

立教大学学術推進特別重点資金(立教SFR)
大学院学生研究
2023年度研究成果報告書

研究科名	立教大学大学院	理学研究科	物理学専攻
研究代表者 (2024年3月現在 のものを記入)	在籍課程・学年	氏名	
	<input type="checkbox"/> 博士前期課程 年 <input checked="" type="checkbox"/> 博士後期課程 1年	齋藤 仁	
指導教員	所属部局・職名	氏名	
	理学部・教授	小林 努	
自然・人文・社会の別	<u>自然</u> ・ 人文 ・ 社会	個人・共同の別	<u>個人</u> ・ 共同 名
研究課題	空間的に共変なテンソル2自由度理論における観測との整合性の検証		
研究組織 (研究代表者 ・共同研究者) ※2024年3月現在 のものを記入	在籍研究科・専攻・課程・学年	氏名	
	研究代表者 理学研究科・物理学専攻・博士課程 後期課程・1年	齋藤 仁	
研究期間	2023 年度		
研究経費 (1円単位)	(支出金額) 472,293 / (採択金額) 500,000 円		

研究の概要 (200~300字で記入、図・グラフ等は使用しないこと。)

重力を記述する標準的な理論である一般相対性理論を拡張するといった試みは修正重力理論と呼ばれている。本研究では、U-DHOST理論と呼ばれる修正重力理論について、パラメトライズドポストニュートニアン形式(PPN形式)という手法を用いることで太陽系スケール実験との整合性について議論を行った。PPN形式は太陽系スケールでの重力の振る舞いにおける一般相対論からのずれを有限個のパラメータ(PPNパラメータ)を用いて表すことができる。よって、PPNパラメータの値を調べることで、実験と整合的な理論領域を探索した。

キーワード (研究内容をよく表しているものを3項目以内で記入。)

[一般相対性理論] [修正重力理論] [太陽系実験]

研究成果の概要 (図・グラフ等は使用しないこと。)**研究の背景**

現在、重力を記述する最も標準的な理論は一般相対論である。太陽による光の曲がりや水星の近日点移動といった現象は一般相対論を用いることで、非常に高い精度で記述することができる。また、一般相対論によって予言される重力波は 2015 年の LIGO/Virgo による直接観測によってその存在が明らかとなった。しかし、一般相対論では説明できない現象も存在する。宇宙初期に起きたとされるインフレーションや、宇宙の後期加速膨張を一般相対性理論で説明するには負の圧力を持つ未発見の重力源を導入する必要がある。

これらの問題点に対し、未知の重力源を導入するのではなく、一般相対性理論自体を拡張することで解決しようとする試みを**修正重力理論**という。重力を修正する最も簡単な方法は、一般相対性理論がもともと持っている自由度に加え新たな場を、重力を表す自由度として加えるというものであり、特に新たにスカラー場の自由度を加えた理論は**スカラー・テンソル理論**と呼ばれる。修正重力理論を構築する上で、重要な点としてゴースト不安定性の有無がある。一般に、運動方程式に高階微分が含まれる場合はゴーストと呼ばれるハミルトニアンが下に有界でない自由度が現れてしまう。よって高階微分を含むようなスカラー・テンソル理論は、縮退条件を課すことによりゴースト自由度が現れないように構築している。しかし近年、縮退条件が部分的に破れているにもかかわらず、ゴースト不安定性を回避したスカラー・テンソル理論が考案された(**U-DHOST 理論**)。U-DHOST 理論では、ゴーストの従う方程式が楕円型の微分方程式となるため、適切な境界条件を課すことでゴーストの配位を完全に決定することができ、ゴースト不安定性を回避することができる。したがって、U-DHOST 理論はゴースト不安定性の観点から見れば、性質の良い修正重力理論と考えられる。しかしゴースト不安定性の有無だけでは、実際に我々の宇宙と整合的な理論となっているかは非自明である。

そこで私は、パラメトライズドポストニュートニアン形式(**PPN 形式**)を用いて、U-DHOST 理論における太陽系スケール実験との整合性について調べようと考えた。PPN 形式は、太陽系スケールでの重力の振る舞いにおける一般相対性理論からのズレを有限個のパラメータ(PPN パラメータ)で表す方法である。各 PPN パラメータはさまざまな太陽系スケール実験から制限されているため、PPN パラメータの値を求めて実験結果と比較することで観測と整合的な理論の範囲を見積もることができる。

