

令和 6 年 9 月 11 日現在

機関番号：32660

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2023

課題番号：20K14471

研究課題名（和文）宇宙論の大スケールと小スケールの強重力領域における相対論を拡張した重力理論の検証

研究課題名（英文）Testing gravitational theories on cosmologically large scales and small scales around the compact object

研究代表者

加瀬 竜太郎（Kase, Ryotaro）

東京理科大学・理学部第二部物理学科・准教授

研究者番号：10756406

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）：本研究課題は、一般相対論を拡張した一般的・汎用的な重力理論に基づいて宇宙論的な未解決問題に挑むと同時に、強重力場を生み出すブラックホールや中性子星の解に対して重力理論の拡張が与える影響を明らかにし、宇宙論の大スケールとコンパクト天体のような小スケールという二つの全く異なる領域において重力理論の検証を行い、拡張重力理論の有効性を検証することを目的としている。本研究課題を実施することで得られた研究成果は合計8編の論文として国際的な学術誌より出版された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究課題で得られた成果を特徴付ける学術的意義は、暗黒エネルギーの効果が顕著にあらわれる宇宙論的な大スケールと、ブラックホールや中性子星といった強い重力場をもつコンパクト天体周の小スケールという、異なる二つのスケールから多角的に拡張重力理論の検証を行った点にある。また、一般性を保った理論に基づいて解析を行い、現存する様々な理論模型に対する統一的な検証のための枠組みを提供することで、宇宙論的なスケールにおいては勿論、今後激化する重力波観測を通じた強重力場における重力理論の検証においても土台を成す重要な成果となりうる点で意義深い。

研究成果の概要（英文）：This research project aims to tackle unresolved cosmological problems based on modified gravitational theories that extends general relativity, and at the same time to study the nature of black holes and neutron stars that possess strong gravitational fields, and to test the gravitational theories in the two completely different scales: the cosmologically large scale and the small scale of compact objects. The results obtained by carrying out this research project were summarized in the eight papers published in international journals.

研究分野：宇宙論，宇宙物理学，重力理論

キーワード：暗黒エネルギー ブラックホール 中性子星 重力波 修正重力理論

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た。この宇宙後期加速膨張という未知の現象の源は暗黒エネルギーと名付けられ、最新の宇宙背景放射(CMB)の観測によると現在の宇宙の組成比のうち約70%はこの暗黒エネルギーによって占められている。残りのうち約25%は宇宙の大規模構造形成の主要因である暗黒物質が占めており、我々のよく知るバリオンは全体の約5%を占めているにすぎない。暗黒エネルギーと暗黒物質という現在の宇宙の大半を占める二つの暗黒成分の存在を一般相対論と素粒子の標準模型の枠組みで説明することは困難であり、これらの理論を拡張してその起源を探ろうという試みが行なわれている。特に、スカラーやベクトルの新たな自由度を導入することで一般相対論を拡張した重力理論(拡張重力理論)は、宇宙初期に起こったとされるもう一つの加速膨張(インフレーション)を観測結果と無矛盾に説明可能なモデルを有する。インフレーションとよく似た現象である宇宙後期加速膨張も、同様に拡張重力理論によって説明できる可能性があり世界中で活発に研究されている。また近年、宇宙の密度揺らぎの振幅とハッブルパラメータの観測値が高赤方偏移領域と低赤方偏移領域とで食い違うという二つの不一致問題が指摘されていた。この問題を解決するために、活動銀河核からのフィードバックやニュートリノの質量の影響等が議論されていたが、前者は天体物理プロセスのモデル依存性の問題があり、後者は現在知られている三種類のニュートリノのみでは不一致の解決が難しいことが分かっていた。一方で、暗黒物質の一部が減衰するような場合には、これらの問題を統合的に説明できる可能性がBerezhianiらによって示唆されていた(Z. Berezhiani, A. D. Dolgov and I. I. Tkachev, Phys. Rev. D92 (2015) no.6, 061303)。

他方、相対論の提唱から100年を経た近年の目覚ましい観測技術の発展によって重力波の直接検出が2015年に初めて成功し、ついに重力波を通じた重力理論の検証・探求の時代が到来した。特に2017年に観測された連星中性子星の合体イベントでは、合体時の重力波(GW170817)とガンマ線がともに観測されており、ここから重力波の伝搬速度が光速に非常に近いことが示された。この結果は宇宙論の研究においても非常に重要な意味を持つ。拡張重力理論に基づく宇宙論モデルには光速と大きく異なる重力波の伝搬速度を预言するモデルが存在するが、これらはGW170817の制限により棄却される。今後、重力波を通じた重力理論の検証はより激化していくことが予想されていた。

