

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 31 日現在

機関番号：32660

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2015～2016

課題番号：15H06635

研究課題名(和文) 修正重力理論に基づく暗黒エネルギー模型に関する大・小スケールでの最新の観測的制限

研究課題名(英文) Observational constraints on the dark energy models base on modified gravitational theories at large/small distances

研究代表者

加瀬 竜太郎 (Ryotaro, Kase)

東京理科大学・理学部第二部物理学科・助教

研究者番号：10756406

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,100,000円

研究成果の概要(和文)：1998年、Ia型超新星の観測から現在の宇宙は加速膨張していることが発見された。この現象を引き起こすエネルギーは暗黒エネルギーと呼ばれ、その起源は未だ不明である。この宇宙後期加速膨張を説明する理論の一つとして、大スケールで重力理論を変更した修正重力理論がある。本研究では修正重力理論に基づく理論模型に関して、大スケールにおいて模型が満たすべき理論的安定性の条件、密度ゆらぎの発展の理論予測、及び可観測量に与える影響を明らかにした。また、太陽系等の小スケールにおける第五の力の遮蔽機構を精査し、局所重力実験を満たすための条件を明らかにした。これらの研究は有効な後期加速膨張模型の選別に大きく寄与した。

研究成果の概要(英文)：In 1998, the late-time cosmic acceleration is discovered from the observations of supernovae. The origin of the source for this acceleration, dubbed dark energy, has not been identified yet. One of the candidates that can explain the late-time cosmic acceleration is a modification of gravity at large distances. For the models based on modified gravitational theories, I revealed the theoretical conditions to avoid instabilities, theoretical prediction of the evolutions of the matter perturbations and its effect to the observables at large distances. I also studied the screening mechanism of the fifth force at short distances such as the solar system, and clarified the conditions for the models to satisfy local gravity experiments. These studies make a large contribution to distinguish between theoretical models of dark energy based on modified gravity.

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 宇宙の大規模構造 密度ゆらぎの成長率 局所重力実験 第五の力の遮蔽機構

1. 研究開始当初の背景

1998年にIa型超新星の観測から現在の宇宙は加速膨張していることが発見され、この未知の現象の源は暗黒エネルギーと名付けられた。最新の観測では、現在の宇宙のおよそ7割がこの未知のエネルギーによって占められていることが明らかにされているが、暗黒エネルギーの起源に関しては未だ不明である。この宇宙後期加速膨張という未知の現象を説明する有力な候補の一つとして、大スケールで重力理論を変更した修正重力理論があり、スカラー場と重力場が結合したスカラー・テンソル理論、ベクトル場と重力場が結合したベクトル・テンソル理論等が現在世界中で活発に研究されている。これら二つの理論に関してはまだ未解明な点も多く、宇宙論的な大スケールと太陽系等の小スケールにおける理論的・観測的な整合性から、真に有効な理論モデルの選別を行う必要がある。

2. 研究の目的

本研究の目的は理論と観測、更に大スケール・小スケールといった多角的な視点から修正重力理論に基づく暗黒エネルギーモデルの検証を行い、暗黒エネルギーの起源に迫ることである。そのため、本研究ではスカラー・テンソル理論やベクトル・テンソル理論に基づく理論モデルに関して、大スケールで現在の加速膨張を実現するための条件と理論的な安定性の条件、更に可観測量と関係する密度ゆらぎの時間変化等を明らかにしていく。また、修正重力理論に基づく暗黒エネルギーモデルでは、一般的に重力理論の修正に寄与する場によって第五の力の伝搬が起こりうる。このような第五の力の伝搬は、太陽系等の局所領域では非常に強く制限されることが実験的に分かっている。たとえ大スケールで観測と整合的な理論モデルであったとしても、小スケールにおいて第五の力が伝搬してしまう場合は非整合的である。よって、小スケールでの理論モデルの振る舞いを精査し、局所重力実験を満たすための条件を明らかにする必要がある。

