである。原始ブラックホールという化石から宇宙の過去の姿を知る上ではその理論的研究が欠かせない。我々の研究成果は、現在続々と見つかっているブラックホール連星の起源が原始ブラックホールなのかどうかを観測的に決定づける上で基礎的な理論を与えるものである。

研究成果の概要（英文）：During the period of this research project, we published three papers in the international refereed journals. In the first one, correcting an error in the preceding paper, we have shown that the nondimensional Kerr parameter of primordial black holes (PBHs) formed in the radiation-dominated era is of the order of 0.001. In the second, we have derived the statistical properties of PBH binaries, such as the correlation functions between the effective spin parameter, mass ratio and Chirp mass. In the third, motivated by the QCD phase transition, we extended this analysis to the equations of state softer than radiation and showed that the spins of PBHs become larger than those formed in the radiation domination.

研究分野：理論宇宙物理学

キーワード：ブラックホール インフレーション宇宙論 スピン 重力波 ビッグバン宇宙論 一般相対論 重力崩壊

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 1.研究開始当初の背景

2015年に人類が初めてとらえた重力波イベントGW150914などの重力波発生源は約30倍の太陽質量程度の二つのブラックホールからなる連星である。それらのブラックホールが初期宇宙に起源をもつ可能性が指摘されている。このような初期宇宙起源のブラックホールは原始ブラックホールと呼ばれる。ブラックホールの固有の性質は質量とスピン(自転)だけであるから、ブラックホールの起源を推定するにはそのスピンの鍵を握っている。

## 2.研究の目的

本研究は、原始ブラックホールの形成理論に回転を取り入れることによって、そのスピンを理論的に導出することを目的とする。

## 3.研究の方法

初期宇宙ではインフレーション起源のゆらぎが重力崩壊することで原始ブラックホールができると考えられている。本研究では、インフレーション後の輻射優勢期における原始ブラックホール形成過程においてブラックホールがどのようにそしてどれだけの角運動量を獲得するのかについて明らかにする。具体的には、一般相対論的な長波長解の非線形性の解析によって、形成される原始ブラックホールのスピンの評価を行う。そして、原始ブラックホール同士が連星を組んでLIGO重力波イベントの源となっているという説や原始ブラックホールが我々の宇宙の暗黒物質となっているという説に対する理論的な示唆を与える。またさらに、宇宙における量子色力学相転移を念頭にしてこの枠組みを拡張して、物質の状態方程式を輻射よりも柔らかい場合について調べる。

## 4.研究成果

研究成果の科学的内容は以下のとおりである。研究期間中に我々は原始ブラックホールのスピンの理論的予言に関する3編の論文を査読学術誌に発表した。

そのうちの最初の論文は、原田知広(立教大)、柳哲文(名大)、郡和範(KEK)、古賀泰敬(立教大)、物部武瑠(立教大)、“Spins of primordial black holes formed in the radiation-dominated phase of the universe: first-order effect,” *Astrophys. J.* 908 (2/2021) no.2, 140であり、ここでは輻射優勢期に生成される原始ブラックホールに関して、先行論文の誤りを正しつつ、無次元カーパラメーターが0.001程度になることを示した。

つづいて、古賀泰敬(名大)、原田知広(立教大)、多田祐一郎(名大)、横山修一郎(名大)、柳哲文(名大)、“Effective inspiral spin distribution of primordial black hole binaries,” *Astrophys. J.* 939 (11/2022) no.2, 65では、先の研究に基づいて、原始ブラックホールが連星になった場合の有効スピンパラメータと質量比とチャープ質量の相関関数などの統計的性質を導出した。

3編目の論文の齊藤大生(名大)、原田知広(立教大)、古賀泰敬(名大)、柳哲文(名大)、“primordial black holes formed with a soft equation of state,” JCAP 07 (7/2023), 030では、量子色力学相転移を念頭に、1編目および2編目で行った解析を輻射より柔らかい状態方程式の場合にまで拡張し、原始ブラックホールのスピンの大きさが輻射の場合に比べて大きくなることを示した。

