

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 1 日現在

機関番号：32660

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24540286

研究課題名(和文)最新の観測に基づく暗黒エネルギーの理論モデルの検証

研究課題名(英文) Probing theoretical models of dark energy from latest observations

研究代表者

辻川 信二 (TSUJIKAWA, Shinji)

東京理科大学・理学部・教授

研究者番号：30318802

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：超新星などの観測から、現在の宇宙が加速膨張をしていることが知られているが、その起源は未だに不明である。研究代表者はその起源を明らかにするために、一般相対論を拡張した修正重力理論を用いて、加速膨張を引き起こす暗黒エネルギーモデルを統一的に取り扱う手法を確立した。そのような一般的な枠組みにおいて、背景宇宙の進化、密度揺らぎの進化、太陽系における重力の強さなどについて詳細に調べ、暗黒エネルギーのモデルを選別する上で極めて重要な貢献を果たした。さらに、最新の超新星、宇宙背景輻射、大規模構造などのデータを用いて個々のモデルに対して制限を与え、有効な後期加速膨張のモデルの絞り込みを行った。

研究成果の概要(英文)：From the observations of supernovae it is known that the present Universe is accelerating, but the origin of cosmic acceleration has not been identified yet. To reveal the origin of dark energy, I constructed a general theoretical framework for dealing with dark energy models in modified gravitational theories. In such a general scheme I studied the cosmic expansion history, the evolution of density perturbations, and the gravitational couplings in the solar system, which is very useful to distinguish between theoretical models of dark energy. In addition, we placed constraints on each dark energy model from the observations of supernovae, cosmic microwave background, and large-scale structures.

研究分野：宇宙論，一般相対論

キーワード：暗黒エネルギー 修正重力理論 宇宙背景輻射 宇宙の大規模構造 暗黒物質 インフレーション 重力波

1. 研究開始当初の背景

遠方の超新星の 1990 年代の観測から、現在の宇宙が加速膨張をしていることがわかり、2000 年以降の様々な独立した観測データによっても、宇宙を加速膨張させる源である暗黒エネルギーの存在が裏付けられている。暗黒エネルギーは、実効的に負の圧力を持ち、斥力のように働く特殊なエネルギーで、その起源は不明である。理論的な側面では、(i) 物質場として特殊なものを考えるもの、(ii) 一般相対論を修正した重力理論によるものが考えられており、研究開始の当初では、様々な模型を統一的に扱う手法がなく、また、観測からの模型の間の選別も明確にできていなかった。

2. 研究の目的

現在の宇宙のエネルギーの約 73 % を占める暗黒エネルギーの起源に迫るため、理論的に矛盾のない模型の構築を行い、最新の観測データを用いて模型の選別を行う。特に、超新星、宇宙背景輻射、宇宙の大規模構造、重力レンズなどの様々な観測から、修正重力理論・素粒子論に基づく暗黒エネルギー模型の有効性や、暗黒エネルギーと暗黒物質との関連性について、詳細な解析を行う。さらに、そのような理論模型において、密度の高い宇宙の局所領域でどのように一般相対論的な振る舞いが回復されるかについて調べ、太陽系における重力実験からの制限も満たす整合的な模型の構築を行う。

3. 研究の方法

研究内容は、理論と観測の 2 つの側面あり、特に初年度から 2 年目にかけては修正重力理論、素粒子論に基づく理

論的な暗黒エネルギー模型の構築に焦点をおいた研究を遂行した。2013 年に、PLANCK 衛星による宇宙背景輻射の観測結果が得られたため、CosmoMC などを用いたモンテカルロ数値計算を開始し、観測的に模型の選別を行った。2 年目から 4 年目にかけては、模型の理論的な構築だけでなく、それらの観測的な兆候や局所領域でのヴァインシユタイン機構の研究を推進した。それとともに、宇宙の大規模構造の赤方偏移空間における密度揺らぎの成長率などの新しい観測データを用いて、暗黒エネルギーの模型の選別を行った。

4. 研究成果

一般相対論を拡張した修正重力理論を用いて、加速膨張を引き起こす暗黒エネルギー模型を統一的に取り扱う手法を確立した。特に、ホルンデスキー理論とそれを拡張した修正重力理論を内包する非常に一般的な有効場の理論を構築した。

そのような一般的な枠組みにおいて、背景宇宙の進化、密度揺らぎの進化、太陽系における重力結合の強さなどについて詳細な解析を行い、そのような包括的な理論が予測する観測量の定式化を行った。さらに、超新星、宇宙背景輻射、大規模構造などの観測データを用いて個々の模型に対して制限を与え、有効な加速膨張模型の絞り込みを行った。

その結果、一般相対論の枠組みでスカラー場を用いるクインテッセンス模型は、宇宙項による模型と比べて特に観測的に好まれないことが明らかになった。それに対して、修正重力理論の枠組みでは、観測と整合的な模型を構築することが可能であることを示した。

5 . 主な発表論文等
(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 14 件, 全て査読あり)

