

平成21年 3月31日現在

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2006～2008

課題番号：18549001

研究課題名（和文） 暗黒エネルギーの素粒子理論からの解明

研究課題名（英文） Elucidation of Dark Energy from the viewpoint of Elementary Particle Theory

研究代表者

野尻 伸一 (Shin'ichi Nojiri)

名古屋大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号：00432229

研究成果の概要：

宇宙の様々な観測から、現在の宇宙の膨張の速さが約50億年前から増加に転じ、宇宙が暗黒エネルギーという負の圧力を持つ未知のエネルギーで満たされていることが明らかになった。本研究ではその暗黒エネルギーの起源を超弦理論のような高次元の素粒子の模型に求める研究を行い、超弦理論に現れる粒子のモードや超弦理論からの重力理論への補正を取り入れることにより、実際に観測と矛盾のない模型を構築し、その検証の可能性を調べた。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	2,000,000	0	2,000,000
2007年度	700,000	210,000	910,000
2008年度	700,000	210,000	910,000
総計	3,400,000	420,000	3,820,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学 素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：素粒子物理

## 1. 研究開始当初の背景

宇宙背景輻射温度揺らぎの観測から、宇宙が平坦であることが分かった。宇宙が平坦であるためには宇宙の物質密度が臨界密度程度なければならないが、星などを形成する通常の物質はその4%程度しかなく、暗黒物質の密度も臨界密度の23%程度しかないと見積もられている。従って残り70%を未知のものが占めていることになる。この未知のものが「暗黒エネルギー」である。一方遠方にあるIa型超新星の観測により、宇宙がおよそ50億年前から加速膨張していることが発見された。加速膨張が起こるためには宇宙が大きな負の圧力を持つもので満たされていなければ

ばならない。このことは暗黒エネルギーが大きな負の圧力を持つことを示している。このようなことが分かった背景には宇宙の精密な観測の大きな進展にある。今後10年程度はこのような進展がさらに進み、暗黒エネルギーに対する観測面からの理解がより深まると考えられる。

現在まで得られている宇宙の観測結果は暗黒エネルギーの正体が宇宙項であることと矛盾はないが、宇宙項以外の可能性も否定されてはいない。素粒子理論の立場では暗黒エネルギーが宇宙項であるとするのは非常に不自然に思われる。暗黒エネルギーが宇宙項であるとしたときに、宇宙項に含まれる

宇宙定数の大きさは現在の宇宙の膨張率であるハッブル定数から決まるが、そのハッブル定数のスケールは重力理論における基本的なスケールと言われているプランク=スケールとは10の60乗も異なる。素粒子理論の目標は素粒子とその相互作用の統一的な理解にあるが、もし、重力も含むような統一理論が存在するとした場合、そのような理論がこのように大きさの異なる二つのスケールを持つことは非常に不自然である。現在の宇宙では暗黒エネルギーの密度がその他の物質の密度よりかなり大きい、桁違いというわけではなく同程度の大きさとみなすこともできる。そうすると暗黒エネルギーが一種の物質場であるほうがより自然に思われる。現在見つかっている素粒子でそのように大きな負の圧力を持つ物質場を構成することはできない。このため、暗黒エネルギーの研究が新しい素粒子の発見に繋がることが期待され、新しい素粒子モデルの構築と時空構造の新たな可能性の解明を目指した研究を展開できる。

暗黒エネルギーの解明は、物理学における今世紀最大の課題の一つであり、また新しい物理学の発見につながる可能性があるものと広く認識されている。このように暗黒エネルギーの研究は非常に重要であるが、日本国内ではその研究を、特に素粒子理論の観点から研究している研究者は本研究課題の研究代表者の野尻以外にはほとんどない。この研究課題を実行し達成することが日本の学問の発展が他国のものに遅れを取らないためには非常に重要であった。

