

令和元年6月19日現在

機関番号：32660

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K05359

研究課題名(和文) 一般相対論を超える理論の多角的な検証

研究課題名(英文) Theoretical and observational probes for theories beyond General Relativity

研究代表者

辻川 信二 (TSUJIKAWA, SHINJI)

東京理科大学・理学部第二部物理学科・教授

研究者番号：30318802

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：宇宙初期と後期に、加速的な宇宙の膨張が起こったことが観測的に示唆されており、それらの根源的な問題を解決するために、一般相対論とそれを拡張した理論における有効なモデルを構築した。特に、スカラー場もしくはベクトル場によって加速膨張を起こすモデルを新たに構築し、それらの観測的な兆候を詳細に調べた。2017年に得られた重力波の新たな観測データから、後期加速膨張のモデルの選別を行い、様々な観測と無矛盾なモデルの絞り込みを行った。特に拡張重力理論において、標準的な宇宙項モデルよりも観測的に好まれるモデルの構築をベクトル場を用いて行い、暗黒エネルギーの起源に迫る上で重要な示唆を与えた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現在の宇宙の全エネルギーの約70%を占めるダークエネルギーの起源を明らかにすることは、今世紀の物理学の最重要課題といってもよく、本研究ではその起源を解明するために、有効な理論モデルの構築と様々な観測的な兆候について精査した。特に2015年に始まった重力波天文学によって、本研究期間中にダークエネルギーについての新たな制限が得られ、予想以上にモデルの絞り込みに成功した。これらの研究から、今後さらに加速膨張の起源に迫ることが可能になると期待され、学術的に重要な貢献をしたと言える。

研究成果の概要(英文)：It is observationally known that the two stages of cosmic acceleration occurred in the early and late Universes. To address these fundamental problems, we constructed theoretically viable models of cosmic acceleration in general relativity and extended theories of gravity. In particular, we successfully constructed dark energy models based on scalar/vector fields and studied their observational signatures in detail. By using the new data of gravitational waves obtained in 2017, we distinguished between theoretical models consistent with observations. We showed that dark energy models in vector-tensor theories exhibit a better fit to the data compared to the standard cosmological constant. Our works played important roles to approach the origin of cosmic acceleration.

研究分野：宇宙論，相対論

キーワード：相対論 拡張重力理論 ダークエネルギー インフレーション 宇宙の大規模構造 重力波 宇宙背景放射

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

一般相対論の正しさが完全に検証されていない超ミクロと超マクロのスケールにおいて、2つの加速膨張が起こったことが観測的に明らかになっており、それを説明するための理論的なモデルが多く提唱されていた。

研究開始当初の段階では、宇宙初期のインフレーションに関してはある程度のモデルの選別が宇宙背景放射の観測から行われていたが、宇宙の後期加速膨張に関するダークエネルギーに関しては、どのようなモデルが観測的に好まれるかが明確でなかった。

特に、一般相対論を拡張した重力理論に基づくモデルがどの程度観測から選別されるかは、研究開始当初の観測データでは制限が緩く、標準的な宇宙項モデルよりも観測的に好まれるようなモデルも特に存在していなかった。

### 2. 研究の目的

一般相対論とその拡張理論が、超ミクロおよび超マクロの大きく異なる2つのスケールにおいて、どの程度の精度で成り立っているかを詳細に調べ、一般相対論を超える理論の構築を目指す。

超ミクロのスケールでは、一般相対論と量子論を統一する量子重力理論(超弦理論を含む)に基づくインフレーションモデルの構築、再加熱機構、素粒子の標準モデルとの整合性に関する研究を行い、宇宙背景放射などの最新の観測データを用いて真に有効なモデルを絞り込む。

超マクロのスケールでは、現在の宇宙の加速膨張を引き起こす暗黒エネルギーの起源が、一般相対論の枠組みを超えた理論と関係するかどうかを調べる。これらの研究を統合し、宇宙進化の初期と後期の物理現象を統一的に説明できる究極理論の構築を目指す。

### 3. 研究の方法

本研究は、主に代表者が行う理論的な研究であり、理論モデルの構築と観測的な兆候については、代表者が共同研究者とともにやってきた。代表者は、国内外の多くの共同研究者と連携して、理論と観測の垣根のない共同研究を遂行し、一般相対論とその拡張理論の検証を行ってきた。

