

令和 6 年 6 月 20 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20H01902

研究課題名（和文）「弱い重力予想」に基づく素粒子論・宇宙論：量子重力理論への現象論的アプローチ

研究課題名（英文）Weak gravity conjecture and its application to particle physics and cosmology

研究代表者

野海 俊文（Noumi, Toshifumi）

東京大学・大学院総合文化研究科・准教授

研究者番号：30709308

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,800,000円

研究成果の概要（和文）：弱い重力予想は「すべての相互作用の中で重力が一番弱い」と主張し、素粒子論・宇宙論モデルの質量スペクトルや相互作用係数が満たすべき様々な不等式を预言する。本研究では、ユニタリ性や因果律などの基本原理の立場から弱い重力予想の理論検証を行なった。特に、アクシオンや高次形式対称性に対する弱い重力予想の強い証拠を与えると共に、素粒子標準模型や暗黒物質模型と量子重力の整合性を議論した。これらと並行し、弱い重力予想のターゲットの1つであるアクシオン宇宙論の研究も進め、アクシオン暗黒物質から生成される重力波シグナルの同定などを行なった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

弱い重力予想に代表される「量子重力特有の整合性条件」を解明し、その素粒子論・宇宙論的帰結を明らかにできれば、量子重力の立場から素粒子や宇宙の謎に迫ることができる。また逆に、得られた整合性条件を素粒子実験や宇宙観測のデータと比較することにより、現象論に根ざした量子重力研究を進められる。本研究ではユニタリ性や因果律などの立場から「量子重力特有の整合性条件」解明のための理論的枠組みを整備したが、この成果をさらに発展させ、様々な素粒子論・宇宙論モデルに適用することにより、量子重力と素粒子論・宇宙論の双方向研究が展開できると期待される。

研究成果の概要（英文）：The weak gravity conjecture states that gravity is the weakest force, offering various consistency conditions on interactions in particle physics and cosmology. In this research, we performed theoretical tests of the conjecture based on fundamental principles such as unitarity and causality. In particular, we provided strong evidence for the weak gravity conjecture for axion and higher form symmetries. We also discussed consistency of the Standard Model and dark matter models based on unitarity of gravitational scattering. In addition, we studied phenomenology of axion cosmology. For example, we identified gravitational wave signals originating from axion dark matters.

研究分野：素粒子論・宇宙論

キーワード：量子重力 素粒子論 宇宙論 弦理論 弱い重力予想 スワンプランド 暗黒物質 ブラックホール

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

量子重力理論の構築は現代物理学の最重要課題の1つであり、超弦理論をはじめとする理論研究の進展は著しい。その一方で、重力の量子効果が現れるエネルギースケールが極めて高いために量子重力理論の実験的検証は難しいと考えられてきた。しかし、近年の理論研究では「量子重力理論に基づく素粒子論・宇宙論模型が満たす一般的性質は何か?」という問いを投げかけることでこの難問に挑もうという機運が高まっている。

例えば、量子色力学や超弦理論などの高エネルギー理論に動機付けられ、宇宙論の様々な場面で重要な役割を果たす擬スカラー場アクシオンの文脈では「量子重力理論にはどのような質量・ポテンシャルのアクシオンが存在するのか?」という問題が盛んに議論されてきた。その過程で提案された弱い重力予想は「アクシオンポテンシャルの周期に理論的上限值が存在すること」を予言し、インフレーション中に作られる原始揺らぎのスペクトルや暗黒物質の質量に関する興味深い予言を与えることが知られている。

このように「量子重力の整合性条件」をキーワードにすることで、量子重力の立場から素粒子論・宇宙論を展開し、素粒子実験や宇宙観測に根ざした現象論から量子重力理論へのフィードバックを与えられると期待される。

2. 研究の目的

以上の背景を踏まえ、本研究では弱い重力予想の理論検証および関連するアクシオン宇宙論を並行して進める。弱い重力予想に代表される「量子重力の整合性条件」を解明するための理論的枠組みを整備し、その素粒子論・宇宙論への応用を進めることで、量子重力と現象論の架け橋の構築を目指す。

