

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 3 月 31 日現在

機関番号：32660

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2008～2011

課題番号：20740148

研究課題名（和文）暗黒エネルギーの起源の理論的な探究と観測からの制限

研究課題名（英文）Construction of theoretical models of dark energy and their observational constraints

研究代表者 辻川 信二 (Shinji Tsujikawa)

東京理科大学・理学系・准教授

研究者番号：30318802

研究成果の概要（和文）：

現在の宇宙のエネルギーの約 70 %程度が、暗黒エネルギーと呼ばれる宇宙を加速膨張させる未知の成分であることが、Ia 型の超新星の観測などから示唆されている。その起源を明らかにするには、理論と観測の相補的な進展が不可欠である。研究代表者は、様々な暗黒エネルギーモデルに基づく宇宙進化、密度揺らぎの進化、局所重力実験からの制限等を理論的に考察し、有効なモデルの候補を絞り込んだ。その上で、様々な観測データからモデルへの制限を与えた。

研究成果の概要（英文）：

Observations such as supernova type Ia suggest that about 70 % of the energy density of the Universe today consists of dark energy responsible for cosmic acceleration. The development of both theoretical and observational sides is required to approach the origin of dark energy. From the theoretical side I discriminated between many models of dark energy by studying the background cosmological dynamics, the evolution of density perturbations, and local gravity constraints. Moreover we placed constraints on theoretical models of dark energy from a number of independent observational data.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
20 年度	900,000	270,000	1170,000
21 年度	900,000	270,000	1170,000
22 年度	800,000	240,000	1040,000
23 年度	700,000	210,000	910,000
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

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：暗黒エネルギー，一般相対論

1. 研究開始当初の背景

1998年の遠方の超新星の観測により、宇宙が現在付近になって減速膨張から加速膨張に転じたことが発見された。その加速膨張を引き起こす源である、圧力が負の未知のエネルギーは暗黒エネルギーと呼ばれている。宇宙背景輻射、宇宙の大規模構造などの様々な観測データからも、独立に暗黒エネルギーの存在が裏付けられている。暗黒エネルギーの起源を明らかにすることは、21世紀の物理学の最大の課題と言ってもよい。

最も単純な暗黒エネルギーのモデルは、宇宙項と呼ばれるエネルギー密度が一定の項であり、実際に素粒子物理において、真空が内在するエネルギーとして自然に現れる。しかし、素粒子物理が予測する宇宙項の値と観測されている値には、非常に大きなずれがあることが知られており、暗黒エネルギーの起源としての宇宙項には様々な問題点がつきまとう。そのため、超弦理論のような素粒子理論で現れるスカラー場を用いたり、一般相対論を変更したモデルで暗黒エネルギーの起源を明らかにしようとする研究が盛んに行われている。そのような理論モデルが予測する暗黒エネルギーの状態方程式の変化は、それぞれのモデルによって異なることから、観測的に理論モデルに対する制限を与える研究も数多くなされている。

2. 研究の目的

暗黒エネルギーの起源の解明に向けて、以下のような3つの事項について明らかにしていくのが主な目的である。

(1) 暗黒エネルギーモデルの理論的研究

超弦理論のような素粒子論を用いた暗黒エネルギーの起源の探究、特にスカラー場を用いたモデルの構築を行う。また、一般相対論の変更に基づくモデル、超弦理論の高次補正で現れる曲率の非線形項が存在するモデルなどの、加速膨張を含めた宇宙論的な妥当性について、太陽系での重力実験からの制限も加味し詳細な解析を行う。

(2) 最新の観測による暗黒エネルギーの性質に対する理解

宇宙背景輻射の温度揺らぎ、宇宙の大規模構造、バリオン振動、重力レンズ、ガンマ線バーストなどの様々な観測デー

タを用いて、暗黒エネルギーの性質に対する強い制限を付ける。特に、項目(1)で挙げた理論モデルの観測的な妥当性を議論することで、素粒子理論に対する示唆を与える。特に、宇宙項によるモデルからのずれについて詳細に解析し、暗黒エネルギーの起源が宇宙項であるかそれ以外のものであるか明らかにしていきたい。

