

令和 5 年 6 月 12 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H01891

研究課題名(和文) 超精密観測時代における次世代相対論的宇宙論の構築

研究課題名(英文) Next-generation relativistic cosmology in the era of precision observations

研究代表者

成子 篤(Naruko, Atsushi)

京都大学・基礎物理学研究所・特定助教

研究者番号：80749507

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,300,000円

研究成果の概要(和文)：宇宙に存在するゆらぎを取り扱う宇宙論的摂動論は、観測データと理論予測を結びつけるために必須なツールである。一方、「ゆらぎの非線形性」は小さいながらも必ず存在するものであり、それらを正しく解析することで、線型摂動論では得られない、初期宇宙について本質的に新しくはるかに豊かな情報を得ることができる。本研究課題では、原始ゆらぎの非線形成長の研究、宇宙マイクロ波背景放射や宇宙大規模構造における非線形効果の系統的な解析・観測手法の提案を行ったり、背景重力波の観測可能性に関する研究を行った。これらを通じて、ゆらぎの生成から観測量に至る過程を非線形レベルで扱う理論的枠組みを構築・整備した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現在、そして将来的な観測計画を前に、「ゆらぎの非線形性」の解析手法を整備し、その観測可能性や観測量への影響を明らかにすることは、次世代宇宙論の構築にとっては必須の命題である。本研究課題を通じて、ゆらぎの非線形性の解析手法を発見・提示し、さらに一歩踏み込んでそれらの観測可能性まで明らかにすることができ、ゆらぎの非線形性の重要性をはっきりと示した。今後、さらに新しい視点からの解析・観測手法の提案につながると予想される。また研究の中で、非線形・非接道的な解析手法の構築することができ、これらの手法の他分野や他の研究課題への応用的な展開も考えられ、本課題の学術的・社会的意義は大きいと考えている。

研究成果の概要(英文)：Cosmological perturbation theory, which deals with fluctuations in the universe, is an essential tool for linking observational data with theoretical predictions. "Nonlinearities of primordial fluctuations" are small but always present, and by correctly analyzing them, we can obtain essentially new and much richer information about the early universe that cannot be obtained by linear perturbation theory.

In this research project, we have studied the nonlinear growth of primordial fluctuations and developed the method to systematically analyze cosmic microwave background radiation and cosmic large scale structures at the non-linear level of perturbations. We have also studied the observability of stochastic gravitational wave background. Through these studies, we have constructed a theoretical framework to treat all process from the generation of fluctuations to their observational impacts at the nonlinear level.

研究分野：相対論的宇宙論

キーワード：相対論的宇宙論 宇宙マイクロ波背景放射 宇宙大規模構造 重力波

1. 研究開始当初の背景

宇宙誕生からの宇宙の通史、そして宇宙を支配する根源的な物理理論を明らかにすることは、宇宙論における至上命題である。これまでの理論研究や近年の観測技術の発展のおかげで、宇宙の精細な姿が明らかになってきているのに比べ、その背後にある物理理論に関しては未解明な点が多い。例えば、宇宙のインフレーションや現在の宇宙の加速膨張を引き起こす原因はいまだ分かっていない。こうした謎に迫るためには、宇宙の進化について本質的に新しい情報が必要である。

本研究課題では、宇宙論における主要な観測量である「宇宙マイクロ波背景放射」と「宇宙大規模構造」に加え、2015年に初めて直接検出された新たな観測量である「重力波」にも注目する。これら3つの観測量と理論予言との関係を非線形レベルで明らかにし、そこから宇宙を記述する物理法則をどこまで検証できるのかを明確にする。宇宙誕生からの宇宙の進化を高い精度で記述する理論的枠組みを構築し、超精密観測時代の本格的到来を前に、どのような精度の観測が実現されれば、どのような本質的に新しい宇宙論の情報を抽出することができるのか、これらの事項を多角的に検討し徹底的に明らかにする。

