

令和 6 年 6 月 21 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2023

課題番号：20K14468

研究課題名（和文）初期宇宙観測を用いた重力場の基本変数の検証

研究課題名（英文）Exploring fundamental variables of gravity through early universe observations

研究代表者

青木 勝輝（Aoki, Katsuki）

京都大学・基礎物理学研究所・特定助教

研究者番号：80822288

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：摂率がある重力理論ではスピン0, 1, 2の自由度が矛盾なく生じることを明らかにした。これらのモデルにおけるインフレーションシナリオの提案や宇宙論摂動の一般的定式化を行った。これら重力の修正によって生じる現象論的示唆を系統的に明らかにするために宇宙論やブラックホール時空における有効場理論を構築した。さらにS行列のユニタリー性や解析性を用いることで重力理論の理論的整合性を明らかにした。特に一般相対論と素粒子標準模型の整合性から力の統一が自然に示唆されるという結果を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

一般相対論と量子論の不整合性やダークエネルギー、ダークマター、インフレーションといった宇宙論に残された数々の謎の存在は一般相対論を超えた重力理論の必要性を示唆している。本研究で提案した有効場理論はこれら重力理論を系統的に調査していくための土台を与え、今後重力理論を検証していく上で有用であると期待される。一方で、有効場理論の理論空間の全ての領域がユニタリー性などの物理原理と整合的ではない。重力理論とS行列との整合性を明らかにすることは理論の妥当性を明らかにするだけでなく、究極の物理法則と期待される量子重力理論の理解を得ることに繋がる。

研究成果の概要（英文）：We showed that spin-0, 1, and 2 degrees of freedom can consistently arise from gravitational theories with torsion. We proposed inflationary scenario and constructed a general framework for cosmological perturbations in such theories. To systematically understand observational signatures from modifications of gravity, we formulated effective field theories for cosmology and black holes. In addition, we studied unitarity and analyticity of S-matrix to investigate the theoretical consistency of gravitational theories. In particular, we found that the consistency between general relativity and the standard model of particle physics naturally predicts the unification of fundamental forces.

研究分野：重力・宇宙論

キーワード：重力理論 宇宙論 量子重力理論

1. 研究開始当初の背景

一般相対論は量子論と整合的でなく、その背後には量子重力理論と呼ばれる基礎的な理論が隠れていると考えられている。基礎理論の兆候は重力の修正として観測可能な低エネルギー領域に現れる可能性がある。事実、宇宙にはインフレーション、ダークマター、ダークエネルギーといった標準物理では説明できない謎が残されており、これらは一般相対論を超えた重力理論の必要性を示唆している。特に重力を幾何学として理解すると曲率の他に捩率も重力を記述する自然な基本変数となる。捩率の存在は低エネルギーでは新たな粒子の存在として理解可能であり、これら新たな粒子を調査することによって重力を記述する基本変数の検証が可能と期待される。更にこれら新たな粒子の散乱問題を考えると S 行列のユニタリー性や解析性との整合性から理論に対する整合性条件が得られると期待される。これらは宇宙に残された謎の解決に加え、究極の物理法則と期待される量子重力理論の理解へ向けた重要な一歩を与えることができると期待される。

2. 研究の目的

本研究の大きな目的は現象論研究と理論研究の両者を相補的に用いることで宇宙を用いた重力理論の検証を行うことである。これに向けて本課題では、重力場は曲率のみで記述されるのか？という点を観測と理論の両面から検証する枠組みを構築することを目的とする。通常用いられる計量を基本とする重力理論では曲率のみが重力場を記述するが、多脚場を基本にすると曲率と捩率が重力場を記述する。そこでインフレーション等の初期宇宙モデルを具体的に解析し、観測でどのような兆候を見つければ捩率の存在あるいは非存在を示唆できるかを明らかにする。また S 行列の性質を調べることで基礎理論と低エネルギー有効理論の間にある整合性条件を明らかにし、重力理論の理論的妥当性を明らかにすると共に、ボトムアップ的に量子重力の性質を探る。

