

令和 6 年 6 月 4 日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2023

課題番号：21K13918

研究課題名(和文) 確率解析・原始ブラックホール・重力波観測から迫るインフレーション

研究課題名(英文) Inflationary universe in light of stochastic calculus, primordial black holes, and gravitational waves

研究代表者

多田 祐一郎 (Tada, Yuichiro)

名古屋大学・高等研究院(理)・特任助教

研究者番号：90837022

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では確率形式、原始ブラックホール(BH)、重力波の3つの視点からインフレーション宇宙の機構解明を目指した。本研究費により計16本の原著論文を執筆、確率形式におけるゆらぎの粗視化や非ガウスな初期ゆらぎから原始BH量を見積もる方法、そのような場合における重力波量の推定等々を確立した。これらの功績が認められ、書籍"Black Holes in the Era of Gravitational-Wave Astronomy"の1章に招待され、原始BHに関する総括論文arXiv:2211.05767をEscriva博士およびKuhnel博士とともに執筆した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

宇宙に満ちる暗黒物質の正体が未だ不明な中、その候補として原始BHが注目を集めている。小惑星程度の質量の原始BHであればこれまでの観測と矛盾なく暗黒物質を説明できる一方、その証拠を観測的に得ることは難しい。そこで副産物である重力波が間接的証拠として注目され、将来の宇宙望遠鏡LISAで観測可能であることが示されている。本研究により原始BH量と重力波量のより定量的な関係性が明らかになり、実際に重力波が観測された際に原始BHの間接的証拠としての根拠が強くなるとともに、インフレーション宇宙への示唆を得ることもできるようになった。

研究成果の概要(英文)：This research aimed to elucidate the mechanism of the inflationary universe from three perspectives: stochastic formalism, primordial black holes (PBHs), and gravitational waves (GWs). We have written a total of 16 original papers funded by this grant, and established methods for coarse-graining observable fields in stochastic formalism, estimating the PBH abundance from non-Gaussian initial fluctuations, and estimating the GW abundance in such cases. In recognition of these achievements, we are invited to contribute a chapter to the book "Black Holes in the Era of Gravitational-Wave Astronomy" and wrote the summary paper arXiv:2211.05767 on PBH together with Dr Escriva and Dr Kuhnel.

研究分野：宇宙論

キーワード：インフレーション 確率形式 原始ブラックホール 重力波

1. 研究開始当初の背景

現代宇宙論では、宇宙最初期にインフレーションと呼ばれる加速膨張が起こったことが広く支持されている。インフレーションは大局的には宇宙を均一にしつつ、量子力学的効果で細かな空間の歪み(曲率ゆらぎ)も作ることが知られており、その歪みに物質が集まることで現在の銀河等宇宙構造のもとになると考えられている。インフレーションは最初期であるがゆえ、最高エネルギーを実現しているともされ、宇宙論的観点だけでなく素粒子理論などの高エネルギー物理の観点からも「インフレーションの具体的な仕組みは何か?」ということは重要な学問的問いである。近年 Planck 衛星によって初期宇宙のなごりの光(宇宙背景放射; CMB)が精密に測定され [1], インフレーション機構はさらに強く支持されるようになったが、その具体的な仕組みは未だ解明されていない。むしろ Planck 衛星の詳細な観測により有力視されていた簡潔な理論の多くは否定されてしまい、より複雑で現実的な理論も視野に入れる必要が出てきているのが現状である。

一方インフレーションにも関係する面白い話題として、これまで間接的な証拠しかなかった重力波(時空のさざ波)が、LIGO/Virgo グループによって初めて直接観測された [2]。続く LISA などの重力波観測の人工衛星計画も視野に入り、「重力波を用いて何が探求できるか?」を議論することが現在喫緊の課題となっている。観測された重力波はブラックホール(BH)や中性子星の合体から生じたものであるが、太陽の30倍を超える重いBHも多く見つかっており、そのような「重いBHの生成機構」は明らかになっていない。それを受け、通常とは異なる生成機構を持つ原始BHが再注目されている。BHは通常重い恒星の爆発によって形成されるが、インフレーションで大きな曲率ゆらぎが作られた場合、宇宙初期にエネルギー密度の濃い領域が直接潰れることでも形成され、これを原始BHと呼ぶ。原始BHはいまだに発見されていないが、もし観測されればインフレーション理論の大きな情報となる。さらに原始BHは重力波源となるだけでなく、いまだ「正体の明らかになっていない暗黒物質」の候補でもあり、天体そのものとしても興味深い。