本研究による業績の概要は以下のとおりである。本研究の中心的な課題である原始ブラックホールのスピンに関わる研究論文を3編を査読付きの国際学術誌に発表した。またそれと密接に関して、原始ブラックホールの形成閾値として用いられている圧縮関数に関する研究、物質優勢期の原始ブラックホール形成における速度分散の効果に関する研究、等曲率ゆらぎによる原始ブラックホール形成に関する研究、任意のパワースペクトルに対する原始ブラックホールの存在量の評価に関する研究、非球対称重力崩壊における原始ブラックホール形成閾値に関する研究、の合計5編の研究論文を研究期間中に査読を経て国際的な学術誌に掲載されるに至り、大きな成果を上げることができた。また、宇宙論的ブラックホール、星の近点移動、地平線のないコンパクト天体による粒子生成、フリードマン＝ルメートル＝ロバートソン＝ウォーカー時空の補足地平面・時空特異点・無限遠による分類に関する研究、など、関連研究も含めて研究期間中に総計31編の研究論文を査読学術誌に発表することができた。また研究成果に関連して国際会議において合計19件の講演をおこなった。このうち9件は招待講演であった。

研究成果の学術的意義や社会的意義は以下のようなものである。宇宙はどのように生まれたのかという問いは全人類共通の謎である。この問に実証的に答えるには、宇宙の過去の姿を伝える化石を調べていくのが正攻法であろう。そこで重力波観測の進展に相まって注目されてきたのが原始ブラックホールである。原始ブラックホールという化石から宇宙の過去の姿を知る上ではその理論的研究が欠かせない。我々の研究成果は、現在重力は観測によって続々と見つかったブラックホール連星の起源が原始ブラックホールなのかどうかを観測的に決定づける上で基礎的な理論を与えるものである。特に重力波観測によって連星ブラックホールのスピンの情報が得られるので、本研究で得られた原始ブラックホールのスピンに対する理論的予言は、今後の観測によってこれらの連星ブラックホールの起源を推定していく上で鍵となるものとなる。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計31件（うち査読付論文 31件 / うち国際共著 8件 / うちオープンアクセス 7件）