3. 研究の方法

弱い重力予想の理論検証には「散乱行列理論」を応用する。散乱振幅のユニタリ性や解析性などの基本原理を用いることで「質量スペクトルや相互作用係数が満たすべき様々な不等式」が導出できる。このようなアプローチは「散乱行列理論」と呼ばれ、歴史的にも素粒子物理学で重要な役割を果たしてきた。本研究ではこれを重力理論に応用することで弱い重力予想の理論検証を行い、より一般に「量子重力の整合性条件」を解明するための理論的枠組みを整備する。

アクシオン宇宙論においては、弱い重力予想の主なターゲットの1つである「非常に軽いアクシオン暗黒物質」に焦点をあてる。今後更なる進展が期待される重力波観測や近年進歩している量子制御を活用した暗黒物質探査実験等における現象論を展開することで、量子重力研究においてどのようなモデルやパラメータ領域に狙いを定めるのが効果的かを見極める。

相補的バックグラウンドを持つ野海、早田、泉および研究費で雇用する博士研究員がこれらのテーマを協力して進めることで、量子重力の理論研究と宇宙論の現象論を双方向的に展開する。

4. 研究成果

本研究費のサポートを受けて挙げた研究成果の一部を以下にまとめる。

(1) 弱い重力予想の理論検証 (野海、指導学生)

弱い重力予想は極限ブラックホールの質量電荷比や極限ブラックブレンの張力電荷比がある種の単調性に従うことを予言する。その自然な拡張である「アクシオンに対する弱い重力予想」は、アクシオン電荷を持つワームホールの作用と電荷の比が同様の単調性に従うことを予言する。発表論文[1]で野海らは、この単調性が散乱振幅のユニタリ性などの原理から自然と従うことを示し、アクシオンに対する弱い重力予想の強い証拠を与えた。その後、野海は指導大学院生とともに、同様の解析を極限ブラックブレンに拡張し、高次形式対称性に対する弱い重力予想の証拠を与えた[2]。なお、当該大学院生はこの成果に基づいて博士号を取得している。

(2) 散乱行列理論の重力理論への応用 (野海、指導学生)

以上の成果を受けて、野海らは発表論文[3,4]で散乱行列理論の重力理論への応用をさらに進めた。まず、発表論文[3]では、素粒子標準模型における散乱振幅のユニタリ性を重力相互作用の効果まで含めて精査した。いくつかの仮定のもとではあるが、標準模型のカットオフスケールを推定することで、相互作用の統一を予感させる結果を得た。その過程では、ヒッグス粒子と電子の湯川相互作用に対して弱い重力予想と類似の不等式が得られた。従来の弱い重力予想の適用

範囲はゲージ相互作用に限られていたが、この結果は同様の関係式が他の相互作用にも成り立つことを示唆している。以上の成果は、重力理論における散乱行列理論に関する近年の進展を現実の素粒子論模型に初めて応用した点が特に高く評価され、Phys. Rev. Lett. より出版された。

発表論文[4]で野海は指導大学院生らとともに、散乱行列理論の暗黒物質模型への応用を行なった。具体例として暗黒光子模型を扱い、標準模型光子と暗黒光子の散乱振幅のユニタリ性を重力相互作用まで含めて精査した。論文[3]と同様の仮定のもと、標準模型講師と暗黒光子の相互作用定数に理論的下限が存在する可能性を指摘するとともに、重力理論における散乱行列理論を現象論模型に応用する際の課題も整理した。当該大学院生は、論文[4]を含む一連の成果に基づいて2024年度に博士論文を提出予定である。

その後、発表論文[5]で野海は指導大学院生らとともに、非線型電磁気学における荷電ブラックホールの極限条件を平坦時空、ド・ジッター時空、反ド・ジッター時空でそれぞれ調べた。特に、弱い重力予想が予言する「極限ブラックホールの質量電荷比の単調性」と発表論文[3,4]で行なった散乱行列理論の解析が密接に関連することを量子電磁気学を例に指摘した。当該大学院生は論文[5]に関するポスター発表で国際会議の発表賞を受賞した。