2. 研究の目的

以上の背景を踏まえ本研究課題では、インフレーションの確率形式・原始BH・重力波を三位一体とした「インフレーション理論の包括的解析」を主目的とし、また派生として「暗黒物質や初期宇宙の物理を調査」することを副目的とする。

インフレーションの確率形式は量子効果由来のインフレーションのゆらぎを古典的乱数で近似して扱う手法である。通常の摂動論的量子計算ではインフレーションのゆらぎが小さい場合しか扱うことができないが、確率形式にて古典乱数として近似してしまえば大きなゆらぎであっても統一的に扱うことができる。したがって大きなゆらぎ由来の天体である原始BHの生成などについて議論する際に必要不可欠である。原始BHは暗黒物質の候補であるし、また合体から生じる重力波を通じて検証可能性もある。さらにもし原始BHを作るほどインフレーションのゆらぎが大きかった場合、原始BHの合体からだけでなく、初期宇宙において曲率ゆらぎの振動からも重力波が誘導されることが知られている [3]。そのような誘導重力波は生成時の初期宇宙プラズマの情報を記録している可能性がある [4]。

そこで本研究課題ではインフレーションの理論的側面として確率形式に着目、本形式を整備し、ゆらぎが大きくなる理論まで含めインフレーション理論の統一的解析を行う。また観測的側面として、確率形式を応用し原始BHや関連重力波量の正確な計算を行い、インフレーション理論の検証に役立てる。確率形式を応用することでこれまで計算できなかった大きなゆらぎやその派生である原始BH・重力波の正確な計算が可能になること、および理論から観測的検証までを一まとめにしてインフレーション機構に迫ることが、本研究の学問的独自性である。

3. 研究の方法

1) 確率形式

私はこれまでにインフレーションの確率形式を応用し、実際に大きな曲率ゆらぎにも適用できる計算手法の確立に成功している [5]。しかしながら本手法の具体的計算には大量の確率標本を数値的に生成する必要があるが、他の研究者が簡単に実装できるものではなかった。2015年に共同研究者でもある Vincent Vennin 氏 (APC 研究員) らが本手法を偏微分方程式に焼き直し [6]、いくつかの解析解を与えると同時に、統一的な数値実装の可能性を示した。そこで我々は現在共同で、本手法を誰でも簡単に利用できるよう、公開プログラムとしての数値実装を進めている。これにより計算機によるインフレ

ーション理論の自動解析が可能になり、クラスター計算機と組み合わせれば大規模な包括的探索も可能となるだろう。具体的研究計画としてまず「確率的計算プログラムの完成・公開」が挙げられる

プログラムの完成後は実際に様々なインフレーション理論に適用し解析を行っていく。詳細は割愛するが、特に近年幾何学力によって不安定性が生じる理論 ([7]等) とスローロール条件を破る理論 ([8]等) に対し、ゆらぎが大きくなり確率形式が必須となる可能性が指摘され注目されている。2 つ目の研究計画はこのような「具体的なインフレーション理論に対し確率計算プログラムを適用し解析を行う」ことである。

最後に原始 BH 生成量計算への応用が挙げられる。原始 BH 生成量はゆらぎの大きさだけでなくその統計性にも大きく依存することが指摘されており ([9]等)、その正確な計算には「我々の確率計算手法を様々な統計量に適用できるように拡張」する必要がある。これが 3 つ目の研究計画である。私はこれまでに、曲率ゆらぎの高次統計量を計算する手法について準備研究を行っており [10]、これを応用すればよい。

2) 原始ブラックホール

原始 BH に関しては、まず上述した拡張確率形式を応用して「原始 BH 生成量の正確な計算法を確立」する研究を行う。またゆらぎの高次統計量由来の原始 BH の空間分布にも着目したい。私はこれまでに、ゆらぎが高次統計量を持つと原始 BH が密集して形成されることを指摘したが [11]、これは BH 合体の歴史に影響し、したがって合体重力波によって区別できる可能性がある。そこで「ゆらぎの統計性 \leftrightarrow 形成時の原始 BH 空間分布 \leftrightarrow 現在の合体重力波スペクトルの対応を明確に定式化」し、重力波から原始 BH を通じてインフレーション理論の情報を得る手段とする。

