

令和 5 年 4 月 30 日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19K03854

研究課題名（和文）多様な観測データによる一般相対論の拡張理論の検証

研究課題名（英文）Probing extend theories of gravity from observations

研究代表者

辻川 信二（TSUJIKAWA, Shinji）

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：30318802

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000 円

研究成果の概要（和文）：ダークエネルギーの起源に迫るために、拡張重力理論やダークマターと結合したモデルを理論的に構築し、それらが予測する観測量を定式化した。さらに、様々な観測データを用いてモデルの有効性を調べ、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選別を行なった。さらに、拡張重力理論においてブラックホールや中性子星の解を精査し、安定な解の絞り込みに成功した。それらの解を重力波の観測から検証するために、連星系合体の前に放出される重力波の波形に対する影響を詳しく調べた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現在の宇宙の大部分を占めるダークエネルギーとダークマターの謎を明らかにしようとする我々の研究で、それらが互いに結合している可能性と標準的な宇宙項モデルが必ずしも観測的に最適なモデルでないことが明らかになってきたが、その成果は今後の研究の発展の上で重要な意義を持つ。さらに、拡張重力理論での安定なブラックホールと中性子星の解を選別し、重力波の観測からその兆候を探るための理論的な枠組みを一般的に与えたことは、今後次々に現れる新たな重力波のデータから強重力場中での物理を探る上で、極めて重要な意味を持つ。

研究成果の概要（英文）：To approach the origin of dark energy, we constructed theoretical models of cosmic acceleration in extended theories of gravity and in theories of interacting dark energy and dark matter. We computed observables predicted in such theories and distinguish between models that are favored over the cosmological constant scenario. We also studied static and spherically symmetric black holes and neutron stars in extended theories of gravity and succeeded to identify solutions without instabilities against linear perturbations. To probe such solutions from the observations of gravitational waves, we computed the gravitational waveform emitted from the inspiral phase of coalescing binaries.

研究分野：宇宙論，重力理論

キーワード：ダークエネルギー ブラックホール 中性子星 重力波 スカラー・テンソル理論 ベクトル・テンソル理論 インフレーション ダークマター

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、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

1992年のCOBE衛星による宇宙背景輻射(CMB)の発見と、2000年代以降のCMBの温度揺らぎの詳細な観測、1998年のIa型超新星の観測による宇宙の後期加速膨張の発見、2015年のブラックホール連星系からの重力波の検出は、精密科学としての宇宙論の発展に大きな貢献をもたらした。CMBの温度揺らぎの観測から、宇宙初期にインフレーションという加速膨張が起こったと考えられており、その起源が不明であることから、理論的にインフレーションモデルを構築し、観測データから最適なモデルを探る研究が行われている。

さらに宇宙背景輻射の観測は、現在の宇宙の全エネルギーのうち約68%が宇宙を加速膨張させる暗黒エネルギー、約27%が宇宙の構造形成の主役を担う暗黒物質、約5%がバリオンであることを示しており、これは宇宙の大規模構造やIa型超新星の観測とも整合的である。暗黒エネルギーは重力に逆らう斥力の存在を、暗黒物質は重力以外の相互作用が極めて小さい特殊な物質の存在を示しており、一般相対論と素粒子の標準理論の枠組みでそれらの事象を自然に説明することが難しい。そのため、これらの理論を拡張して、インフレーションと宇宙の暗黒成分の起源に迫ろうとする研究が世界的に精力的に行われている。

また、強重力天体からの重力波の検出は、強重力場中での物理現象の研究に新たな知見をもたらした。特に、ブラックホールや中性子星を含む連星系から放出される重力波の波形を解析することによって、一般相対論の検証およびそれからのずれの可能性を探ることが可能になってきた。

2. 研究の目的

宇宙初期のインフレーションと宇宙後期の加速膨張を引き起こす暗黒エネルギーの起源は、未だに明らかにされていない。本研究では、これらの根源的な問題を解決するため、素粒子の標準理論の枠組みを超えたスカラー場やベクトル場を考え、それらが重力と結合している一般的な重力理論(スカラー・テンソル理論、ベクトル・テンソル理論)において、その宇宙進化と様々な観測的兆候を明らかにし、CMB、宇宙の大規模構造、Ia型超新星などの多様な観測データから、最適な加速膨張のモデルへと迫る。さらに、ブラックホールや中性子星のような強重力天体周辺でのスカラー場、ベクトル場の振る舞いを詳細に解析し、最新の重力波の観測から、一般相対論からのずれの可能性を探る研究を行う。

3. 研究の方法

本研究の基盤となる一般相対論を拡張した重力理論は、基礎方程式を2階微分までに保つ最も一般的なスカラー・テンソル理論(ホルンデスキ理論)とベクトル・テンソル理論(一般化されたプロカ理論)に基づくものである。これは、今までに提唱されたインフレーションと暗黒エネルギーモデルの多くを内包するのみならず、統一理論の有力候補である超弦理論の低エネルギー有効作用も含んでいる。このような非常に一般的な枠組みにおいて、理論が予測する様々な観測量を評価し、多様な観測データから宇宙初期と後期の加速膨張の機構を統一的に明らかにすることを試みる。特に、(A)宇宙初期、(B)宇宙後期、(C)強重力天体近傍で起こる物理現象に対して理論を適用し、マイクロ、マ

クロ、および中間領域などの異なるスケールで理論の有効性を、様々な観測から検証する。より具体的に大別すると、下記のような内容の研究テーマである。

- (A) 有効なインフレーションモデルの構築と、宇宙背景輻射およびからの制限
- (B) 拡張重力理論の暗黒エネルギーへの応用と、観測からのモデルの性別
- (C) 新たなブラックホール、中性子星の解の構築と、重力波の観測からの検証

これら3つの研究を並行して行うことで、一般相対論の拡張理論を多角的に検証し、様々なスケールで起こる宇宙現象を統一的に説明できる理論の構築を目指す。

4. 研究成果

まずインフレーションに関して、ヒッグス場がスカラー曲率およびガウス・ボンネ項の両方と結合している場合に、CMBの温度揺らぎの観測と整合的で、かつ十分な原始ブラックホールの種を生成するモデルの構築に成功した。さらにこのシナリオでは、全ての暗黒物質の起源となる原始ブラックホールの種を十分に生成することが可能であり、今後の原始重力波の観測からも検証が可能なシナリオである。

暗黒エネルギーに関しては、スカラー場が宇宙の後期加速膨張の起源である場合に、ダークエネルギーとダークマターが結合した理論をラグランジアンレベルで一般的に構築することに成功した。それだけでなく、線形密度揺らぎが従う基礎方程式を一般的に導出し、理論の安定性の条件について明らかにし、宇宙の構造形成に関係するダークマターの有効重力結合を一般的に求めた。さらに、ダークエネルギーがダークマターと結合している具体的な理論的なモデルの構築を行い、宇宙後期にダークマターの揺らぎの成長率を抑制することができることを示した。このモデルでは、標準的な宇宙項モデルで存在する、ハッブル定数および物質揺らぎの振幅の観測的な不一致問題を改善することが予測される。実際に、CMB、Ia型超新星、バリオン音響振動などの観測データを用いた統計解析を行い、これらの不一致問題が緩和されることを示した。我々の解析結果は、ダークエネルギーとダークマターが結合している可能性を示唆しており、これは宇宙の暗黒成分の起源に迫る上で極めて重要な意味を持つ。さらに、ベクトル場がダークエネルギーの起源である場合にも、ダークマターと結合したモデルを構築し、スカラー場との場合についての違いを明らかにした。

ブラックホールと中性子星に関しては、まずスカラー・テンソル理論において、静的・球対称の背景時空において奇パリティと偶パリティの線形摂動に関する一般的な定式化を行い、ゴーストやラプラシアン不安定性が存在しない条件を一般的に明らかにした。さらにホルンデスキ理論において、スカラー毛が存在する安定な静的・球対称ブラックホール解が、スカラー場とガウス・ボンネ項が結合している場合に絞り込まれることを明らかにした。また、スカラー場とガウス・ボンネ項が結合した理論において、星の中心付近でラプラス不安定性が生じないための条件から、結合定数に対して理論的な上限を与えた。これは、重力波の観測から得られている制限のどれよりも強い上限値であり、その意味で価値のあるものである。

また、ブラックホールや中性子星がスカラー毛を持つと、それらの連星系合体前に、テンソル型の重力波以外にスカラー型の重力波の放出も起こる。そのようなスカラー波の放出は、重力波の波形に影響を与えるために、観測からスカラー毛の存在を検証することが可能である。我々は、スカラー・テンソル理論において連星系から放出される重力波の波形を計算し、

ブラックホール・中性子星連星の観測によって、中性子星がスカラー化するときのスカラー毛の大きさに制限を与えられることを示した。

研究期間を通して、現在の宇宙の加速膨張のような大スケールで起こりうる現象の理論的な解明と観測からの制限の研究、そして強重力場中での物理現象の解明の研究を行い、数多くの成果を挙げることができた。これらの成果は、ダークエネルギー、ダークマター、インフレーションの起源の解明、さらには一般相対論を超える理論を構築する上で、今後も有用になることが期待される。

なお、研究期間中に出版された査読付き論文のうち、主な発表論文を以下に挙げる。

1. [S. Tsujikawa](#),
Lunar Laser Ranging constraints on nonminimally coupled dark energy and standard sirens
Physical Review D100, 043510, p1-p19 (2019),
10.1103/PhysRevD.100.043510
2. S. Peirone, G. Benevento, N. Frusciante, [S. Tsujikawa](#),
Cosmological data favor Galileon ghost condensate over Λ CDM
Physical Review D100, 063540, p1-p6 (2019),
10.1103/PhysRevD.100.063540
3. R. Kase, [S. Tsujikawa](#),
Scalar-field dark energy nonminimally and kinetically coupled to dark matter
Physical Review D100, 063511, p1-p22 (2020),
10.1103/PhysRevD.101.063511
4. R. Kase, [S. Tsujikawa](#),
Weak cosmic growth in coupled dark energy with a Lagrangian formulation
Physics Letters B, 804, 135400, p1-p13 (2020),
10.1016/j.physletb.2020.135400
5. R. Kase, M. Minamitsuji, [S. Tsujikawa](#),
Neutron stars with a generalized Proca hair and spontaneous vectorization
Physical Review D102, 024067, p1-p18 (2020),
10.1103/PhysRevD.102.024067
6. L. Amendola, [S. Tsujikawa](#),
Scaling solutions and weak gravity in dark energy with energy and momentum couplings
Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, 06, 020 (2020),
10.1088/1475-7516/2020/06/020
7. A. De Felice, S. Nakamura, [S. Tsujikawa](#),
Suppressed cosmic growth in coupled vector-tensor theories
Physical Review D102, 063531, p1-p24 (2020),
10.1103/PhysRevD.102.063531
8. R. Kase, [S. Tsujikawa](#),
General formulation of cosmological perturbations in scalar-tensor dark energy
coupled to dark matter
Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, 11, 032 (2020),
10.1088/1475-7516/2020/11/032
9. R. Kase, R. Kimura, S. Sato, [S. Tsujikawa](#),
Stability of relativistic stars with scalar hairs
Physical Review D102, 084037, p1-p24 (2020),
10.1103/PhysRevD.102.084037
10. J. B. Jimenez, D. Bettoni, D. Figueruelo, F. Teppa Pania, [S. Tsujikawa](#),
Probing elastic interactions in the dark sector and the role of σ_8

- Physical Review D104, 103503, p1-p20 (2021),
10.1103/PhysRevD.104.103503
11. S. Tsujikawa, C. Zhang, X. Zhao, A. Wang,
Odd-parity stability of black holes in Einstein-aether gravity
Physical Review D104, 064024, p1-p16 (2021),
10.1103/PhysRevD.104.064024
 12. R. Kase, S. Tsujikawa,
Relativistic star perturbations in Horndeski theories with a gauge-ready formulation
Physical Review D105, 024059, p1-p26 (2021),
10.1103/PhysRevD.105.024059
 13. M. Minamitsuji, K. Takahashi, S. Tsujikawa,
Linear stability of black holes in shift-symmetric Horndeski theories with a time-independent scalar field
Physical Review D105, 104001, p1-p17 (2022),
10.1103/PhysRevD.105.104001
 14. M. Minamitsuji, K. Takahashi, S. Tsujikawa,
Linear stability of black holes with static scalar hair in full Horndeski theories: generic instabilities and surviving models
Physical Review D102, 024067, p1-p20 (2022),
10.1103/PhysRevD.106.044003
 15. S. Tsujikawa,
Instability of hairy black holes in regularized 4-dimensional Einstein-Gauss-Bonnet gravity
Physics Letters B, 833, 137329, p1-p9 (2022),
10.1016/j.physletb.2022.137329
 16. M. Minamitsuji, S. Tsujikawa,
Stability of neutron stars in Horndeski theories with Gauss-Bonnet couplings
Physical Review D106, 064008, p1-p20 (2022),
10.1103/PhysRevD.106.064008
 17. M. Minamitsuji, S. Tsujikawa,
Symmetry restoration in the vicinity of neutron stars with a nonminimal coupling
Physics Letters B, 840, 137869, p1-p16 (2023),
10.1016/j.physletb.2023.137869
 18. Y. Higashino, S. Tsujikawa,
Inspirational gravitational waveforms from compact binary systems in Horndeski gravity
Physical Review D107, 044003, p1-p23 (2023),
10.1103/PhysRevD.107.044003
 19. R. Kawaguchi, S. Tsujikawa,
Primordial black holes from Higgs inflation with a Gauss-Bonnet coupling
Physical Review D107, 063508, p1-p18 (2023),
10.1103/PhysRevD.107.063508
 20. S. Tsujikawa,
Cosmological stability in $f(\phi, G)$ gravity
Physics Letters B, 838, 137751, p1-p11 (2023),
10.1016/j.physletb.2023.137751

また、研究期間を通して、合計で12件の口頭発表を行い、研究成果の公表に努めた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計22件（うち査読付論文 21件 / うち国際共著 5件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 TsujiKawa Shinji	4. 巻 103
2. 論文標題 Cosmological perturbations for ultralight axionlike particles in a state of Bose-Einstein condensate	5. 発行年 2021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.103.123533	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 Jose Beltran Jimenez, Dario Bettoni, David Figueruelo, Florencia Anabella Teppa Pannia, Shinji Tsujikawa	4. 巻 104
2. 論文標題 Probing elastic interactions in the dark sector and the role of	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 1-20
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.104.103503	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 Shinji Tsujikawa, Chao Zhang, Xiang Zhao, Anzhong Wang	4. 巻 104
2. 論文標題 Odd-parity stability of black holes in Einstein-aether gravity	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Phys. Rev. D	6. 最初と最後の頁 1-16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.104.064024	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 Ryotaro Kase, Shinji Tsujikawa	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 Phys. Rev. D	6. 最初と最後の頁 1-26
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 Masato Minamitsuji, Shinji Tsujikawa	4. 巻 820
2. 論文標題 Spontaneous scalarization of charged stars	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2021.136509	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 -

1. 著者名 Ryotaro Kase, Shinji Tsujikawa	4. 巻 804, 135400
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 Physic Letters B	6. 最初と最後の頁 1-13
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 Ryotaro Kase, Masato Minamitsuji, Shinji Tsujikawa	4. 巻 102, 024067
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 1-18
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 Luca Amendola, Shinji Tsujikawa	4. 巻 06, 020
2. 論文標題 Scaling solutions and weak gravity in dark energy with energy and momentum couplings	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 1-25
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1475-7516/2020/06/020	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 Antonio De Felice, Shintaro Nakamura, Shinji Tsujikawa	4. 巻 102, 063531
2. 論文標題 Suppressed cosmic growth in coupled vector-tensor theories	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 1-24
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.102.063531	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 Ryotaro Kase, Shinji Tsujikawa	4. 巻 11, 032
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 1-32
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 Ryotaro Kase, Rampei Kimura, Seiga Sato, Shinji Tsujikawa	4. 巻 102, 084037
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 1-24
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 Ryotaro Kase, Shinji Tsujikawa	4. 巻 01, 008
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 1-28
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 Tomohiro Fujita, Kai Murai, Hiromasa Nakatsuka, Shinji Tsujikawa	4. 巻 103, 043509
2. 論文標題 Detection of isotropic cosmic birefringence and its implications for axionlike particles including dark energy	5. 発行年 2021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.103.043509	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 J. Beltran Jimenez, D. Bettoni, D. Figueruelo, F. A. Teppa Pannia, Shinji Tsujikawa	4. 巻 03,085
2. 論文標題 Velocity-dependent interacting dark energy and dark matter with a Lagrangian description of perfect fluids	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 1-30
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1475-7516/2021/03/085	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 Juan P. Beltran Almeida, Alejandro Guarnizo, Ryotaro Kase, Shinji Tsujikawa, Cesar A. Valenzuela-Toledo	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 Shinji Tsujikawa	4. 巻 100, 043510
2. 論文標題 Lunar Laser Ranging constraints on nonminimally coupled dark energy and standard sirens	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.100.043510	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 Simone Peirone, Giampaolo Benevento, Noemi Frusciante, Shinji Tsujikawa	4. 巻 100, 063540
2. 論文標題 Cosmological data favor Galileon ghost condensate over CDM	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.100.063540	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 Simone Peirone, Giampaolo Benevento, Noemi Frusciante, Shinji Tsujikawa	4. 巻 100, 063509
2. 論文標題 Cosmological constraints and phenomenology of a beyond-Horndeski model	5. 発行年 2019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.100.063509	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 Ryotaro Kase, Shinji Tsujikawa	4. 巻 09, 054
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 JCAP	6. 最初と最後の頁 1-28
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 Shintaro Nakamura, Ryotaro Kase, Shinji Tsujikawa	4. 巻 12, 032
2. 論文標題 Coupled vector dark energy	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 JCAP	6. 最初と最後の頁 1-30
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 Ryotaro Kase, Shinji Tsujikawa	4. 巻 101, 063511
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 1-22
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 Ryotaro Kase, Shinji Tsujikawa	4. 巻 804, 135400
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 1-13
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9件（うち招待講演 6件 / うち国際学会 8件）

1. 発表者名 辻川 信二
2. 発表標題 ホルンデスキ理論における相対論的天体の摂動論
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 辻川 信二
2. 発表標題 Stabilities of black hole solutions in vector-tensor theories
3. 学会等名 SUSY2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 辻川 信二
2. 発表標題 Weak gravity in dark energy with energy and momentum couplings
3. 学会等名 Quarks (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shinji Tsujikawa
2. 発表標題 Modified gravity theories with application to cosmology
3. 学会等名 XXI Jorge Andre Swieca School on Particles and Fields (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shinji Tsujikawa
2. 発表標題 Scaling solutions and weak gravity in dark energy with energy and momentum couplings
3. 学会等名 J-PAS meeting (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Shinji Tsujikawa
2. 発表標題 Dark energy
3. 学会等名 The 5th Tah Poe School on Cosmology (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shinji Tsujikawa
2. 発表標題 Dark energy in scalar-tensor versus vector-tensor theories
3. 学会等名 CCNU-cfa@USTC Junior Cosmology Symposium (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shinji Tsujikawa
2. 発表標題 Introduction to Scalar-Tensor Theories
3. 学会等名 Tenth Aegean Summer School (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shinji Tsujikawa
2. 発表標題 Activities of A03 group
3. 学会等名 Cosmic acceleration (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 辻川 信二	4. 発行年 2022年
2. 出版社 講談社	5. 総ページ数 264
3. 書名 入門 現代の宇宙論 インフレーションから暗黒エネルギーまで	

〔産業財産権〕

〔その他〕

<http://www.f.waseda.jp/tsujikawa/template/publications.html>

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