(3) 宇宙初期のインフレーション機構の解明と暗黒エネルギーとの関連

宇宙背景輻射やその他の観測から、宇宙初期にもインフレーションと呼ばれる加速膨張が起こったことが分かっている。このインフレーションの機構を明らかにすることにより、暗黒エネルギーの起源に対する何らかの大きな示唆を与えることができる。研究代表者は、インフレーション理論が予測する密度揺らぎ、その非ガウス性、重力波の解析を行い、宇宙背景輻射や宇宙の大規模構造の観測データから、モデルに対する制限を与える。

3. 研究の方法

暗黒エネルギーの起源を明らかにするには、理論と観測の相補的な進展が不可欠である。研究代表者は、様々な暗黒エネルギーモデルに基づく宇宙進化、密度揺らぎの進化、局所重力実験からの制限等を理論的に考察し、まず有効なモデルの候補を絞り込む。その上で、将来得られる様々な観測データからモデルへの制限を与える。このようにして、どのようなモデルが最も好まれるかを調べ、暗黒エネルギーの起源に迫っていく。

宇宙論、特に暗黒エネルギーの分野の進展は非常に速く、国際的に認知される研究を遂行するためには、観測データなどの情報をいち早く取り入れ、それを理論的にも正確かつ迅速に解析する必要がある。このような観測データを用いた解析を行う手法を身につけるために、様々な研究者とコンタクトをとり、積極的に共同研究を推進していく。国内外の研究者と、電子メールだけでなく、コンピュータ電話やビデオ会議などを用いて議論を行うことで、充実した研究を行っていく。

4. 研究成果

研究代表者は4年間で計34件の査読付き学術論文を執筆した。それらの成果が評価さ

れ, 2010 年には $f(R)$ 重力理論のレビュー論文の執筆を依頼され, また, 2010 年にはケンブリッジ出版から暗黒エネルギーの専門書を執筆した. 主な研究成果を挙げると下記のようなになる.

(1) $f(R)$ 重力理論, スカラーテンソル理論, $f(G)$ 重力理論に基づく暗黒エネルギー模型

これらの理論に基づく有効な暗黒エネルギー模型を構築し, 密度揺らぎの進化を詳細に調べ, 宇宙の大規模構造や重力レンズの観測に与える影響を評価した. さらに, 宇宙の局所領域で第 5 の力の伝搬を抑制するカメレオン機構について調べた.

(2) ガリレオン場に基づく有効な暗黒エネルギー模型の構築と観測的な兆候

ガリレオンと呼ばれるスカラー場を用いて, 有効な暗黒エネルギー模型の構築を行い, ゴーストや不安定性の現れない条件について明らかにした. さらに, 暗黒エネルギーの状態方程式の変化や, 宇宙の密度揺らぎの進化について詳細に調べ, 観測から模型に対する制限をつけた.

(3) 最も一般的なスカラーテンソル理論の暗黒エネルギーへの応用

ほとんどの暗黒エネルギー模型を含むような最も一般的なスカラーテンソル理論において, 模型が宇宙論的に有効であるための条件について明らかにした. さらに, 宇宙論的密度揺らぎが従う式を線形レベルで一般的に導出した. それに加えて, 宇宙の局所領域で一般相対論的な振る舞いを回復するヴァインシュタイン機構について詳細に調べた.

(4) 最も一般的なスカラーテンソル理論に基づくインフレーション理論で生成される密度揺らぎの非ガウス性の評価

インフレーションで生成される密度揺らぎの非ガウス性に関して, 一般的な評価を与えた. この公式は, 幅広いインフレーション模型に適用が可能な応用性の高いものである.

上記の研究によって, いくつかの暗黒エネルギー模型を棄却することができ, 暗黒エネルギーの起源の解明に重要な寄与を与えたと考えられる.

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 34 件)