3) 重力波

原始 BH が形成されるほど曲率ゆらぎが大きかったとすると、BH の合体からだけでなく、曲率ゆらぎの振動からも初期宇宙において重力波が誘導生成されることが知られている。したがってこの誘導重力波を観測することで原始 BH の間接的証拠とすることができる。さらに興味深いことに合体 BH としてちょうど良い太陽質量程度の原始 BH の形成は、初期宇宙でちょうど量子色力学 (QCD) の相転移が起こっている時代である。加えて対応する誘導重力波の波数はパルサータイミングアレイ (PTA) と呼ばれる重力波観測法で観測可能な波数にちょうど一致している。先日 NANOGrav グループがこの PTA を用いた重力波観測に初めて成功した可能性があることを発表し注目されている [12]。このような状況のもと申請者はこれまで所属研究室である名古屋大学宇宙論研究室の大学院生らとともに、この誘導重力波が QCD プラズマ流体の音速の変化に影響されることを示す研究を行った [4]。本研究では引き続き大学院生らとともに、NANOGrav 等の「具体的観測を考慮して初期宇宙プラズマの性質の観測可能性を定量的に議論する」ことを計画している。本研究はインフレーション理論の観点からだけでなく、QCD 理論等の素粒子原子核理論の立場からも重要である。

4. 研究成果

1) 確率形式

私はまず Vennin 博士とともに確率形式において、曲率ゆらぎや天体形成計算に関わるコンパクト関数 (相対論的密度ゆらぎの一種) を任意スケールで粗視化する方法を定式化、簡易なインフレーション模型ではあるが初めて確率形式でゆらぎの計算から原始 BH 量計算までを一貫して計算することに成功した [13]。また確率形式を電磁場に応用したり [14]、ハイブリッドインフレーションに適用したりなどした [15]。当初は曲率ゆらぎのパワースペクトルを計算するプログラムを公開する予定であったが、重裾確率分布模型の提唱や [9]、後述するように与えられた曲率ゆらぎの形状からの原始 BH 形成判定条件が数値相対論の結果から整備されてきたことから [16]、BH を作り得る高密度領域を直接シミュレートするプログラムが求められるようになってきた。そこで私は確率形式と格子シミュレーションを組み合わせたプログラム STOLAS (STOchastic Lattice Simulation) を開発、重点サンプリングの手法と組み合わせることで、与えられたインフレーション模型に対し原始 BH 量を直接サンプリングするシステムを提唱・公開することに成功した [17]。今後はこのプログラムを応用した様々な研究を行う予定である。

2) 原始ブラックホール

先述した原始 BH 形成判定条件 [16] や高密度領域の形状の統計性の計算法が整備されてきたことをうけ [18]、重裾確率分布において高密度領域の確率分布を求め原始 BH 量を計算する手法を定式化した [19]。また論文 [20] では原始 BH 形成判定条件を提唱した Escrivá 博士と共同で、負の非ガウス性を持つ曲率ゆらぎに対して判定条件が使え

るか数値相対論を用いて検証し、その妥当性を議論した。論文 [21] では確率分布論を用い原始 BH がどのような角運動量を持ち得るかを定量的に議論、合体重力波に与える影響を調べた。論文 [22] ではハイブリッドインフレーションにおける原始 BH 形成を、論文 [23] では素粒子標準模型を超えた物理におけるクロスオーバー相転移からの原始 BH 形成を議論し、それらが誘導重力波で検証できることなどを明らかにした。論文 [24] では太陽より軽い原始 BH が白色矮星と連星を作ったら合体重力波で区別できるかを議論した。これらの成果が認められ書籍 “Black Holes in the Era of Gravitational-Wave Astronomy” の 1 章に招待され、Escriva 博士および Kuhnel 博士とともに原始 BH に関する総括論文を執筆した [25]。

3) 重力波

重裾確率分布モデルの提唱をうけ、そのような確率分布のもとでの原始 BH 量と誘導重力波量の対応を計算、この場合も将来の宇宙望遠鏡 LISA にて「暗黒物質 = 原始 BH」説の検証が可能であることを明らかにした [26]。また 2023 年には NANOGrav を含む複数の PTA 観測グループから背景重力波の証拠が報告された。論文 [27] ではこの重力波を誘導重力波と解釈する際、宇宙の QCD 相転移を考慮しなければならないことを改めて指摘、相転移効果を取り入れたパラメータ翻訳を整備した。