3. 研究の方法

捩率がある重力理論ではスピン 0, 1, 2 の自由度を含むためモデルのパラメータに応じて様々な現象論的帰結を持ちうる。そこでまず捩率をもつ理論における背景宇宙の進化を議論し、その後各スピンの自由度の有無に応じて摂動がどのように振る舞うかを明らかにする。課題遂行中に、これらの理論予言を系統的に調査するためには当初予定していた具体的なモデルを解析するだけでなく重力の修正に現れる新たな自由度を包括的に扱える有効場理論の手法が有用であることが判明した。そこで、上述した捩率をもつ理論の具体的解析に加え、宇宙論やブラックホール時空に対する有効場理論を考えた。特にスピン 0 粒子に対応する宇宙論の有効場理論は知られていたが、それを他の対称性パターンに拡張することによってスピンをもった粒子に対する宇宙論及びブラックホールの有効場理論を構築することにした。一方で、有効場理論はある限られたエネルギー領域を有効的に記述する理論であるが、その全ての理論空間がユニタリー性といった背後にある基礎理論に対する仮定と整合的ではないことが知られている。S 行列のユニタリー性や解析性から生じる整合性条件は重力がない場合にはよく知られているが、重力がある場合には重力子交換によって生じる極のために同様な整合性条件が得られるかは不明であった。そこで超弦理論から動機付けされる重力理論の高エネルギー極限に対する一定の仮定の下で重力理論に対する整合性条件を導き、そこから量子重力の低エネルギー物理に対する現象論的な予言を調査した。

4. 研究成果

本研究課題では研究期間全体を通じて、捩率をもつ具体的なモデルを用いた研究に加え、有効場理論の視点に基づく包括的な重力理論検証、そして S 行列のユニタリー性や解析性に関する理論研究を行った。以下ではそれぞれについて得られた成果のハイライトを述べる。

(1) 捩率による重力の修正とダークマター

重力理論が曲率のみによって記述される場合、曲率は基本変数(計量)の2階微分で与えられるため高次曲率理論は Ostrogradsky 定理によりゴーストでない有質量スピン 2 粒子を記述することは不可能である。一方で、曲率の他に捩率が存在すると、曲率は接続の1階微分で与えられることとなり Ostrogradsky 定理が適応されなくなる。実際、捩率をもつ高次曲率理論はゴーストでない有質量スピン 2 粒子を記述することが可能であることが平坦時空周りの摂動レベルで知られていた。本課題ではこのような高次曲率理論におけるインフレーション宇宙シナリオを提案した。背景レベルでは Starobinsky 模型として知られる現在の観測と最も一致しているインフレーション模型と同様のダイナミクスを与える。一方で Starobinsky 模型とは異なり、捩率

には追加で質量をもったスピン 2 粒子が理論に含まれ、このスピン 2 の自由度の存在によって重力波にパリティを破る相互作用が生じることを明らかにした。更に曲率・捩率に加え非計量性をもつ最も一般的な線形接続幾何である計量アフィン幾何に基づく宇宙論摂動の一般論を定式化した。これは一般幾何における重力理論の摂動論を議論するための基礎を与えるものであり、当初の目的通り、捩率といった一般化された幾何学量をもった重力理論の観測的妥当性を評価するための重要な礎を築くことができた。

有質量スピン 2 粒子をもった理論は線形レベルではゴーストを避けることができるが非線形レベルでゴーストが再び現れることが問題視されていた。本研究では曲率の高次相互作用を適切に選ぶことによって捩率をもつ理論では非線形レベルでもゴーストが現れない有質量スピン 2 粒子を記述できることを示した。特に 3 次元ではただ一つの 2 次曲率項のみで完全にゴーストフリーとなる。さらに本結果を AdS/CFT 対応に応用させ、3 次元 new massive gravity におけるユニタリー性の破れの問題は捩率を導入することで自然に解決されることを示した。

このように捩率をもつ理論は矛盾のない有質量スピン 2 粒子を予言する。本課題では更に有質量スピン 2 粒子がダークマターとして振る舞うシナリオを提案し、等方宇宙から非等方宇宙への相転移を用いた新たなダークマター生成シナリオの提案や、軽いダークマターのスピンは重力波観測によって直接検証可能であることまで明らかにした。