1. Vainshtein mechanism in second-order scalar-tensor theories,
A. De Felice, R. Kase, S. Tsujikawa,
Physical Review D 85, 044059 (2012),
1-13, 査読有
2. Conditions for the cosmological viability of the most general scalar-tensor theories and their applications to extended Galileon models,
A. De Felice, S. Tsujikawa,
JCAP, 1202, 007 (2012),
1-24, 査読有
3. Inflationary non-Gaussianities in the most general second-order scalar-tensor theories,
A. De Felice, S. Tsujikawa,
Physical Review D 84, 083504 (2011),
1-15, 査読有
4. Observational constraints on loop quantum cosmology
M. Bojowald, G. Calcagni, S. Tsujikawa,
Physical Review Letters, 107, 211302 (2011), 1-5, 査読有
5. Matter perturbations in Galileon cosmology
A. De Felice, R. Kase, S. Tsujikawa,
Physical Review D 83, 043515 (2011),
1-15, 査読有
6. Cosmology of a covariant Galileon field,
A. De Felice, S. Tsujikawa,
Physical Review Letters, 105, 111301 (2010), 1-4, 査読有
7. Density perturbations in general modified gravitational theories,
A. De Felice, S. Mukohyama, S. Tsujikawa,
Physical Review D 82, 023524 (2010),
1-14, 査読有
8. $f(R)$ theories
A. De Felice, S. Tsujikawa,
Living Reviews in Relativity, 13, 3 (2010),
1-156, 査読有

9. Dispersion of growth of matter perturbations in $f(R)$ gravity
S. Tsujikawa, R. Gannouji, B. Moraes, D. Polarski,
Physical Review D 80, 084044 (2009),
1-11, 査読有
10. Chameleon scalar fields in relativistic gravitational backgrounds,
S. Tsujikawa, T. Tamaki, R. Tavakol,
JCAP, 0905, 20 (2009),
1-26, 査読有
11. Construction of cosmologically viable $f(G)$ dark energy models
A. De Felice, S. Tsujikawa,
Physics Letters B 675, 1-8 (2009),
査読有
12. Revisiting chameleon gravity:
Thin-shell and no-shell fields
with appropriate boundary conditions
T. Tamaki, S. Tsujikawa,
Physical Review D 78, 084028 (2008),
1-11, 査読有
13. The effect of modified gravity on
weak lensing,
S. Tsujikawa, T. Tatekawa
Physics Letters B 665, 325-331 (2008),
査読有

[学会発表] (計 25 件)

1. Dark energy in the most general scalar tensor theories with second-order field equations,
S. Tsujikawa,
The Dark Universe Conference,
Heidelberg (Germany), 2011 年 10 月 6 日
2. Observational status and models of dark energy,
S. Tsujikawa,
Six-th Aegean summer school,
Island of Naxos (Greece),
2011 年 9 月 16 日~9 月 17 日
3. Dynamics of dark energy,
S. Tsujikawa,
24-th Spring school on particles
and fields,
Hsinchu (Taiwan),
2011 年 4 月 6 日~4 月 9 日

4. Inflation and dark energy
-theoretical progress over 20 years,
S. Tsujikawa,
The 20-th workshop on
General Relativity and Gravitation,
京都大学, 2010 年 9 月 25 日
5. Dark energy and modified gravity,
S. Tsujikawa,
Confronting theory with observations,
Copenhagen (Denmark),
2010 年 8 月 20 日
6. Probing signatures of modified gravity
models of dark energy,
S. Tsujikawa,
IEU-APCTP workshop,
Seoul (Korea),
2010 年 5 月 17 日
7. Dark energy and modified gravity,
S. Tsujikawa,
Lambda-LTB cosmology,
高エネルギー加速器研究機構,
2009 年 10 月 23 日
8. Matter density perturbations
in modified gravity models of
dark energy,
S. Tsujikawa,
IPMU international conference on
dark energy,
IPMU (柏),
2009 年 6 月 24 日
9. Overview lectures of modified gravity,
S. Tsujikawa,
TRR33 Winter school,
Passo del Tonare (Italy),
2008 年 12 月 7 日~12 月 12 日
10. Scalar-tensor models of dark energy
and their observational signatures,
S. Tsujikawa,
Cosmology Workshop Montpellier08,
Montpellier (France),
2008 年 10 月 23 日

[図書] (計 3 件)

1. Dark Matter and Dark Energy:
A Challenge for Modern Cosmology,
S. Tsujikawa and S. Matarrese et al,
Springer, p331-p402,
2010 年 10 月 28 日

2. Dark Energy: Theory and Observations,
L. Amendola, S. Tsujikawa,
Cambridge University Press, p1-p504,
2010年6月30日

3. Lectures on Cosmology: Accelerated
expansion of the Universe,
S. Tsujikawa, E. Bernardini et al,
Springer, p99-p145,
2010年3月1日

[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

6. 研究組織

(1) 研究代表者

辻川 信二 (東京理科大)

研究者番号：30318802

