

立教大学学術推進特別重点資金（立教 S F R）
大学院学生研究
2024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 (2025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 2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	縮退高階スカラー・テンソル理論に対する観測制限に向けた多角的研究		
研究組織 (研究代表者 ・共同研究者) ※2025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・2年	齋藤 仁	
研究期間	2024 年度		
研究経費 (1円単位)	(支出金額) 464,495 円 / (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。)
当該研究の研究目的を含むこと。
重力を記述する標準的な理論である一般相対論をさらに拡張するという試みは修正重力理論と呼ばれている。本研究では、U-DHOST 理論と呼ばれるスカラー場とテンソル場の自由度を持つような広い枠組みの理論において、ゆっくり移動するブラックホール解が存在するかという問題についてアプローチをした。U-DHOST 理論はローレンツ対称性を自発的に破るような理論であり、そのような理論では特定の場に対する絶対静止系を定義することができる。そこで、特定の場の絶対静止系に対してブラックホールが動くことができるようなどうかについて調べた。現在までに観測された重力波はブラックホール連星といった動く天体からの重力波である。よって、本研究はU-DHOST 理論において天体起源の重力波を考えることが可能かどうかについて深く密接する研究である。
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] [ブラックホール]

研究成果の概要 (図・グラフ等は使用しないこと。)

以下の視点を含めて記載のこと。

- ・当該研究は何をどこまで明らかにできたのか (できなかったのか)。
- ・何をもって研究成果 (経過) を達成できた (できなかった) と考えられるのか。
自身が設定した研究目的・目標に照らして、その根拠がわかるよう記載のこと。

私は、ローレンツ対称性を破る高階スカラーテンソル理論におけるゆっくりと動くブラックホール解について研究を行っている。本研究は先行研究[1]で行われている手法を参考にして計算している。

物質場におけるローレンツ対称性の破れは素粒子標準模型などから高い精度で制限されている。しかし、重力場におけるローレンツ対称性については物質場のように強く制限はなされていない。また、ローレンツ対称性を破ることによってくりこみが可能な重力理論も提唱された。そのため近年、ローレンツ対称性を破るような重力理論が注目されている。ローレンツ対称性を破る重力理論には、特定の指向性を持つ場を含んでおり、そのため一般相対性理論には存在しない preferred frame が存在する。よって、preferred frame に対して動くブラックホール解を考えることができる。一般の速度を持つブラックホール解を解析的に見つけることは困難であるが、ゆっくりと動くブラックホールに関しては背景ブラックホール時空に対する摂動論として考えることができる。そこで、本研究では静的・球対称ブラックホール時空に対する線形摂動論を考えることで動くブラックホール解の存在を調べた。

スカラー・テンソル理論の性質を表すための便利な手法として暗黒エネルギーの有効場の理論(EFT of dark energy)によって定義されるパラメータが存在する。そして、このようなパラメータのうちの一つにローレンツ対称性の破れに関連するパラメータがあり、本研究ではローレンツ対称性の破れに関連するパラメータが一般の値を持つような、ラグランジアンにスカラー場の二階微分の二乗までを含む高階スカラー・テンソル理論に注目した。

まず初めに背景時空とする静的・球対称ブラックホール解を求めた。この解にはユニバーサルホライズンと呼ばれるローレンツ対称性を破るような重力理論において特徴的な因果構造を持つことがわかっている。ユニバーサルホライズンは伝播速度が無限大のモードに対する因果的境界線である。一般にローレンツ対称性を破る場合、伝播速度が光速を超えるモードの存在が許されるため、光速に対する因果的境界線より内側をブラックホールとするのは適切ではない。しかし、ユニバーサルホライズンを内側の因果的境界線とすることでブラックホールを考えることができる。静的・球対称ブラックホールの周りでの摂動の結果、摂動変数は二階微分を含むある演算子を二回作用させた四階微分方程式に従うことを示した。また、ここで得られた自身の過去の研究で得た方程式を拡張したものとなっている[2]。そして適切な境界条件のもとで、この四階微分方程式が持つ無限遠方とユニバーサルホライズン近傍での漸近解を調べ、実際に正則な解の存在が示された。また、この解にはローレンツ対称性の破れに関するパラメータに依存しないことも示された。

なお、本研究に関して論文を執筆し、*Physical Review D*へ投稿し、すでに受理され投稿されている。

参考文献

- [1] A. Kovachik and S. Sibiryakov, [arXiv:2311.12936 [gr-qc]].
- [2] J. Saito and T. Kobayashi, Phys. Rev. D 108, no.10, 104063 (2023)
- [3] J. Saito and T. Kobayashi, [arXiv: 2408.14004[gr-qc]]
- [4] J. Saito, Z. Yao, and T. Kobayashi, JCAP06(2024)040

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, Tsutomu Kobayashi, “Slowly moving black hole in Lorentz-violating scalar-tensor theories”, Phys. Rev. D 111 (2025) 2, 024062 (arXiv:2408.14004 [gr-qc])

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, “Slowly moving black hole in Lorentz-violating scalar-tensor theories”, The 33rd Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan (JGRG33), Kindai University, Osaka, Dec. 2024

[3] J. Saito, Zhibang Yao, Tsutomu Kobayashi, “Post-Newtonian approximation in higher-order scalar-tensor theories”, Testing gravity 2025, Simons-Fraser University, Vancouver, BC, Canada, Feb. 2025

(4-2)国内学会での発表

[4] 齋藤 仁, Zhibang Yao, 小林努, “Slowly moving black hole in Lorentz-violating scalar-tensor theories”, 「特異点と時空, および関連する物理」研究会, 明治大学, 2024年9月

[5] 齋藤 仁, Zhibang Yao, 小林努, “Post-Newtonian approximation in higher-order scalar-tensor theories”, 日本物理学会第79回年次大会, 北海道大学, 2024年9月