

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 6 月 6 日現在

機関番号：14301

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2010～2011

課題番号：22840011

研究課題名（和文） 拡張重力モデルによる加速膨張宇宙の研究

研究課題名（英文） Modified Gravity and the Accelerated Expansion of the Universe

研究代表者

小林 努 (KOBAYASHI TSUTOMU)

京都大学・次世代研究者育成センター・特定助教

研究者番号：40580212

研究成果の概要（和文）：

宇宙を加速膨張させるダークエネルギーの代替としての拡張重力理論の可能性を探求した。重力の理論を一般相対論から変更することが、宇宙論的観測や太陽系における重力実験と整合的か否かを調べ、モデルの峻別に適した観測を提唱した。また、拡張重力理論の枠組みでの初期宇宙のインフレーションについて考察し、既存のすべてのモデルを包含する最も一般的なモデルを構築することに成功した。

研究成果の概要（英文）：

We have explored modified theories of gravity as an alternative to dark energy that would be the origin of the current cosmic acceleration. We have studied observational and experimental consequences of modified gravity, and considered how one can distinguish different theories of gravitation. We have also proposed the most general model of inflation in the early Universe, based upon some generic class of modified gravity theories.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	1,250,000	375,000	1,625,000
2011 年度	1,150,000	345,000	1,495,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,400,000	720,000	3,120,000

研究分野：宇宙論・相対論

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：ダークエネルギー、修正重力理論、密度揺らぎ

1. 研究開始当初の背景

遠方の超新星の観測から、現在の宇宙は加速膨張しているということが強く示唆されているが、その原因は不明であり、加速膨張の起源は現代宇宙論に残された最大級の

謎である。この問題に対する「標準的」なアプローチは、宇宙項、もしくはそれに準ずる性質を持つ正体不明のエネルギー(ダークエネルギーと呼ばれる)が、現在の宇宙のエネルギー密度の 70%以上を占めている、という受

け入れがたい描像にもとづくものである。一方で、この未解決問題は、宇宙論における基本的な仮定や土台となる基礎物理法則を再検討することを迫っている、と捉えることもできる。特に近年、正体不明のダークエネルギーを導入する代わりに、一般相対論を宇宙論的長距離スケールで変更することによって加速膨張を説明しようというアイデア(拡張重力理論)に、世界中の多くの研究者が強い関心を向けている。本研究では、拡張重力理論により加速膨張の起源を説明する可能性を追求する。

2. 研究の目的

ダークエネルギーの問題を除いては、一般相対論は現実の重力現象を記述する上で最も成功した理論である。したがって、ダークエネルギーの代替としての拡張重力理論は、その成功を損なわないよう構築されるべきであり、理論としての整合性や実験・観測に対する帰結などは注意深くチェックされなければならない。具体的には、例えば以下のような点に留意する必要がある。長距離で重力の振る舞いを変更するような理論の特性として、多くの場合、通常のテンソル的な重力の自由度に加えて、新たなスカラー的自由度も重力を伝える、ということが挙げられる。太陽系スケールでは、太陽による光線の曲がりなどの観測により、高い精度で一般相対論の正しさが確認されていることに注意すると、宇宙論的長距離スケールではスカラー自由度導入による重力の変更で加速膨張を実現させつつ、太陽系サイズ程度の短距離スケールでそのスカラー自由度の効果を遮蔽する機構が必要になることがわかる。本研究では、そのような「良い」性質をもった重力理論を研究対象とする。

マイクロ波背景放射や大規模構造などに

関して、今後、さらに精細な観測成果(～パーセント精度)が期待されている。そこで、本研究計画では、定性的な解析に留まっていたこれまでの研究を発展させ、拡張重力模型の宇宙論的観測に対する予言を、定量的に正確なレベルで明らかにする。そして、拡張重力模型を宇宙論的観測と照らし合わせた際の妥当性を精査し、将来観測による検証可能性も議論する。想定している具体的観測量の一例は、マイクロ波背景放射の積分ザックス・ウォルフ効果である。積分ザックス・ウォルフ効果は、加速膨張期に重力ポテンシャルが浅くなることで生まれる2次的な温度揺らぎであり、そのためにダークエネルギーの性質を探る上で有効な観測であると考えられているからである。重力法則の変更に対し宇宙論的観測を用いたテストを行う、という本研究は、別の見方をすると、宇宙論的スケールにおける一般相対論の検証という重要な意義を持つことを強調したい。

