

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 9 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2011～2015

課題番号：23540296

研究課題名(和文) 拡張された重力理論に基づく宇宙の歴史を再現するモデルの構築

研究課題名(英文) Construction of Models reproducing History of Universe based on Modified Gravity Theories

研究代表者

野尻 伸一 (Nojiri, Shin'ichi)

名古屋大学・理学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：00432229

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：F(R)、ガリレオン模型、重力子が質量を持つ模型、スピン2の場が重力と相互作用する模型、ドメインウォール模型、ボルン=インフェルト重力、マイメティック模型やユニモジュラー重力など様々な修正重力理論とその拡張を考え、宇宙の発展を記述するモデルの構築、また、その検証可能性、理論としての矛盾のなさ等について詳しく調べ、モデルに対する制限等を与えた。その結果、ある程度拡張されたモデルを考え、更にパラメーター等に制限を課すと、ほとんどのモデルで宇宙の膨張の歴史を再現することが分かった。ただし、モデルとしての不自然さを完全に解消するモデルはなく、また、量子論的な整合性がそのままでは不十分なモデルが多いことも分かった。

研究成果の概要(英文)：I have investigated many kinds of modified gravity theories, that is, F(R) gravity, Galileon models, massive gravity, bi-gravity, domain wall model, Born-Infeld gravity, mimetic model, unimodular gravity, etc. I have extended them so that the models could describe the evolution of the universe, and found constraints on the models. Then I found that most of the model can reproduce the evolution of the universe if we give some constraints on the parameters of the models. We should note, however, that there is no model which could be completely natural. Furthermore I have also found that it could be difficult to satisfy the consistencies as a quantum theory.

研究分野：素粒子的宇宙論

キーワード：暗黒エネルギー 修正重力理論 インフレーション

## 1. 研究開始当初の背景

この研究開始当初、宇宙の精密観測の飛躍的發展により、宇宙の歴史の中で二つの加速膨張の時期、すなわち、宇宙初期のインフレーションおよび約 50 億年前から始まった現在の宇宙の加速膨張の存在が明らかになっていった。この加速膨張は、宇宙に満ちる未知のエネルギーである暗黒エネルギーの存在を示唆している。また、銀河の回転曲線、宇宙背景輻射や重力レンズの観測から暗黒物質の存在が推測される。現在の素粒子理論や重力理論では、このインフレーション、暗黒エネルギー、及び暗黒物質を説明することは困難であり、今世紀の物理学における大問題となっていた。

この問題の解決を目指し、アインシュタインの重力理論を拡張した多種多様な模型が提案され、多様なアイデアが展開されていた。これらの模型のほぼすべてで、宇宙の膨張の歴史が再現できることが示されていたが、これらの模型の中には、重力のニュートン法則からのずれがあり、それによって観測や実験からすぐに棄却されるものも多かった。この研究開始当初には既に、このずれを矛盾がない程度に小さくするいわゆるカメレオン機構やバインシュタイン機構についての研究が進んでおり、実験や観測と矛盾のない模型の構築が可能になっていた。

しかし、粒子の生成をもたらすインフレーション後の「再加熱」の現象や、現在の宇宙の大規模構造をもたらす物質の揺らぎの成長等の問題は、拡張された重力理論の枠組みの中では、十分な説明がされていなかったことや、インフレーション、暗黒エネルギー、及び暗黒物質の問題を統一的に解決する模型も確立されてはいなかった。

一方、研究開始当初はプランク衛星が打ち上げられた直後であり、宇宙背景輻射の揺らぎの観測データから宇宙初期について様々な手掛かりが得られることが期待された。宇宙背景輻射については BICEP2 や Keck Array 等の地上観測からのデータも期待された。また、暗黒物質についても XMASS 等による直接探索や LHC による直接観測の期待があった。

