

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 4 月 25 日現在

機関番号：32665

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008～2011

課題番号：20540280

研究課題名（和文） 宇宙論的スケールでの重力理論の検証

研究課題名（英文） Testing general relativity at cosmological distances

研究代表者

千葉 剛 (CHIBA TAKESHI)

日本大学・文理学部・教授

研究者番号：40324602

研究成果の概要（和文）： 最近の天文学的観測から、現在宇宙が加速膨張していることが強く示唆されている。重力は本来引力相互作用するので、膨張速度が加速するということは何らかの引力ではない斥力源が必要であり、それをダークエネルギーと呼んでいる。このダークエネルギーの正体を明らかにすることは現代物理学における喫緊の課題のひとつである。

本研究では、運動エネルギーが小さい一般的なダークエネルギーモデルについては、宇宙定数からのずれを解析的に求めることに成功した。また、ダークエネルギーが宇宙定数かどうかをテストする方法と重力が一般相対論かどうかをテストする方法を提案した。観測データに適用し、現在の超新星や弱い重力レンズの観測からは宇宙定数や一般相対論からのからの有意なずれは見出されなかった。

研究成果の概要（英文）： We derive analytically the equation of state of slow-roll dark energy whose functional form applies to a wide class of dark energy models. We also propose two consistency tests of the cosmological constant and the general relativistic Friedmann universe. When applied to the current observational data, we find that the current cosmological data are consistent with the cosmological constant and general relativity. Future cosmological observations such as weak lensing survey and supernovae would improve the constraints.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	700,000	210,000	910,000
2009年度	700,000	210,000	910,000
2010年度	600,000	180,000	780,000
2011年度	600,000	180,000	780,000
年度			
総計	2,600,000	780,000	3,380,000

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：ダークエネルギー、重力理論

1. 研究開始当初の背景

最近の宇宙論的な観測から、正の宇宙項によって現在宇宙が加速膨張していることが強く示唆されている。一方、真空のエネルギー

はまさに宇宙項の役割を果たすが、素朴に零点振動による真空のエネルギーを見積もると観測値とは120桁以上も食い違ってしまっている（宇宙項問題）。

宇宙項問題に対しては、なんらかの相殺機構が働いているのだとする考え方に基づく研究がなされてきた。正の宇宙項の観測的示唆によって明らかになったこのアプローチの問題点は、そのような相殺機構は宇宙項を完全にゼロではなく120桁目を残す程度に調整するものではなくてはならないという点である。真空のエネルギーを正確に見積もる理論を持っていない以上、ここで視点を改めて、「宇宙項(ダークエネルギー)を導入する以外に観測を説明する手段はないのか」、すなわち「一般相対性理論はどこまで正しいのか」という疑問を呈してみるのも意義のあることだと考える。太陽系での重力の検証実験から、少なくとも 10^{13}cm のスケールでは一般相対論との違いはせいぜい0.1%以下であることがわかっている。この結果を単純にホライズンスケール(10^{28}cm)にまで外挿できるのかは本来検証すべきことである。

2. 研究の目的

ダークエネルギーのある一般相対論での膨張則と同じ膨張則はダークエネルギーのない変更された重力理論でも再現できる。したがって、宇宙の膨張則に限れば、ダークエネルギーの効果と重力理論の変更することによる効果には縮退がある。そこで本研究では、まず、(1)この縮退を解く観測量に注目し、観測から「ダークエネルギーのある一般相対論」と「ダークエネルギーのない変更された重力理論」とがどの程度の精度で峻別可能か、を将来の観測計画も視野に入れて定量的に明らかにすることを目標とする。そのために、一般相対論的宇宙論において観測量の間に成り立つ整合性関係を観測的にどの程度の精度で確認できるかを追究する。さらに、大域的なスケールで違いの現れるいくつかの重力理論について、宇宙論的な観測量の解析を行い、一般相対論との違いを評価する。最終的には、(2)「ダークエネルギーのある一般相対論的宇宙モデル」からのずれを、特定の理論に限定しない形でパラメータ化し、宇宙論的観測量からずれのパラメータに制限をあたえられるような型式(宇宙論的PPN型式)を構築することを目標とする。