また、そのような研究と並行して、天体物理学の視点など、多様な視点から模型の整合性・妥当性のチェックを行い、さらにはそれらのテストをパスする拡張重力模型の提案を目指す。具体的には、星などを表す静的球対称解の摂動に対する安定性の解析やダイナミカルな系からの重力波放出量の評価を計画している。これらの点は、拡張重力模型の妥当性のチェック項目としては、これまでほとんど関心が払われてこなかったという意味で独創的である。本研究が完成した暁には、このような天体物理学的観点からの研究なども、拡張重力模型の重要なテストとして認識されることが期待される。

3. 研究の方法

ガリレオン拡張重力における宇宙論的揺らぎの発展方程式を、共動ゲージのもと数値

計算コードに取り込める形で導出し、得られた方程式系にもとづいて公開コード **CAMB** を適宜修正・改良する。改良 **CAMB** を利用して、マイクロ波背景放射の温度揺らぎに対する重力の変更の効果を定量的に評価する。結果を研究協力者から得た温度揺らぎと銀河分布の相関データと比較し、観測的に許される模型を特定する。一方で、ガリレオン拡張重力における球対称解の摂動に対する安定性解析をおこない、異なる観点から模型の整合性をチェックすることで、真に生き残る模型を提示する。同様の方法を、その他の代表的な拡張重力模型に対しても適用していく。

4. 研究成果

拡張重力理論のひとつであるガリレオン理論に動機付けられた宇宙模型の研究をおこなった。ガリレオン場を初期宇宙の加速膨張、すなわちインフレーションに応用し、新しいクラスのインフレーション模型 - G-inflation - を提唱した。G-inflation における揺らぎの性質を精査し、現在の観測と無矛盾な予言を与える一方で、重力波揺らぎについては、将来観測で検出可能な程度に大きな振幅が予言されることを示した。また、スカラー場のポテンシャルが通常では許されないほど急な場合にも G-inflation を起こすことが可能であることを指摘した。その仕組みをヒッグス場によるインフレーション模型に取り入れ、通常では難しかった観測と整合的なヒッグスインフレーション模型の構築に成功した。

これとは別に、一般相対論にベクトルの重力自由度を加えるような修正を施した際に、それをどのような観測で検証できるのかを検討した。具体的には、そのような重力理論の代表例であるアインシュタイン-イーサー

理論の枠組みで、ベクトル摂動の発展方程式を数値計算に組み込みやすい形で導出し、マイクロ波背景放射の偏光 B モードのスペクトルを数値的に計算した。その結果、このような理論では通常期待される重力波起源の偏光 B モードよりも大きな振幅の B モードが生成されることが明らかになった。また、スペクトルの形から理論のパラメータに制限をつけることが可能であることを指摘した。

最も一般的なスカラー・テンソル理論における密度揺らぎの発展方程式を導出し、一般相対論におけるそれとどのような違いが現れ得るかを明らかにした。これはしたがって、スカラー-1 自由度を追加したすべての修正重力理論に適用可能な結果である。この種の理論では一般に、弱重力の近似のもとでも小スケールでは非線形効果が重要になることがある。そして、その非線形効果により小スケールで一般相対論が回復される、という効果があると言われている。そこで、前述の結果を必要な非線形効果をすべて取り入れたものに拡張する研究を続けておこなった。これにより、どのような理論においてたしかに小スケールで一般相対論が回復され、どのような理論ではそうならないのか、が明らかになった。

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] (11 件)

[1] T. Kobayashi, H. Motohashi and T. Suyama,
“Black hole perturbation in the most general scalar-tensor theory with second-order field equations I: the odd-parity sector,”
Phys. Rev. D 85, 084025 (2012)
[arXiv:1202.4893 [gr-qc]].

[2] R. Kimura, T. Kobayashi and K. Yamamoto,

“Vainshtein screening in a cosmological background in the most general second-order scalar-tensor theory,”
Phys. Rev. D 85, 024023 (2012)
[arXiv:1111.6749 [astro-ph.CO]].

[3] A. De Felice, T. Kobayashi and S. Tsujikawa,
“Effective gravitational couplings for cosmological perturbations in the most general scalar-tensor theories with second-order field equations,”
Phys. Lett. B 706, 123 (2011)
[arXiv:1108.4242 [gr-qc]].

[4] M. Nakashima and T. Kobayashi,
“The Music of the Aetherwave - B-mode Polarization in Einstein-Aether Theory,”
Phys. Rev. D 84, 084051 (2011)
[arXiv:1103.2197 [astro-ph.CO]].

[5] X. Gao, T. Kobayashi, M. Yamaguchi and J. 'i. Yokoyama,
“Primordial non-Gaussianities of gravitational waves in the most general single-field inflation model,”
Phys. Rev. Lett. 107, 211301 (2011)
[arXiv:1108.3513 [astro-ph.CO]].