2. 研究の目的

本研究課題は、これまで用いられてきた宇宙論的線形摂動論を超えて、「ゆらぎの非線形性」を扱う理論的枠組みを構築・整備し、理論予言と観測量の関係を非線形レベルで明らかにすることを主眼とする。特に、「宇宙マイクロ波背景放射」「宇宙大規模構造」「重力波」など宇宙論における主要な3つの観測量それぞれに対し、「ゆらぎの非線形性」を含めた理論予言を明らかにすることももちろん、観測量を組み合わせる新たな理論予言を抜き出すことは、本研究の特色の1つである。新しい理論予言がどのような観測量にどのように反映されるのか、また逆に、将来観測によって初期宇宙に対してどのような新しい情報・制限が得られるのか、これらを超精密観測時代に見合うレベルで明らかにすることを目指す。

3. 研究の方法

上記目的を達成するため、次の3つの課題を設定して取り組んでいく。

課題1：原始ゆらぎの非線形進化と宇宙論的な重力波

本研究課題では、原始ゆらぎが非線形レベルでどのように進化するのかを明らかにする。そのためには、通常注目されることが少ない、いわゆる宇宙論的なベクトル型ゆらぎやテンソル型ゆらぎにも着目する必要がある。宇宙論的なゆらぎには3つのタイプが存在し、それは重力ポテンシャルや密度ゆらぎなどに代表されるスカラー型ゆらぎ、重力波を表すテンソル型ゆらぎ、そして両者に属さないベクトル型ゆらぎである。本研究では特に、非線形効果によってスカラー型・ベクトル型・テンソル型ゆらぎ(重力波)が混ざり合うことに着目し、それらに関する理論研究を行う。

まずは、宇宙論的摂動論と相補的な方法であり、成子が専門とする勾配展開法を用いたゆらぎの非摂動的な定式化を行う。本研究では、標準的なCDMモデルだけでなく、拡張重力理論を含む一般的な宇宙モデルを視野に含めた定式化を目指す。宇宙項()、暗黒エネルギー、宇宙論的長距離スケールで一般相対性理論からずれているとする拡張重力理論は、いずれも現在の宇宙の加速膨張を説明するために導入された宇宙モデルであるが、いずれのモデルが正しいかは完全に絞り込まれてはいない。特に宇宙項以外のモデルにおいては、余分な自由度が導入されるため、それらを含めた一般的な勾配展開法の定式化を行う。

一方で齊藤は、すでにスカラー型ゆらぎ起源の非線形テンソル型ゆらぎ(背景重力波)を用いることで、「原始ブラックホール」の数を厳しく制限できることを明らかにしている。非線形効果で生み出される背景重力波の特徴を明らかにし、他の重力波源との峻別など、その観測可能性について議論する。

課題2：宇宙マイクロ波背景放射の高精度計算

観測精度の向上により、弱重力レンズ効果によって生じる宇宙マイクロ波背景放射(CMB)の温度異方性の多点相関や偏光といった、線形レベルでは捉えることのできない小さなシグナルも、現在では議論できるようになってきている。こうしたことを背景に、数年前より世界の幾つかのグループでCMBに対する高次摂動論の構築が進められており、齊藤と成子も、これまで近似的に

取り扱われてきた弱重力レンズ効果の計算を、系統的かつ厳密に取り扱うことを可能にする方法の開発に成功した(curve-of-sight 法)。本研究課題では、curve-of-sight 法を偏光にまで拡張し、将来の CMB 偏光観測データを非線形レベルで解析することができるフレームワークの構築を目指す。

課題 3：宇宙大規模構造におけるゆらぎの非線形効果

原始ゆらぎによって生み出された宇宙の密度の空間的なゆらぎは、重力の影響で成長し、ひいては星や銀河などの宇宙大規模構造を形成する。ゆらぎの成長の初期段階は、線形理論で記述可能であるが、時間が経つにつれてゆらぎの非線形成長を無視できなくなる。特に、ゆらぎの非線形成長はゆらぎの非自明な高次相関を誘起することから、精密観測により非線形ゆらぎについて、重要な知見が得られると期待される。しかしながら、理論予言と観測量とを結びつけるためには、バイアスと呼ばれる余剰の情報が必要となり、超精密観測におけるノイズ源となりえる。本研究課題においては、バイアスに左右されずに、ゆらぎの非線形進化の情報を引き抜く手法を開発する。特に、これまであまり検討されてこなかった、ゆらぎの歪度や尖度といった 1 点関数に着目することで、バイアスに依存しない関係式(整合性条件)を定式化することを目指す。