2. 研究の目的

後期加速膨張の発見から20年、その間の観測技術の飛躍的な発展により暗黒エネルギーの性質は徐々に解き明かされてきたが、その起源に関しては未だ謎のままである。これに加えて近年の観測から、宇宙の密度揺らぎの振幅とハッブルパラメータの不一致問題が提示された。これらの問題は潜在的に一般相対論と素粒子の標準模型の枠組みを超えた新たな物理の必要性を示唆している可能性があり、その解決は今世紀の物理学の最難関かつ最重要な課題の一つと言えるだろう。本研究の目的は、一般相対論を内包する一般的な拡張重力理論に基づいてこれらの未解決問題に挑むと同時に強重力場を生み出すブラックホールや中性子星の解に対して重力理論の拡張が与える影響を明らかにし、宇宙論の大スケールとコンパクト天体のような小スケールという二つの異なる領域において検証を行うことにより拡張重力理論の有効性を精査することである。

3. 研究の方法

上記の目的を包括的かつ効率的に実行するため、素粒子物理学の標準模型に限らず一般的なスカラー場やベクトル場が重力場と結合した拡張重力理論に基づき研究を実施する。拡張重力理論には、スカラー場と重力場が結合したスカラー・テンソル理論や、ベクトル場と重力場が結合したスカラー・テンソル理論、更にはスカラー場とベクトル場の双方が重力場と結合したスカラー・ベクトル・テンソル理論(SVT理論)が存在する。特にSVT理論は、一般相対論は勿論のこと、現在までに宇宙論研究で幅広く用いられてきたスカラー・テンソル理論やベクトル・テンソル理論といった拡張重力理論を部分集合として含む非常に一般的な枠組みである。更に本研究では上記の理論の作用に加えて完全流体の作用を考え、完全流体の数密度や四元速度とスカラー場やベクトル場及びその微分から構成される相互作用項を新たに導入することで暗黒エネルギーと暗黒物質の相互作用を考慮に入れた一般化を行う。暗黒エネルギーと暗黒物質のエネルギー密度は現在同程度であり、これら二つの暗黒成分の間の相互作用が自然と考えられる。この相互作用を介して暗黒物質が部分的に暗黒エネルギーへと変換されれば、Berezhianiらが生じた暗黒物質の部分減衰による不一致問題解決を作用レベルで理論的に実現可能である。更に、二つの暗黒成分が比例しながら減衰していく宇宙論解(スケーリング解)を実現可能であり、偶然性問題の解決可能性にも繋がる可能性がある。また、暗黒エネルギーの効果が顕著にあら

らわれる宇宙論的な大スケールにおいて拡張重力理論の有効性を精査するだけでなく、ブラックホールや中性子星といった強い重力場をもつコンパクト天体周りでも拡張重力理論を検証する点にある。特に、現実的な中性子星の状態方程式を用いた解を拡張重力理論に基づいて構築する際には、原点と無限遠での境界条件を同時に満たす数値解を見つけるという技術的な困難さがあり、多くの先行研究では単純化された理論模型で解析が行われてきた。本研究では宇宙論的なスケールで観測と整合的であるようなより現実的な理論模型を用いてブラックホール解と中性子星解の構築を行い、強重力場において拡張重力理論の有効性を検証するという点で創造的であり、今後激化する重力波観測を通じた強重力場における重力理論の検証において土台を成す重要な成果となりうる。

4. 研究成果

本研究課題において得られた研究成果は8編の論文としてまとめた。以下ではそのうち、主要な成果について説明を行う。

(1) 暗黒物質と暗黒エネルギーが相互作用する理論に関するゲージに依存しない宇宙論的摂動論の解析手法の確立

近年、宇宙の密度揺らぎの振幅とハッブルパラメータという二つの独立した観測量に関して、その観測値が高赤方偏移領域と低赤方偏移領域とで食い違うという二つの不一致問題が指摘されている。このうち、前者の不一致問題に関しては暗黒エネルギーと暗黒物質の相互作用、特に運動量輸送型の相互作用項を導入することで緩和可能である。本研究では、このような相互作用を一般的なラグランジアンとして拡張重力理論に組み込み、ゲージに依存しない方法で理論の安定性の条件、及び可換測量の時間発展を理論的に計算する上で必要となる摂動方程式の導出を行った。これらの安定性条件や摂動方程式は様々な理論模型に適用することが可能である非常に一般的な枠組みであり、宇宙論的に真に有効な理論模型を選別する上での強力なツールとなる。

(2) 拡張重力理論における中性子星解の一般的な摂動論の枠組みの構築

(1)の研究は宇宙論的な大スケールにおける研究であったことに対し、こちらの研究ではコンパクト天体のような小スケールにおける拡張重力理論模型の摂動論の枠組みとして一般的な拡張重力理論と完全流体の作用を静的球対称時空周りで二次まで展開し、摂動方程式と理論の安定性の条件を導いた。2015年に初めて直接検出され現も活発に観測されている重力波は重力理論を検証していく上で非常に重要な要素となっている。現在観測されている重力波は主にブラックホールや中性子星といったコンパクト天体の連星から放たれる重力波だが、拡張重力理論における中性子星解の安定性を一般的に精査するための枠組みはこれまで存在しなかったことから、本研究における成果は観測データとの照合する上で、理論的に不整合な模型を事前にスクリーニングするための画期的かつ強力な枠組みを提供する。更に、ここで求めた摂動方程式は、中性子星の潮汐変形率のような重力波の波形に影響を与える効果の見積もりにも応用することが可能であり、今後の発展性に富んだ結果であると言える。