[6] T. Kobayashi, M. Yamaguchi and J. 'i. Yokoyama,
“Generalized G-inflation: Inflation with the most general second-order field equations,” Prog. Theor. Phys. 126, 511 (2011) [arXiv:1105.5723 [hep-th]].

[7] Y. Misonoh, K. i. Maeda and T. Kobayashi,
“Oscillating Bianchi IX Universe in Horava-Lifshitz Gravity,” Phys. Rev. D, accepted [arXiv:1104.3978 [hep-th]].

[8] T. Kobayashi, M. Yamaguchi, J. Yokoyama,
“Primordial non-Gaussianity from G-inflation,”
Phys. Rev. D 83, 103524 (2011)
[arXiv:1103.1740 [hep-th]].

[9] K. Kamada, T. Kobayashi, M. Yamaguchi and J. Yokoyama,
“Higgs G-inflation,”
Phys. Rev. D 83, 083515 (2011)
[arXiv:1012.4238 [astro-ph.CO]].

[10] T. Kobayashi, M. Yamaguchi and J. Yokoyama,

“G-inflation: inflation driven by the Galileon field,”
Phys. Rev. Lett. 105, 231302 (2010)
[arXiv:1008.0603 [hep-th]].

[11] K. i. Maeda, Y. Misonoh and T. Kobayashi,
“Oscillating Universe in Horava-Lifshitz Gravity,”
Phys. Rev. D 82, 064024 (2010)
[arXiv:1006.2739 [hep-th]].

以上すべて査読有.

[学会発表] (計 14 件)

[1] 小林努,
“拡張された重力理論の宇宙論、高密度天体における観測可能性の研究,”
日本物理学会年次大会 (関西学院大学, 西宮市, 3 月, 2012)

[2] 小林努,
“ダークエネルギーか修正重力か,”
日本物理学会年次大会 (関西学院大学, 西宮市, 3 月, 2012)

[3] T. Kobayashi,
“Vainshtein screening in a cosmological background in the most general second-order scalar-tensor theory,”
Testing Gravity with Astrophysical and Cosmological Observations (IPMU, 柏, 1 月, 2012)

[4] T. Kobayashi,
“G-inflation and generalized G-inflation,”
The ECTP international conference on primordial QCD Matter in LHC Era (カイロ, エジプト, 12 月, 2011)

[5] T. Kobayashi,
“G-inflation and generalized G-inflation,” 日本・エジプト二国間交流事業「素粒子天体物理学でさぐる初期宇宙の進化」(Egyptian Center for Theoretical Physics, MTI University, 12 月, 2011)

[6] T. Kobayashi,
“Generalized G-inflation,” JGRG21 (東北大学, 9 月, 2011)

[7] 小林努,
“一般化されたガリレオン場とインフレーション,”
日本物理学会秋季大会 (弘前大学, 弘前市,

9 月, 2011)

[8] T. Kobayashi,
“Galileon Cosmology,”
Summer Institute 2011 (Cosmology & String)
(Seminar House “Fuji Calm”, 富士吉田, 8
月, 2011)

[9] T. Kobayashi,
“G-inflation,”
Summer Institute 2010 (Cosmology & String)
(Seminar House “Fuji Calm”, 富士吉田, 8
月, 2010)

[10] 小林努,
“Generalized Galileons and inflation,”
「第 11 回 宇宙における時空・物質・構造
の進化」研究会 ’ Dark Energy in the
Universe’ サマースクール (熊本県阿蘇郡
三愛高原ホテル, 7 月, 2011)

[11] T. Kobayashi,
“Primordial non-Gaussianity from
G-inflation,” PASCOS 2011 (ケンブリッジ
大学, イギリス, 7 月, 2011)

[12] T. Kobayashi,
“G-inflation,”
COSMO/CosPA 2010 (東京大学本郷キャンパス,
日本, 9 月-10 月, 2010)

[13] 小林努,
“Galileon scalar-tensor models of dark
energy,”
日本物理学会秋季大会 (九州工業大学戸畑
キャンパス, 北九州市, 9 月, 2010)

[14] T. Kobayashi,
“G-inflation,”
「第 10 回 宇宙における時空・物質・構造
の進化」研究会 (RESCEU 夏の学校 2010) (高
知パレスホテル/高知工科大学, 8-9 月,
2010)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小林努 (KOBAYASHI Tsutomu)

研究者番号 : 40580212

(2) 研究分担者

()

研究者番号 :

(3) 連携研究者

()

研究者番号 :