3. 研究の方法

修正重力理論に基づく暗黒エネルギーモデルは現在までに数多く提唱されてきた。これら数多あるモデルを統一的に取り扱うことのできる枠組みとして、運動方程式が微分に関して二階以下に保たれる最も一般的なスカラー・テンソル理論であるホルンデスキ理論、更に運動方程式が空間の高階微分項を許容するようにホルンデスキ理論を拡張したGLPV理論がある。これまでに提唱されてきた中で、スカラー・テンソル理論に属する暗黒エネルギーモデルのほとんどは、ホルンデスキ理論及びGLPV理論に内包されている。また、

ベクトル・テンソル理論では、ホルンデスキ理論と同様の手法で構築された一般化プロカ理論が存在する。これらの一般的な枠組みを用いて宇宙論的背景時空(大スケール)、静的球対称時空(小スケール)双方における解析を行い、赤方偏移歪みの観測データや局所重力実験のデータと比較していく。

4. 研究成果

初年度はスカラー・テンソル理論に属するGLPV理論に関する研究を行い、静的球対称時空の原点でホルンデスキ理論からのずれが有限な値を持つような場合に欠損角不安定性が生じることを明らかにした。この欠損角が存在する場合、恒星等の原点で曲率の発散が起こる。更に、第五の力の遮蔽機構が正常に働かず、局所重力実験の結果を満たすことができない。研究代表者は、GLPV理論の枠組みにおいて欠損角不安定性を避けるための一般的な条件を明らかにし、実際にこのような不安定性が生じないモデルの構築を行った。このようなモデルにおいては遮蔽機構が正常に働く。更に、宇宙論的背景時空における解析を行い、上記のモデルが後期加速膨張を実現可能であること、また密度ゆらぎの成長率は相対論と比較して大きくなる傾向にあり、赤方偏移歪みの観測データとは整合的になり難いことを明らかにした。

2年目は主にベクトル・テンソル理論に属する一般化プロカ理論についての研究を行った。静的球対称時空での解析から、同理論に基づくモデルでは一般的に第五の力の遮蔽機構が強く働き、局所重力実験の結果を自然に満たしうることを明らかにした。更に宇宙論的背景時空における解析から、一般化プロカ理論が満たすべき理論的安定性の条件を導き、この条件を満たし、かつ後期加速膨張を実現するようなモデルの構築を行った。このモデルに関して、観測に関わる量である密度ゆらぎの時間発展を精査し、大スケールにおいて実効重力定数が一般相対論の場合よりも小さくなりうること、及び、そのような場合には密度ゆらぎの成長率が小さくなり赤方偏移歪みの観測データと整合的になりやすいことを示した。更に一般化プロカ理論を拡張した理論の構築を行い、このような拡張理論では一般化プロカ理論と比較してゆらぎの成長率を更に抑制することが可能であり、観測結果と整合的であることを明らかにした。

以上のことから、スカラー・テンソル理論では密度ゆらぎの成長率の理論値が相対論に基づくモデルと比較して大きくなり、最新の観測結果と整合的になり難いという傾向があるが、ベクトル・テンソル理論の枠組みでは安定性の条件を満たしつつ弱重力を実現することで、観測と整合的なモデルの構築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 11 件, 全て査読あり)