(3) アクシオン宇宙論 (早田)

早田は、弱い重力予想のターゲットの1つであるアクシオン暗黒物質の探索手法を多角的に研究した。発表論文[6]では、アクシオン暗黒物質が生成するゲージ場に起因する背景重力波量の正確な見積りを行なった。格子シミュレーションにより非線型ダイナミクスの解析を行うことで、アクシオン暗黒物質において自然な崩壊係数 10^{16}GeV 程度のアクシオンから SKA で検出可能な円偏光重力波が生成されることを示した。詳細な数値計算に基づくこの成果は高く評価され、Phys. Rev. Lett. より出版された。そのほか、マグノンを用いたアクシオンの新たな探索手法の提案[7]やアクシオン暗黒物質と類似の性質を持つ「非常に軽いベクトル暗黒物質」をパルサータイミングアレイを用いて探索する手法の提案[8]も行なった。

(4) 量子重力の整合性条件への新たなアプローチの開拓 (野海、泉、博士研究員、指導学生)

本研究では主に散乱行列理論を用いて「量子重力の整合性条件」の研究を進めてきたが、それと並行して新たなアプローチも模索した。ブラックホールエントロピーに代表される「時空の情報量」は「量子重力の整合性条件」の研究においても重要な役割を果たす。泉はこのような「時空の情報量」の考え方をダイナミカルな時空や弱重力領域への拡張を行うため、重力理論において様々な「面」が満たすべき面積不等式の研究を行なった[9-11]。泉の一連の結果について意見交換をする中で、野海と泉らは宇宙検閲官仮説を用いた量子重力の整合性条件という着想を得て、それに関する最初の結果を arXiv 上で発表した (当該論文は現在論文雑誌で査読中)。

また、野海と科研費雇用の博士研究員、指導大学院生らは発表論文[12]において、ブラックホールの蒸発過程の過程のユニタリ性を特徴付ける「ページ曲線」の考え方を、保存電荷の各電荷セクターの量子もつれを特徴付ける「symmetry-resolved entanglement entropy」に拡張した。その結果に基づいて、ページ曲線との整合性から「量子重力に広域対称性が存在しないこと」を議論した。

<引用文献>

二重線は研究代表者と分担者、科研費雇用の博士研究員を、一重線は指導大学院生を表す。

1. S. Andriolo, T.C. Huang, T. Noumi, H. Ooguri, G. Shiu, “Duality and Axionic Weak Gravity,” Phys. Rev. D 102 (2020) 046008.
2. T. Noumi, H. Satake, “Higher derivative corrections to black brane thermodynamics and the weak gravity conjecture,” Jour. High Energy Phys.12(2022)130.
3. K. Aoki, T.Q. Loc, T. Noumi, J. Tokuda, “Is the Standard Model in the Swampland? Consistency Requirements from Gravitational Scattering,” Phys. Rev. Lett. 127 (2021) 091602.
4. T. Noumi, S. Sato, J. Tokuda, “Phenomenological motivation for gravitational positivity bounds: A case study of dark sector physics,” Phys. Rev. D 108 (2023) 056013.
5. Y. Abe, T. Noumi, K. Yoshimura, “Black hole extremality in nonlinear electrodynamics: a lesson for weak gravity and Festina Lente bounds,” Jour. High Energy Phys. 09 (2023) 024.
6. N. Kitajima, J. Soda, Y. Urakawa, “Nano-Hz Gravitational-Wave Signature from Axion Dark Matter,” Phys. Rev. Lett. 126 (2021) 121301.
7. T. Ikeda, A. Ito, K. Miuchi, J. Soda, H. Kurashige, Y. Shikano, “Axion search with quantum nondemolition detection of magnons,” Phys. Rev. D 105 (2022) 102004.