平成28年度には、主に理論に精通した研究者と協力して、宇宙の後期加速膨張を引き起こし、かつ局所重力実験の制限と整合的な拡張重力理論に基づくモデルの構築を行った。

平成29年度には、28年度の研究を継続するとともに、インフレーションを始めとする宇宙初期の理論的なモデルの構築の研究にも着手した。

平成30年度には、観測データの解析に詳しい研究者と連携し、有効なダークエネルギーのモデルを絞り込み、モデルの選別を行った。

### 4. 研究成果

スカラー場もしくはベクトル場が存在する系で、それらが重力と直接結合している一般的な理論における宇宙進化、特に密度ゆらぎの進化と理論が不安定性を持たないための条件を明らかにした。特に、基礎方程式が2階微分に保たれる一般的なベクトルテンソル理論において新たなダークエネルギーモデルを構築し、状態方程式や物質ゆらぎの成長率などを詳細に調べた。さらに、宇宙背景放射、大規模構造、超新星の観測データを用いた統計解析を行うことで、ベクトルテンソル理論に基づくモデルの方が宇宙項モデルよりも好まれるという興味深い結果を得た。

平成29年度に得られた重力波の伝搬速度の観測結果を踏まえて、スカラーテンソル理論とベクトルテンソル理論に基づくダークエネルギーモデルが強く制限されることを示し、有効なモデルの絞り込みを行った。それに加えて、太陽系のような宇宙の局所領域において、ベクトルテンソル理論における重力の振る舞いを調べ、局所重力実験と矛盾しないレベルで第5の力の伝搬が抑えられることを示した。

また、ベクトル場がスカラー場と結合しているスカラーベクトルテンソル理論において、新たなインフレーションモデルを構築し、曲率ゆらぎのパワースペクトルを計算することで、宇宙背景放射の観測データからモデルに制限をつけた。このような宇宙初期と後期の加速膨張の物理の研究を、一般相対論とその拡張理論に基づいて行った結果として、有効なモデルの絞り込みができただけでなく、宇宙進化を統一的に説明可能な理論的な枠組みに近づいたと言える。

### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 18 件)

1. J. P. B. Almeida, A. Guarnizo, R. Kase, S. Tsujikawa and C. A. Valenzuela-Toledo,

``Anisotropic inflation with coupled p-forms,"

JCAP1903, 025 (2019)

DOI: [10.1088/1475-7516/2019/03/025](https://doi.org/10.1088/1475-7516/2019/03/025)

2. N. Frusciante, R. Kase, K. Koyama, [S. Tsujikawa](#) and D. Vernieri,

``Tracker and scaling solutions in DHOST theories,"

Phys. Lett. B790, 167 (2019)

DOI: [10.1016/j.physletb.2019.01.009](https://doi.org/10.1016/j.physletb.2019.01.009)

3. L. Heisenberg, H. Ramirez and [S. Tsujikawa](#),

``Inflation with mixed helicities and its observational imprint on CMB,"

Phys. Rev. D99, 023505 (2019)

DOI: [10.1103/PhysRevD.99.023505](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.99.023505)

4. S. Nakamura, A. De Felice, R. Kase and

[S. Tsujikawa](#),

``Constraints on massive vector dark energy models from integrated Sachs-Wolfe-galaxy cross-correlations,"

Phys. Rev. D99, 063533 (2019)

DOI: [10.1103/PhysRevD.99.063533](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.99.063533)

5. R. Kase and [S. Tsujikawa](#),

``Dark energy in Horndeski theories after GW170817: A review,"

Int. J. Mod. Phys. D28, no. 05, 1942005 (2019)

DOI: [10.1103/PhysRevD.99.063533](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.99.063533)

6. L. Heisenberg, R. Kase and [S. Tsujikawa](#),

``Odd-parity stability of hairy black holes in U(1) gauge-invariant scalar-vector-tensor theories,"

Phys. Rev. D97, 124043 (2018)

DOI: [10.1103/PhysRevD.97.124043](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.97.124043)

7. N. Frusciante, R. Kase, N. J. Nunes and

[S. Tsujikawa](#),

``Most general cubic-order Horndeski Lagrangian allowing for scaling solutions and the application to dark energy,"

Phys. Rev. D98, 123517 (2018)

DOI: [10.1103/PhysRevD.97.124043](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.97.124043)

8. I. S. Albuquerque, N. Frusciante, N. J. Nunes and [S. Tsujikawa](#)

``New scaling solutions in cubic Horndeski theories,"

Phys. Rev. D98, 064038 (2018)

DOI: [10.1103/PhysRevD.98.064038](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.98.064038)

9. L. Heisenberg, R. Kase and S. Tsujikawa  
``Gauge-ready formulation of cosmological perturbations in scalar-vector-tensor theories,"  
Phys. Rev. D98, 123504 (2018)  
DOI: [10.1103/PhysRevD.98.123504](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.98.123504)
  
10. R. Kase and S. Tsujikawa,  
``Dark energy in scalar-vector-tensor theories,"  
JCAP 1811, no. 11, 024 (2018)  
DOI: [10.1088/1475-7516/2018/11/024](https://doi.org/10.1088/1475-7516/2018/11/024)
  
