

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

2 0 2 5 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<br>(2026 年 3 月現在<br>のものを記入)                     | 在籍課程・学年                                                                             |  | 氏 名     |                                    |       |
|                                                       | <input checked="" type="checkbox"/> 博士前期課程 2 年<br><input type="checkbox"/> 博士後期課程 年 |  | 堀 井 優 希 |                                    |       |
| 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                                            | <input type="checkbox"/> 自然 ・ 人文 ・ 社会                                               |  | 個人・共同の別 | <input type="checkbox"/> 個人 ・ 共同 名 |       |
| 研究課題                                                  | 整合的な 2 形式場による等方的インフレーション                                                            |  |         |                                    |       |
| 研究組織<br>(共同研究者が<br>いる場合のみ、<br>2026 年 3 月現在<br>のものを記入) | 在籍研究科・専攻・課程・学年                                                                      |  | 氏 名     |                                    |       |
|                                                       |                                                                                     |  |         |                                    |       |
| 研究期間                                                  | 2 0 2 5 年度                                                                          |  |         |                                    |       |
| 研究経費<br>(1 円単位)                                       | (支出金額) 250,000 円 / (採択金額) 250,000 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。                                                                                                                                                                                                                                |
| 本研究では、我々が構築した有質量 2 形式場と同一の力学的自由度を保持しゴーストを含まない、パリティ非保存かつ非最小結合をもつ 2 形式場理論での重力波のパリティ破れと安定性について検討した。重力波のパリティ破れは一般相対性理論では生じ得ない現象であり、観測されれば一般相対性理論を超える重力理論が必要になる。本研究では等方的 triplet 配置をもつ宇宙論モデルでテンソル摂動を解析し、ポテンシャル中のパリティ非保存項によりカイラル重力波が生成され得ることを明らかにした。 |
| 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。)                                                                                                                                                                                                             |
| [宇宙論] [重力理論] [重力波]                                                                                                                                                                                                                             |

**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。

本研究の当初の研究目的、研究方法、研究内容と比較しながら説明する。

**研究 A より一般的な 2 形式場インフレーションの模索**

2 形式場インフレーションのフリーパラメータが一般の場合にインフレーションが起こるかを、Mathematica を用いた数値計算によって検証する。

→ 2 形式場によるインフレーションの研究は学術的インパクトが小さいと判断し、行わなかった。ゆえに研究 A は達成できなかった。

**研究 B 2 形式場インフレーションの線形摂動の解析****〈B-1〉摂動のスケール依存性の評価**

我々が構築した有質量 2 形式場と同一の力学的自由度を保持しゴーストを含まない、パリティ非保存かつ非最小結合をもつ 2 形式場理論の時空にスカラー・ベクトル・テンソル摂動を加え、2 形式場をスカラー・ベクトル・テンソルに分解し、それぞれの運動方程式を Fourier 空間で解くことで、原始密度ゆらぎ、原始磁場、原始重力波のスケール依存性を求める。原始密度ゆらぎのパワースペクトルと原始重力波のパワースペクトルの比である スカラー・テンソル比と、原始密度ゆらぎのパワースペクトルの指数である スペクトル指数を求め、CMB 観測と比較する。

→ テンソル摂動を加え、ラグランジアンを Fourier 空間で表すことができた。ラグランジアンが複雑であるため、運動方程式を導出して解くことはしなかった。また、スカラー・ベクトル摂動はテンソル摂動よりもさらに複雑になると判断し、これらの摂動の解析は行わなかった。運動方程式を解けなかったため、摂動のスケール依存性を求めなかった。ゆえに研究 B-1 は達成できなかった。

**〈B-2〉原始重力波のパリティ対称性の破れの評価**

[研究 B] で求めた原始重力波の運動方程式は、重力波の二つのモードに対して異なることが予想される。この場合、重力波の群速度が光速とわずかに異なることが示されている [1]。中性子星連星合体による重力波と  $\gamma$  線バーストの同時観測 [2] により重力波の伝搬速度は光速にほぼ等しいという強い観測的制限があるので、この観測結果と理論を比較して 重力波のパリティ対称性に関わるフリーパラメータに制限をかける。

→ 重力波の 2 つのモードは左巻きモードと右巻きモードで表せる。我々は左巻き右巻きの 2 つのモードにおけるラグランジアンの違いから、重力波のパリティが破れるための条件を特定した。運動方程式を導出し解いていないので、重力波のパリティ対称性に関わるフリーパラメータには制限をかけていない。重力波のパリティが破れるための条件を特定することができたことから、研究 B-2 は達成できたと考える。

**〈B-3〉原始重力波の異方性の評価**

論文 [3] の方法を用いて 2 形式場インフレーションからの原始重力波の異方性を評価する。

→ 研究 B-3 には取り組んでいない。ゆえに達成できなかった。

**〈B-4〉原始重力波の非ガウス性の評価**

論文 [3] の方法を用いて 2 形式場インフレーションからの原始重力波の非ガウス性を評価する。

→ 研究 B-4 には取り組んでいない。ゆえに達成できなかった。

**研究成果の概要 (つづき)****研究 C    ダークマターとしての 2 形式場の再検討**

2 形式場は中期~後期宇宙における背景時空の膨張に寄与しないようなエネルギー密度の小さな場であり、背景時空の膨張が主に他の場によって担われると考える。この仮定のもとで 2 形式場の運動方程式を解いて現在のダークマターの存在量と比較することで、2 形式場がダークマターである可能性を探求する。

→重力波のパリティ破れが生じるためには本研究の当初の理論は広すぎるものが研究 B-2 によって分かった。過剰に広い理論を考えても計算が複雑になるだけなので、計算コストを下げるために、今後は重力波のパリティを破る必要最小限の理論を構築した上で研究 C を行うことにした。したがって研究 C には取り組んでいないため、達成できなかった。

**【参考文献】**

- [1] T. Manton & S. Alexander, Phys.Rev.D 110 (2024) 4, 044067.
- [2] LIGO Scientific and Virgo and Fermi-GBM and INTEGRAL Collaborations, Astrophys.J.Lett. 848 (2017) 2, L13.
- [3] N. Bartolo *et al.*, Phys.Rev.D 102 (2020) 2, 023527

**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 (著者名、論文標題、雑誌名、巻号、発行年、ページ)

Yuki Horii, Tomoaki Murata, Tsutomu Kobayashi, Ghost-free 2-form fields in cosmology: implications for gravitational parity violation, Physical Review D, 査読中

④ その他 (学会発表、研究報告書の印刷等)

(1)研究会発表, 「2 形式場の整合的な非最小結合による重力波」、2025 年度立教大学理論物理学研究室研究会、発表賞銀賞受賞

(2)研究会発表, 「2 形式場の整合的な非最小結合による重力波」、日本物理学会第 80 回年次大会

(3)研究会発表, “Essential ingredients for chiral gravitational waves from 2-form fields”, Inflation 2025

(4)研究会発表, “Essential ingredients for chiral gravitational waves from 2-form fields”, JGRG34

(5)研究会発表, “Essential ingredients for chiral gravitational waves from 2-form fields”, JGRC2026