8. H. Omiya, K. Nomura, J. Soda, “Hellings-Downs curve deformed by ultralight vector dark matter,” *Phys. Rev. D* 108 (2023) 104006.
9. K. Izumi, Y. Tomikawa, T. Shiromizu, H. Yoshino, “Area bound for surfaces in generic gravitational field,” *PTEP* 2021 (2021) 083E02.
10. K. Lee, T. Shiromizu, K. Izumi, “Refined inequalities for a loosely trapped surface and attractive gravity probe surface,” *Phys. Rev. D* 105 (2022), 044037.
11. K. Lee, T. Shiromizu, K. Izumi, H. Yoshino, Y. Tomikawa, “Four types of attractive gravity probe surfaces,” *Phys. Rev. D* **106** (2022) no.6, 064028.
12. P.H.C. Lau, T. Noumi, Y. Takii, K. Tamaoka, “Page curve and symmetries,” *JHEP* 10 (2022), 015.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計48件（うち査読付論文 48件 / うち国際共著 16件 / うちオープンアクセス 28件）

1. 著者名 Aoki Shuntaro, Noumi Toshifumi, Sano Fumiya, Yamaguchi Masahide	4. 巻 2024
2. 論文標題 Analytic formulae for inflationary correlators with dynamical mass	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 1-36
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP03(2024)073	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 Abe Yoshihiko, Noumi Toshifumi, Yoshimura Kaho	4. 巻 2023
2. 論文標題 Black hole extremality in nonlinear electrodynamics: a lesson for weak gravity and Festina Lente bounds	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 1-37
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP09(2023)024	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 Noumi Toshifumi, Tokuda Junsei	4. 巻 2023
2. 論文標題 Finite energy sum rules for gravitational Regge amplitudes	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 1-33
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP06(2023)032	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 Khoury Justin, Noumi Toshifumi, Trodden Mark, Wong Sam S.C.	4. 巻 2023
2. 論文標題 Stability of hairy black holes in shift-symmetric scalar-tensor theories via the effective field theory approach	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 1-35
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1475-7516/2023/04/035	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 Noumi Toshifumi, Sato Sota, Tokuda Junsei	4. 巻 108
2. 論文標題 Phenomenological motivation for gravitational positivity bounds: A case study of dark sector physics	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.108.056013	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 Shiromizu Tetsuya, Izumi Keisuke	4. 巻 2024
2. 論文標題 Attractive gravity probe surface, positivity of quasi-local mass, and Arnowitt-Deser-Misner mass expression	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptad159	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 Shiromizu Tetsuya, Izumi Keisuke	4. 巻 2023
2. 論文標題 Attractive gravity probe surface with positive cosmological constant	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 1-14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptad119	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 Amo Masaya, Izumi Keisuke, Tomikawa Yoshimune, Shiromizu Tetsuya, Yoshino Hiroataka	4. 巻 107
2. 論文標題 Asymptotic behavior of null geodesics near future null infinity. IV. Null-access theorem for generic asymptotically flat spacetime	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 1-16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.107.124050	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 Izumi Keisuke, Shimada Keigo, Tomonari Kyosuke, Yamaguchi Masahide	4. 巻 2023
2. 論文標題 Boundary conditions for constraint systems in variational principle	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 1-15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptad122	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 Izumi Keisuke, Tomikawa Yoshimune, Shiromizu Tetsuya, Yoshino Hirota	4. 巻 2023
2. 論文標題 Attractive gravity probe surfaces in higher dimensions	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 1-20
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptad046	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 Omiya Hidetoshi, Nomura Kimihiro, Soda Jiro	4. 巻 108
2. 論文標題 Hellings-Downs curve deformed by ultralight vector dark matter	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 1-13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.108.104006	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 Kanno Sugumi, Soda Jiro, Taniguchi Akira	4. 巻 108
2. 論文標題 Circularly polarized gravitational waves in Chern-Simons gravity originating from an axion domain wall	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.108.083525	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 Chen Chong-Bin, Soda Jiro	4. 巻 2023
2. 論文標題 Implications of multi-axion dark matter on structure formation	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 1-49
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1475-7516/2023/06/049	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 Kanno Sugumi, Mukuno Ann, Soda Jiro, Ueda Kazushige	4. 巻 2023
2. 論文標題 A peak in the power spectrum of primordial gravitational waves induced by primordial dark magnetic fields	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 1-52