参考文献

- [1] P. A. R. Ade et al. [Planck], *Astron. Astrophys.* 571, A22 (2014).
- [2] B. P. Abbott et al. [LIGO Scientific and Virgo], *Phys. Rev. Lett.* 116, no.6, 061102 (2016).
- [3] R. Saito and J. Yokoyama, *Phys. Rev. Lett.* 102, 161101 (2009) [erratum: *Phys. Rev. Lett.* 107, 069901 (2011)].
- [4] K. T. Abe, Y. Tada and I. Ueda, *JCAP* 06 (2021), 048.
- [5] T. Fujita, M. Kawasaki, Y. Tada and T. Takesako, *JCAP* 12, 036 (2013), T. Fujita, M. Kawasaki and Y. Tada, *JCAP* 10, 030 (2014).
- [6] V. Vennin and A. A. Starobinsky, *Eur. Phys. J. C* 75, 413 (2015).
- [7] S. Renaux-Petel and K. Turzynski, *Phys. Rev. Lett.* 117, no.14, 141301 (2016).
- [8] J. M. Ezquiaga and J. Garcia-Bellido, *JCAP* 08, 018 (2018).
- [9] J. M. Ezquiaga, J. Garcia-Bellido and V. Vennin, *JCAP* 03, 029 (2020).
- [10] Y. Tada and V. Vennin, *JCAP* 02, 021 (2017), T. Suyama, Y. Tada and M. Yamaguchi, *PTEP* 2020 (2020) no.11, 113E01.
- [11] Y. Tada and S. Yokoyama, *Phys. Rev. D* 91, no.12, 123534 (2015).
- [12] Z. Arzoumanian et al. [NANOGrav], [arXiv:2009.04496 [astro-ph.HE]].
- [13] Y. Tada and V. Vennin, *JCAP* 02 (2022) no.02, 021.
- [14] T. Fujita, K. Mukaida and Y. Tada, *JCAP* 12 (2022), 026.
- [15] Y. Tada and M. Yamada, *JCAP* 11 (2023), 089.
- [16] A. Escriva, C. Germani and R. K. Sheth, *Phys. Rev. D* 101 (2020) no.4, 044022.
- [17] Y. Mizuguchi, T. Murata and Y. Tada, [arXiv:2405.10692 [astro-ph.CO]].
- [18] C. M. Yoo, T. Harada, J. Garriga and K. Kohri, *PTEP* 2018 (2018) no.12, 123E01 [erratum: *PTEP* 2024 (2024) no.4, 049202].
- [19] N. Kitajima, Y. Tada, S. Yokoyama and C. M. Yoo, *JCAP* 10 (2021), 053.
- [20] A. Escriva, Y. Tada, S. Yokoyama and C. M. Yoo, *JCAP* 05 (2022) no.05, 012.
- [21] Y. Koga, T. Harada, Y. Tada, S. Yokoyama and C. M. Yoo, *Astrophys. J.* 939 (2022) no.2, 65.
- [22] Y. Tada and M. Yamada, *Phys. Rev. D* 107 (2023) no.12, 123539.
- [23] A. Escriva, Y. Tada and C. M. Yoo, [arXiv:2311.17760 [astro-ph.CO]].
- [24] T. S. Yamamoto, R. Inui, Y. Tada and S. Yokoyama, *Phys. Rev. D* 109 (2024) no.10, 103514.
- [25] A. Escriva, F. Kuhnel and Y. Tada, [arXiv:2211.05767 [astro-ph.CO]].
- [26] K. T. Abe, R. Inui, Y. Tada and S. Yokoyama, *JCAP* 05 (2023), 044.
- [27] K. T. Abe and Y. Tada, *Phys. Rev. D* 108 (2023) no.10, L101304.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計17件（うち査読付論文 17件 / うち国際共著 4件 / うちオープンアクセス 4件）

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 Fujita Tomohiro, Mukaida Kyohei, Tada Yuichiro	4. 巻 2022
2. 論文標題 Stochastic formalism for U(1) gauge fields in axion inflation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 026 ~ 026
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1475-7516/2022/12/026	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 Fujita Tomohiro, Kume Jun'ya, Mukaida Kyohei, Tada Yuichiro	4. 巻 2022
2. 論文標題 Effective treatment of U(1) gauge field and charged particles in axion inflation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 023 ~ 023
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1475-7516/2022/09/023	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 Escriba Albert, Tada Yuichiro, Yokoyama Shuichiro, Yoo Chul-Moon	4. 巻 2022
2. 論文標題 Simulation of primordial black holes with large negative non-Gaussianity	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 012 ~ 012
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1475-7516/2022/05/012	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 Mikura Yusuke, Tada Yuichiro	4. 巻 2022
2. 論文標題 On UV-completion of Palatini-Higgs inflation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 035 ~ 035
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1475-7516/2022/05/035	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 -