1. 著者名 Bambhaniya Parth, Joshi Ashok B., Dey Dipanjan, Joshi Pankaj S., Mazumdar Arindam, Harada Tomohiro, Nakao Ken-ichi	4. 巻 84
2. 論文標題 Relativistic orbits of S2 star in the presence of scalar field	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 The European Physical Journal C	6. 最初と最後の頁 124
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1140/epjc/s10052-024-12477-3	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 Igata Takahisa, Harada Tomohiro, Saida Hiromi, Takamori Yohsuke	4. 巻 32
2. 論文標題 Periastron shifts in dark matter distribution around a black hole	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 International Journal of Modern Physics D	6. 最初と最後の頁 2350105
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1142/S0218271823501055	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 Harada Tomohiro, Igata Takahisa, Saida Hiromi, Takamori Yohsuke	4. 巻 32
2. 論文標題 General formulae for the periastron shift of a quasi-circular orbit in static spherically symmetric spacetimes and the active gravitational mass density	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 International Journal of Modern Physics D	6. 最初と最後の頁 2350098
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1142/S0218271823500980	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 Harada Tomohiro, Yoo Chul-Moon, Koga Yasutaka	4. 巻 108
2. 論文標題 Revisiting compaction functions for primordial black hole formation	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 43515
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.108.043515	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 Saito Daiki, Harada Tomohiro, Koga Yasutaka, Yoo Chul-Moon	4. 巻 2023
2. 論文標題 Spins of primordial black holes formed with a soft equation of state	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 030 ~ 030
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1475-7516/2023/07/030	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 Harada Tomohiro, Ishii Takaaki, Katagiri Takuya, Tanahashi Norihiro	4. 巻 2023
2. 論文標題 Hairy black holes in AdS with Robin boundary conditions	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 106
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP06(2023)106	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 Nakao Ken-ichi, Okabayashi Kazumasa, Harada Tomohiro	4. 巻 107
2. 論文標題 Radiative gravastar with thermal spectrum: Sudden vacuum condensation without gravitational collapse	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 84036
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.107.084036	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 Harada Tomohiro, Kohri Kazunori, Sasaki Misao, Terada Takahiro, Yoo Chul-Moon	4. 巻 2023
2. 論文標題 Threshold of primordial black hole formation against velocity dispersion in matter-dominated era	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 038 ~ 038
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1475-7516/2023/02/038	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 Nakao Ken-ichi, Okabayashi Kazumasa, Harada Tomohiro	4. 巻 106
2. 論文標題 Radiative gravastar with Gibbons-Hawking temperature	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 105006 ~ 105006
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.106.105006	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 Koga Yasutaka, Harada Tomohiro, Tada Yuichiro, Yokoyama Shuichiro, Yoo Chul-Moon	4. 巻 939
2. 論文標題 Effective Inspiral Spin Distribution of Primordial Black Hole Binaries	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 65 ~ 65
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac93f1	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 Sato Takuma, Maeda Hideki, Harada Tomohiro	4. 巻 39
2. 論文標題 Conformally Schwarzschild cosmological black holes	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Classical and Quantum Gravity	6. 最初と最後の頁 215011 ~ 215011
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6382/ac902f	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 Maeda Hideki, Harada Tomohiro	4. 巻 39
2. 論文標題 Criteria for energy conditions	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Classical and Quantum Gravity	6. 最初と最後の頁 195002 ~ 195002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6382/ac8861	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 Harada Tomohiro, Maeda Hideki, Sato Takuma	4. 巻 833
2. 論文標題 Thakurta metric does not describe a cosmological black hole	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 137332 ~ 137332
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2022.137332	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 Yoo Chul-Moon, Harada Tomohiro, Hirano Shin'ichi, Okawa Hirotada, Sasaki Misao	4. 巻 105
2. 論文標題 Primordial black hole formation from massless scalar isocurvature	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 103538 ~ 103538
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.105.103538	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 Harada Tomohiro, Igata Takahisa, Sato Takuma, Carr Bernard	4. 巻 39