(3) 拡張重力理論に基づく電荷を持ったブラックホール解の一般的な摂動論の枠組みの構築

(2)の研究と同様に、拡張重力理論に基づくコンパクト天体に焦点をあてた研究であるが、対象は中性子星ではなくブラックホールであるという大きな違いがある。本研究ではスカラー自由度を導入した一般的な重力理論である Horndeski 理論に、スカラー自由度と電磁場(ベクトル自由度)との相互作用のうち最も単純なものを取り入れることで構築された Horndeski -Maxwell 理論に基づき、ブラックホール解の安定性を解析するための一般的な枠組みの構築を行なった。一般相対論の枠組みにおいて定常的なブラックホール解には無毛定理が成立するため、多くの場合はスカラー自由度を付け加えても自明な解のみしか許されないことが先行研究から分かっている。すなわち、定常的なブラックホール解においては重力理論を拡張した影響が大半の場合は消えてしまうため、一般相対論との区別がつかない。しかし、Einstein-Maxwell 理論において電荷を持つブラックホールを考え、更にベクトル場とスカラー場の相互作用項を導入した場合、スカラー場は非自明なベクトル場によって励起された非自明な解を持ちうる。先行研究によって示されている。研究代表者はスカラー・テンソル理論として高い一般性を持つ Horndeski 理論に電磁場としてのベクトル場を導入した Horndeski -Maxwell 理論に基づき、ブラックホール摂動の統一的な解析手法を確立した。本研究の成果を用いれば、このような理論に基づく電荷を持った様々なブラックホール解の安定性を統一的に試験することが可能となる。そのため、(2)と同様、本研究における成果は理論模型と観測データとの照合を行う上で、理論的に不整合なブラックホール解を持つ理論を事前にスクリーニングするための強力なツールとなる。また、中性子星の場合と同様にここで求めた摂動方程式は、例えばブラックホール連星が合体した後に定常状態に落ち着くまでの間に放出する重力波の準固有振動といった、重力波に関連する現象の記述に用いることが可能であり、発展性に富んだ結果であると言える。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Arai Shun et al.	4. 巻 2023
2. 論文標題 Cosmological gravity probes: Connecting recent theoretical developments to forthcoming observations	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptad052	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Kase Ryotaro, Tsujikawa Shinji	4. 巻 107
2. 論文標題 Black hole perturbations in Maxwell-Horndeski theories	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.107.104045	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 Dohi Akira, Kase Ryotaro, Kimura Rampei, Yamamoto Kazuhiro, Hashimoto Masa-aki	4. 巻 2021
2. 論文標題 Neutron star cooling in modified gravity theories	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 1-32
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptab099	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 Kase Ryotaro, Tsujikawa Shinji	4. 巻 105
2. 論文標題 Relativistic star perturbations in Horndeski theories with a gauge-ready formulation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 1-29
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.105.024059	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 Kase Ryotaro, Minamitsuji Masato, Tsujikawa Shinji	4. 巻 102
2. 論文標題 Neutron stars with a generalized Proca hair and spontaneous vectorization	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 1-17
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.102.024067	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 Kase Ryotaro, Kimura Rampei, Sato Seiga, Tsujikawa Shinji	4. 巻 102
2. 論文標題 Stability of relativistic stars with scalar hairs	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 1-23
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.102.084037	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 Kase Ryotaro, Tsujikawa Shinji	4. 巻 2020
2. 論文標題 General formulation of cosmological perturbations in scalar-tensor dark energy coupled to dark matter	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 1-34
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1475-7516/2020/11/032	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 Kase Ryotaro, Tsujikawa Shinji	4. 巻 2021
2. 論文標題 Instability of compact stars with a nonminimal scalar-derivative coupling	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 1-23
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1475-7516/2021/01/008	査読の有無 無
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 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 谷口喜太郎, 加瀬竜太郎
2. 発表標題 物質場と直接結合したスカラー・テンソル理論におけるヴァインシュタイン機構
3. 学会等名 日本物理学会 第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Ryotaro Kase
2. 発表標題 Weak cosmic growth in coupled dark energy with a Lagrangian formulation
3. 学会等名 7th Korea-Japan Workshop on Dark Energy
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

東京理科大学 教員紹介 https://www.tus.ac.jp/academics/teacher/p/index.php?6bb5 宇宙物理学研究室(加瀬研究室)website https://www.rs.tus.ac.jp/r.kase/

6. 研究組織			
<table border="1"><thead><tr><th>氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)</th><th>所属研究機関・部局・職 (機関番号)</th><th>備考</th></tr></thead></table>	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
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0件

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			
ポルトガル	リスボン大学			
米国	プリンストン高等研究所	アリゾナ大学		
中国	華中師範大学	中国石油大学		
その他の国・地域	中央研究院天文及天文物理研究所（台湾）			
韓国	基礎科学研究院			