1. 著者名 Pino Lucas, Renaux-Petel S?bastien, Tada Yuichiro	4. 巻 2021
2. 論文標題 A manifestly covariant theory of multifield stochastic inflation in phase space: solving the discretisation ambiguity in stochastic inflation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 048 ~ 048
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1475-7516/2021/04/048	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 Suyama Teruaki, Tada Yuichiro, Yamaguchi Masahide	4. 巻 2021
2. 論文標題 Revisiting non-Gaussianity in non-attractor inflation models in the light of the cosmological soft theorem	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 7300
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptab063	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 Mikura Yusuke, Tada Yuichiro, Yokoyama Shuichiro	4. 巻 103
2. 論文標題 Minimal $\langle \text{mml:math xmlns:mml="http://www.w3.org/1998/Math/MathML" display="inline"} \rangle \langle \text{mml:mi} \rangle k \langle \text{mml:mi} \rangle \langle \text{mml:math} \rangle$ -inflation in light of the conformal metric-	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 L101303
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.103.L101303	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 Kitajima Naoya, Tada Yuichiro, Yokoyama Shuichiro, Yoo Chul-Moon	4. 巻 2021
2. 論文標題 Primordial black holes in peak theory with a non-Gaussian tail	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 053 ~ 053
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1475-7516/2021/10/053	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 Tada Yuichiro, Vennin Vincent	4. 巻 2022
2. 論文標題 Statistics of coarse-grained cosmological fields in stochastic inflation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 021 ~ 021
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1475-7516/2022/02/021	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 Tada Yuichiro, Terada Takahiro, Tokuda Junsei	4. 巻 2024
2. 論文標題 Cancellation of quantum corrections on the soft curvature perturbations	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Journal of High Energy 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) 10.1007/JHEP01(2024)105	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 He Minxi, Mikura Yusuke, Tada Yuichiro	4. 巻 2023
2. 論文標題 Hybrid metric-Palatini Higgs inflation	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 047 ~ 047
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1475-7516/2023/05/047	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 Abe Katsuya T., Inui Ryoto, Tada Yuichiro, Yokoyama Shuichiro	4. 巻 2023
2. 論文標題 Primordial black holes and gravitational waves induced by exponential-tailed perturbations	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 044 ~ 044
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1475-7516/2023/05/044	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 Motohashi Hayato, Tada Yuichiro	4. 巻 2023
2. 論文標題 Squeezed bispectrum and one-loop corrections in transient constant-roll inflation	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 069 ~ 069
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1475-7516/2023/08/069	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 Tada Yuichiro, Yamada Masaki	4. 巻 107
2. 論文標題 Primordial black hole formation in hybrid inflation	5. 発行年 2023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.107.123539	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 Tada Yuichiro, Yamada Masaki	4. 巻 2023
2. 論文標題 Stochastic dynamics of multi-waterfall hybrid inflation and formation of primordial black holes	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 089 ~ 089
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1475-7516/2023/11/089	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 Abe Katsuya T., Tada Yuichiro	4. 巻 108
2. 論文標題 Translating nano-Hertz gravitational wave background into primordial perturbations taking account of the cosmological QCD phase transition	5. 発行年 2023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.108.L101304	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28件 (うち招待講演 10件 / うち国際学会 18件)