2. 論文標題 Complete classification of Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker solutions with linear equation of state: parallelly propagated curvature singularities for general geodesics	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Classical and Quantum Gravity	6. 最初と最後の頁 145008 ~ 145008
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6382/ac776e	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 Okabayashi Kazumasa, Harada Tomohiro, Nakao Ken-ichi	4. 巻 2022
2. 論文標題 Robustness of particle creation in the formation of a compact object	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 2300
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptac006	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 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 93000
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Katagiri Takuya, Harada Tomohiro	4. 巻 38
2. 論文標題 Stability of small charged anti-de Sitter black holes in the Robin boundary	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Classical and Quantum Gravity	6. 最初と最後の頁 135026 ~ 135026
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6382/abfed6	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 Harada Tomohiro, Yoo Chul-Moon, Kohri Kazunori, Koga Yasutaka, Monobe Takeru	4. 巻 908
2. 論文標題 Spins of Primordial Black Holes Formed in the Radiation-dominated Phase of the Universe: First-order Effect	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/abd9b9	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 Yoo Chul-Moon, Harada Tomohiro, Hirano Shin'ichi, Kohri Kazunori	4. 巻 2021
2. 論文標題 Abundance of primordial black holes in peak theory for an arbitrary power spectrum	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptaa155	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 Allahverdi Rouzbeh, Tomohiro Harada, Kazunori Kohriなど26名	4. 巻 4
2. 論文標題 The First Three Seconds: a Review of Possible Expansion Histories of the Early Universe	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Open Journal of Astrophysics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.21105/astro.2006.16182	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 Kokubu Takafumi, Harada Tomohiro	4. 巻 6
2. 論文標題 Thin-Shell Wormholes in Einstein and Einstein-Gauss-Bonnet Theories of Gravity	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Universe	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/universe6110197	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 Tsuchiya Masataka, Yoo Chul-Moon, Koga Yasutaka, Harada Tomohiro	4. 巻 102
2. 論文標題 Sonic point and photon surface	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.102.044057	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 Patil Mandar, Harada Tomohiro	4. 巻 102
2. 論文標題 Extremal Kerr white holes as a source of ultrahigh energy particles	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.102.024002	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 Yoo Chul-Moon, Harada Tomohiro, Okawa Hirotada	4. 巻 102
2. 論文標題 Threshold of primordial black hole formation in nonspherical collapse	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.102.043526	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 Hioki Kenta, Harada Tomohiro	4. 巻 35
2. 論文標題 Dynamical transition from a naked singularity to a black hole	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal of Modern Physics A	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1142/S0217751X20502012	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 Tomohiro Harada, Maximilian Thaller	4. 巻 110
2. 論文標題 Uniqueness of static, isotropic low- pressure solutions of the Einstein-Vlasov system	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Lett. Math. Phys.	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11005-020-01284-y	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 Ogasawara Kota, Igata Takahisa, Harada Tomohiro, Miyamoto Umpei	4. 巻 101
2. 論文標題 Escape probability of a photon emitted near the black hole horizon	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.101.044023	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 Kokubu Takafumi、Harada Tomohiro	4. 巻 100
2. 論文標題 Bursts of particle creation in gravitational collapse to a horizonless compact object	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.100.084028	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 Koga Yasutaka、Harada Tomohiro	4. 巻 100
2. 論文標題 Stability of null orbits on photon spheres and photon surfaces	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.100.064040	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 Harada Tomohiro、Cardoso Vitor、Miyata Daiki	4. 巻 99
2. 論文標題 Particle creation in gravitational collapse to a horizonless compact object	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.99.044039	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36件 (うち招待講演 9件 / うち国際学会 21件)