4. 研究成果

初年度は、原始ゆらぎの非線形進化と宇宙マイクロ波背景放射(CMB)の高精度計算に関する研究を主に進めた。

前者については、原始ゆらぎが非線形レベルでどのように進化するのかを明らかにすることを目標とした。この目標を達成するためには、通常注目されることが少ない、いわゆる宇宙論的なベクトル型ゆらぎやテンソル型ゆらぎにも着目する必要がある。そもそも宇宙論的なゆらぎには 3 つのタイプが存在し、重力ポテンシャルや密度ゆらぎなどに代表されるスカラー型ゆらぎ、重力波を表すテンソル型ゆらぎ、そして両者に属さないベクトル型ゆらぎがある。線形レベルではこれら 3 つのタイプのゆらぎは独立に進化するのに対し、非線形レベルでは混じり合って進化する。本研究では特に、非線形効果によってスカラー型ゆらぎからベクトル型・テンソル型ゆらぎ(重力波)が生み出されることに着目し、それらに関する理論研究を行った。宇宙論的摂動論と相補的な方法であり、成子が専門とする空間勾配展開法を用いて、ゆらぎの非摂動的な解析を行った。

次に後者に関して、curve-of-sight 法の偏光を含めた拡張を行った。非線形効果の中でも特に重要であるのが、弱重力レンズ効果である。線形レベルでは、テンソル型ゆらぎ(重力波)のみが CMB の B モード偏光を生み出す。しかし、非線形レベルでは、弱重力レンズ効果を通して、スカラー型ゆらぎも B モード偏光を生み出す。こうした弱重力レンズ効果による B モードは通常リマッピング法によって評価され、それを除去する方法(delensing)も定式化されている。しかし、リマッピング法の計算精度は明らかでなく、インフレーション起源の重力波など、小さなシグナルを検出する際には、その誤差が問題となりうる。そこで、厳密な定式化である curve-of-sight 法を使って、非線形レベルで生じる B モード偏光の評価を行った。その結果として、近く計画されている CMB 実験では、リマッピング法で十分な精度の計算が可能であることを明らかにした。

次年度は、宇宙大規模構造を用いた重力理論の検証に関する基礎研究、および空間勾配展開法を用いた宇宙論的長波長ゆらぎに関する研究に取り組んだ。

宇宙大規模構造のゆらぎの成長は、初期段階では線形理論で記述可能であるが、時間が経つにつれゆらぎの非線形成長を無視できなくなる。そのため、密度揺らぎの非線形成長を組み込んだ解析が重要となる。本研究では、非線形ゆらぎを特徴づける観測量として、宇宙大規模構造ゆらぎの 1 点相関関数に着目した。3 次の 1 点相関関数である歪度を用いることで、バイアスに依存しない整合性関係式を構築することが出来ることを見出した。本成果により、非線形ゆらぎの性質に不定性なく迫ることが出来ることから、将来の精密宇宙観測における全く新しい視点からの検証手法を提案した。

また、宇宙初期の宇宙のインフレーション時に生成された長い波長のゆらぎについて、その非線形性まで考慮して解析を行うために、通常の宇宙論的摂動論とは異なる手法である空間勾配展開法を用いて解析を行なった。これまでの研究においては、重力場の方程式や物質場の方程式に空間勾配展開法を適用し解析がなされてきたが、本研究においては世界で初めて、重力と物質を記述する場の作用自体に空間勾配展開法を適用し解析を行なった。特に、宇宙のインフレーションは真空のエネルギーを担うスカラー場によって引き起こされたと考えており、いわゆるスカラー・テンソル理論に対し空間勾配展開法を適用し解析を進めている。