## 2. 研究の目的

最近の宇宙の加速膨張の発見に刺激され、世界各国で重力と量子場に関する理論的研究が活発に行われている。宇宙の加速膨張を引き起こすものとして「暗黒エネルギー」というものが考えられているが、その研究から素粒子理論に対する手がかりや制限を見出すことが目的である。

本研究では暗黒エネルギーの問題に

- ・暗黒エネルギーの存在を自然な形で説明できる理論の構築
- ・暗黒エネルギーのある宇宙を現象論的に取り扱うモデルの構築
- ・構築した理論、モデルについて基本的な物理量の量子効果まで含めた解析
- ・構築した理論、モデルについて観測からくる制限と検証可能性の検討

の4つの側面から取り組み、場の量子論と素粒子物理学とに基づいて暗黒エネルギーの起源を解明することを目的とした。具体的には、ファントム場やスカラー=テンソル理論、拡張された重力理論を対象とし、有効的に暗黒エネルギーを生み出す機構と素粒子モデル

としての整合性について研究し、また量子効果によって生じる暗黒エネルギーと素粒子現象、及びこれらの時間発展について解析し、超弦理論、M理論やブレイン理論を起源とするモデルの探求を行うことを目指した。また、それらのモデルにおいて特徴的に現れる物理過程を明らかにして検証の可能性を検討することとした。例えば、暗黒エネルギーのモデルによってはその帰結として将来の宇宙に Big Rip と呼ばれる特異点の生じる可能性が指摘されている。これらの特異点の性質を調べることは宇宙の始まりを考える上でも大変興味深い。この特異点の性質がどのように暗黒エネルギーのモデルに依存するか、また特異点付近における量子効果がどのように特異点形成に影響を与えるかを明らかにすることを目指した。暗黒エネルギーの研究は、初期宇宙の現象と密接に関係しているため、本研究で得られた成果を初期宇宙の研究にも応用し合わせて成果を得ることを目指した。

## 3. 研究の方法

暗黒エネルギーを素粒子の基本理論から説明するには、その起源を超弦理論やいわゆるM理論、また超弦理論との関係が深いと思われるブレイン理論など高次元の理論に求めることが自然である。実際、暗黒エネルギーを記述するようなモデルを場の理論で作ろうとすると、その理論は超弦理論、M理論やブレイン理論のような高次元の理論に起源を持つ4次元時空の理論と共通の特徴を持っている。このような高次元理論との関係を調べるためには重力場中での超対称性を含めた素粒子理論の研究を行う。また、暗黒エネルギーの起源が実際に超弦理論、M理論やブレイン理論にあったとすると、宇宙初期のインフレーションの様相も一般相対性理論で予測されるものと異なる可能性が大きい。その痕跡を現在の宇宙に求めるためには、時空と素粒子の場の時間発展、量子補正を含めた素粒子現象とそれが現在の宇宙に及ぼす影響の解明を行う。

一方、宇宙の観測プロジェクトとして暗黒エネルギーの性質を強く制限することの可能なものがいくつか提案され計画がすすめられている。宇宙論的観測から暗黒エネルギーの性質を有効的に制限する方法の研究開発も同時に進める。天体分布観測データを用いて効率よくスペクトルを測定し暗黒エネルギーの状態方程式を決定する方法を開発し、他の方法とあわせて観測からの制限を与える。

暗黒エネルギーの研究は世界的には多くの研究があるが、宇宙論を専門とする研究者の研究には素粒子理論や場の量子論の観点から抜け落ちているものも多く、また素粒子理論を専門とする研究者の研究では実際の観

測に基づいた宇宙論による制限に対する認識が少ないものもある。研究代表者の主な興味は素粒子理論にあるが、本研究課題では宇宙論と素粒子理論の両方の立場を密接に関連させて暗黒エネルギーの研究を行うことにより素粒子の統一理論についての手がかりを求める。

