

令和 4 年 6 月 22 日現在

機関番号：15501

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2021

課題番号：17K14286

研究課題名（和文）第5の力を通した重力理論の検証

研究課題名（英文）Tests of gravity through the fifth force

研究代表者

齊藤 遼 (Saito, Ryo)

山口大学・大学院創成科学研究科 ・助教

研究者番号：70781392

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,900,000円

研究成果の概要（和文）：現在の宇宙を加速させている原因を解明することは宇宙論の大きな課題である。本研究では、加速膨張が重力理論の修正によって引き起こされている可能性を検証することを目標とし、修正重力理論に共通して現れる「第5の力」に関する研究を行った。特に代表的な修正重力理論で生じる「第5の力」について、その環境依存性を明らかにした。また、宇宙の進化、およびそれを支配する重力理論の検証において重要なツールとなる宇宙マイクロ波背景放射（CMB）や背景重力波の持つ異方性を精密かつ系統的に計算する方法の開発を行った。その方法をCMBのBモード偏光の計算に応用し、CMBの伝播過程における重力の効果で生じるBモードを評価した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

重力は我々にとって身近な力であるとともに、宇宙の進化において重要な役割を果たす。本研究の成果は、重力を記述する基礎理論を調べるために必要となるツールを与える。特に本研究の中で開発を行ったcurve-of-sight法は、重力の効果に限らず、宇宙マイクロ波背景放射を系統的に計算する枠組みを与えるものである。重力理論の検証にとどまらず、例えばBモード偏光観測によるインフレーション検証の際に障害となる非線形Bモードの除去など、広い応用が期待される。

研究成果の概要（英文）：The origin of the cosmic acceleration is one of the biggest challenge in cosmology. One possibility is that Einstein's gravity is not correct on cosmological scales. To test this possibility, we focused on an extra force, "fifth force", as a universal feature in modified gravity theories and investigated its environmental dependence. In parallel, we developed new systematic approaches to accurately compute anisotropies in cosmic microwave background (CMB) and stochastic gravitational-wave background, which are important probes for the cosmic evolution and the gravity theory describing it. Applying this approach to CMB B-mode polarization, we estimated B-mode polarization induced by gravitational effects in photon propagation.

研究分野：宇宙論

キーワード：重力理論 第5の力 宇宙マイクロ波背景放射 背景重力波

1. 研究開始当初の背景

現在の宇宙が加速度的に膨張しているという事実は、宇宙マイクロ波背景放射(CMB)、銀河の大規模構造、超新星など、様々な観測により確かなものとなっている。その一方で、こうした加速膨張はすでに検証を受けている理論では説明することができず、宇宙論的な長距離スケールにおいて我々の物理理論に対する理解が不十分であることを示している。なかでも重力は宇宙の進化において重要な役割を果たす一方で、その宇宙論的な長距離スケールにおける振る舞いは十分な検証を受けていない。こうした背景のもと、加速膨張の原因となりうる整合的な重力理論(修正重力理論)の構築やその観測的検証を目指した研究が行われている。

修正重力理論の広く共通した特徴として、「第5の力(fifth force)」の存在がある。現在の標準理論である一般相対性理論は、質量を持たないスピン2の場を記述する唯一の理論であることが知られている。そのため、修正重力理論は、重力を媒介する新たな自由度となるスカラー場を一般に含んでいる。このスカラー場は加速膨張を説明する一方で、より短距離の太陽系、銀河、銀河団スケールでも「第5の力」を媒介し、系の構造や運動に影響を与える。そのため、天体-銀河スケールでの修正重力理論の検証を行ううえで、「第5の力」の振る舞いを調べるのが重要になる。特に高密度領域で働く「第5の力」の遮蔽機構は、太陽系における検証実験との整合性を保つために重要である。しかしながら、「第5の力」の働きにおいては、スカラー場の持つ自己相互作用が重要になることが知られており、その振る舞いは多様で複雑である。「第5の力」の解析は静的球対称で重力場が弱い単純な系に対して主に行われており、宇宙に存在するより一般の系で「第5の力」がどのように働くかはあまり理解されていない。重力が重要になる様々な系で、重力理論の観測的検証は今後も進んでいくことが期待されており、それに対応する理論側の進展が望まれる。また一方で、宇宙論的なスケールなど低密度領域では遮蔽機構の働きが弱くなり、「第5の力」の働きが顕著になると期待される。そのため、CMBや重力波も修正重力理論の重要な検証手段になると期待され、その理論的整備が望まれる。