- 1) S. Nakamura, R. Kase, and S. Tsujikawa, Cosmology in beyond-generalized Proca theories, Physical Review D95, 104001, p1-p22 (2017), 10.1103/PhysRevD.95.104001
- 2) J. Beltran Jimenez, L. Heisenberg, R. Kase, R. Namba, and S. Tsujikawa, Instabilities in Horndeski Yang-Mills inflation, Physical Review D95, 063533, p1-p8 (2017), 10.1103/PhysRevD.95.063533
- 3) L. Heisenberg, R. Kase, and S. Tsujikawa, Absence of solid angle deficit singularities in beyond-generalized proca theories, Physical Review D94, 123513, p1-p14 (2016), 10.1103/PhysRevD.94.123513
- 4) L. Heisenberg, R. Kase, and S. Tsujikawa, Anisotropic cosmological solutions in massive vector theories, Journal of cosmology and Astroparticle physics, 1611, 008, p1-p28 (2016), 10.1088/1475-7516/2016/11/008
- 5) A. De Felice, L. Heisenberg, R. Kase, S. Mukohyama, S. Tsujikawa, and Y. Zhang, Effective gravitational couplings for cosmological perturbations in generalized Proca theories, Physical Review D94, 044024, p1-p20 (2016), 10.1103/PhysRevD.94.044024
- 6) L. Heisenberg, R. Kase, and S. Tsujikawa, Beyond generalized Proca theories, Physics Letters B760, p617-p626 (2016), 10.1016/j.physletb.2016.07.052
- 7) A. De Felice, L. Heisenberg, R. Kase, S. Mukohyama, S. Tsujikawa, and Y. Zhang, Cosmology in generalized Proca theories, Journal of cosmology and Astroparticle physics, 1606, 048, p1-p33 (2016), 10.1088/1475-7516/2016/06/048
- 8) A. De Felice, L. Heisenberg, R. Kase, S. Tsujikawa, Y. Zhang, and G. Zhao, Screening fifth forces in generalized Proca theories, Physical Review D93, 104016, p1-p17 (2016), 10.1103/PhysRevD.93.104016
- 9) R. Kase, S. Tsujikawa, and A. De Felice, Conical singularities and the Vainshtein screening in full GLPV theories, Journal of cosmology and Astroparticle

physics, 1603, 003, p1-p25 (2016), 10.1088/1475-7516/2016/03/003

- 10) R. Kase, S. Tsujikawa, and 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
- 11) A. De Felice, R. Kase, and S. Tsujikawa, Existence and disappearance of conical singularities in Gleyzes-Langlois-Piazza-Vernizzi theories, Physical Review D92, 124060, p1-p11 (2015), 10.1103/PhysRevD.92.124060

[学会発表](計 9 件)

- 1) R. Kase, Absence of conical singularities in beyond-generalized Proca theories, 日本物理学会 第 72 回年次大会, 2017 年 3 月 17 日, 大阪大学(大阪府豊中市)
- 2) R. Kase, Absence of conical singularities in beyond-generalized Proca theories, The 26th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan, 2016 年 10 月 26 日, 大阪市立大学(大阪府大阪市)
- 3) R. Kase, Effective gravitational couplings for cosmological perturbations in generalized Proca theories, Varying Constants and Fundamental Cosmology – VARCOSMOFUN'16, 2016 年 9 月 13 日, Szczecin (ポーランド)
- 4) R. Kase, Screening fifth forces in generalized Proca theories, IF-YITP GR+HEP+Cosmo International Symposium VI, 2016 年 8 月 4 日, Phitsanulok (タイ)
- 5) R. Kase, Conical singularities and the Vainshtein screening in full GLPV theories, 3rd Korea-Japan Workshop on Dark Energy, 2016 年 4 月 7 日, 大田 (韓国)
- 6) R. Kase, Cosmology with a successful Vainshtein screening in theories beyond Horndeski, 日本物理学会 第 71 回年次大会, 2016 年 3 月 21 日, 東北学院大学(宮城県仙台市)
- 7) R. Kase, Existence and disappearance of conical singularities in GLPV theories, The 25th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan,

2015年12月9日,京都大学基礎物理学
研究所(京都府京都市)

- 8) R. Kase,
拡張されたホルンデスキ理論(GLPV 理論)におけるヴァインシュタイン機構と
局所重力実験からの制限,
日本物理学会 2015年秋季大会,
2015年9月27日,大阪市立大学(大阪
府大阪市)
- 9) R. Kase,
Local gravity constraints on theories
beyond Horndeski,
2nd APCTP-TUS workshop on Dark
Energy,
2015年8月5日,東京理科大学(東京
都新宿区)

6. 研究組織

(1)研究代表者

加瀬 竜太郎 (Ryotaro Kase)
東京理科大学・理学部第二部物理学科・
助教
研究者番号: 10756406