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1475-7516/2023/05/052	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 Ito Asuka, Soda Jiro	4. 巻 83
2. 論文標題 Exploring high-frequency gravitational waves with magnons	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The European Physical Journal C	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1140/epjc/s10052-023-11876-2	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 Nomura Kimihiro, Saito Kaishu, Soda Jiro	4. 巻 107
2. 論文標題 Observing axions through photon ring dimming of black holes	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 1-18
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.107.123505	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 Kanno Sugumi, Mukuno Ann, Soda Jiro, Ueda Kazushige	4. 巻 107
2. 論文標題 Impact of quantum entanglement induced by magnetic fields on primordial gravitational waves	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.107.063503	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 Kanno Sugumi, Mukuno Ann, Soda Jiro, Ueda Kazushige	4. 巻 107
2. 論文標題 Anisotropic warm inflation	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.107.063524	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 Lau Pak Hang Chris, Noumi Toshifumi, Takii Yuhei, Tamaoka Kotaro	4. 巻 2022
2. 論文標題 Page curve and symmetries	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 1-16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP10(2022)015	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 Noumi Toshifumi, Satake Hibiki	4. 巻 2022
2. 論文標題 Higher derivative corrections to black brane thermodynamics and the weak gravity conjecture	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 1-22
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP12(2022)130	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 Kangjae, Shiromizu Tetsuya, Izumi Keisuke	4. 巻 105
2. 論文標題 Refined inequalities for a loosely trapped surface and attractive gravity probe surface	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.105.044037	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 Amo Masaya, Shiromizu Tetsuya, Izumi Keisuke, Yoshino Hirotaka, Tomikawa Yoshimune	4. 巻 105
2. 論文標題 Asymptotic behavior of null geodesics near future null infinity. II. Curvatures, photon surface, and dynamically transversely trapping surface	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.105.064074	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 Izumi Keisuke, Shiromizu Tetsuya, Suzuki Kenta, Takayanagi Tadashi, Tanahashi Norihiro	4. 巻 2022
2. 論文標題 Brane dynamics of holographic BCFTs	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 1-50
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP10(2022)050	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 Amo Masaya, Izumi Keisuke, Tomikawa Yoshimune, Yoshino Hirotaka, Shiromizu Tetsuya	4. 巻 106
2. 論文標題 Asymptotic behavior of null geodesics near future null infinity. III. Photons towards inward directions	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.106.084007	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 Lee Kangjae, Shiromizu Tetsuya, Izumi Keisuke, Yoshino Hiroataka, Tomikawa Yoshimune	4. 巻 106
2. 論文標題 Four types of attractive gravity probe surfaces	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 1-14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.106.064028	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 Shiromizu Tetsuya, Izumi Keisuke, Lee Kangjae, Soligon Diego	4. 巻 106
2. 論文標題 Maximum size of black holes in our accelerating Universe	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.106.084014	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 Kanno Sugumi, Matsumura Akira, Soda Jiro	4. 巻 37
2. 論文標題 Harvesting quantum coherence from axion dark matter	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Modern Physics Letters A	6. 最初と最後の頁 1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1142/S0217732322500286	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 Kanno Sugumi, Soda Jiro	4. 巻 31
2. 論文標題 Squeezed quantum states of graviton and axion in the universe	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 International Journal of Modern Physics D	6. 最初と最後の頁 1-25
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1142/S0218271822500985	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 Chen Chong-Bin, Soda Jiro	4. 巻 2022
2. 論文標題 Geometric structure of multi-form-field isotropic inflation and primordial fluctuations	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 1-45
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1475-7516/2022/05/029	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 Kanno Sugumi, Soda Jiro, Ueda Kazushige	4. 巻 106
2. 論文標題 Conversion of squeezed gravitons into photons during inflation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 1-14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.106.083508	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 Aoki Katsuki, Loc Tran Quang, Noumi Toshifumi, Tokuda Junsei	4. 巻 127
2. 論文標題 Is the Standard Model in the Swampland? Consistency Requirements from Gravitational Scattering	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.127.091602	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 Noumi Toshifumi, Tokuda Junsei	4. 巻 104