2. 研究の目的

本研究では加速膨張を説明する修正重力理論の検証を大きな目的とし、天体スケールや宇宙論的なスケールのそれぞれで必要となる理論を整備する。天体スケールでは「第5の力」に特に着目し、一般の系において「第5の力」、特にその遮蔽機構がどのように働くかを明らかにする。一方で、宇宙論的なスケールにおいてはCMBや重力波といった修正重力理論の重要な検証手段となりうる対象に対して、解析の際に必要なツールの開発・整備を行う。

3. 研究の方法

加速膨張を説明する修正重力理論は、重力を媒介する新たなスカラー自由度を一般に含んでいる。そのスカラー自由度をスカラー場として加えた最も単純な修正重力理論のクラスがスカラーテンソル理論である。近年、スカラーテンソル理論の一般形が調べられており、スカラー場の持つ一般的な自己相互作用項の構造に関する理解が進んでいる。その枠組みのもとで「第5の力」が満たす基礎方程式を導出し、静的球対称を仮定しない一般的な系における「第5の力」の振る舞いを調べる。また、宇宙論的なスケールでの検証においては、独自に開発を行っているCMBに対する重力の効果を経路積分法(curve-of-sight法)を拡張・適用する。

4. 研究成果

本研究を通して、主に以下のような成果が得られた。

[A] ヴァインシュタイン機構：(1) 2017年の中性子連星衝突に伴う重力波とガンマ線の同時観測によって、重力波と光の速度が非常に高い精度で一致していることが明らかにされた。この一致を再現するスカラーテンソル理論の一般形を書き下し、「第5の力」の遮蔽機構のひとつであるヴァインシュタイン機構の解析を行った(ただし静的球対称性は仮定)。そして、標準的な逆二乗則からのずれが有限密度領域で現れ、2つのパラメータで記述されることを見出した。(2) また、等速運動を行う系における「第5の力」の解析(preferred frame効果の解析)を行った。まだ完全な解析には至っていないものの、一般に加速膨張を説明するスカラーテンソル理論ではpreferred frame効果が現れ、強い制限を受けることを見出した。本結果は論文に

はまとめられていないが、部分的な結果の報告を研究会で行なっている。

[B]カメレオン機構：強い非一様性，および動的な系に対して，「第5の力」の遮蔽機構の一種であるカメレオン機構の解析を行った．(1) まず強い非一様性を持つ系として，静的球対称なシェル系を調べた．結果として，シェル系の外部では非一様性の強さに関わらず遮蔽が働くこと，対して内部では標準重力と同程度の「第5の力」が生じうることを明らかにした．(2) また，球対称の動的な系に対して，「第5の力」の解析を行った．結果として，静的な状況で遮蔽機構が働くパラメータ領域においても，非常に大きな密度の変化がある場合には，標準重力と同程度の「第5の力」が生じることを明らかにした．ただし，同状況下では重力よりも圧力が優勢であり，天体構造は大きく影響を受けない．(3) さらに，現在の加速膨張だけでなくインフレーションも統一的に記述するスカラーテンソル理論 (f(R)理論) に対してカメレオン機構の解析を行い，インフレーションを起こす項の効果は小さいことを明らかにした．

(C)curve-of-sight 法：宇宙の晴れ上がりによって自由に伝播できるようになった光子は，我々に届くまでに重力レンズ効果をはじめとした様々な重力の効果を受ける．これらの効果を光子分布の基礎方程式であるボルツマン方程式に取り込むには技術的な困難があった．この困難を解決するために独自に開発を行っている curve-of-sight 法の偏光への拡張を行った．

以上の結果を国際的な論文誌で出版し (A-2 除く)，4 件の招待講演を含む研究発表を行った．また，本研究費を財源として，山口大学において宇宙・重力に関する研究会を主催した．