## 2. 研究の目的

本研究ではこれらの拡張された重力理論に基づき、様々な観測や実験と矛盾がないとともに、宇宙の発展の歴史をほぼ完全に再現する模型が存在するかを系統的に調べるとともに、頭にそのような模型の構築を行うことを主な目的としていた。また、そのような模型の実験・観測による検証の可能性を検討するとともに、これらの模型の弦理論等の素粒子模型からの起源を明らかにしてゆくことが目的であった。

## 3. 研究の方法

宇宙膨張の歴史自体はほぼすべての拡張された重力理論で再現できることが分かっており、また、どうすれば重力のニュートン法則と矛盾がないような模型を構成することができるかということもかなり明らかになっていた。そのため、宇宙の歴史をほぼ完全に再現するためには、粒子の生成をもたらすインフレーション後の「再加熱」の現象や現在の宇宙の大規模構造をもたらす物質の揺らぎの成長等の機構を明らかにする必要がある。これらが宇宙膨張の歴史の再現と矛盾なく実現できるかを、必要に応じ計算機も使い、海外の研究者や学生と議論を重ねながら考察し、このようにして構築した模型について、今後の実験や観測の計画を考慮しながら、その検証の手段を検討するとともに、超弦理論などの素粒子模型との関係を明らかにして行こうとした。

## 4. 研究成果

この研究の目的は主に次の3つであった。

1. 宇宙初期のインフレーション、約 50 億年前から始まった宇宙の加速膨張や暗黒物質を説明する模型が存在するかを系統的に調べるとともに、頭にそのような模型の構築を行う。

2. そのような模型が、現在の宇宙の大規模構造をもたらす物質の揺らぎの成長等を様々な観測や実験と矛盾がなく説明できるか確かめるとともに、これらの模型のするとともに、系統的に調べるとともに、実験・観測による検証の可能性を検討する。

3. 超弦理論に基づく重力理論的立場と、より現象論的な素粒子論の立場の両方から、模型の考察を行い、宇宙論から素粒子論へ明確なフィードバックを与える。

1. については研究開始当初から計画していたインフラトンと似たようなスカラー場を導入した、k-エッセンスと呼ばれる模型、ガリレオンと呼ばれる模型、また、アインシュタイン重力を拡張した  $F(R)$  重力理論の研究を行ない、十分現実的な模型を構築できることをしめすことができた。また、研究開始後に盛んに研究されるようになった、ガリレオンと呼ばれる模型、シンメトロンと呼ばれるスクリーニングを起こす模型、また、質量を持つ重力子の模型、質量を持つスピン 2 の場を含む重力理論、時空の振率  $T$  を使って理論を拡張した  $F(T)$  重力理論、ボルン=インフェルト型の重力理論、マイメティックと呼ばれる理論、ドメインウォール宇宙模型、ユニモジュラー重力理論等を調べ、これらの模型の多くでも現実的な模型を構築することができることが分かった。

ガリレオンやシンメトロンの模型はスカラー場を含むために重力のニュートン則に補

正を与える。シンメトロンモデルでは物質密度の大きいところでは物質とスカラー場の結合が小さくなりニュートン則への補正を観測と矛盾がない程度に小さくすることができる。ところが、シンメトロンだけでは現在の宇宙の加速膨張を引き起こすことができないことが分かった。そこでこのシンメトロンのモデルと、F(R) 重力理論の中で今まで観測等から棄却されていたモデルを組み合わせることにより、宇宙の加速膨張を引き起こすとともに、観測と矛盾のないモデルを構築した。

最近になり、質量を持つ2階対称テンソル場やこの場が重力と結合した理論の研究に目覚ましい進歩があった。2階対称テンソル場の時間成分や跡成分が期待値を持って空間の回転対称性を破らないために矛盾なく加速膨張を引き起こすことができる。そこで、このようなモデルをF(R)重力の形に拡張し、実際にインフレーションや加速膨張を実現するモデルが作れることを示した。

また、いわゆる宇宙項問題のうち物質の量子補正からくる非常に大きな真空のエネルギーの問題を解決するため、かなり前よりユニモジュラー重力理論という理論が提案されていた。この重力理論をF(R)重力理論に拡張し、宇宙膨張の発展がどのように記述されるかについて調べた。