最終年度は、原始ゆらぎの非線形進化に関する研究をさらに発展させるとともに、背景重力波の観測可能性に関する研究を行なった。

背景重力波は、将来的に宇宙マイクロ波背景放射と共に初期宇宙を探る重要なツールになると

期待される。そのために重要となるのが、重力波源の峻別である。背景重力波を生み出す起源としては、宇宙に存在する天体、宇宙ひも、宇宙の相転移、非線形効果、宇宙のインフレーションなど様々な可能性がある。本研究では、その中でもインフレーション起源の背景重力波の特定が可能かどうか、検証を行った。インフレーションは宇宙の地平線スケール以上の長い波長を持つ重力波を生み出すという特徴があり、その特徴は対蹠相関(反対方向から到来する重力波間の相関)として観測量に現れる。対蹠相関の原理的な観測可能性を検討し、背景重力波の持つ統計的等方性で決定されることを見出した。

また、宇宙初期の宇宙のインフレーション時に生成された長い波長のゆらぎについて、その非線形性まで考慮して解析を行うために、通常宇宙論的摂動論とは異なる手法である空間勾配展開法を用いた解析を行なった。特に、宇宙のインフレーションは真空のエネルギーを担うスカラー場によって引き起こされたと考えられており、いわゆるスカラー・テンソル理論に対し空間勾配展開法を適用し解析を進めた。重力と物質を記述する場の作用自体に空間勾配展開法を適用し、共変的な重力理論が内包する拘束条件を解くことにより、作用を1つのスカラー自由度と重力波に対応する2つの自由度のみを用いて記述することができた。これまでの研究においては、場の方程式に空間勾配展開法を適用し、方程式を組み合わせた結果スカラー自由度と重力波に対するマスター方程式が導出されてきた。しかしながら本研究により、より一般的なスカラーテンソル理論に対しても、非常に見通しよく対応する方程式を導出することができた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計23件（うち査読付論文 15件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Naruko Atsushi, Yoo Chul-Moon, Sasaki Misao	4. 巻 2020
2. 論文標題 Resolving a spacetime singularity with field transformations	5. 発行年 2020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/ptaa028	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 De Felice Antonio, Naruko Atsushi	4. 巻 101
2. 論文標題 On metric transformations with a U(1) gauge field	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	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/PhysRevD.101.084044	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 Domenech Guillem, Naruko Atsushi, Sasaki Misao, Wetterich Christof	4. 巻 29
2. 論文標題 Could the black hole singularity be a field singularity?	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal of Modern Physics D	6. 最初と最後の頁 2050026 ~ 2050026
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1142/S0218271820500261	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 Rampei, Naruko Atsushi, Yamauchi Daisuke	4. 巻 104
2. 論文標題 On Lorentz-invariant bispin-2 theories	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review D	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) 10.1103/PhysRevD.104.044021	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 Namikawa Toshiya, Naruko Atsushi, Saito Ryo, Taruya Atsushi, Yamauchi Daisuke	4. 巻 2021
2. 論文標題 Unified approach to secondary effects on the CMB B-mode polarization	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 029 ~ 029
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1475-7516/2021/10/029	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 Yoo Chul-Moon, Naruko Atsushi, Sakurai Yusuke, Takahashi Keitaro, Takamori Yohsuke, Yamauchi Daisuke	4. 巻 74
2. 論文標題 Axion cloud decay due to the axion-photon conversion with background magnetic fields	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 64 ~ 72
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psab110	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 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 1-26
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 Namikawa Toshiya, Saga Shohei, Yamauchi Daisuke, Taruya Atsushi	4. 巻 100
2. 論文標題 CMB constraints on the stochastic gravitational-wave background at Mpc scales	5. 発行年 2019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.100.021303	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 Chibana F., Kimura R., Yamaguchi M., Yamauchi D., Yokoyama S.	4. 巻 2019
2. 論文標題 Redshift space distortions in the presence of non-minimally coupled dark matter	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 049 ~ 049
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1475-7516/2019/10/049	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 Hiramatsu Takashi, Yamauchi Daisuke	4. 巻 102
2. 論文標題 Testing gravity theories with cosmic microwave background in the degenerate higher-order scalar-tensor theory	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 1-19
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.102.083525	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 Hirano Shin'ichi, Kobayashi Tsutomu, Yamauchi Daisuke, Yokoyama Shuichiro	4. 巻 102
