

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 (2026 年 3 月現在 のものを記入)	在籍課程・学年		氏 名		
	☒ 博士前期課程 2 年 ☐ 博士後期課程 年		JHUN JINYOUNG		
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	☒ 自然 ・ 人文 ・ 社会		個人・共同の別	☒ 個人 ・ 共同 名	
研究課題	トポロジカルソリトンからの重力波の研究およびトポロジカル量に基づく検出手法の開発				
研究組織 (共同研究者が いる場合のみ、 2026 年 3 月現在 のものを記入)	在籍研究科・専攻・課程・学年		氏 名		
研究期間	2 0 2 5 年度				
研究経費 (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。
トポロジカルソリトンは、背景重力波の起源や天体を構成する物質の候補として注目されている。しかし、トポロジカルソリトンは一般に、解析的に解くことが困難な非線形偏微分方程式によって記述される。そこで本研究では、重力場およびトポロジカルソリトンを支配する方程式を格子上で数値的に解くことにより、トポロジカルソリトンに由来する重力波の特徴を明らかにし、それを観測量と結びつけることを目的とする。あわせて、シミュレーション結果の定量的解析に向けて、トポロジカルソリトンの種類ごとに異なる方法に依存しない、包括的かつ系統的な検出アルゴリズムの開発を行う。
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。)
[重力波] [場の理論] [数値計算]

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。

1. 研究成果

標準模型を超える物理理論では、宇宙の膨張に伴う温度低下によって自発的対称性の破れが生じ、現在の標準模型に至ったと考えられている。自発的対称性の破れが起こると、トポロジカルソリトンが形成され、そこから重力波が放射される可能性がある。特に、自発的対称性の破れに伴う真空多様体が円状である場合には、1次元のトポロジカルソリトンである宇宙ひもが形成される。さらに、宇宙ひもがヒッグス場と相互作用する場合には、ヒッグス場の対称性が宇宙ひも上で破れて凝縮し、超流動性を示す「超伝導宇宙ひも」が生じる可能性がある。

本研究では、格子上の場のシミュレーションを通じて、超伝導宇宙ひものネットワークから放射される重力波の性質を調べ、その物理の解明を行った。具体的には、重力波を記述する運動方程式が線形であることに着目し、エネルギー運動量テンソルを宇宙ひも由来の部分とヒッグス場由来の部分に分け、それぞれの重力波への寄与を調べた。その結果、このようにして計算された各寄与が、重力波のパワースペクトルの形状を説明できることを明らかにした。特に、宇宙ひもとヒッグス場の相互作用が強くなるほど、宇宙ひもからの重力波への寄与は減少し、ヒッグス場からの寄与は増加することを見いだした。また、これにより、相互作用の強さに対する重力波パワースペクトルの依存性を説明できることを示した。

さらに、数値計算の結果、宇宙ひも由来の重力波スペクトルは、相互作用が強くなるほど、あるスケールにおいて平坦化することが分かった。加えて、そのスケールが、宇宙ひもがスケールリング則に従うようになった時点での地平線スケールに対応していることを、勾配エネルギーの体積平均の時間発展を計算することで確認した。以上より、「重力場およびトポロジカルソリトンを支配する方程式を格子上で数値的に解くことにより、トポロジカルソリトンに由来する重力波の特徴を明らかにし、それを観測量と結びつける」という研究目標は達成されたと考えられる。

もう一つの研究目標である「トポロジカルソリトンの種類ごとに異なる方法に依存しない、包括的かつ系統的な検出アルゴリズムの開発を行う」については、トポロジカルチャージの一般的な定義を、本研究で用いた数値計算コードに実装したことによって達成できたと考えられる。

研究成果の概要 (つづき)

※この(様式2)に記入の成果の公開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

なし

② 図書

なし

③ シンポジウム・公開講演会等の開催

なし

④ その他

・国内学会発表(口頭、査読なし)

[1] 「物質場が凝縮した宇宙ひもからの重力波」、2025年度立教大学理論物理学研究室研究会、2025年9月

[2] 「物質場が凝縮した宇宙ひもからの重力波」、日本物理学会 第80回年次大会、19pW2、広島大学、2025年9月

[3] “Gravitational Waves from Superconducting Cosmic Strings”, The 34th workshop on General Relativity and Gravitation, 京都大学、2026年1月

・海外学会発表(ポスター、査読なし)

[4] “Gravitational Waves from Superconducting Cosmic Strings”, 29th International Summer Institute on Phenomenology of Elementary Particle Physics and Cosmology, Utop Marina Hotel & Resort, Yeosu, Korea, 2025年8月