1. 発表者名 H. Motohashi and Y. Tada
2. 発表標題 On the soft theorem in the transient ultra-slow or constant roll inflation
3. 学会等名 Domestic Molecule-type Workshop "Non-linear Nature of Cosmological Perturbations and its Observational Consequences" (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Y. Tada
2. 発表標題 Inflation theory --- D'ou venons-nous? Que sommes-nous? Ou allons-nous? ---
3. 学会等名 19th Rencontres du Vietnam "Theory meeting experiments: particle astrophysics and cosmology" (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Y. Tada
2. 発表標題 Stochastic approach to cosmic inflation
3. 学会等名 TSQS 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 M. He, Y. Mikura, and Y. Tada
2. 発表標題 Hybrid metric-Palatini Higgs inflation
3. 学会等名 JGRG31 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 多田祐一郎, 山田將樹
2. 発表標題 多重滝場ハイブリッドインフレーションと原始ブラックホール
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 多田祐一郎
2. 発表標題 原始ブラックホール研究の近年の進展
3. 学会等名 第35回 理論懇シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 多田祐一郎
2. 発表標題 曲率ゆらぎへの非摂動的アプローチ
3. 学会等名 第11回観測的宇宙論ワークショップ (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 多田祐一郎
2. 発表標題 Recent progress on stochastic inflation
3. 学会等名 Workshop on Gravitation & Cosmology
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 藤田智弘, 向田享平, 多田祐一郎
2. 発表標題 アクシオンインフレーションにおける $U(1)$ ゲージ場の確率形式
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yuichiro Tada
2. 発表標題 Primordial black holes in peak theory with a non-Gaussian tail
3. 学会等名 2021 NRF-JSPS Workshop in particle physics, cosmology, and gravitation (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuichiro Tada
2. 発表標題 Probability density functions of coarse-grained curvature and density perturbations in stochastic inflation
3. 学会等名 COSMO'21 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuichiro Tada
2. 発表標題 Primordial black holes in peak theory with a non-Gaussian tail
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 Yuichiro Tada
2. 発表標題 Probability density functions of coarse-grained curvature and density perturbations in stochastic inflation
3. 学会等名 JGRG30 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuichiro Tada
2. 発表標題 Primordial black holes and induced gravitational waves in light of the non-Gaussian tail
3. 学会等名 FY2021 学術変革領域研究「ダークマター」シンポジウム(招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 多田祐一郎
2. 発表標題 粗視化曲率ゆらぎの確率密度関数
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 多田祐一郎
2. 発表標題 インフレーションの「現在」と重力波
3. 学会等名 DECIGO workshop (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 多田祐一郎
2. 発表標題 原始ブラックホールのピーク理論と非ガウス尾
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 Yuichiro Tada
2. 発表標題 Dive into the Cosmic Abyss: Echoes from Primordial Black Hole
3. 学会等名 Joint workshop on General Relativity and Cosmology (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Y. Tada, T. Terada, J. Tokuda
2. 発表標題 Cancellation of quantum corrections on the soft curvature perturbations
3. 学会等名 YITP long-term workshop "Gravity and Cosmology 2024" (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Yuichiro Tada
2. 発表標題 The present and future of primordial black holes as dark matter
3. 学会等名 The 32nd Texas Symposium on Relativistic Astrophysics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yuichiro Tada
2. 発表標題 The present and future of primordial black holes as dark matter
3. 学会等名 KASHIWA DARK MATTER SYMPOSIUM 2023 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Y. Tada, T. Terada, J. Tokuda
2. 発表標題 Cancellation of quantum corrections on the soft curvature perturbations
3. 学会等名 JGRG 32 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 H. Motohashi, Y. Tada, T. Terada, J. Tokuda
2. 発表標題 Squeezed bispectrum and one-loop corrections in transient constant-roll inflation
3. 学会等名 COSMO'23 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yuichiro Tada
2. 発表標題 Stochastic approach to the inflationary universe
3. 学会等名 YITP International Molecule-type Workshop "Revisiting cosmological non-linearities in the era of precision surveys" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Y. Tada and V. Vennin
2. 発表標題 Statistics of coarse-grained cosmological fields in stochastic inflation
3. 学会等名 New Horizons in Primordial Black Hole Physics (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Y. Tada and M. Yamada
2. 発表標題 Revisiting the formation of massive primordial black holes in hybrid inflation
3. 学会等名 i-LINK workshop on observational cosmology (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 多田祐一郎
2. 発表標題 インフレーションと超準解析 --- 原始ブラックホールに向けて ---
3. 学会等名 "Physics meets Mathematics" まとめ合宿 (招待講演)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 多田祐一郎
2. 発表標題 原始ブラックホールは自然科学なのか
3. 学会等名 基研研究会 素粒子物理学の進展2023 (PPP2023) (招待講演)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Manuel Arca Sedda, Elisa Bortolas, Mario Spera	4. 発行年 2024年
2. 出版社 Elsevier	5. 総ページ数 508
3. 書名 Black Holes in the Era of Gravitational-Wave Astronomy	

〔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0件

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
---------	---------