2. 論文標題 Gravitational positivity bounds on scalar potentials	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 1-22
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.104.066022	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 Kato Mitsuhiro, Nishii Kanji, Noumi Toshifumi, Takeuchi Toshiaki, Zhou Siyi	4. 巻 2021
2. 論文標題 Spiky strings in de Sitter space	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 1-30
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP05(2021)047	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 Kim Suro, Noumi Toshifumi, Takeuchi Keito, Zhou Siyi	4. 巻 2021
2. 論文標題 Perturbative unitarity in quasi-single field inflation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 1-31
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP07(2021)018	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 Masuda Toru, Matsunaga Hiroaki, Noumi Toshifumi	4. 巻 2022
2. 論文標題 Proof of new S-matrix formula from classical solutions in open string field theory: Or, deriving on-shell open string field amplitudes without using Feynman rules, Part II	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 1-26
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptab140	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 Gao Pengyuan, Takahashi Kazufumi, Ito Asuka, Soda Jiro	4. 巻 104
2. 論文標題 Cosmic no-hair conjecture and inflation with an SU(3) gauge field	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 1-13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.104.103526	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 Ikeda Tomonori, Ito Asuka, Miuchi Kentaro, Soda Jiro, Kurashige Hisaya, Shikano Yutaka	4. 巻 105
2. 論文標題 Axion search with quantum nondemolition detection of magnons	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.105.102004	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 Kanno Sugumi, Matsumura Akira, Soda Jiro	4. 巻 37
2. 論文標題 Harvesting quantum coherence from axion dark matter	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Modern Physics Letters A	6. 最初と最後の頁 1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1142/S0217732322500286	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 Kitajima Naoya, Soda Jiro, Urakawa Yuko	4. 巻 126
2. 論文標題 Nano-Hz Gravitational-Wave Signature from Axion Dark Matter	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.126.121301	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 Amo Masaya, Izumi Keisuke, Tomikawa Yoshimune, Yoshino Hiroataka, Shiromizu Tetsuya	4. 巻 104
2. 論文標題 Asymptotic behavior of null geodesics near future null infinity: Significance of gravitational waves	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 1-14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.104.064025	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 Amo Masaya, Shiromizu Tetsuya, Izumi Keisuke, Yoshino Hirotaka, Tomikawa Yoshimune	4. 巻 105
2. 論文標題 Asymptotic behavior of null geodesics near future null infinity. II. Curvatures, photon surface, and dynamically transversely trapping surface	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.105.064074	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 Lee Kangjae, Shiromizu Tetsuya, Izumi Keisuke	4. 巻 105
2. 論文標題 Refined inequalities for a loosely trapped surface and attractive gravity probe surface	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.105.044037	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 Andriolo Stefano, Huang Tzu-Chen, Noumi Toshifumi, Ooguri Hirosi, Shiu Gary	4. 巻 102
2. 論文標題 Duality and axionic weak gravity	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.102.046008	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 Loges Gregory J., Noumi Toshifumi, Shiu Gary	4. 巻 2020
2. 論文標題 Duality and supersymmetry constraints on the weak gravity conjecture	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 1-21
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP11(2020)008	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 Noumi Toshifumi, Saito Kaishu, Soda Jiro, Yoshida Daisuke	4. 巻 103
2. 論文標題 O(d,d;Z) invariant Fierz-Pauli massive gravity	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.103.046011	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 Isono Hiroshi, Liu Hoiki Madison, Noumi Toshifumi	4. 巻 2021
2. 論文標題 Wavefunctions in dS/CFT revisited: principal series and double-trace deformations	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 1-23
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP04(2021)166	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 Kitajima Naoya, Soda Jiro, Urakawa Yuko	4. 巻 126
2. 論文標題 Nano-Hz Gravitational-Wave Signature from Axion Dark Matter	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.126.121301	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 Izumi Keisuke, Tomikawa Yoshimune, Shiromizu Tetsuya, Yoshino Hirotaka	4. 巻 2021
2. 論文標題 Area bound for surfaces in generic gravitational field	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 1-28
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptab089	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