(2) 有効場理論を用いた系統的重力理論検証

宇宙は大きなスケールでは空間的に一様等方であり、このような対称性の高い時空の解析においては有効場理論の手法が役立つ。有効場理論の手法では、対称性(及びその破れ)を用いて模型を系統的に分類する。これによって模型を特徴づける観測量や無矛盾性関係、他の模型との明白な違いが発見可能となり、観測から様々な模型を包括的かつ系統的に検証することが可能となる。本課題ではこれまで用いられてきた宇宙論の有効場理論の手法を他の対称性破れパターンに拡張し、スカラー場(スピン 0 粒子)により宇宙膨張が実現される宇宙模型とベクトル場(スピン 1 粒子)の宇宙模型の間の違いを普遍的に特徴づける理論パラメータを発見することに成功した。これにより 2 つの模型を統合的に扱うことが可能となり、今後の模型検証に有益となる定式化を構築した。より具体的にはベクトル場の理論はシフト対称なスカラー場理論をゲージ化したとして解釈できる。するとこれらの理論は一般に、シフト対称性の有無と対称性が大域的か局所的かというように対称性によって普遍的に区別される。それぞれの対称性の違いは有効場理論においては結合係数の間の整合性関係とゲージ結合定数の大きさによって現象論的にパラメトライズされる。本課題ではこれら有効場理論の定式化に加え、ダークエネルギーの文脈において小スケール極限に注目した解析的手法と宇宙論ゆらぎの数値計算コードの開発を行うことで、小スケールから CMB の大スケールに至るまで対称性の違いが与える影響を明らかにした。結果、シフト対称性は有効的なダークエネルギーの状態方程式パラメータが -1 を上回ることをできないことを予言し、一方でゲージ結合(つまりベクトルらしさ)は小スケール・大スケール共に重力法則の修正を抑えることを発見した。これらは対称性のみによって決まる非常に普遍的な予言であり、今後ダークエネルギー模型を観測検証していく際の大きな指針を与えると期待できる。

さらに本手法を拡張することによって、流体・固体・エーテルといった連続体物質に対する宇宙論的有效場理論の定式化や、ベクトル場の有効場理論をブラックホールといった一般時空の周りへと一般化した。例えばいわゆるステルス解と呼ばれる時空自体は一般相対論と同じであるが他の場が非自明な期待値をもつブラックホール解においては一般に強結合の問題が生じることを明らかにした。その他にも相対論的天体といった強重力場領域で問題視されていたベクトル場の病的不安定性は有効場理論の破綻に過ぎず、基礎理論に戻ることで不安定性は解決されることを指摘した。

(3) S 行列と重力・宇宙論

S 行列は量子論における中心的存在であり、ヒッグス粒子の予言など理論物理学の発展において重要な役割を果たしてきた。正値性条件は S 行列のユニタリー性や解析性から生じる整合性条件の一つで、例えばスカラー有効場理論における最低次の微分結合の結合定数は厳密に正でなければならないことを予言する。本研究では、重力散乱の高エネルギー極限に対する振る舞いに対する仮定、具体的には超弦理論で予言されるように重力子交換によって生じる低エネルギーの極は量子重力で現れる高スピン粒子交換と相殺するという仮定の下で重力的な正値性条件を導いた。その結果、重力があっても正値性の条件は少なくとも近似的には成り立つことが示された。

特に上述の相殺が正確に相殺する場合には正値性は厳密に成立する。その場合には一般に「理論のカットオフで決まるある値より場の理論の結合定数は大きくなってはならない」という条件を与える。これは量子電磁気学の場合にはまさに弱い重力予想として知られる条件と一致しており、更に我々の手法は量子電磁気学を超えて標準模型といった他の理論へも容易に拡張することができる。例えば我々の条件を既知の物理法則である一般相対論と素粒子標準模型に適用することで 10^{16} GeV よりも低いエネルギースケールで新物理が必要となることを示した。得られたスケールは大統一が期待されるスケールと正に一致しており、本結果は S 行列の整合性が重力も含めた力の統一を自然に示唆していると理解できる。一方、本条件をダークマター模