11. L. Heisenberg, R. Kase and S. Tsujikawa,  
``Cosmology in scalar-vector-tensor theories,"  
Phys. Rev. D98, 024038 (2018)  
DOI: [10.1103/PhysRevD.98.024038](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.98.024038)
  
12. R. Kase and S. Tsujikawa,  
``Dark energy scenario consistent with GW170817 in theories beyond Horndeski,"  
Phys. Rev. D97, 103501 (2018)  
DOI: [10.1103/PhysRevD.97.103501](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.97.103501)
  
13. L. Heisenberg and S. Tsujikawa,  
``Dark energy survivals in massive gravity after GW170817: SO(3) invariant,"  
JCAP 1801, no. 01, 044 (2018)  
DOI: [10.1088/1475-7516/2018/01/044](https://doi.org/10.1088/1475-7516/2018/01/044)
  
14. S. Nakamura, R. Kase and S. Tsujikawa,  
``Cosmology in beyond-generalized Proca theories,"  
Phys. Rev. D95, 104001 (2017)  
DOI: [10.1103/PhysRevD.95.104001](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.95.104001)
  
15. L. Heisenberg, R. Kase, M. Minamitsuji and S. Tsujikawa,  
``Black holes in vector-tensor theories,"  
JCAP 1708, no. 08, 024 (2017)  
DOI: [10.1088/1475-7516/2017/08/024](https://doi.org/10.1088/1475-7516/2017/08/024)
  
16. J. B. Jimenez, L. Heisenberg, R. Kase, R. Namba and S. Tsujikawa ,  
``Instabilities in Horndeski Yang-Mills inflation,"  
Phys. Rev. D95, 063533 (2017)  
DOI: [10.1103/PhysRevD.95.063533](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.95.063533)

17. A. De Felice, L. Heisenberg and S. Tsujikawa,  
"Observational constraints on generalized Proca theories,"  
Phys. Rev. D95, 123540 (2017)  
DOI: [10.1103/PhysRevD.95.123540](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.95.123540)

18. L. Heisenberg, R. Kase and S. Tsujikawa,  
"Beyond generalized Proca theories,"  
Phys. Lett. B760, 617-626 (2016)  
DOI: [10.1016/j.physletb.2016.07.052](https://doi.org/10.1016/j.physletb.2016.07.052)

[学会発表](計 9 件)

1. S. Tsujikawa,  
"Dark energy in scalar-tensor versus vector-tensor theories,"  
Philosophy of Dark Energy workshop,  
2019年3月, アーバイン (米国)
2. S. Tsujikawa,  
"Galaxy-ISW constraints on dark energy models consistent with GW170817,"  
Testing Gravity 2019,  
2019年1月, バンクーバー (カナダ)
3. S. Tsujikawa,  
"Dark energy in scalar-tensor and vector-tensor theories,"  
5<sup>th</sup> International Workshop on dark matter, dark energy and matter-antimatter asymmetry,  
2018年12月, 高雄 (台湾)
4. S. Tsujikawa,  
"Hairy black holes and gravitational waves in vector-tensor theories,"  
Gravitational waves in modified gravity,  
2018年5月, チューリッヒ (スイス)
5. S. Tsujikawa,  
"Cosmology in generalized Proca theories,"  
Ninth Aegean Summer School,  
2017年9月, シフノス島 (ギリシャ)
6. S. Tsujikawa,  
"Hairy black holes in vector-tensor theories,"  
4-th Korea-Japan Workshop on Dark Energy,  
2017年8月, 名古屋
7. S. Tsujikawa,  
"Dark energy in vector-tensor theories,"  
CosKASI conference 2017,  
2017年4月, 大田 (韓国)

8. S. Tsujikawa,  
``Theories of modified gravity,"  
CosPA 2016  
2016年11月, シドニー (オーストラリア)

9. S. Tsujikawa,  
``Dark energy and modified gravity,"  
Hanoi workshop on general relativity and  
cosmology,  
2016年10月, ハノイ (ベトナム)

〔図書〕(計 1 件)

S. Tsujikawa,  
``The Encyclopedia of Cosmology, Volume 3, Dark  
Energy,"  
World Scientific, 2018年5月

〔産業財産権〕  
出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕  
ホームページ等  
<https://www.rs.kagu.tus.ac.jp/shinji/Tsujikawaj.html>

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者  
辻川 信二 (TSUJIKAWA Shinji )  
東京理科大学 理学部第二部物理学科 教授

研究者番号 : 30318802

(2) 研究分担者  
研究分担者氏名 :  
ローマ字氏名 :  
所属研究機関名 :  
部局名 :  
職名 :  
研究者番号 (8桁) :

(3) 研究協力者  
研究協力者氏名 :  
ローマ字氏名 :

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。