[学会発表] 計43件(うち招待講演 41件/うち国際学会 37件)

1. 発表者名 Toshifumi Noumi
2. 発表標題 Thought experiments on dark sector and cosmic censorship conjecture
3. 学会等名 2024 Kanto-NTU High Energy Physics Workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Toshifumi Noumi
2. 発表標題 Bootstrap Approaches to Cosmology and Gravity
3. 学会等名 Chongqing Workshop on Cosmology and Fundamental Physics 2023 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Toshifumi Noumi
2. 発表標題 How dark can dark matters be?
3. 学会等名 EAST ASIA JOINT WORKSHOP ON FIELDS AND STRINGS 2023 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Toshifumi Noumi
2. 発表標題 Positivity, Black Holes and Weak Gravity
3. 学会等名 YITP workshop -Gravity 2023: Dawn of field theoretic approach- (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Keisuke Izumi
2. 発表標題 Area bound in weak gravity region
3. 学会等名 IBS CTPU-CAG 2023 Workshop on Modified Gravity (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Keisuke Izumi
2. 発表標題 リーマン-ペンローズ不等式の一般化
3. 学会等名 一般相対論と幾何 (招待講演)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Jiro Soda
2. 発表標題 Can we detect gravitons or HFGWs?
3. 学会等名 Copernics Webinar (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Jiro Soda
2. 発表標題 Serach for high frequency gravitational waves
3. 学会等名 String theory, gravity and cosmology SGC2023(招待講演)(国際学会) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Toshifumi Noumi
2. 発表標題 Positivity and the Swampland
3. 学会等名 YITP workshop -Gravity: current challenges in black hole physics and cosmology- (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Toshifumi Noumi
2. 発表標題 Introduction to the Swampland Program
3. 学会等名 Summer Institute 2022 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Toshifumi Noumi
2. 発表標題 Gravitational Positivity and (Beyond) the Standard Model
3. 学会等名 KEK-PH 202 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Toshifumi Noumi
2. 発表標題 Gravitational Positivity and (Beyond) the Standard Model
3. 学会等名 Annual theory meeting of National Center of Theoretical Science (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Toshifumi Noumi
2. 発表標題 Dark Matter and Quantum Gravity
3. 学会等名 Workshop on Very Light Dark Matter 2023 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Keisuke Izumi
2. 発表標題 Area inequality in weak gravity region
3. 学会等名 Quantum extreme universe from quantum information (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Keisuke Izumi
2. 発表標題 弱重力中の面積不等式: リーマン・ペンローズ不等式の一般化
3. 学会等名 第5回ブラックホール研究会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Jiro Soda
2. 発表標題 Graviton search with quantum information and quantum sensing
3. 学会等名 極限宇宙コロキウム (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Jiro Soda
2. 発表標題 原始重力波とその量子性について
3. 学会等名 Frontiers in Gravity and Fundamental Physics (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Toshifumi Noumi
2. 発表標題 Thought experiments on dark sector and cosmic censorship conjecture
3. 学会等名 2024 Kanto-NTU High Energy Physics Workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Toshifumi Noumi
2. 発表標題 Bootstrap Approaches to Cosmology and Gravity
3. 学会等名 Chongqing Workshop on Cosmology and Fundamental Physics 2023 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Toshifumi Noumi
2. 発表標題 How dark can dark matters be?
3. 学会等名 EAST ASIA JOINT WORKSHOP ON FIELDS AND STRINGS 2023 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Toshifumi Noumi
2. 発表標題 Positivity, Black Holes and Weak Gravity
3. 学会等名 YITP workshop -Gravity 2023: Dawn of field theoretic approach- (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Keisuke Izumi
2. 発表標題 Area bound in weak gravity region
3. 学会等名 IBS CTPU-CAG 2023 Workshop on Modified Gravity (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 泉圭介
2. 発表標題 リーマン-ペンローズ不等式の一般化
3. 学会等名 一般相対論と幾何 (招待講演)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Jiro Soda
2. 発表標題 Can we detect gravitons or HFGWs?