1. S. Tsujikawa,
Observational tests of inflation with a field derivative coupling to gravity,
Physical Review D85, 083518, p1-p11 (2012),
[10.1103/PhysRevD.85.083518](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.85.083518)
2. J. Ohashi and S. Tsujikawa,
Potential-driven Galileon inflation,
Journal of cosmology and Astroparticle physics, 1210, 035, p1-p31 (2012),
[10.1088/1475-7516/2012/10/035](https://doi.org/10.1088/1475-7516/2012/10/035)
3. A. De Felice and S. Tsujikawa,
Shapes of primordial non-Gaussianities in the Horndeski's most general scalar-tensor theories,
Journal of cosmology and Astroparticle physics, 1303, 030, p1-p38 (2013),
[10.1088/1475-7516/2013/03/030](https://doi.org/10.1088/1475-7516/2013/03/030)
4. T. Chiba, S. Tsujikawa, and A. De Felice,
Observational constraints on Quintessence: Thawing, Tracker, and scaling models,
Physical Review D 87, 083505, p1-p12 (2013),
[10.1103/PhysRevD.87.083505](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.87.083505)
5. S. Tsujikawa, J. Ohashi, S. Kuroyanagi, and A. De Felice,
Planck constraints on single-field inflation,
Physical Review D 88, 023529, p1-p21 (2013),
[10.1103/PhysRevD.88.023529](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.88.023529)
6. S. Tsujikawa,
Quintessence: A review,
Classical and quantum gravity, 30, 214003, p1-p18 (2013),
[10.1088/0264-9381/30/21/214003](https://doi.org/10.1088/0264-9381/30/21/214003)
7. R. Kase and S. Tsujikawa,
Screening the fifth force in the Horndeski's most general scalar-tensor theories,
Journal of cosmology and Astroparticle physics, 1308, 054, p1-p36 (2013),
[10.1088/1475-7516/2013/08/054](https://doi.org/10.1088/1475-7516/2013/08/054)
8. L. Gergely and S. Tsujikawa,
Effective field theory of modified gravity with two scalar fields: Dark energy and dark matter,
Physical Review D89, 064059, p1-p18 (2014),
[10.1103/PhysRevD.89.064059](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.89.064059)
9. S. Nesseris and S. Tsujikawa,
Cosmological perturbations and observational constraints on non-local massive gravity,
Physical Review D90, 024070, p1-p14 (2014),
[10.1103/PhysRevD.90.024070](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.90.024070)
10. R. Kase and S. Tsujikawa,
Cosmology in generalized Horndeski theories with second-order equations of motion,
Physical Review D90, 044073, p1-p15 (2014),
[10.1103/PhysRevD.90.044073](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.90.044073)
11. R. Kase and S. Tsujikawa,
Effective field theory approach to modified gravity including Horndeski theory and Horava-Lifshitz gravity,
International journal of modern physics D 23, 1443008, p1-p41 (2015),
[10.1142/S0218271814430081](https://doi.org/10.1142/S0218271814430081)
12. A. De Felice, K. Koyama, and S. Tsujikawa,
Observational signatures of the theories beyond Horndeski,
Journal of cosmology and Astroparticle physics, 1505, 058, p1-p27 (2015),
[10.1088/1475-7516/2015/05/058](https://doi.org/10.1088/1475-7516/2015/05/058)
13. S. Tsujikawa,
Possibility of realizing weak gravity in redshift space distortion measurements,
Physical Review D92, 044029, p1-p16 (2015),
[10.1103/PhysRevD.92.044029](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.92.044029)
14. R. Kase, S. Tsujikawa, A. De Felice,
Cosmology with a successful Vainshtein screening in theories

beyond Horndeski,
Physical Review D93, 024007,
p1-p17 (2016),
[10.1103/PhysRevD.93.024007](https://arxiv.org/abs/10.1103/PhysRevD.93.024007)

〔学会発表〕(計 12 件)

1. S. Tsujikawa,
Selection of dark energy models
from recent observations,
13-th Marcel Grossman meeting,
2012年7月2日, スtockホルム
(スウェーデン)
2. S. Tsujikawa,
Discrimination between theoretical
models of dark energy
from observations,
ICFPC meeting,
2012年8月12日, 威海(中国)
3. S. Tsujikawa,
Discrimination between theoretical
models of dark energy
from observations,
13-th Marcel Grossman meeting,
2012年8月30日, パッサクアトロ
(ブラジル)
4. S. Tsujikawa,
Planck constraints on single-field
inflation,
1-st i-Link workshop,
2013年6月27日, マドリード
(スペイン)
5. S. Tsujikawa,
Cosmological perturbations in the
most general scalar-tensor theories,
Seventh Aegean summer school,
2013年9月24日, パロス島
(ギリシャ)
6. S. Tsujikawa,
Discrimination between
dark energy models
from observations,
1-st APCTP-NBA joint workshop,
2013年10月21日, 浦項
(韓国)
7. S. Tsujikawa,
The effective field theory
of modified gravity and the
Horndeski theory,
Quantum cosmology workshop,
2014年7月28日, バットホネフ
(ドイツ)

8. S. Tsujikawa,
暗黒エネルギーと修正重力理論,
日大理工益川塾連携シンポジウム,
2014年11月8日,
京都産業大学
9. S. Tsujikawa,
Disformal invariance of
cosmological perturbations in a
generalized class of
Horndeski theories,
Testing gravity 2015 workshop,
2015年1月17日, バンクーバー
(カナダ)
10. S. Tsujikawa,
Effective field theory
of cosmological perturbations with
application to dark energy,
14-th Marcel Grossman meeting,
2015年7月16日, ローマ(イタリア)
11. S. Tsujikawa,
Effective field theory approach to
modified gravity with application
to inflation and dark energy,
14-th Marcel Grossman meeting,
2015年8月13日, クイノン
(ベトナム)
12. S. Tsujikawa,
Current status of dark energy and
beyond,
NCTS annual theory meeting 2015,
2015年12月12日, 新竹(台湾)

〔図書〕(計 2 件)

1. 辻川信二,
現代宇宙論講義, サイエンス社,
2013年7月, p1-p208
2. 辻川信二,
相対性理論が描く宇宙の未来,
シーアンドアール研究所,
2015年3月, p1-p216

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

取得状況（計 0 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

6. 研究組織

(1) 研究代表者

辻川 信二 (Shinji Tsujikawa)
(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

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：