型へと適応することで軽い暗黒光子模型は量子重力と相容れないという本結果の現象論的有用性を示す結果も得た。事実得られた条件は非常に強力であり、上述の厳密相殺が正しい場合には観測制限と合わせることで 10^4 eV 程度より軽い暗黒光子を完全に棄却することができる。

このように S 行列の整合性は理論・現象論共に強力な示唆を与えることができる。その一方で、現実世界の粒子は殆どが崩壊幅をもっており、これら崩壊する粒子は漸近状態に現れないため通常の S 行列の手法は適応できない。不安定な粒子（共鳴状態）は S 行列の非物理シート上の極として現れ、解析接続を用いることで不安定粒子の S 行列を定義することができる。本課題では S 行列の解析構造を詳細に調べることで、不安定な粒子に対する S 行列理論を新たに創設し、S 行列の基礎方程式である光学定理と分散関係式を導出した。特に不安定粒子に対しても振幅の虚部の正值性（光学定理）は成り立つが、一方で異常閾値として知られる特異性の存在により分散関係式は補正を受けることを明らかにした。簡単な理論を考えると補正は微分結合に対して負の寄与が判明し、その結果、単純なスカラー模型では不安定粒子の正值性は破れることを発見した。これらの結果は今後現実世界を S 行列から理解していく際に障害となり得る課題の存在を指摘するものであり、不安定粒子の解析には異常閾値の更なる理解が必須であることを明らかにした。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計24件（うち査読付論文 24件 / うち国際共著 8件 / うちオープンアクセス 24件）

