

令和 7 年度（2025） 共同利用研究・研究成果報告書

研究課題名	和文：宇宙の進化と素粒子模型 英文：Evolution of the universe and particle physics
研究代表者	伊部昌宏
参加研究者	東京大学宇宙線研究所・教授・川崎雅裕 名古屋大学・教授・久野純治 京都大学工学部・講師・瀬波大土、 神奈川大学理学部・教授・粕谷伸太 金沢大学・教授・青木真由美 国立天文台・教授・郡和範 東北大学理学部・教授・高橋史宜 金沢大学・准教授・石渡弘治 金沢大学・助教・斎川賢一 東京大学宇宙線研究所・研究員 渡慶次孝気、D 3 笠井健太郎、D 2 千歳彬文、根田俊輔、 D 1 青木隆史、M 2 廣岡幸、聞亜軒
研究成果概要	本年度は、昨年度までに進めてきた準安定宇宙ひもの崩壊率およびその宇宙論的帰結の研究をさらに発展させ、宇宙ひもの崩壊後に生じるモノポール端点およびひもセグメントの力学を詳細に解析した。特に、近年のパルサー・タイミング・アレイ（PTA）観測によって示唆される nHz 帯の統計的重力波背景が、準安定宇宙ひものに由来する可能性を踏まえ、重力波信号の理論予言に影響を与える微視的過程を明らかにすることを目指した。 本研究ではまず、階層的な多段階対称性の破れにおいて形成される宇宙ひもの構造を調べた。多段階の対称性の破れでは、初期段階で形成される重い準安定宇宙ひもと、後期段階で形成される軽い安定宇宙ひものが共存し得ることを示した。さらに、準安定宇宙ひものが崩壊してモノポール・反モノポールを端点に持つセグメントへ分裂した際、その端点に付随する磁束構造を解析した。その結果、宇宙ひもの崩壊が最終段階の対称性の破れの前に起こるか後に起こるかによって、磁束がひもセグメント内に閉じ込められる場合と、非閉じ込め磁束として外部へ広がる場合があることを明らかにした（arXiv:2506.15194）。 次に、崩壊後に生じるひもセグメントが重力波源として有意に寄与するかどうかを検討した。従来の議論では、ひもの張力によって端点のモノポールと反モノポールが強く加速され、セグメントが激しく振動することで、長い宇宙ひもループとは別の重力波源となる可能性が指摘されていた。しかし本研究では、現実的な状況では宇宙ひも上に存在する熱的な横揺らぎとの散乱が端点モノポールの運動に対する抵抗として働き、モノポールの加速を抑制することを示した。その結果、PTA 観測で好まれるパラメータ領域

では、セグメントは十分な振動状態に入る前にエネルギーを散逸し、セグメント由来の重力波放射は宇宙ひもループからの寄与に比べて無視できることを明らかにした (arXiv:2507.12386)。

以上により、本年度は、準安定宇宙ひもによる重力波背景の予言を精密化するうえで重要となる、崩壊後の非線形力学と微視的構造を明らかにした。これにより、PTA 観測と初期宇宙の相転移・位相欠陥を結びつける準安定宇宙ひもシナリオの理論的基盤を一層強化し、将来の SKA や LISA などの重力波観測による検証に向けた重要な知見を得た。