2. 論文標題 UV sensitive one-loop matter power spectrum in degenerate higher-order scalar-tensor theories	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	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) 10.1103/PhysRevD.102.103505	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 Yamauchi Daisuke, Sugiyama Naonori S.	4. 巻 105
2. 論文標題 Second-order peculiar velocity field as a novel probe of scalar-tensor theories	5. 発行年 2022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.105.063515	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 Ryo, Shirai Satoshi, Yamazaki Masahito	4. 巻 101
2. 論文標題 Is the trans-Planckian censorship a swampland conjecture?	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.101.046022	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 Yashiki Mai, Sakai Nobuyuki, Saito Ryo	4. 巻 102
2. 論文標題 Local-gravity test of unified models of inflation and dark energy in $f(R)$ gravity	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 1-12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.102.043504	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 Tomohiro, Ikeda Taishi, Saito Ryo, Tanahashi Norihiro, Yoo Chul-Moon	4. 巻 103
2. 論文標題 Dynamical analysis of screening in scalar-tensor theory	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 1-19
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.103.024009	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 Takamori Yohsuke, Naruko Atsushi, Sakurai Yusuke, Takahashi Keitaro, Yamauchi Daisuke, Yoo Chul-Moon	4. 巻 75
2. 論文標題 Testing the non-circularity of the spacetime around Sagittarius A* with orbiting pulsars	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 S217 ~ S231
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psac003	査読の有無 無
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 Naruko Atsushi, Saito Ryo, Tanahashi Norihiro, Yamauchi Daisuke	4. 巻 2023
2. 論文標題 Ostrogradsky mode in scalar-tensor theories with higher-order derivative couplings to matter	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 1-21
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptad049	査読の有無 無
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 Matsui Hiroki, Mukohyama Shinji, Naruko Atsushi	4. 巻 107
2. 論文標題 No smooth spacetime in Lorentzian quantum cosmology and trans-Planckian physics	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.107.043511	査読の有無 無
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 Wu Zhen-Yuan, Sakai Nobuyuki, Saito Ryo	4. 巻 107
2. 論文標題 Antipodal angular correlations of inflationary stochastic gravitational wave background	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 1-12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/physrevd.107.023503	査読の有無 無
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 Yamauchi Daisuke, Ishimaru Shoya, Matsubara Takahiko, Takahashi Tomo	4. 巻 107
2. 論文標題 Skewness consistency relation in large-scale structure and test of gravity theory	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.107.043526	査読の有無 無
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 Matsui Hiroki, Mukohyama Shinji, Naruko Atsushi	4. 巻 833
2. 論文標題 DeWitt boundary condition is consistent in Ho?ava-Lifshitz quantum gravity	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 137340 ~ 137340
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2022.137340	査読の有無 無
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 Minoda Teppei, Saga Shohei, Takahashi Tomo, Tashiro Hiroyuki, Yamauchi Daisuke, Yokoyama Shuichiro, Yoshiura Shintaro	4. 巻 75
2. 論文標題 Probing the primordial Universe with 21?cm line from cosmic dawn/epoch of reionization	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 S154 ~ S180
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psac015	査読の有無 無
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 Yamauchi Daisuke, Yokoyama Shuichiro, Takahashi Tomo	4. 巻 75
2. 論文標題 Generalized local ansatz for scale-dependent primordial non-Gaussianities and future galaxy surveys	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 S181 ~ S195
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psab108	査読の有無 無
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 6件 / うち国際学会 12件)