2. については、研究開始のかなり早い段階で、k-エッセンスモデルやF(R)重力理論で物質の密度揺らぎを調べるための摂動計算を学生の松本路朗氏らと行なった。これらのモデルでは、摂動計算がきわめて複雑になるため多くの論文では何かしら仮定を置いて近似計算を行っているが、その仮定が本当に正当化されるかは自明ではなかった。かなり面倒になるが近似を使わない摂動の式から出発し、必ずしも近似が正当化されないことを示すとともに、これらのモデルに非常に特徴的な、ゆらぎが振動するモードが存在することを見つけ、一般の初期条件ではこれらのモードが現れ、観測により将来検証することが可能であることを示した。この計算には今回購入したコンピューターがフルに使われ、その成果につながっている。その後、質量を持つ重力子のモデル、質量を持つスピン2の場を含む重力理論等での物質の密度揺らぎの研究を計画したが、これらのモデルがさらに複雑であること、さらに大型の計算機を使わなければいけないことからこの方向での研究は一旦中断し、次にこの研究計画として検討を行っている。

上記の事情もあり、物質の密度揺らぎ以外で実験・観測によって様々なモデルを検証する可能性について検討を行った。そのような研究の一つとして、未来の宇宙で宇宙膨張に伴う慣性力により、あらゆる結合状態が壊れてしまうというリトルリップのシナリオが提案され、そのようなシナリオを実現するモデルを

スカラー場を使ったモデルやF(R)重力理論のモデルで構築し、このシナリオが安定な時間発展として起こるか、また、このシナリオを観測で検証する手段について検討した。また、宇宙初期に作られたブラックホールがF(R)重力理論では「反蒸発」という現象によって生き残る可能性があることを示した。更に、F(T)重力理論では、高次元理論との関係や、F(R)重力理論と異なり、余分な伝搬モードが現れず、観測との整合性がたやすく満たされることを示した。

現在の宇宙の加速膨張の研究の中で、宇宙膨張の中でソフトな特異性を持つ振る舞いが膨張の過程で現れうることが示唆されていたが、宇宙初期の加速膨張期であるインフレーションの最中にこの特異性を持つ振る舞いが起こった時の影響及び検証の可能性についてしらべた。

3. については、まず、重力理論の背後にある理論をさぐるため、臨界重力理論と呼ばれるくりこみ可能な簡素化されたモデルの研究を行った。また、最近の観測により、暗黒エネルギーの状態方程式パラメーターが-1より小さいことが示唆されているが、このような状態方程式をスカラー場の理論で実現しようとすると量子力学の原理と矛盾するが、F(R)重力理論のような修正重力理論等でこの問題を回避できることを示した。

また、超弦理論におけるD-braneの研究に動機づけられ、我々の宇宙が高次元時空に浮かぶ膜であるというシナリオが考えられるようになった。この膜ができる機構自体は未解明であるため、スカラー場を使って膜に厚みを持たせたドメインウォールを実現させるモデルを提案した。特に、膨張宇宙を記述するような動的なドメインウォールのモデルを提案し、更に重力子、スピノール粒子、ベクトル粒子の場など様々な場が動的なドメインウォール上に局在化するための条件を調べた。特に、5次元では存在しないカイラル粒子が動的なドメインウォール上でどのように現れるかを明らかにした。

重力子が質量を持つ理論では質量を持つスピン2の粒子が現れ、自己相互作用をする。このような粒子は超弦理論のような高次元の理論では自然に現れるため、私は学生と、このモデルを単純化したモデルを提案するとともに、背景時空が曲がっているときに矛盾がないとともに解が安定になる条件を調べた。また、二つの計量を含む理論については、この理論でブラックホールが解として現れる条件や、そのエントロピー、また反蒸発という現象が起こるかを調べた。

また、超弦理論の低エネルギーでの有効理論ともみなされるボルン=インフェルト型の重力理論では、曲率に上限があると期待されるので、このモデルで星の崩壊によってブラックホールが形成されるかなどを調べた。

いわゆる宇宙項問題のうち物質の量子補正

からくる非常に大きな真空のエネルギーの問題を解決するため、かなり前よりユニモジュラー重力理論という理論が提案されていたが、この真空のエネルギーの問題に関連し、ユニモジュラー重力理論を拡張または変形し、位相的場の理論で解決するモデルを提案した。

以上の成果は「実績報告書」提出以降に掲載決定になった論文や登校中の論文を含め67編以上の論文にまとめられ、レビュー論文も含めると全体で、既に3千回以上学術論文で引用されている（レビュー論文2編を除くと千回以上である）。また、以上の研究に基づき多くの招待講演を国外で行っている。

以上のように、物質の密度揺らぎの研究は完全には終わっていないが、研究開始前に想定していたよりはるかに多くの種類のモデルについて、宇宙膨張の歴史を再現するモデルを構築し、それらのモデルの無矛盾性や素粒子モデルとの関係について議論した。物質の密度揺らぎの研究については他のモデルの検証のための研究とともに、新たな研究計画を立てて進めていきたい。

#### 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 64 件）

1. S. Nojiri, S. D. Odintsov, V. K. Oikonomou and E. N. Saridakis, ``Singular cosmological evolution using canonical and ghost scalar fields,’’ JCAP 1509 (2015) 044  
doi:10.1088/1475-7516/2015/9/044,  
10.1088/1475-7516/2015/09/044  
査読有
2. S. Nojiri, S. D. Odintsov and V. K. Oikonomou, ``Quantitative analysis of singular inflation with scalar-tensor and modified gravity,’’ Phys. Rev. D 91 (2015) no. 8, 084059  
doi:10.1103/PhysRevD.91.084059  
査読有
3. K. Bamba, S. Nojiri, S. D. Odintsov and D. Sáez-Gómez, ``Inflationary universe from perfect fluid and  $F(R)$  gravity and its comparison with observational data,’’ Phys. Rev. D 90 (2014) 124061  
doi:10.1103/PhysRevD.90.124061  
査読有
4. S. Nojiri and S. D. Odintsov, ``Mimetic  $F(R)$  gravity: inflation, dark

- energy and bounce,’’  
Mod. Phys. Lett. A 29 (2014) no. 40, 1450211  
doi:10.1142/S0217732314502113  
査読有
5. K. Bamba, S. Nojiri and S. D. Odintsov, ``Reconstruction of scalar field theories realizing inflation consistent with the Planck and BICEP2 results,’’ Phys. Lett. B 737 (2014) 374  
doi:10.1016/j.physletb.2014.09.014  
査読有
  6. K. Bamba, S. Nojiri and S. D. Odintsov, ``Trace-anomaly driven inflation in  $f(T)$  gravity and in minimal massive bigravity,’’ Phys. Lett. B 731 (2014) 257  
doi:10.1016/j.physletb.2014.02.041  
査読有
  7. K. Bamba, A. N. Makarenko, A. N. Myagky, S. Nojiri and S. D. Odintsov, ``Bounce cosmology from  $F(R)$  gravity and  $F(R)$  bigravity,’’ JCAP 1401 (2014) 008  
doi:10.1088/1475-7516/2014/01/008  
査読有
  8. K. Bamba, S. Capozziello, M. De Laurentis, S. Nojiri and D. Sáez-Gómez, ``No further gravitational wave modes in  $F(T)$  gravity,’’ Phys. Lett. B 727 (2013) 194  
doi:10.1016/j.physletb.2013.10.022  
査読有
  9. J. Klusoň, S. Nojiri and S. D. Odintsov, ``New proposal for non-linear ghost-free massive  $F(R)$  gravity: Cosmic acceleration and Hamiltonian analysis,’’ Phys. Lett. B 726 (2013) 918  
doi:10.1016/j.physletb.2013.10.003  
査読有
  10. S. Nojiri and S. D. Odintsov, ``Accelerating cosmology in modified gravity: from convenient  $F(R)$  or string-inspired theory to bimetric  $F(R)$  gravity,’’ Int. J. Geom. Meth. Mod. Phys. 11 (2014) 1460006  
doi:10.1142/S0219887814600068  
査読有
  11. K. Bamba, S. Nojiri and S. D. Odintsov, ``Effective  $F(T)$  gravity from the higher-dimensional Kaluza-Klein and