3. 研究の方法

(1)一般相対論的宇宙論における整合性関係：千葉は最近、一般相対論的宇宙論において距離と密度揺らぎからとの間に成り立つ関係式を見出した。この関係式(整合性関係)は距離と密度揺らぎから決められる二つの膨張率を等値する事で導かれるものであり、(ダークエネルギーの揺らぎが無視できる状況では)ダークエネルギーの状態方程式によ

らず、どの赤方偏移においても成立するものである。したがって、この整合性関係が観測的に成り立たないなら、一般相対論が宇宙を記述する理論として有効でないということの意味する。そこで、この整合性関係が観測的にどの程度の精度で決められるのかを、将来の超新星や重力レンズの観測計画を視野に入れて、定量的に明らかにする。

(2)宇宙論的 PPN 型式の構築：重力理論ごとの、case by case の解析ではなく、さまざまな重力の修正理論への制限を宇宙論的な状況で組織的に解析するための理論的枠組み(ここでは仮に宇宙論的 PPN 型式としておく)の構築を目指したい。

4. 研究成果

(1)については、名大の杉山直教授のグループとの共同研究により、LSST計画を用いれば整合性関係を用いて一般相対性理論と他の重力理論との区別が可能であることが示された。また、宇宙定数からのずれを表すダークエネルギーの状態方程式の表式を基本理論に立ち返って導出し、これまで用いられてきたパラメトリゼーションとは異なることを明らかにした。さらに、その状態方程式を超新星の観測データに適用し、状態方程式のパラメータへの制限を与えた。その結果、現在の観測データは宇宙定数と矛盾しない、ということが明らかになった。さらには、新しいパラメトリゼーションはより広いダークエネルギーモデルについても適用できることを示した。

(2)については、scalar-tensor理論において解析し、PPNパラメータ自体は通常の場合と同じように定義でき、宇宙膨張が無視できる極限で通常PPNパラメータと一致することが確かめられたが、宇宙論的な状況ではもはやパラメータではなく時間と空間の関数となり、観測的な制限を付けるのは困難なことが明らかになった。

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] (計 13 件)
すべて査読あり

① Takeshi Chiba,
The Constancy of the Constants of Nature:
Updates,
Progress of Theoretical Physics, 126
993-1019 (2011). (invited paper)

② Daisuke Nitta, Takeshi Chiba, Naoshi

Sugiyama,
Shadows of Colliding Black Holes,
Physical Review D, 84, 063008 (2011) (4
pages).

③ Takeshi Chiba and Masahide
Yamaguchi,

Runaway Domain Wall and Space-time
Varying Alpha,
Journal of Cosmology and Astroparticle
Physics, 03 (2011) 044 (10 pages).

④ Sachiko Kuroyanagi, Takeshi Chiba,
Naoshi Sugiyama,

Prospects for Direct Detection of
Inflationary Gravitational Waves by Next
Generation Interferometric Detectors,
Physical Review D, 83, 043514 (2011) (10
pages).

⑤ Takeshi Chiba, Kohei Kamada, Shinta
Kasuya and Masahide Yamaguchi,
Fate of Thermal Log Type Q Balls,
Physical Review D, 82, 103534 (2010) (9
pages).

⑥ Takeshi Chiba, Masaru Siino,
Masahide Yamaguchi,

Slow-roll Extended Quintessence,
Physical Review D, 81, 083530 (2010) (7
pages).

⑦ Takeshi Chiba, Kohei Kamada and
Masahide Yamaguchi,

Gravitational Waves From Q-Ball
Formation,
Physical Review D, 81, 083503 (2010) (26
pages).

⑧ Takeshi Chiba,
The Equation of State of Tracker Fields,
Physical Review D, 81, 023515 (2010) (4
pages).

⑨ Takeshi Chiba and Masahide
Yamaguchi,

Extended Slow-Roll Conditions and
Primordial Fluctuations: Multiple Scalar
Fields and Generalized Gravity,
Journal of Cosmology and Astroparticle
Physics, 01 (2009) 019 (16 pages).

⑩ Takeshi Chiba and Masahide
Yamaguchi,

Extended Slow-Roll Conditions and
Rapid-Roll Conditions,
Journal of Cosmology and Astroparticle

Physics, 10 (2008) 021 (16 pages).

⑪ Takeshi Chiba,
Initial Conditions for Vector Inflation,
Journal of Cosmology and Astroparticle
Physics, 08 (2008) 004 (11 pages).