#### 4. 研究成果

##### (1) 高階微分を含む重力理論の研究

素粒子とその相互作用の統一理論の有力な候補である超弦理論は重力を含む理論であるが、弦の単位長さ当たりのエネルギーに当たるパラメーターが無限大の極限で、超弦理論はアインシュタイン重力に通常の物質場が結合した理論に一致する。このパラメーターが有限の場合には、重力のアインシュタイン=ヒルベルト作用に対する一次の補正としてガウス=ボンネ項と呼ばれる時空の曲率の二次の項、更に二次の補正として曲率の四次の項が重力の作用の中に現れる。これらの項により、加速膨張を説明しようという試みが野尻=佐々木=オディンツォフの仕事 (S. Nojiri, S.D. Odintsov, M. Sasaki, Phys. Rev. D71:123509, 2005) 以来行われている。論文⑬ではガウス=ボンネ項を取り入れた場合、論文⑭ではさらに高次の補正を取り入れた場合を議論し、特にこれまでの宇宙膨張の歴史を再現するようなモデルが、どのようなものであれ再現できることを示した。論文⑮では、この理論と後に述べる  $F(R)$ -重力理論、論文①ではこの後に述べる非局所的重力理論と組み合わせる加速膨張を説明するシナリオを検討し、それが可能であることを明らかにし、今後の観測でどのように検証できるかを議論した。

##### (2) 非局所重力理論の研究

現在観測されている加速膨張の謎の一つは、宇宙が減速膨張から加速膨張に移ったのが、なぜおよそ 50 億年前かということである。これを説明するために非局所的な重力理論を考えるシナリオがデーザー=ウッダードらにより提案されている (S. Deser, R.P. Woodard, Phys. Rev. Lett. 99:111301, 2007)。我々はこのシナリオを検討し、正確に解けるモデルを提案するとともに、後に述べる  $F(R)$ -重力理論と組み合わせたモデル (論文⑩) や、超弦理論の高次補正を入れたようなモデル (論文①) を調べた。その結果、現実的なモデルを構築するには技術的な困難が大きいこと、ここで扱われている非局所的な重力理論は局所的な理論に書き換えられることなど、問題点が数多くあることが分かった。

##### (3) スカラー=テンソル理論

超弦理論は多くのスカラー場を含んでおり、インフレーションを引き起こすインフラトンや暗黒エネルギーの起源をこのスカラ

一場に求めるシナリオが多数提案されている。スカラー場が重力と結合した理論 (スカラー=テンソル理論) では宇宙膨張の歴史がどんなものであれ、再現することができるが、論文①では、特に物質優勢期を再現するようなモデルを実際に構築し、論文⑦では宇宙初期のインフレーションから現在の宇宙膨張を再現するようなモデルを構築した。スカラー=テンソル理論は数学的には次で述べる  $f(R)$  重力理論に書き直すことができるが、論文⑱では、この「書き直し」によって、宇宙の発展等が異なって観測され、物理的に異なる現象に見える場合を系統的に調べた。今までの宇宙の発展の中で、インフレーションと現在の宇宙の加速膨張と二度は加速膨張の時期があったと信じられている。論文⑰ではこのような加速膨張を引き起こす宇宙項的なものが何度も現れるようなモデルをスカラー=テンソル理論に基づいて構築した。

