

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 6 月 25 日現在

機関番号：32660

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2020

課題番号：17K14297

研究課題名(和文)ベクトル・テンソル型修正重力理論に基づく暗黒エネルギーモデルの構築と観測的な選別

研究課題名(英文)Construction of dark energy model based on vector-tensor theories

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・講師

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)：本研究課題ではベクトル場と重力場(テンソル場)が結合したベクトル・テンソル理論に基づいた暗黒エネルギーモデルの構築と選別を主眼とした研究を行った。宇宙論的な大スケールだけではなく、近年発展が目覚ましい重力波観測と深く関連するブラックホールや中性子星といった小スケールの局所天体にも注目し、研究期間である2017年4月から2021年3月までの間に合計26編の原著論文と1編の総説論文を出版した。またこれらの成果を発信することを目的として、国際会議における4件の招待講演、及び学会における3件の研究発表を行い、更に二度の研究会の主催を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

宇宙の加速膨張という未知の現象の発見から約20年が経過したが、この源である暗黒エネルギーに関して現存する全ての観測データと整合性のある理論モデルは依然見つかっていない。修正重力理論に基づく暗黒エネルギーモデルに関しては、これまでスカラー場を導入した理論が多く研究されてきたが、本研究ではベクトル場を導入した理論に着目して研究を行い、ベクトル場が宇宙論的なダイナミクスやブラックホール、中性子星に与える固有の影響を包括的に明らかにした。これらの研究成果は将来の高精度な観測結果を用いた両理論の観測的区別を可能にしており、今世紀の物理学最大の課題の一つである暗黒エネルギーの起源解明に一歩近づいたと言える。

研究成果の概要(英文)：In this research project, we focused on the construction of dark energy model based on vector-tensor theories in which a vector field and a gravitational field (tensor field) are directly coupled. We focused not only on the large scale associated with cosmology but also on small scale local objects such as black holes and neutron stars, which are closely related to gravitational wave observations showing the remarkable development in recent years. As a result, in the research period is from April 2017 to March 2021, a total of 26 original papers and 1 review paper have been published. In addition, for the purpose of disseminating these results, we gave four invited talk at international conferences, three research presentations at academic conferences, and hosted two research meetings.

研究分野：宇宙物理学・重力理論

キーワード：暗黒エネルギー 修正重力理論 ブラックホール 中性子星 インフレーション

1. 研究開始当初の背景

1998年、Ia型超新星の観測により現在の宇宙は加速膨張していることが発見され、2011年度にはこの業績に対しノーベル物理学賞が与えられた。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、最新の観測では暗黒エネルギーが現在の宇宙のおよそ7割を占めることが分かっている。一方で、暗黒エネルギーの起源に関しては未だ明らかになっておらず、その解明は今世紀の物理学における最難関かつ最重要な課題の一つと言える。暗黒エネルギーの最も単純な候補は一般相対論に宇宙項を取り入れた宇宙項モデルである。しかし、Planck衛星とIa型超新星の最新の観測データの複合解析結果は、このモデルよりも寧ろ一般相対論を含むように重力理論を一般化した拡張重力理論に基づいて大スケールでの重力法則を変更したシナリオを好むと考えられる兆候を示していた。重力理論の拡張は、例えば超弦理論の低エネルギー有効作用から自然と現れるため、理論的な動機付けが存在する。また、一般相対論の枠組みではバリオンのような通常物質を用いて宇宙の後期加速膨張を説明できないことから、拡張重力理論は世界中で活発に研究されており、拡張重力理論に基づいた大・小スケール両方で観測と整合性のあるモデルの構築は理論的な観点からも非常に重要となる。研究開始当初、拡張重力理論に関する研究は主に重力理論に新たな自由度としてスカラー場を導入したスカラー・テンソル理論を用いて行われていた。しかし、スカラー・テンソル理論では理論の安定性を加味すると実効的な重力結合が一般相対論よりも強くなる傾向にあり、密度ゆらぎの成長率に関する観測結果を説明することが難しい。一方で、研究開始当初に徐々に注目され始めていたベクトル・テンソル理論の場合は状況が異なる。ベクトル・テンソル理論は重力理論に新たな自由度としてベクトル場を導入した理論であり、ベクトル固有モードが存在するためにスカラー・テンソル理論とは異なる振る舞いを示すことが分かっている。このベクトル固有モードの存在により、観測結果と整合的な理論モデルの構築が期待される。

他方、一般相対論が確立してからおよそ100年が経過した2015年、一般相対論が予言していた重力波が初めて直接検出され、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。現在の重力波観測における主要な重力波源はブラックホールや中性子星から成る連星系であり、重力波を介して重力理論を検証する上では拡張重力理論におけるブラックホール・中性子星が一般相対論と比較してどのように異なるのかを定量的に明らかにする必要がある。

2. 研究の目的

本研究は、一般相対論を拡張した拡張重力理論、その中でも特にベクトル・テンソル理論に着目し、宇宙背景輻射をはじめとした最新の観測結果と整合性のある暗黒エネルギーモデルの選別と構築を目的とする。この目的を達成するため、理論/観測、大スケール/小スケール、解析計算/数値計算といった多角的な視点から研究を行うことにより、真に有効なモデルの選別と構築を通して暗黒エネルギーの起源に迫る。本研究を実行する上で重要となるのは、以下の四点である：

- (1) 小スケールにおけるベクトル場の振る舞いを明らかにし、太陽系における局所重力実験との整合性を精査すること。
- (2) 拡張重力理論の枠組みで大スケールにおける弱重力がどの程度まで実現可能であり、観測結果をどの程度説明できるのかを明確にすること。
- (3) 大スケールにおいて弱重力を示し、かつ小スケールで局所重力実験の結果と整合的な暗黒エネルギーモデルに関して、最新の観測データから得られる理論モデルへの制限を明らかにすること。
- (4) 将来の高精度な重力波の観測データを用いて重力理論の検証を実行するための準備として、拡張重力理論におけるブラックホール解、中性子星解を解析的・数値的に導出し、観測量に重力理論の拡張が与える影響を調査すること。

今後の観測技術の向上により暗黒エネルギーモデルの選別は更に進んでいく。実際に大スケールでの暗黒エネルギーの観測に関しては、欧州のEuclidをはじめとした次世代の観測プロジェクトが計画されている。更には小スケールに関わる観測として、2016年2月にアメリカの重力波望遠鏡LIGOが前年の2015年9月にブラックホール連星系からの重力波の初の直接検出に成功したことが発表された。これにより、重力波観測による拡張重力理論の選別が今後非常に重要になっていくことが予想される。以上のことから、拡張重力理論に基づいた大・小スケール両方で観測と整合性のあるモデルの構築は理論的・観測的な双方の観点から喫緊の課題であると言える。

3. 研究の方法

本研究では、包括的・効率的に解析を行うため、ベクトル・テンソル理論に属する多くの模型を内包する一般化プロカ理論、及びその拡張理論を主に用いて研究を行う。このような理論を用いることにより、模型に依存せず一般的に解析を行うことが可能となる。下図に示すように、一般化プロカ理論、及びその拡張理論は、スカラー極限を取った際に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、及びこれに高階微分を含められる形で拡張した GLPV 理論に帰着する。そのため、先行研究により良く知られているホルンデスキ理論 / GLPV 理論のスカラー場からベクトル場への自然な拡張となっているが、一方でプロカ理論 / その拡張理論にはベクトルモード固有の自由度が存在するため、スカラー・テンソル理論とは異なるベクトルモード固有の振る舞いを示す。

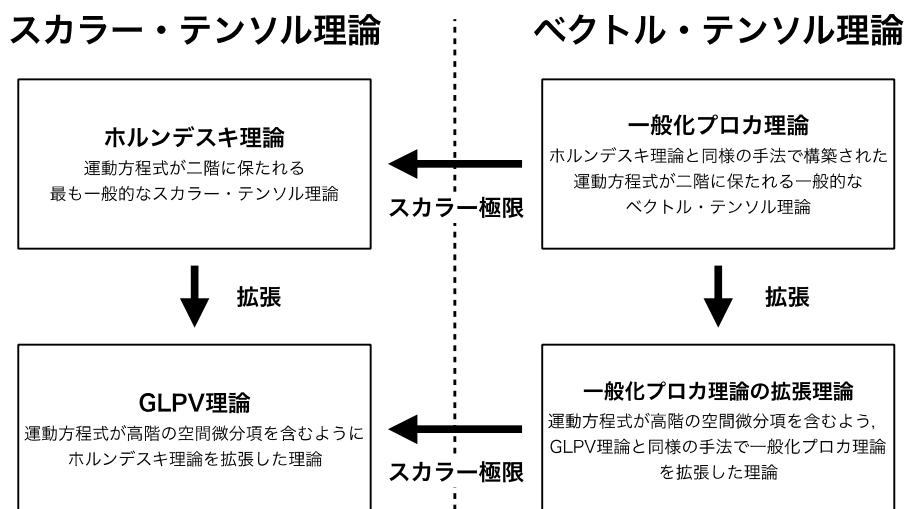


図. ホルンデスキ理論と一般化プロカ理論の対応関係

まず、研究の目的において説明した(1)の点に関して、一般化プロカ理論は五つのラグランジアンによって構成されており、先行研究において研究代表者はその内三つのラグランジアンが存在する場合に、太陽系のような局所領域ではヴァインシュタイン機構と呼ばれる重力理論の拡張の効果を遮蔽する機構が正常に働くことで局所重力実験の結果と整合的であることを明らかにした。よって次のステップとして、残り二つのラグランジアンが局所領域においてどのように振る舞うのかを精査し、局所重力実験の結果を満たすための一般的な条件を求めて模型の選別を行う。次に、研究目的(2)に関して、研究代表者は先行研究において、一般化プロカ理論を用いて弱重力が実現可能であることを示したが、強い弱重力の実現は難しい上にパラメータの調整が必要となる。そこで一般化プロカ理論の拡張理論に的を絞り、この拡張理論の枠内でパラメータを調整することなく弱重力が実現可能な模型の構築を目指す。スカラー・テンソル理論の場合、ホルンデスキ理論の枠内では一般的に弱重力の実現が難しいが、その拡張理論である GLPV 理論には弱重力を実現しうる模型が存在する。しかし、そのような模型は球対称時空の原点で曲率が発散する不安定性が存在することが研究代表者の先行研究から分かっている。一方、ベクトル・テンソル理論の場合、GLPV 理論と同様の手法で一般化プロカ理論を拡張した理論では、ベクトルモード固有の自由度の存在により GLPV 理論の時に現れた不安定性を回避することができるため、理論的な不安定性なしに弱重力を促進することが可能であると考えられる。この拡張理論を用いて密度揺らぎの解析を行い、ベクトル・テンソル理論が大スケールでどの程度パラメータの調整なしに弱重力を実現可能なかを明らかにする。研究目的(3)に関しては、上記(1)、(2)と関連して、ベクトル・テンソル理論に基づいた理論模型について最新の観測データを用い、大規模数値計算コードを利用して複合解析を行うことで様々な観測結果と整合的な模型を選別していく。研究目的(4)に関しては、最初のステップとして一般化プロカ理論を用いて静的球対称な時空におけるブラックホール・中性子星に関する解析解、及び数値解を導く。また、摂動論に基づきこれらの解の安定性を議論する。

4. 研究成果

本研究では研究期間である 2017 年 4 月から 2021 年 3 月までの間に合計 26 編の原著論文と 1 編の総説論文を出版した。またこれらの成果を発信することを目的として、国際会議における 4 件の招待講演、及び学会における 3 件の研究発表を行い、更に二度の研究会の主催を行った。以下に研究成果の詳細を述べる。まず研究目的(1)に関して、物質場とベクトル場の結合が存在する場合に、一般化プロカ理論のラグランジアンに存在するベクトル場の非線形相互作用項が小スケールで大きな寄与を及ぼす場合に重力理論の拡張を遮蔽するヴァインシュタイン機構が

正常に働くことを明らかにし、更に重力ポテンシャルの補正項を評価することで局所重力実験を満たすために理論モデルのパラメータに課せられる条件を導出した。また、一般化プロカ理論の一部のサブクラスは星の外側で正則な解が存在せず非整合的であることを明らかにした。研究目的(2)に関しては、一般化プロカ理論の拡張理論において、拡張に相当する項が現在付近で最大値を取り、この効果によって一般化プロカ理論と比較して大きな弱重力が実現できることを解析的・数値的に明らかにした。この弱重力は比較的広い理論モデルのパラメータスペースで実現することが可能であり、この点においても一般化プロカ理論とは異なる振る舞いである。また、密度ゆらぎの成長率に関する観測データとの比較を行い、近年指摘されている不一致問題を解決しうることを示した。研究目的(3)に関しては、CMB や Ia 型超新星などの複数の独立な観測データに加え、宇宙の晴れ上がりから現在までの重力ポテンシャルの時間変化に起因する宇宙背景放射のパワースペクトルのピーク位置変化である積分ザックス-ヴォルフェ (ISW) 効果と銀河の個数密度分布の相関に関する観測結果を含めた統合解析を行い、宇宙論における標準的なモデルである宇宙項モデルと比較して一般化プロカ理論に基づいた理論モデルは統計的に有意であることを示した。研究目的(4)に関して、ブラックホールについて一般相対論では質量、電荷、角運動量以外の情報は消失するという無毛定理が成り立つ。この無毛定理はスカラー・テンソル理論についても多くの場合に成立し、スカラー場は非自明な解を持つことができない。一方、ベクトル・テンソル理論においてはその限りでない。研究代表者は一般化プロカ理論に基づき、ベクトル場が非自明な解を持つ、すなわち無毛定理を破る解を解析的・数値的に多数発見した。更に、ブラックホール摂動論を用いて奇パリティ摂動に関する二次の作用を導き、上記の様々な解の安定性を精査した。これと並行して、一般化プロカ理論における中性子星解や自発的ベクトル化に関する研究を行い、一般相対論における中性子星解との相違点を明らかにした。また、上記の研究以外にも、スカラー・テンソル理論において暗黒物質とスカラー場が結合した場合の宇宙論シナリオに関する研究、新たな中性子星解の構築、中性子星の摂動論等に関する研究等を遂行した。これらの成果は、宇宙論的な大スケールにおける将来の観測や、コンパクト天体のような小スケールに関する今後の観測によって得られる高精度のデータを用いて重力理論を検証する上で欠かせないものとなる。

以上の研究成果は、論文として発表するとともに、国内外の会議において広く発信している。また、これらの論文は 2021 年 6 月現在の時点ですでに約 500 回引用されており、強いインパクトと重要性を持って認識されていることが推察される。今後の展望としては、密度ゆらぎの成長率以外のもう一つの不一致問題であるハッブル定数の不一致問題を同時に解決しうる暗黒エネルギーモデルの構築と、その観測的な制限を明らかにすること。そしてブラックホールや中性子星の摂動論を発展させ拡張重力理論における重力波と関連した可観測量の一般的な定式化を行い、観測結果と比較することで重力理論の検証を推進していくこと等が挙げられる。今回の研究で得られた結果を土台として前進することでこれらの課題に取り組み、暗黒エネルギーの起源の解明に挑戦していく。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計27件（うち査読付論文 27件／うち国際共著 13件／うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Beltran Almeida Juan P., Guarnizo Alejandro, Kase Ryotaro, Tsujikawa Shinji, Valenzuela-Toledo Cesar A.	4. 巻 793
2. 論文標題 Anisotropic 2-form dark energy	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 396 ~ 404
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2019.05.008	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 2019
2. 論文標題 Neutron stars in $f(R)$ gravity and scalar-tensor theories	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 054 ~ 054
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1475-7516/2019/09/054	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 Nakamura Shintaro, Kase Ryotaro, Tsujikawa Shinji	4. 巻 2019
2. 論文標題 Coupled vector dark energy	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 032 ~ 032
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1475-7516/2019/12/032	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 101
2. 論文標題 Scalar-field dark energy nonminimally and kinetically coupled to dark matter	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 001 ~ 022
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.101.063511	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 804
2. 論文標題 Weak cosmic growth in coupled dark energy with a Lagrangian formulation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 135400 ~ 135400
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2020.135400	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 -