1. 著者名 Aoki Katsuki, Tsujikawa Shinji	4. 巻 843
2. 論文標題 Coupled vector Gauss-Bonnet theories and hairy black holes	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physics Letters B	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) 10.1016/j.physletb.2023.138022	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 Aoki Katsuki, Gorji Mohammad Ali, Mukohyama Shinji, Takahashi Kazufumi, Yingcharoenrat Vicharit	4. 巻 2024
2. 論文標題 Effective field theory of black hole perturbations in vector-tensor gravity	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle 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) 10.1088/1475-7516/2024/03/012	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 Manita Yusuke, Takeda Hiroki, Aoki Katsuki, Fujita Tomohiro, Mukohyama Shinji	4. 巻 109
2. 論文標題 Exploring the spin of ultralight dark matter with gravitational wave detectors	5. 発行年 2024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.109.095012	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 Katsuki Aoki, Sebastian Bahamonde, Jorge Gigante Valcarcel, Mohammad Ali Gorji	4. 巻 -
2. 論文標題 Cosmological perturbation theory in metric-affine gravity	5. 発行年 2024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) なし	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 Aoki Katsuki, Gorji Mohammad Ali, Mukohyama Shinji, Takahashi Kazufumi	4. 巻 2022
2. 論文標題 Effective field theory of gravitating continuum: solids, fluids, and aether unified	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle 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) 10.1088/1475-7516/2022/08/072	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 Aoki Katsuki, Minamitsuji Masato	4. 巻 106
2. 論文標題 Resolving the pathologies of self-interacting Proca fields: A case study of Proca stars	5. 発行年 2022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.106.084022	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 Manita Yusuke, Aoki Katsuki, Fujita Tomohiro, Mukohyama Shinji	4. 巻 107
2. 論文標題 Spin-2 dark matter from an anisotropic universe in bigravity	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.107.104007	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 Aoki Katsuki	4. 巻 107
2. 論文標題 Unitarity and unstable-particle scattering amplitudes	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.107.065017	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 Aoki Katsuki, Minamitsuji Masato	4. 巻 107
2. 論文標題 Highly compact Proca stars with quartic self-interactions	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.107.044045	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 Arai Shun, Aoki Katsuki, Chinone Yuji, Kimura Rampei, Kobayashi Tsutomu, Miyatake Hironao, Yamauchi Daisuke, Yokoyama Shuichiro, et al	4. 巻 2023
2. 論文標題 Cosmological gravity probes: Connecting recent theoretical developments to forthcoming observations	5. 発行年 2023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/ptad052	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 Aoki Katsuki, Beltran Jimenez Jose, Figueruelo David	4. 巻 2023
2. 論文標題 Some disquisitions on cosmological 2-form dualities	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle 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) 10.1088/1475-7516/2023/04/059	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 Aoki Katsuki, Di Filippo Francesco, Mukohyama Shinji	4. 巻 2021
2. 論文標題 Non-uniqueness of massless transverse-traceless graviton	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle 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) 10.1088/1475-7516/2021/05/071	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 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 -
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 Aoki Katsuki, Mukohyama Shinji, Namba Ryo	4. 巻 2021
2. 論文標題 Positivity vs. Lorentz-violation: an explicit example	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle 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) 10.1088/1475-7516/2021/10/079	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 Aoki Katsuki, Manita Yusuke, Mukohyama Shinji	4. 巻 2021
2. 論文標題 Shift-symmetric SO(N) multi-Galileon	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle 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) 10.1088/1475-7516/2021/12/045	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 Aoki Katsuki, Gorji Mohammad Ali, Mukohyama Shinji, Takahashi Kazufumi	4. 巻 2022
2. 論文標題 The effective field theory of vector-tensor theories	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle 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) 10.1088/1475-7516/2022/01/059	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 Aoki Katsuki, Motohashi Hayato	4. 巻 2020
2. 論文標題 Ghost from constraints: a generalization of Ostrogradsky theorem	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle 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) 10.1088/1475-7516/2020/08/026	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 Aoki Katsuki, Mukohyama Shinji	4. 巻 2020
2. 論文標題 Consistent inflationary cosmology from quadratic gravity with dynamical torsion	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle 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) 10.1088/1475-7516/2020/06/004	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 Aoki Katsuki, Gorji Mohammad Ali, Mukohyama Shinji	4. 巻 810
2. 論文標題 A consistent theory of D = 4 Einstein-Gauss-Bonnet gravity	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physics Letters B	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) 10.1016/j.physletb.2020.135843	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 Aoki Katsuki, Gorji Mohammad Ali, Mukohyama Shinji	4. 巻 2020
2. 論文標題 Cosmology and gravitational waves in consistent D = 4 Einstein-Gauss-Bonnet gravity	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle 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) 10.1088/1475-7516/2020/09/014	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 Aoki Katsuki, De Felice Antonio, Mukohyama Shinji, Noui Karim, Oliosi Michele, C. Pookkillath Masroor	4. 巻 80
2. 論文標題 Minimally modified gravity fitting Planck data better than CDM	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The European Physical Journal C	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) 10.1140/epjc/s10052-020-8291-1	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 Tokuda Junsei, Aoki Katsuki, Hirano Shin'ichi	4. 巻 2020
2. 論文標題 Gravitational positivity bounds	5. 発行年 2020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/JHEP11(2020)054	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 Aoki Katsuki	4. 巻 102
2. 論文標題 Nonlinearly ghost-free higher curvature gravity	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.102.124049	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 Aoki Katsuki, Gorji Mohammad Ali, Mizuno Shuntaro, Mukohyama Shinji	4. 巻 2021
2. 論文標題 Inflationary gravitational waves in consistent D = 4 Einstein-Gauss-Bonnet gravity	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle 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) 10.1088/1475-7516/2021/01/054	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 -