- Randall-Sundrum theories,’’  
 Phys. Lett. B 725 (2013) 368  
 doi:10.1016/j.physletb.2013.07.052  
 査読有
12. S. Nojiri and S. D. Odintsov,  
 ‘‘Anti-Evaporation of Schwarzschild-de  
 Sitter Black Holes in  $F(R)$  gravity,’’  
 Class. Quant. Grav. 30 (2013) 125003  
 doi:10.1088/0264-9381/30/12/125003  
 査読有
13. S. Nojiri, S. D. Odintsov  
 and N. Shirai,  
 ‘‘Variety of cosmic acceleration models  
 from massive  $F(R)$  bigravity,’’  
 JCAP 1305 (2013) 020  
 doi:10.1088/1475-7516/2013/05/020  
 査読有
14. I. Brevik, R. Myrzakulov, S. Nojiri  
 and S. D. Odintsov,  
 ‘‘Turbulence and Little Rip Cosmology,’’  
 Phys. Rev. D 86 (2012) 063007  
 doi:10.1103/PhysRevD.86.063007  
 査読有
15. S. Nojiri and S. D. Odintsov,  
 ‘‘Ghost-free  $F(R)$  bigravity and  
 accelerating cosmology,’’  
 Phys. Lett. B 716 (2012) 377  
 doi:10.1016/j.physletb.2012.08.049  
 査読有
16. K. Bamba, S. Capozziello, S. Nojiri  
 and S. D. Odintsov,  
 ‘‘Dark energy cosmology: the equivalent  
 description via different theoretical  
 models and cosmography tests,’’  
 Astrophys. Space Sci. 342 (2012) 155  
 doi:10.1007/s10509-012-1181-8  
 査読有
17. A. V. Astashenok, S. Nojiri,  
 S. D. Odintsov and R. J. Scherrer,  
 ‘‘Scalar dark energy models mimicking  
 $\Lambda$ CDM with arbitrary future  
 evolution,’’  
 Phys. Lett. B 713 (2012) 145  
 doi:10.1016/j.physletb.2012.06.017  
 査読有
18. K. Bamba, R. Myrzakulov, S. Nojiri  
 and S. D. Odintsov,  
 ‘‘Reconstruction of  $f(T)$  gravity: Rip  
 cosmology, finite-time future  
 singularities and thermodynamics,’’  
 Phys. Rev. D 85 (2012) 104036  
 doi:10.1103/PhysRevD.85.104036  
 査読有
19. A. V. Astashenok, S. Nojiri,  
 S. D. Odintsov and A. V. Yurov,  
 ‘‘Phantom Cosmology without Big Rip  
 Singularity,’’  
 Phys. Lett. B 709 (2012) 396  
 doi:10.1016/j.physletb.2012.02.039  
 査読有
20. Y. Ito, S. Nojiri and S. D. Odintsov,  
 ‘‘Stability of Accelerating Cosmology in  
 Two Scalar-Tensor Theory: Little Rip  
 versus de Sitter,’’  
 Entropy 14 (2012) 1578  
 doi:10.3390/e14081578  
 査読有
21. S. Nojiri and S. D. Odintsov,  
 ‘‘Could the dynamical Lorentz symmetry  
 breaking induce the superluminal  
 neutrinos?,’’  
 Eur. Phys. J. C 71 (2011) 1801  
 doi:10.1140/epjc/s10052-011-1801-4  
 査読有
22. P. H. Frampton, K. J. Ludwick,  
S. Nojiri, S. D. Odintsov  
 and R. J. Scherrer,  
 ‘‘Models for Little Rip Dark Energy,’’  
 Phys. Lett. B 708 (2012) 204  
 doi:10.1016/j.physletb.2012.01.048  
 査読有
23. I. Brevik, E. Elizalde, S. Nojiri  
 and S. D. Odintsov,  
 ‘‘Viscous Little Rip Cosmology,’’  
 Phys. Rev. D 84 (2011) 103508  
 doi:10.1103/PhysRevD.84.103508  
 査読有
24. T. Harko, F. S. N. Lobo, S. Nojiri  
 and S. D. Odintsov,  
 ‘‘ $f(R, T)$  gravity,’’  
 Phys. Rev. D 84 (2011) 024020  
 doi:10.1103/PhysRevD.84.024020  
 査読有
25. K. Bamba, S. Nojiri, S. D. Odintsov  
 and M. Sasaki,  
 ‘‘Screening of cosmological constant for  
 De Sitter Universe in non-local gravity,  
 phantom-divide crossing and finite-time  
 future singularities,’’  
 Gen. Rel. Grav. 44 (2012) 1321  
 doi:10.1007/s10714-012-1342-7  
 査読有
26. E. Elizalde, S. Nojiri, S. D. Odintsov,  
 L. Sebastiani and S. Zerbini,  
 ‘‘Non-singular exponential gravity: a