1. 著者名 Kase Ryotaro, Minamitsuji Masato, Tsujikawa Shinji	4. 巻 97
2. 論文標題 Relativistic stars in vector-tensor theories	5. 発行年 2018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.97.084009	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 Kase Ryotaro, Tsujikawa Shinji	4. 巻 97
2. 論文標題 Dark energy scenario consistent with GW170817 in theories beyond Horndeski gravity	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 1-19
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.97.103501	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 Heisenberg Lavinia, Kase Ryotaro, Tsujikawa Shinji	4. 巻 97
2. 論文標題 Odd-parity stability of hairy black holes in U(1) gauge-invariant scalar-vector-tensor theories	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 1-14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.97.124043	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 Kase Ryotaro, Minamitsuji Masato, Tsujikawa Shinji	4. 巻 782
2. 論文標題 Black holes in quartic-order beyond-generalized Proca theories	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 541 ~ 550
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2018.05.078	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, Kimura Rampei, Naruko Atsushi, Yoshida Daisuke	4. 巻 783
2. 論文標題 Stable cosmological solutions in degenerate theory of gravity	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 320 ~ 325
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2018.07.009	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 Heisenberg Lavinia, Kase Ryotaro, Tsujikawa Shinji	4. 巻 98
2. 論文標題 Cosmology in scalar-vector-tensor theories	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 1-15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.98.024038	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 Kase Ryotaro, Tsujikawa Shinji	4. 巻 2018
2. 論文標題 Dark energy in scalar-vector-tensor theories	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 024 ~ 024
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1475-7516/2018/11/024	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 Heisenberg Lavinia, Kase Ryotaro, Tsujikawa Shinji	4. 巻 98
2. 論文標題 Gauge-ready formulation of cosmological perturbations in scalar-vector-tensor theories	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 1-25
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.98.123504	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 Frusciante Noemi, Kase Ryotaro, Nunes Nelson J., Tsujikawa Shinji	4. 巻 98
2. 論文標題 Most general cubic-order Horndeski Lagrangian allowing for scaling solutions and the application to dark energy	5. 発行年 2018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.98.123517	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 Almeida Juan P. Beltran, Guarnizo Alejandro, Kase Ryotaro, Tsujikawa Shinji, Valenzuela-Toledo Cesar A.	4. 巻 2019
2. 論文標題 Anisotropic inflation with coupled p-forms	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 025 ~ 025
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1475-7516/2019/03/025	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 Nakamura Shintaro, De Felice Antonio, Kase Ryotaro, Tsujikawa Shinji	4. 巻 99
2. 論文標題 Constraints on massive vector dark energy models from integrated Sachs-Wolfe-galaxy cross-correlations	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 1-18
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.99.063533	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 28
2. 論文標題 Dark energy in Horndeski theories after GW170817: A review	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 International Journal of Modern Physics D	6. 最初と最後の頁 1942005 ~ 1942005
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1142/S0218271819420057	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 Frusciante Noemi, Kase Ryotaro, Koyama Kazuya, Tsujikawa Shinji, Vernieri Daniele	4. 巻 790
2. 論文標題 Tracker and scaling solutions in DHOST theories	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 167 ~ 175
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2019.01.009	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 Nakamura Shintaro, Kase Ryotaro, Tsujikawa Shinji	4. 巻 95
2. 論文標題 Cosmology in beyond-generalized Proca theories	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 1 ~ 22
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.95.104001	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 Heisenberg Lavinia, Kase Ryotaro, Minamitsuji Masato, Tsujikawa Shinji	4. 巻 2017
2. 論文標題 Black holes in vector-tensor theories	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 024 ~ 024
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1475-7516/2017/08/024	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 Heisenberg Lavinia, Kase Ryotaro, Minamitsuji Masato, Tsujikawa Shinji	4. 巻 96
2. 論文標題 Hairy black-hole solutions in generalized Proca theories	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 1 ~ 37
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.96.084049	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 Nakamura Shintaro, Kase Ryotaro, Tsujikawa Shinji	4. 巻 96
2. 論文標題 Suppression of matter couplings with a vector field in generalized Proca theories	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 1 ~ 18
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.96.084005	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, Zhang Ying-li	4. 巻 2018
2. 論文標題 Black hole perturbations in vector-tensor theories: the odd-mode analysis	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 048 ~ 048
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1475-7516/2018/02/048	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 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 008 ~ 008
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 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 032 ~ 032
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, 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, 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 -

〔学会発表〕 計6件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 Ryotaro Kase
2. 発表標題 Neutron stars in $f(R)$ gravity and scalar-tensor theories
3. 学会等名 6th Korea-Japan workshop on dark energy at KMI (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 加瀬竜太郎
2. 発表標題 Weak cosmic growth in coupled dark energy with a Lagrangian formulation
3. 学会等名 日本物理学会 第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中村進太郎
2. 発表標題 Coupled vector dark energy
3. 学会等名 日本物理学会 第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 加瀬竜太郎
2. 発表標題 Gauge-ready formulation of cosmological perturbations in scalar-vector-tensor theories
3. 学会等名 日本物理学会 第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ryotaro Kase
2. 発表標題 Dark energy in vector-tensor theories
3. 学会等名 13th Rencontres du Vietnam -Cosmology 2017 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Ryotaro Kase
2. 発表標題 Cosmology in generalized Proca theories and its extension
3. 学会等名 4th Korea-Japan joint workshop on Dark Energy at KMI (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>東京理科大学 教員プロフィール https://www.tus.ac.jp/fac_grad/p/achievement.php?6bb5 加瀬 竜太郎 論文・著書・学会発表 東京理科大学 https://www.tus.ac.jp/fac_grad/p/achievement.php?6bb5</p>
--

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
---------	---------