〔学会発表〕 計26件（うち招待講演 15件 / うち国際学会 13件）

1. 発表者名 Katsuki Aoki
2. 発表標題 Analytic S-matrix of Unstable Particles
3. 学会等名 Kanto-NTU HEP Workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Katsuki Aoki
2. 発表標題 Towards quantum gravity constraints from S-matrix
3. 学会等名 14th Taiwan String Workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Katsuki Aoki
2. 発表標題 Towards quantum gravity constraints from S-matrix
3. 学会等名 BIG&C Meetings: Barcelona Initiative for Gravitation and Cosmology (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Katsuki Aoki
2. 発表標題 Effective field theory approaches to cosmology
3. 学会等名 IBS CTPU-CGA Workshop on Modified Gravity (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Katsuki Aoki
2. 発表標題 Is a scalar field everything about dark sectors/modified gravity?
3. 学会等名 第12回 観測的宇宙論ワークショップ (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Katsuki Aoki
2. 発表標題 The Effective Field Theory of Vector-Tensor Theories
3. 学会等名 COSMO'23 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Katsuki Aoki
2. 発表標題 不安定粒子の散乱振幅と正值性
3. 学会等名 素粒子物理学の進展 2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Katsuki Aoki
2. 発表標題 Towards S-matrix theory of unstable particles
3. 学会等名 場の理論と弦理論2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Katsuki Aoki
2. 発表標題 Positivity beyond tree level
3. 学会等名 2023 Winter-I NRF-JSPS Workshop in particle physics, cosmology, and gravitation (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Katsuki Aoki
2. 発表標題 The Effective Field Theory of Vector-Tensor Theories
3. 学会等名 9th Korea-Japan Workshop on Dark Energy (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Katsuki Aoki
2. 発表標題 Effective field theory approaches to cosmology
3. 学会等名 Joint workshop on General Relativity and Cosmology (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Katsuki Aoki
2. 発表標題 Positivity Bounds for Unstable Particles
3. 学会等名 量子重力と暗黒物質 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Katsuki Aoki
2. 発表標題 Towards global S-matrix constraints on dark matter physics
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 Katsuki Aoki
2. 発表標題 The Effective Field Theory of Vector-Tensor Theories
3. 学会等名 JGRG31 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Katsuki Aoki
2. 発表標題 Effective Field Theory of Gravitating Continuum: Solids, Fluids, and Aether Unified
3. 学会等名 日本物理学会 年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Katsuki Aoki, Mohammad Ali Gorji, Shinji Mukohyama, Kazufumi Takahashi
2. 発表標題 The Effective Field Theory of Vector-Tensor Theories
3. 学会等名 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 Katsuki Aoki, Shinji Mukohyama, and Ryo Namba
2. 発表標題 Positivity vs. Lorentz-violation
3. 学会等名 8th Korea-Japan workshop on Dark Energy (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Katsuki Aoki, Tran Quang Loc, Shinji Mukohyama, Ryo Namba, Toshifumi Noumi, and Junsei Tokuda
2. 発表標題 UV consistency of gravitational and cosmological EFTs
3. 学会等名 AAPPS-DACG Workshop 2021 on Astrophysics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Katsuki Aoki, Shinji Mukohyama, and Ryo Namba
2. 発表標題 Positivity vs. Lorentz-violation
3. 学会等名 JGRG30 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Katsuki Aoki, Tran Quang Loc, Toshifumi Noumi, and Junsei Tokuda
2. 発表標題 Is the Standard Model in the Swampland?
3. 学会等名 Strings and Fields 2021 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Katsuki Aoki
2. 発表標題 Non-linearly ghost-free higher curvature gravity
3. 学会等名 Geometric Foundations of Gravity 2021, University of Tartu (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 青木勝輝, Mohammad Ali Gorji, 向山信治, 高橋一史
2. 発表標題 The Effective Field Theory of Vector-Tensor Theories
3. 学会等名 日本物理学会年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 青木勝輝, Tran Quang Loc, 野海俊文, 徳田順生
2. 発表標題 Is the Standard Model in the Swampland?
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 青木勝輝, Tran Quang Loc, 野海俊文, 徳田順生
2. 発表標題 Positivity Bounds on Standard Model and General Relativity
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 青木勝輝
2. 発表標題 Consistent inflationary cosmology from quadratic gravity with dynamical torsion
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 青木勝輝
2. 発表標題 Non-linearly ghost-free higher curvature gravity
3. 学会等名 Online JGRG2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>京都大学基礎物理学研究所 重力量子情報研究センター https://www2.yukawa.kyoto-u.ac.jp/~cgpqi/</p>

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2件

国際研究集会 Gravity 2023: Dawn of field theoretic approach	開催年 2023年～2023年
国際研究集会 Gravity: Current challenges in black hole physics and cosmology	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			
ポルトガル	Universidade de Lisboa			
スペイン	Universidad de Salamanca	バルセロナ大学		
英国	ケンブリッジ大学	エディンバラ大学		
フランス	Universite de Paris			
台湾	国立台湾大学			