⑫ Tomotada Akutsu, Seiji Kawamura,
Atsushi Nishizawa, Koji Arai, Kazuhiro
Yamamoto, Daisuke Tatsumi, Shigeo
Nagano, Erina Nishida, Takeshi Chiba,

Ryuichi Takahashi, Naoshi Sugiyama,
Mitsuhiro Fukushima, Toshitaka
Yamazaki, Masa-Katsu Fujimoto,

Search for a Stochastic Background of
100-MHz Gravitational Waves with Laser
Interferometers,
Physical Review Letters, 101, 101101
(2008) (4 pages).

⑬ Takeshi Chiba, Tristan L. Smith and
Adrienne L. Erickcek,

Reply to "Comments on 'Solar System
constraints to general f(R) gravity'",
Physical Review D, 77, 108502 (2008) (1
page).

[学会発表] (計 15 件)

① Takeshi Chiba,

「物理定数はどこまで定数か?」, 日本物理
学会第67回年会 招待講演(2012年3月24
日).

② Takeshi Chiba,

「加速膨張する宇宙」, 日大理工学部素粒子
論研究室セミナー (2012年1月25日).

③ Takeshi Chiba,

「暗黒エネルギーをめぐって」, 第5回湯川
記念財団・木村利栄理論物理学賞受賞記念講
演、京都大学基礎物理学研究所(2012年1月
18日).

④ Takeshi Chiba,

"Constancy of the Constants of Nature:
Updates", invited talk at Summer Institute
2011 (Fujiyoshida, Japan, August 4, 2011).

⑤ Takeshi Chiba,

"Cosmology with TMT", 「TMTで切り拓
く2020年代の新しい天文学」招待講演, 国
立天文台 (2010年10月5日).

⑥ Takeshi Chiba,
"Slow-roll dark energy", invited talk at the
20th Workshop on General Relativity and
Gravitation in Japan(JGRG20), YITP,
Kyoto, Sep. 24, 2010.

⑦ Takeshi Chiba,
"The dynamics and the equation of state of
dark energy", 特定領域研究「広視野深宇宙
探査によるダークエネルギーの研究」第4回
研究会、いわき荘(2010年3月16日).

⑧ Takeshi Chiba,
"Scalar-tensor gravity and f(R) gravity",
近畿大学理工学部理学科セミナー (2010年3
月4日) .

⑨ Takeshi Chiba,
Cosmology with TMT, 光赤天連シンポジウ
ム『30m 地上超大型望遠鏡 TMT による天文学
の新展開』招待講演, 国立天文台 (2009 年
10 月 21 日) .

⑩ Takeshi Chiba,
The Equation of State of Slow-roll Dark
Energy, 新潟大学素粒子論研究室セミナー
(2009 年 7 月 23 日).

⑪ Takeshi Chiba,
The Equation of State of Slowly Rolling
Scalar Field, IPMU international
conference "Dark energy: Lighting up the
darkness!", 東大 IPMU (2009 年 6 月 23 日).

⑫ Takeshi Chiba,
Slowly-Rolling Scalar Field, 立教大学理論
物理コロキウム (2009 年 5 月 12 日) .

⑬ Takeshi Chiba,
Parametrizing w, 特定領域研究「広視野深宇
宙探査によるダークエネルギーの研究」第3
回研究会, 国立天文台 (2009 年 3 月 18 日) .

⑭ Takeshi Chiba,
Extended Slow-Roll Conditions, invited

talk at Summer Institute 2008
(Fujiyoshida, Japan, August 9, 2008).

⑮ Takeshi Chiba,
The initial conditions for vector inflation,
France-Japan Joint Workshop on the Early
Universe, 日光霧降コンベンションホール
(2008 年 5 月 15 日) .

[図書] (計 2 件)

① 千葉 剛、ニュートン別冊、「宇宙はど
うやって誕生したのか」(編集協力(第3章:74
ページ-105ページ))(2010年12月) .

② 千葉 剛、「ダークエネルギー問題」、
別冊・数理学「量子重力理論 広がる多彩
な最前線」, 179-184, (サイエンス社)
(2009年10月) .

6. 研究組織

(1) 研究代表者

千葉 剛 (Chiba Takeshi)
日本大学・文理学部・教授
研究者番号: 40324602

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし