

令和 4 年 4 月 26 日現在

機関番号：32702

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2021

課題番号：17K14304

研究課題名（和文）宇宙ひもの精密観測による初期宇宙モデルの検証

研究課題名（英文）Testing early Universe model by precise measurement of cosmic strings

研究代表者

山内 大介 (Yamauchi, Daisuke)

神奈川大学・工学部・助教

研究者番号：10624645

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：宇宙ひもは、ひも状の位相欠陥であり、初期宇宙の対称性を破る相転移によって生じたと考えられている。現代宇宙論の文脈においては、宇宙ひもは素粒子模型やインフレーションモデルと密接に関連しており、背後にある超高エネルギー物理現象の探求・解明につながる。本研究においては多様な宇宙ひものタイプを網羅的に探究するため、宇宙ひもの衝突や繋ぎ変え過程といった基礎物理過程を探求することで宇宙論的ネットワークの進化へのインパクトを調べた。また、観測データを用いた評価方法を発展させることで、既存および将来観測による宇宙ひもの再評価を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまで宇宙ひもの理論的・観測的研究は特定のモデル(南部・後藤宇宙ひも)の研究のみに着目していたが、本研究課題によって得た成果によって、初めて多様な宇宙ひもタイプにおける基礎物理過程の検証を行うことに成功した。その成果は、当初の予想とは大きく異なっているものであった。宇宙ひもの振る舞いが全くの非自明であることを明らかにしたことで、本研究課題の学術的意義はより高まっている。また、精密宇宙論観測がさまざまに提案されているが、本研究によって、最先端の宇宙論観測手法を取り入れることで宇宙ひもに迫っていく可能性を指摘したことで、既存および将来観測の重要性を増すこととなる。

研究成果の概要（英文）：In the context of modern cosmology, cosmic strings, which are one-dimensional topological defects and may have formed during a symmetry-breaking phase transition in the early Universe, are closely related to particle physics and inflation models. Therefore, observational verification of cosmic strings leads to the exploration and clarification of the underlying high-energy physics phenomena. In this study, we investigated the impact on the evolution of cosmological string network by exploring fundamental process such as collisions and intercommutation of cosmic strings to comprehensively explore various types of cosmic strings. In addition, we developed the evaluation method of cosmic strings using current and future observation data.

研究分野：宇宙論

キーワード：宇宙ひも

1. 研究開始当初の背景

宇宙ひもとは、素粒子模型に含まれる対称性が自発的に破れることで生成されるひも状の位相的欠陥である。宇宙の大規模構造の種となる揺らぎを与えることが出来ることから、長い間インフレーションモデルによる密度揺らぎ生成論に対する対抗馬と位置付けられてきた。現代宇宙論の文脈においては、宇宙ひもはその生成機構から素粒子模型やインフレーションモデルと密接に関連しており、宇宙ひもの実在を観測的に探求することは、背後にある超高エネルギー物理現象をも探求・解明することとなる。

しかし、これまで観測的な制限が与えられてきた宇宙ひもは、初期宇宙に特定のモデル(南部・後藤宇宙ひも)が熱的な相転移によって生成したことを仮定している。この仮定の下では、宇宙ひもは生成後すぐさまスケール解に到達することで、さまざまな予言を不定性なく行うことが可能となる。しかし、この仮定は単にデータ解析の経済的な理由で選ばれているに過ぎず、実際にはインフレーション宇宙論と矛盾した扱いになっていた。さらに、広範な素粒子模型において、多様な宇宙ひもが一般的に生成しうることから、必ずしも妥当な仮定とは言えない。今後の精密宇宙観測時代においては、微小な差異すらも探査できることから、多様な宇宙ひもモデルを網羅的に探査することは必須になる。

2. 研究の目的

本研究計画においては、多様な宇宙ひものタイプをその生成過程まで考慮した網羅的な探査をすることで、インフレーション宇宙における宇宙ひもを徹底的に探求する。ミクロな物理現象のマクロなネットワークへの影響を探るために、宇宙ひもの衝突や繋ぎ替え過程の数値的・解析的手法の開発を行い、そこから派生するネットワークの進化モデルを探求する。さらに、インフレーションモデルと整合的な宇宙ひもに関して観測データを用いた評価方法を確立し、最終的には実際の観測データを用いた再評価することを目指す。

3. 研究の方法

研究目的達成のため、大きく2つの研究課題がある。宇宙ひもの観測量は、ミクロな基礎過程に強く依存している。精密観測時代の到来を前にして、精密観測に耐えうる宇宙ひもモデルの構築は急務になる。「基礎過程研究」では、宇宙ひもの衝突・繋ぎ替えの解析手法の構築、および、ループや小スケール構造の解析モデルを開発することで、新しい宇宙ひもネットワークの進化モデルを構築する。一方で、宇宙ひもはその強い重力により、さまざまな宇宙論的な観測量にその痕跡を残すと期待される。しかし、従来型の宇宙ひもモデルはインフレーションモデルと整合的ではない。「観測的探求」においては、インフレーションモデルと整合的な宇宙ひもに関して、インフレーションによって生成する量子揺らぎの情報との組み合わせによる統一的な評価方法を開発する。「基礎過程研究」で得た知見を踏まえ、CMB、重力波、大規模構造といった広範なスケールにわたる探査を随時行っていく。最終的には、実際の観測データを組み合わせることで、多様な宇宙ひもモデルの再評価を行う。

4. 研究成果

(1) の論文において、宇宙ひものミクロな基礎課程を精密に予言するため、小スケールの衝突・繋ぎ替えの解析手法について検討を行った。これまでは、宇宙ひもの特定のモデル(南部・後藤宇宙ひも)においてしか衝突・繋ぎ替え過程の解析は行われてこなかった。従来型の宇宙ひもモデルの解析においては、世界面上のゲージ条件を適切に選ぶことで解析を簡便に行うことが出来ることが知られている。さらに、その条件の下では運動方程式が可積分になっており、解析的な評価が容易い構造を持っている。しかし、広範な素粒子模型においては多様な宇宙ひもが一般的に生成しうる。一般的な宇宙ひもにおいては上に挙げた方法論は用いることが出来ず、ゲージ条件によらない共変的な方法論の構築を余儀なくされる。また、一般には世界面上に余分の自由度(電流)を持つことが許されるため、世界面の運動方程式とともに電流の運動についても同時に解く必要がある。本研究においては、宇宙ひも上を超伝導電流が流れるモデル(超伝導宇宙ひも)について着目し、共変的な方程式系を導出するとともに、結合を持つ場合の共変的な境界条件をも明らかにした。これを束縛状態のある系に応用することで、束縛状態が生成しうる条件について考察し、これまで知られていた最も一般的な超伝導宇宙ひもの解析モデル(弾性モデル)であっても方程式系は閉じないという興味深い性質を発見した。この事実は、既存の超伝導宇宙ひもモデルを非弾性モデルに拡張しなければいけない、ということを描した重要な帰結になる。

(2) 宇宙ひもは、その強い重力により重力波を放出することが知られている。宇宙ひもが生成する重力波背景放射が最も強くなると期待される周波数スケール(10^{-16} - 10^{-14} Hz)には観測が可能で手法がこれまで提案されてこなかった。宇宙ひもの観測的検証のためには、これらのスケールにおける重力波背景放射の観測手法を提案することは重要な地位を占める。 の論文において

は、 10^{-16} - 10^{-14} Hz 帯の重力波背景輻射のプロープとして宇宙マイクロ波背景輻射の重力レンズ効果を考え、実際の観測データから初めてこの帯域に制限をつけることに成功した。本研究を通して、宇宙ひもの新たな検証手法が加わったことになる。

(3) 宇宙ひもは宇宙最初期において相転移の際に生成することが知られている。その相転移のタイプによっては真空泡の中に我々の宇宙が生成するモデルが存在する。このようなモデルを観測的に峻別することは相転移の物理、ひいては宇宙ひも観測的検証において有用となる。近年、このようなタイプの初期宇宙モデルは暗黒エネルギーとも密接に関連していることが示唆されており、将来の宇宙論観測における重要なターゲットとしても興味深い対象となる。 の論文においては銀河サーベイ、 の論文においては宇宙マイクロ波背景輻射観測に着目し、その検証可能性について議論を行い、これらが観測から峻別可能であることを初めて示した。

(4) 宇宙ひもは、その大きな重力により宇宙全体にわたって密度揺らぎのみならず、ベクトル型・テンソル型揺らぎと呼ばれる特有な揺らぎをもたらしことが知られている。ベクトル型・テンソル型揺らぎは宇宙マイクロ波背景輻射の B モード偏光にその影響を見ることが出来ることから、宇宙マイクロ波背景輻射の偏光に関する定式化は宇宙ひもの観測的検証において重要となる。しかし、その揺らぎの定式化は非線形であるためこれまでなされてなかった。 の論文においては、宇宙マイクロ波背景輻射偏光に関する統一的な定式化を与えることに成功し、その非線形性による効果を完全に分離することが出来た。これにより、宇宙ひもが宇宙マイクロ波背景輻射偏光に与える影響を峻別することに利用することが可能となる。

(5) アクシオンと呼ばれる物質は近年暗黒物質の候補として検討されているとともに、超高エネルギー物理現象のプロープとしても近年非常に注目を集めている。アクシオンは宇宙ひもと結合することから、宇宙ひものプロープとしても有用であると考えられるため、その観測可能性を探索することは本研究にとって重要となる。 の論文では、アクシオンが磁場を伴うブラックホールのまわりに雲状の構造を取りえることに着目し、その摂動効果を解くことでアクシオンの雲状構造が崩壊していくことを初めて見出した。特に、先行研究においてアクシオンとブラックホールのシステムは超放射不安定性と呼ばれる効果により増幅すると考えられていたことから、それに相反する影響がある点において重要である。これにより、アクシオンの宇宙における発展の理解が大きく進展すると考えられる。

<引用文献>

- D. Steer, M. Lilley, D. Yamauchi, T. Hiramatsu, “Y-junction intercommutation of current carrying strings”, *Phys. Rev. D*, 97, 023507 (2018)
- T. Namikawa, S. Saga, D. Yamauchi, A. Taruya, “CMB Constraints on Stochastic Gravitational-Wave Background at Mpc scales”, *Phys. Rev. D*, 100, 021303 (R) (2019)
- D. Yamauchi, H. Aoki, S. Iso, D.S. Lee, Y. Sekino, C.P. Yeh, “Observational signatures of dark energy produced in an ancestor vacuum: Forecast for galaxy surveys”, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, 05 (2019) 055
- Y. Nan, K. Yamamoto, H. Aoki, S. Iso, D. Yamauchi, “Large-scale inhomogeneity of dark energy produced in the ancestor vacuum”, *Phys. Rev. D*, 99, 103512 (2019)
- T. Namikawa, A. Naruko, R. Saito, A. Taruya, D. Yamauchi, “Unified approach to secondary effects on the CMB B-mode polarization”, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, 10 (2021) 029
- C.M. Yoo, A. Naruko, Y. Sakurai, K. Takahashi, Y. Takamori, D. Yamauchi, “Axion cloud decay due to the axion-photon conversion with background magnetic field”, *Publications of Astronomical Society of Japan*, 74, 1, 64 (2022)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計13件（うち査読付論文 13件 / うち国際共著 5件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Hiramatsu Takashi, Yamauchi Daisuke	4. 巻 102
2. 論文標題 Testing gravity theories with cosmic microwave background in the degenerate higher-order scalar-tensor theory	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 83525
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.102.083525	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Hirano Shin'ichi, Kobayashi Tsutomu, Yamauchi Daisuke, Yokoyama Shuichiro	4. 巻 102
2. 論文標題 UV sensitive one-loop matter power spectrum in degenerate higher-order scalar-tensor theories	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 103505
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.102.103505	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Atsushi Naruko, Rampei Kimura, Daisuke Yamauchi	4. 巻 99
2. 論文標題 On Lorentz-invariant spin-2 theories	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 84018
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/physrevd.99.084018	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Daisuke Yamauchi, Hajime Aoki, Satoshi Iso, Da-Shin Lee, Yasuhiro Sekino, Chen-Pin Yeh	4. 巻 5
2. 論文標題 Observational signatures of dark energy produced in an ancestor vacuum : Forecast for galaxy surveys	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 55
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1475-7516/2019/05/055	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Yue Nan, Kazuhiro Yamamoto, Hajime Aoki, Satoshi Iso, Daisuke Yamauchi	4. 巻 99
2. 論文標題 Large-scale inhomogeneity of dark energy produced in the ancestor vacuum	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 103512
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/physrevd.99.103512	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Shin'ichiro Hirano, Tsutomu Kobayashi, Daisuke Yamauchi, Shuichiro Yokoyama	4. 巻 99
2. 論文標題 Constraining degenerate higher-order scalar-tensor theories with linear growth of matter density fluctuations	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 104051
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/physrevd.99.104051	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Shin'ichi Hirano, Tsutomu Kobayashi, Daisuke Yamauchi	4. 巻 99
2. 論文標題 Screening mechanism in degenerate higher-order scalar-tensor theories evading gravitational wave constraints	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 104073
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/physrevd.99.104073	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Toshiya Namikawa, Shohei Saga, Daisuke Yamauchi, Atsushi Taruya	4. 巻 100
2. 論文標題 CMB Constraints on Stochastic Gravitational-Wave Background at Mpc scales	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 21303
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/physrevd.100.021303	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Fabio Chibana, Rampei Kimura, Masahide Yamaguchi, Daisuke Yamauchi, Shuichiro Yokoyama	4. 巻 10
2. 論文標題 Redshift space distortions in the presence of non-minimally coupled dark matter	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 45
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1475-7516/2019/10/049	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Square Kilometre Array Cosmology Science Working Group: David J. Bacon (including D. Yamauchi)	4. 巻 37
2. 論文標題 Cosmology with Phase 1 of the Square Kilometre Array; Red Book 2018: Technical specifications and performance forecasts	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Publication of Astronomical Society of Australia	6. 最初と最後の頁 e007
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/pasa.2019.51	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 David Langlois, Ryo Saito, Daisuke Yamauchi, Karim Noui	4. 巻 97
2. 論文標題 Scalar-tensor theories and modified gravity in the wake of GW170817	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.97.061501	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Yamauchi, D., Yokoyama, S., Tashiro, H.	4. 巻 96
2. 論文標題 Constraining modified theory of gravity with galaxy bispectrum	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 12356-1, -13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.96.123516	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Steer, D., Lilley, M., Yamauchi, D., Hiramatsu, T.	4. 巻 97
2. 論文標題 Y-junction intercommutation of current carrying strings	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 023507-1, -9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.97.023507	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計17件 (うち招待講演 8件 / うち国際学会 6件)

1. 発表者名 山内大介
2. 発表標題 宇宙大規模構造を使った重力理論の検証
3. 学会等名 ``Testing Gravity THxOBS Japan'' kickoff meeting (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山内大介, 高橋智, 横山修一郎
2. 発表標題 Constraining scale-dependent primordial non-Gaussianities from galaxy power and bispectrum
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山内大介
2. 発表標題 いよいよ建設開始！SKAと10の科学 --宇宙論--
3. 学会等名 SKA-Japanウェビナーシリーズ (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Daisuke Yamauchi
2. 発表標題 Cosmology and dark energy with future HI galaxy surveys
3. 学会等名 East Asia SKA Workshop 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Daisuke Yamauchi
2. 発表標題 Constraining primordial non-Gaussianity with future galaxy surveys
3. 学会等名 Theoretical aspects of non-Gaussianity from modern perspectives (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山内大介
2. 発表標題 SKAによる宇宙論
3. 学会等名 SKA-Japanシンポジウム2019 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山内大介
2. 発表標題 位置天文を用いた背景重力波の制限
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山内大介
2. 発表標題 SKA cosmology
3. 学会等名 第8回観測的宇宙論ワークショップ(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 D. Yamauchi, H. Aoki, S. Iso, D.-S. Lee, Y. Sekino, C.-P. Yeh
2. 発表標題 Testing ancestor vacuum fluctuations as the origin of dark energy from galaxy survey
3. 学会等名 Early Universe and Gravitation seminar
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山内大介, 青木一, 磯暁, Da-Shin Lee, 関野恭弘, Chen-Pin Yeh
2. 発表標題 Testing ancestor vacuum fluctuations as the origin of dark energy from galaxy surveys
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Daisuke Yamauchi
2. 発表標題 Cosmology and dark energy with future HI galaxy surveys
3. 学会等名 Cosmological challenges to dark matter, dark energy and galaxy formation (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山内大介
2. 発表標題 位置天文による低周波重力波の性質の検証
3. 学会等名 「銀河進化と遠方宇宙2019」研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yamauchi, D., Yokoyama, S., Tashiro, H.
2. 発表標題 Constraining modified theory of gravity with galaxy bispectrum
3. 学会等名 YKIS2018a Symposium : General Relativity -Next Generation- (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yamauchi, D., Steer, D., Lilley, M., Hiramatsu T.
2. 発表標題 Y-junction intercommutations of current carrying strings
3. 学会等名 JGRG27 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yamauchi, D., Steer, D., Hiramatsu T.
2. 発表標題 Collisions of superconducting strings with Y-junctions
3. 学会等名 COSMO-17 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 山内大介
2. 発表標題 GW170817後のスカラーテンソル理論
3. 学会等名 若手による重力・宇宙論研究会（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山内大介
2. 発表標題 大規模電波サーベイによる宇宙論
3. 学会等名 日本物理学会2017年秋季大会シンポジウム「低周波電波観測が切り開く宇宙物理学」（招待講演）
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計1件

国際研究集会 「銀河進化と遠方宇宙2019」研究会	開催年 2019年～2019年
------------------------------	--------------------

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関