3. 学会等名 Copernics Webinar (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Jiro Soda
2. 発表標題 Serach for high frequency gravitational waves
3. 学会等名 String theory, gravity and cosmology SGC2023 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Toshifumi Noumi
2. 発表標題 Positivity and the Swampland
3. 学会等名 YITP workshop -Gravity: current challenges in black hole physics and cosmology- (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Toshifumi Noumi
2. 発表標題 Introduction to the Swampland Program
3. 学会等名 Summer Institute 2022 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Toshifumi Noumi
2. 発表標題 Gravitational Positivity and (Beyond) the Standard Model
3. 学会等名 KEK-PH 202 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Toshifumi Noumi
2. 発表標題 Gravitational Positivity and (Beyond) the Standard Model
3. 学会等名 Annual theory meeting of National Center of Theoretical Science (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Toshifumi Noumi
2. 発表標題 Dark Matter and Quantum Gravity
3. 学会等名 Workshop on Very Light Dark Matter 2023 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Keisuke Izumi
2. 発表標題 Area inequality in weak gravity region
3. 学会等名 Quantum extreme universe from quantum information (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Keisuke Izumi
2. 発表標題 弱重力中の面積不等式：リーマン・ペンローズ不等式の一般化
3. 学会等名 第5回ブラックホール研究会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Jiro Soda
2. 発表標題 Graviton search with quantum information and quantum sensing
3. 学会等名 極限宇宙コロキウム (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Jiro Soda
2. 発表標題 原始重力波とその量子性について
3. 学会等名 Frontiers in Gravity and Fundamental Physics (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Toshifumi Noumi
2. 発表標題 Introduction to the Swampland Program
3. 学会等名 Online workshop: Black Holes, Swampland, and Quantum Gravity (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Toshifumi Noumi
2. 発表標題 String Regge trajectories on de Sitter space
3. 学会等名 Online workshop: holography at Prague (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Toshifumi Noumi
2. 発表標題 Gravitational Positivity Bounds and the Standard Model
3. 学会等名 East Asia Joint Symposium on Fields and Strings 2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Jiro Soda
2. 発表標題 Gravitational waves in particle physics, cosmology, and astrophysics
3. 学会等名 The Future is Dark (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Jiro Soda
2. 発表標題 Magnon limits on high frequency gravitational waves
3. 学会等名 Ultra-High Frequency GWs: A Theory and Technology Roadmap (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Keisuke Izumi
2. 発表標題 Area bound for surfaces in general relativity
3. 学会等名 LeCosPA 4th International Symposium Unity of Physics - From Plasma Wakefields to Black Holes (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Toshifumi Noumi
2. 発表標題 Swampland conjectures and gravitational positivity
3. 学会等名 YITP workshop: Recent progress in theoretical physics based on quantum information theory (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Toshifumi Noumi
2. 発表標題 Country Map of the EFT Landscape
3. 学会等名 International Workshop "Cosmological Correlators" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Toshifumi Noumi
2. 発表標題 Duality and Weak Gravity
3. 学会等名 Japan-Netherlands symposium on Gravity & Cosmology (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020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
研究分担者	早田 次郎 (Soda Jiro) (00222076)	神戸大学・理学研究科・教授 (14501)	

6. 研究組織（つづき）

	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	泉 圭介 (Izumi Keisuke) (90554501)	名古屋大学・素粒子宇宙起源研究所・講師 (13901)	

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2件

国際研究集会 Kobe Workshop on Cosmology and Fundamental Physics	開催年 2022年～2022年
国際研究集会 Kobe Workshop on Cosmology and Fundamental Physics 2023	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