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 4件/うちオープンアクセス 8件）

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 024009-1-19
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/physrevd.102.043504	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 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 043504-1-12
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 Fukuda Hajime, Saito Ryo, Shirai Satoshi, Yamazaki Masahito	4. 巻 99
2. 論文標題 Phenomenological consequences of the refined swampland conjecture	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 083520-1-7
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevD.99.083520	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 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 46022
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 オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Nakamura Tomohiro, Ikeda Taishi, Saito Ryo, Yoo Chul-Moon	4. 巻 99
2. 論文標題 Chameleon field in a spherical shell system	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 044024-1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.99.044024	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 Langlois David, Saito Ryo, Yamauchi Daisuke, Noui Karim	4. 巻 97
2. 論文標題 Scalar-tensor theories and modified gravity in the wake of GW170817	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 061501-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.97.061501	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 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 024009-1-19
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 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20件（うち招待講演 4件 / うち国際学会 9件）

1. 発表者名 齊藤 遼
2. 発表標題 CMB Bモード偏光への非線形効果に対する統一のアプローチ
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 齊藤 遼
2. 発表標題 原始ブラックホールと非線形背景重力波・音響再加熱
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 齊藤 遼
2. 発表標題 Curve-of-sight approach for CMB polarizations: intrinsic B mode beyond lensing
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 齊藤 遼
2. 発表標題 Cosmic microwave background anisotropies beyond linear order: curve-of-sight approach
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 齊藤 遼
2. 発表標題 Scalar-tensor theories and modified gravity in the wake of GW170817
3. 学会等名 Essential Next Steps for Gravity and Cosmology
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 齊藤 遼
2. 発表標題 Scalar-tensor theories and modified gravity in the wake of GW170817
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 齊藤 遼
2. 発表標題 高階スカラーテンソル理論におけるpreferred frame効果について
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 齊藤 遼
2. 発表標題 Effective theories for the partial breaking of the Vainshtein mechanism
3. 学会等名 The 27th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 齊藤 遼
2. 発表標題 Breaking of the Vainshtein mechanism through derivative coupling to matter
3. 学会等名 日本物理学会2017年秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 齊藤 遼
2. 発表標題 Preferred frame effects in higher-order scalar-tensor theories
3. 学会等名 The 21st annual International Conference on Particle Physics and Cosmology (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 齊藤 遼
2. 発表標題 Horndeski/beyond Horndeski理論 における第五の力の働きについて
3. 学会等名 相対論・宇宙論 東北研究会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 齊藤 遼
2. 発表標題 The Vainshtein mechanism in general scalar-tensor theories
3. 学会等名 YKIS2018a Symposium: General Relativity - The Next Generation (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 齊藤 遼
2. 発表標題 宇宙マイクロ波背景放射異方性の精密計算法の開発: 非線形効果に対する統一のアプローチ
3. 学会等名 応用物理・物理系学会中国四国支部合同学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 呉 震遠, 坂井 伸之, 齊藤 遼
2. 発表標題 Antipodal correlation of the inflationary primordial gravitational waves
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 齊藤 遼
2. 発表標題 Angular correlations of the inflationary stochastic gravitational wave background
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 呉 震遠, 坂井 伸之, 齊藤 遼
2. 発表標題 Antipodal correlations of the inflationary primordial gravitational waves
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 齊藤 遼、 吳 震遠、 坂井 伸之
2. 発表標題 Angular correlations of the inflationary stochastic gravitational wave background in the perturbed universe
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 齊藤 遼
2. 発表標題 宇宙マイクロ波背景放射異方性の精密計算：非線形効果に対する統一のアプローチ
3. 学会等名 Upcoming CMB observations and Cosmology (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 家鋪真衣、 坂井 伸之、 齊藤 遼
2. 発表標題 Unified Models of Inflation and Dark Energy in $f(R)$ Gravity: constraints from solar system experiments
3. 学会等名 6th Korea-Japan workshop on dark energy at KMI (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 家鋪真衣、 坂井 伸之、 齊藤 遼
2. 発表標題 Unified Models of Inflation and Dark Energy in $f(R)$ Gravity: constraints from solar system experiments
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

〔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
研究協力者	家舗 真衣 (Yashiki Mai)		
研究協力者	呉 震遠 (Wu Zhenyuan)		

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			
ポルトガル	CENTRA			
フランス	APC研究所			
フランス	APC研究所			
英国	ケンブリッジ大学			