研究成果

まず私は高階微分を含む重力理論における 10 個全ての PPN パラメータの表式を計算した。その際に、PPN パラメータを EFT パラメータと呼ばれる暗黒エネルギーの有効場理論から定義される別のパラメータを用いて表すことに成功した。EFT パラメータは重力の検証という観点でしばしば用いられるパラメータであり、この結果は重力を検証する上で重要となる PPN パラメータと EFT パラメータという 2 つのパラメータの間に関係性をつけ、一方パラメータの観測制限をもう一方のパラメータの制限に使用することができるようになったという点で非常に有効である。そして、得られた PPN パラメータの表式は非常に一般的なものであり、ある特定のサブクラスにおける PPN パラメータを求める際に本研究の結果を用いるだけで良いため、PPN 形式を用いた重力理論の検証を容易に行うことができるようになった。U-DHOST 理論の中に含まれるクロノメトリック理論とテンソル 2 自由度理論の二つの理論における PPN パラメータについても議論を行った。クロノメトリック理論における PPN パラメータの値については、すでに先行研究で求められているが、本研究から得られた結果は先行研究で得られた結果と整合的なものであり、本研究での結果の正当性を裏付けることにつながった。また、テンソル 2 自由度理論における PPN パラメータは新しい結果である。テンソル 2 自由度理論は一般相対論と同様にテンソル場の自由度のみを持つ理論であり、一般相対性理論からのズレを実際に捉えられるかどうか議論されている。本研究の結果から重力波の伝播速度が光速で、PPN パラメータのうち重力によってどれくらい曲率が作られるかを示すものを一般相対論と等しい値にとる場合には、一般相対論とテンソル 2 自由度理論の違いは現れないことを示した。

本研究の内容について、すでに JCAP へ投稿済みであり査読中である。

研究成果の概要 (つづき)

※この(様式2)に記入の成果の公表を見合わせる必要がある場合は、その理由及び差控え期間等を記入した調書(A4縦型横書き1枚・自由様式)を添付すること。

研究発表 (研究によって得られた研究成果を発表した①～④について、該当するものを記入してください。該当するものが多い場合は主要なものを抜粋してください。なお、成果発表を確認できる資料を合わせて研究成果報告書提出フォームより提出してください(紙媒体等、研究成果報告書提出フォームから提出できない場合は、別途リサーチ・イニシアティブセンターへ提出してください)。

- ①雑誌論文(著者名、論文標題、雑誌名、巻号、発行年、ページ)
- ②図書(著者名、出版社、書名、発行年、総ページ数)
- ③シンポジウム・公開講演会等の開催(会名、開催日、開催場所)
- ④その他(学会発表、研究報告書の印刷等)

※修士論文・博士論文は含みません。

① 雑誌論文

[1] J. Saito, Zhibang Yao, Tsutomu Kobayashi, “PPN meats EFT of dark energy: Post-Newtonian approximation in higher-order scalar-tensor theories”, (arXiv:2402.10459 [gr-qc]), JCAP へ投稿済み

② 図書

該当なし

③ シンポジウム・公開講演会の開催

該当なし

④ その他

(4-1)国際会議での発表

[2] J. Saito, Tsutomu Kobayashi, “Black hole perturbations in spatially covariant gravity with just two tensorial degrees of freedom”, International Conference on Modified Gravity 2023 (MOGRA2023), Junyi Dynasty Hotel (中国湖北省武漢)、2023年11月

[3] J. Saito, Zhibang Yao, Tsutomu Kobayashi, “Post-Newtonian approximation in higher-order scalar-tensor theories”, YITP long-term workshop Gravity and Cosmology 2024 (GC2024), 京都大学基礎物理学研究所、2024年2月

(4-2)国内学会での発表

[3] J. Saito, Zhibang Yao, Tsutomu Kobayashi, “Post-Newtonian approximation in higher-order scalar-tensor theories”, Third Mini-workshop on the Early Universe, 大濱信泉記念館(沖縄県石垣島)、2024年2月