simple theory for early- and late-time accelerated expansion,”  
Phys. Rev. D 83 (2011) 086006  
doi:10.1103/PhysRevD.83.086006  
査読有

27. S. Nojiri and S. D. Odintsov,  
“Unified cosmic history in modified gravity: from F(R) theory to Lorentz non-invariant models,”  
Phys. Rept. 505 (2011) 59  
doi:10.1016/j.physrep.2011.04.001  
査読有

他 37 件 (すべて査読有)。

[学会発表] (計 21 件)

1. Shin'ichi Nojiri, New theories of massive spin-two particle, Cosmology and the Quantum Vacuum 2015, ギリシャ・ロードス島, 2015/6/1

2. Shin'ichi Nojiri, Dynamical Domain Wall and Localization, Windows on Quantum Gravity: Season 2, スペイン・マドリッド・Instituto de Física Teórica UAM-CSIC, 2015/10/1

3. 野尻伸一, Palatini-Born-Infeld Gravity and Black Hole Formation, Cosmology and the Quantum Vacuum, 2014 年 9 月

4. 野尻伸一, Some extension of bigravity, Quantum Field Theory and Gravity (QFTG '14), Tomsk State Pedagogical University, Tomsk, Russia, 2014 年 7 月

5. 野尻伸一, New theory of massive spin-two field, 2nd International Workshop on Particle Physics and Cosmology after Higgs and Planck, National Tsing Hua University, Hsinchu, Taiwan, 2014 年 10 月

6. 野尻伸一, F(R) bigravity, Petrov Winter School, Kazan Federal Univ., Russia, 2014 年 2 月

7. Shin'ichi Nojiri, F(R) bigravity, 3rd International Workshop on Dark Matter, Dark Energy and Matter-Antimatter Asymmetry, Hsinchu and Taipei, Taiwan, Dec-12

8. Shin'ichi Nojiri, Covariant Lagrange multiplier constrained higher derivative gravity with scalar projectors, "Tenth Conference on QUANTUM FIELD THEORY UNDER THE INFLUENCE OF

EXTERNAL CONDITIONS, Benasque, Spain, 2011 年 9 月

他 13 件。

[図書] (計 0 件)

[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]  
ホームページ等  
特になし。

6. 研究組織  
(1) 研究代表者  
野尻伸一 (Shin'ichi Nojiri)  
名古屋大学・理学研究科・教授

研究者番号：00432229

(2) 研究分担者  
( )

研究者番号：

(3) 連携研究者  
( )

研究者番号：