1. 発表者名 成子 篤
2. 発表標題 Possible resolution of a spacetime singularity with field transformations
3. 学会等名 The third NRF-JSPS workshop in particle physics, cosmology and gravitation (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 成子 篤
2. 発表標題 Possible resolution of a spacetime singularity with field transformations
3. 学会等名 Beyond General Relativity, Beyond Cosmological Standard Model (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 成子 篤
2. 発表標題 宇宙の特異点の取り扱いに関する一つの提案
3. 学会等名 日本物理学会 2019 秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 成子 篤
2. 発表標題 On metric transformations with a U(1) gauge field
3. 学会等名 The 29th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 成子 篤
2. 発表標題 Metric transformation and its applications to cosmology
3. 学会等名 6th Korea-Japan workshop on dark energy at KMI (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 成子 篤
2. 発表標題 Spatial gradient expansion approach for generic scalar-tensor theories
3. 学会等名 International Workshop "Dawn of Gravitational-wave Cosmology and Theory of Gravity" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 成子 篤
2. 発表標題 Spatial gradient expansion approach for generic scalar-tensor theories
3. 学会等名 Workshop on Gravitation & Cosmology (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 成子 篤
2. 発表標題 Multi-messenger Study of Heavy Dark Matter: A02 Group Status Report
3. 学会等名 FY2022 "What is dark matter? - Comprehensive study of the huge discovery space in dark matter" (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 成子 篤
2. 発表標題 Spatial gradient expansion approach for generic scalar-tensor theories
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 成子 篤
2. 発表標題 Field transformation & its applications to cosmology
3. 学会等名 KIAS and NRF-JSPS Workshop on Particle, String and Cosmology (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 成子 篤
2. 発表標題 Long-wavelength perturbations around homogeneous but anisotropic spacetime
3. 学会等名 online JGRG (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 成子 篤
2. 発表標題 VHDM search & gravity sector
3. 学会等名 1st workshop: Multimessenger Study of Heavy Dark Matter (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 成子 篤
2. 発表標題 一般的なスカラー・テンソル理論における勾配展開法
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 成子 篤
2. 発表標題 Axion Cloud Decay due to the Axion-photon Conversion with Background Magnetic Fields
3. 学会等名 8th Korea-Japan workshop on Dark Energy (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 成子 篤
2. 発表標題 Axion Cloud Decay due to the Axion-photon Conversion with Background Magnetic Fields
3. 学会等名 第10回観測的宇宙論ワークショップ
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 成子 篤
2. 発表標題 Axion Cloud Decay due to the Axion-photon Conversion with Background Magnetic Fields
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

〔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	山内 大介 (Yamauchi Daisuke) (10624645)	神奈川大学・工学部・助教 (32702)	

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	齊藤 遼 (Saito Ryo) (70781392)	山口大学・大学院創成科学研究科 ・助教 (15501)	

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13件

国際研究集会 Theoretical aspects of non-Gaussianity from modern perspectives	開催年 2019年～2019年
国際研究集会 Brain-storming workshop on Primordial Black Holes and Gravitational Waves	開催年 2021年～2021年
国際研究集会 Pulsars, black holes and the theory of gravity	開催年 2021年～2021年
国際研究集会 1st workshop: Multimessenger Study of Heavy Dark Matter	開催年 2021年～2021年
国際研究集会 Recent Progress of Quantum Cosmology	開催年 2021年～2021年
国際研究集会 第10回観測的宇宙論ワークショップ	開催年 2021年～2021年
国際研究集会 Galaxy shape statistics and Cosmology	開催年 2021年～2021年
国際研究集会 International Workshop "Dawn of Gravitational-wave Cosmology and Theory of Gravity"	開催年 2022年～2022年
国際研究集会 Upcoming CMB Observations & Cosmology	開催年 2022年～2022年
国際研究集会 2nd workshop: Multimessenger Study of Heavy Dark Matter	開催年 2022年～2022年
国際研究集会 Workshop on Gravitation & Cosmology	開催年 2022年～2022年
国際研究集会 International Workshop "Dawn of Gravitational-wave Cosmology and Theory of Gravity"	開催年 2022年～2022年
国際研究集会 Domestic Molecule-type Workshop "Non-linear Nature of Cosmological Perturbations and its Observational Consequences"	開催年 2022年～2022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			
ドイツ	Heidelberg university			