##### (4) $f(R)$ -重力理論の研究

ここ数年来暗黒エネルギーのモデルとして  $f(R)$ -重力理論というものが盛んに研究されている。アインシュタイン重力の作用密度がスカラー曲率  $R$  に対し線形であるのに対し、 $f(R)$ -重力理論では  $R$  の適当な関数が作用密度になっている。我々は実際にこの  $f(R)$ -重力理論の枠内で観測と矛盾しないような現実的なモデルをどのように構成できるかということの研究してきた (論文②、③、④、⑨、⑩、⑪、⑬、⑭、⑮、⑰、⑱、⑳、㉑)。論文㉒、㉓、㉔では特に物質優勢期がどのように実現されるかを調べた。比較的最近になり、スタロビンスキー (A. A. Starobinsky, JETP Lett. 86:157-163, 2007) やフー=サウィッキ (W. Hu, I. Sawicki, Phys. Rev. D76:064004, 2007) らによって、加速膨張を説明するとともに、宇宙論から来る様々な制限を満たすようなモデルが提案された。我々はこのモデルと同様に加速膨張や様々な観測結果を説明するとともに、宇宙初期のインフレーションも同時に説明できるようなモデルを提案した (論文⑭、⑩、⑧、③)。その後、フロロフ (A. V. Frolov, Phys. Rev. Lett. 101:061103, 2008) によって、 $f(R)$ -重力理論に含まれるスカラーモードによって不安定性が生じることが指摘された。我々はこの不安定性を系統的に調べ、どのようにすればこの不安定性を避けることができるかを明らかにし、実際に現実的なモデルを構築した (論文③、④)。また、論文⑤では  $F(R)$  重力がヤン=ミルズ場と結合した理論でインフレーションを考え、どのようにすれば宇宙膨張の時間発展を再構築できるかを明らかにした。

以上の成果は世界的にも非常に評価されており、例えば 2009 年 3 月現在、論文㉒は 140 回近く、論文⑱は 80 回、論文⑳は 70 回近く、

学術論文で引用されている (SLAC spires 調べ)。

#### 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 22 件)

- ① S. Capozziello, E. Elizalde, S. Nojiri, S.D. Odintsov, “Accelerating cosmologies from non-local higher-derivative gravity”, Phys. Lett. B671: 193–198, 2009, 査読有
- ② A. Dev, D. Jain, S. Jhingan, S. Nojiri, M. Sami, I. Thongkool, “Delicate  $f(R)$  gravity models with disappearing cosmological constant and observational constraints on the model parameters”, Phys. Rev. D78: 083515, 2008, 査読有
- ③ K. Bamba, S. Nojiri, S.D. Odintsov, “The Universe future in modified gravity theories: Approaching the finite-time future singularity”, JCAP 0810: 045, 2008, 査読有
- ④ S. Nojiri, S.D. Odintsov, “The Future evolution and finite-time singularities in  $F(R)$ -gravity unifying the inflation and cosmic acceleration”, Phys. Rev. D78: 046006, 2008, 査読有
- ⑤ K. Bamba, S. Nojiri, S.D. Odintsov, “Inflationary cosmology and the late-time accelerated expansion of the universe in non-minimal Yang-Mills- $F(R)$  gravity and non-minimal vector- $F(R)$  gravity”, Phys. Rev. D77: 123532, 2008, 査読有
- ⑥ S. Jhingan, S. Nojiri, S.D. Odintsov, M. Sami, I. Thongkool, S. Zerbini, “Phantom and non-phantom dark energy: The Cosmological relevance of non-locally corrected gravity”, Phys. Lett. B663: 424–428, 2008, 査読有
- ⑦ E. Elizalde, S. Nojiri, S.D. Odintsov, D. Saez, V. Faraoni, “Reconstructing the universe history, from inflation to acceleration, with phantom and canonical scalar fields”, Phys. Rev. D77: 106005, 2008, 査読有
- ⑧ G. Cognola, E. Elizalde, S. Nojiri, S.D. Odintsov, L. Sebastiani, S. Zerbini, “A Class of viable modified  $f(R)$  gravities describing inflation and the onset of accelerated expansion”, Phys. Rev. D77: 046009, 2008, 査読有
- ⑨ S. Nojiri, S.D. Odintsov, P.V. Tretyakov, “From inflation to dark energy in the non-minimal modified gravity”, Prog. Theor. Phys. Suppl. 172:81–89, 2008,