1. 発表者名 原田知広
2. 発表標題 零質量スカラー場系における定常軸対称解について
3. 学会等名 ブラックホール磁気圏研究会2024
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 原田知広
2. 発表標題 Periaapsis shift of a quasi-circular orbit in static spherically symmetric spacetimes and the active gravitational mass density
3. 学会等名 第24回特異点研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 原田知広、伊形尚久、斉田浩見、孝森洋介
2. 発表標題 静的球対称時空における準円軌道の近点移動の一般公式と能動的重力質量密度
3. 学会等名 日本物理学会第78回年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Tomohiro Harada
2. 発表標題 Revisiting compaction functions for primordial black hole formation
3. 学会等名 Gravity and Cosmology 2024 (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Tomohiro Harada
2. 発表標題 Primordial black hole formation from cosmological perturbations: recent developments
3. 学会等名 Future Perspectives on Primordial Black Holes (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Tomohiro Harada
2. 発表標題 Revisiting compaction functions for primordial black hole formation
3. 学会等名 The 32nd Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Tomohiro Harada
2. 発表標題 Revisiting compaction functions for primordial black hole formation
3. 学会等名 Focus Week on Primordial Black Holes (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Tomohiro Harada
2. 発表標題 Primordial black hole formation from cosmological perturbations
3. 学会等名 Gravitational Wave Probes of Physics Beyond Standard Model (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Tomohiro Harada
2. 発表標題 Periapsis shift of a quasi-circular orbit in a static spherically symmetric spacetime and the active gravitational mass density
3. 学会等名 Black Hole and Gravitational Waves --from modified theories of gravity to data analysis-- (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Tomohiro Harada
2. 発表標題 The periapsis shift of a quasi-circular orbit in a static spherically symmetric spacetime and the active gravitational mass density
3. 学会等名 XV International Conference on Gravitation, Astrophysics and Cosmology (ICGAC15) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Tomohiro Harada
2. 発表標題 Compaction function revisited
3. 学会等名 Dynamics of Primordial Black Hole Formation (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Tomohiro Harada
2. 発表標題 Periapsis shift in a general static spherically symmetric spacetime
3. 学会等名 The 31st Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tomohiro Harada
2. 発表標題 Complete classification of the FLRW solutions with linear equation of state: p.p. curvature singularities for general geodesics
3. 学会等名 Gravity: Current challenges in black hole physics and cosmology (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tomohiro Harada
2. 発表標題 Complete classification of the FLRW solutions with linear equation of state: p.p. curvature singularities for general geodesics
3. 学会等名 The 23rd International Conference on General Relativity and Gravitation (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 原田知広、伊形尚久、斉田浩見、孝森洋介
2. 発表標題 一般的な静的球対称時空における準円軌道の近点移動
3. 学会等名 日本天文学会2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 原田知広、前田秀基、佐藤琢磨
2. 発表標題 Thakurta 計量は宇宙論的ブラックホールを記述しない
3. 学会等名 日本物理学会2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tomohiro Harada
2. 発表標題 Spins of primordial black holes formed in the radiation-dominated phase of the universe: first-order effect
3. 学会等名 The 30th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tomohiro Harada
2. 発表標題 Spins of primordial black holes formed in the radiation-dominated phase of the universe: first-order effect
3. 学会等名 The KEK-PH + KEK-Cosmo joint workshop on "Primordial Black Holes" (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 原田知広、伊形尚久、佐藤琢磨、Bernard Carr
2. 発表標題 FLRW解の共形境界の分類：線形状態方程式の場合II
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 原田知広、伊形尚久、佐藤琢磨
2. 発表標題 FLRW解の共形境界の分類：線形状態方程式の場合
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 原田知広
2. 発表標題 静的球対称時空における近点移動
3. 学会等名 ブラックホール磁気圏研究会2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 原田知広
2. 発表標題 FLRW解の共形分類II
3. 学会等名 第22回特異点研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tomohiro Harada
2. 発表標題 Primordial Black Holes: Mass and Spin
3. 学会等名 7th Korea-Japan Workshop on Dark Energy: Maeda's Universe (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tomohiro Harada
2. 発表標題 Stability of charged AdS black holes in the Robin boundary
3. 学会等名 Online JGRG workshop 2020 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 原田知広
2. 発表標題 ペンローズ過程と粒子衝突
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 原田知広、柳哲文、郡和範、古賀泰敬、物部武瑠
2. 発表標題 輻射優勢期に形成される原始ブラックホールのスピンII
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 原田知広、柳哲文、郡和範、古賀泰敬、物部武瑠
2. 発表標題 輻射優勢期に形成される原始ブラックホールのスピン
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tomohiro Harada
2. 発表標題 Particle Creation by Horizonless Compact Objects
3. 学会等名 International Workshop on Astrophysics and Cosmology (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tomohiro Harada
2. 発表標題 Formation of Primordial Black Holes
3. 学会等名 International Workshop on Astrophysics and Cosmology (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tomohiro Harada
2. 発表標題 Effect of Inhomogeneity on Primordial Black Hole Formation in the Matter Dominated Era
3. 学会等名 Focus Week on Primordial Black Holes (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tomohiro Harada
2. 発表標題 Particle creation in gravitational collapse to a horizonless compact object
3. 学会等名 19th Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tomohiro Harada
2. 発表標題 Particle Creation In Gravitational Collapse To A Horizonless Compact Object
3. 学会等名 22nd International Conference on General Relativity and Gravitation (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tomohiro Harada
2. 発表標題 Particle creation in gravitational collapse to a horizonless compact object
3. 学会等名 29th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 原田知広、柳哲文、郡和範
2. 発表標題 原始ブラックホールのスピンについて
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 原田知広
2. 発表標題 原始ブラックホールの形成
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 國分隆文、原田知広
2. 発表標題 地平面のないコンパクト天体への重力崩壊におけるバースト的粒子生成
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 北本俊二, 原田知広, 亀田真吾	4. 発行年 2021年
2. 出版社 理工図書	5. 総ページ数 196
3. 書名 宇宙まるごとQ & A: はやぶさ2からブラックホールまで	

〔産業財産権〕

〔その他〕

原始ブラックホールについて  
[https://www2.rikkyo.ac.jp/web/harada/pbh\\_kaken.pdf](https://www2.rikkyo.ac.jp/web/harada/pbh_kaken.pdf)

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
研究協力者	柳 哲文  (Yoo Chul-Moon)		
研究協力者	郡 和範  (Kohri Kazunori)		
研究協力者	中司 桂輔  (Nakashi Keisuke)		
研究協力者	古賀 泰敬  (Koga Yasutaka)		
研究協力者	物部 武瑠  (Monobe Takeru)		

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 Dynamics of primordial black hole formation	開催年 2023年～2023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			
韓国	IBS			
英国	QMUL			
インド	IIT Dharwad			
中国	湖南師範大学			
スウェーデン	Chalmers University of Technology			
ポルトガル	Universidade de Lisboa			
インド	Ahmedabad University	Charusat University	IIT Kharagpur	
カナダ	Dalhousie University			