査読有

- ⑩ S. Nojiri, S.D. Odintsov, “Modified  $f(R)$  gravity unifying  $R^{**m}$  inflation with Lambda CDM epoch”, Phys. Rev. D77: 026007, 2008, 査読有
- ⑪ S. Nojiri, S.D. Odintsov, “Modified non-local- $F(R)$  gravity as the key for the inflation and dark energy”, Phys. Lett. B659: 821–826, 2008, 査読有
- ⑫ E. Elizalde, S. Jhingan, S. Nojiri, S.D. Odintsov, M. Sami, I. Thongkool, “Dark energy generated from a (super)string effective action with higher order curvature corrections and a dynamical dilaton”, Eur. Phys. J. C53: 447–457, 2008, 査読有
- ⑬ S. Nojiri, S.D. Odintsov, “Unifying inflation with LambdaCDM epoch in modified  $f(R)$  gravity consistent with Solar System tests”, Phys. Lett. B657: 238–245, 2007, 査読有
- ⑭ S. Nojiri, S.D. Odintsov, “Newton law corrections and instabilities in  $f(R)$  gravity with the effective cosmological constant epoch”, Phys. Lett. B652: 343–348, 2007, 査読有
- ⑮ S. Nojiri, S.D. Odintsov, P.V. Tretyakov, “Dark energy from modified  $F(R)$ -scalar-Gauss-Bonnet gravity”, Phys. Lett. B651: 224–231, 2007, 査読有
- ⑯ S. Nojiri, S.D. Odintsov, “Multiple Lambda cosmology: Dark fluid with time-dependent equation of state as classical analog of cosmological landscape”, Phys. Lett. B649: 440–444, 2007, 査読有
- ⑰ F. Briscese, E. Elizalde, S. Nojiri, S.D. Odintsov, “Phantom scalar dark energy as modified gravity: Understanding the origin of the Big Rip singularity”, Phys. Lett. B646: 105–111, 2007, 査読有
- ⑱ G. Cognola, E. Elizalde, S. Nojiri, S. Odintsov, S. Zerbini, “String-inspired Gauss-Bonnet gravity reconstructed from the universe expansion history and yielding the transition from matter dominance to dark energy”, Phys. Rev. D75: 086002, 2007, 査読有
- ⑲ S. Nojiri, S.D. Odintsov, “Modified gravity and its reconstruction from the universe expansion history”, J. Phys. Conf. Ser. 66: 012005, 2007, 査読有
- ⑳ S. Nojiri, S.D. Odintsov, “Modified gravity as an alternative for Lambda-CDM cosmology”, J. Phys. A40: 6725–6732, 2007, 査読有

㉑ S. Nojiri, S.D. Odintsov, H. Stefancic,  
“On the way from matter-dominated era to  
dark energy universe”, Phys. Rev. D74:  
086009, 2006, 査読有

㉒ S. Nojiri, S.D. Odintsov, “Modified  
f(R) gravity consistent with realistic  
cosmology: From matter dominated epoch to  
dark energy universe”, Phys. Rev. D74:  
086005, 2006, 査読有

[学会発表] (計 3 件)

① 野尻伸一, “Recent Topics in f(R)  
Gravity”, Indo-Japan Workshop on  
Cosmology, Jamia Millia Islamia, New Delhi,  
India, 2008年12月7日

② 野尻伸一, “Can F(R) - gravity be a viable  
model?”, JGRG17, The 17th Workshop on  
General Relativity and Gravitation in  
Japan, Nagoya University, Nagoya, Japan,  
2007年12月3日

③ 野尻伸一, “Modified Gauss-Bonnet  
gravity as dark energy”, QFTG' 07, QUANTUM  
FIELD THEORY AND GRAVITY, Tomsk State  
Pedagogical University, Tomsk, Russia,  
2007年7月2日

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

野尻 伸一 (Shin' ichi Nojiri)  
名古屋大学・大学院理学研究科・教授  
研究者番号: 00432229