

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25年 5月 31日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22540291

研究課題名（和文） 宇宙を舞台にした重力物理学の研究

研究課題名（英文） Research on Gravitational Physics based in a Cosmological Setting

研究代表者

前田 恵一（MAEDA KEI-ICHI）

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：70199610

研究成果の概要（和文）：宇宙における基本的最重要課題を重力物理学の観点から解析した。初期宇宙における最重要課題としては、宇宙初期特異点問題およびインフレーションの起源について、それぞれ、Horava-Lifshitz 重力理論および超ひも理論を基礎に考察した。一方、現在その存在が確実視されているダークエネルギーに関しては、主に bigravity 理論を基礎に解析し、この理論ではダークエネルギー（宇宙定数）がアトラクターとして自然に導かれることを示した。

研究成果の概要（英文）：We study most fundamental and important subjects on cosmology as gravitational physics. As for the subject on the early universe, we analyze the so called cosmological singularity problem by Horava-Lifshitz gravity theory and the origin of inflation based on superstring theory. We also study dark energy problem mainly by a bigravity theory. We find that dark energy (a cosmological constant) naturally appears as an attractor in this model.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2011年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2012年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
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・宇宙物理

キーワード：1) 重力理論 2) ダークエネルギー 3) インフレーション

4) 素粒子統一理論 5) 宇宙論

1. 研究開始当初の背景

重力というものは非常に不思議な力である。身近な存在にも関わらず、人類はまだ完全にその正体を掴んでいない。ニュートンは、地球上の物体の落下現象と天体の運動を統

一する万有引力を発見し、近代物理学を發展させた。その数世紀後に、アインシュタインは、まったく新しい重力理論（一般相対性理論）を提案した。時空の幾何学として重力というものを捉え、それまでの人類の時間や空間

に対する考えを一変させることとなった。このように重力の研究は、ことあるごとに物理学を大きく進化させてきた。そしていま、力の統一や量子重力といった超ミクロの世界と広大な宇宙という超マクロの世界の両極端で自然界は人類に大きな謎を提示し、「重力」がその「鍵」となる可能性を示している。その謎解明が、再び物理学の新しい展開に導くのではと期待される。

2. 研究の目的

宇宙物理学は、近年の観測機器の進歩および大型観測プロジェクトの展開によって精密科学となりつつある。宇宙背景放射を中心とする観測により、ビッグバン宇宙論は確固たる地位を築き、現代科学の金字塔とまでいわれている。しかしながら、それとともに新しい謎「ダークエネルギー」問題が登場した。ダークエネルギーは、宇宙全体のエネルギー密度の7割強を占める宇宙定数のような性質を持った存在で、宇宙を加速膨張させる「未知の物質」と考えられる。このダークエネルギー問題は、現在科学に対する挑戦でもあり、自然界の基本法則の根幹に関わる物理学の最重要課題の一つである。この問題解決には「重力」というものが「鍵」となると考えられ、その解明には重力に対する新しいアプローチや考え方が要求される。そこで本研究では、重力の基礎研究の第一の課題として、申請者のこれまでの研究経験や成果を生かし、ダークエネルギー問題を重力理論の観点から解析する。

一方、ミクロの世界に目を向けると、80年代に提唱された素粒子統一理論の最有力候補である超弦理論は節目ごとに大きな進展を見せ、宇宙初期やブラックホール物理学などの強重力現象研究に大きな影響を与えつつある。特に、理論は4次元を超える高次

元時空を予言し、またブレインという新しい概念は、これまでの宇宙の描像大きく変えた。Kaluza と Klein に起源を遡ることの出来る高次元時空を用いた統一理論は、通常、余分な次元を観測不可能な程度にコンパクト化することによって、現在の4次元時空を説明するが、ブレインの存在は余分な次元のサイズを比較的大きくすることを可能にし、その検証可能性を与えたことで一躍注目された。さらに、Randall と Sundrum による2つのモデルは、新しいタイプのコンパクト化を与え、特に第2モデルは、余分な次元をコンパクト化せずニュートン重力を導いたことで宇宙論学者を含め多くの科学者の注目を浴びている。また、インフレーションは宇宙の初期のシナリオとして現代では標準的な理論となりつつあるが、その要因となるインフラトンの起源は未だにわかっていない。エネルギースケールから考えてそれを明らかにするものとして素粒子統一理論が期待されるが、その際に「鍵」となるのがやはり重力である。そこで、本研究第二の課題として、素粒子統一理論を基礎に、重力物理学の観点から初期宇宙の問題の解明に取り組む。

3. 研究の方法

研究代表者は、これまで様々な重力理論を基礎にブラックホール・中性子星、宇宙初期などの強重力現象の解析を行ってきており、多くのノウハウを蓄積している。たとえば、ブレイン重力理論の研究や共形変換を用いた解析法などは多くの重力理論の解析に非常に有用で、本研究において大いに活用できる。また、学振二国間共同事業(英国)によって培った研究者間ネットワークも研究の展開に生かせる。さらに、重力物理学の世界的権威の G. Gibbons 教授 (Cambridge 大) に研究協力者をお願いしたが、彼との議論を通し

て課題解明に向けた新しい発想やアイデアの取得、情報交換、共同研究を行う。

4. 研究成果

超弦理論やその有効理論である超重力理論に基づき、ブレインを基礎にした初期宇宙モデルの解析、特に、ブレインを伴う超重力理論の厳密解の導出を精力的に行っている。まず、研究協力者の G. Gibbons 教授とともに、時間依存したブレイン解をコンパクト化し、膨張宇宙におけるブラックホール解を構成した。これまでのブレインインフレーションのモデルは、その多くが試験ブレインを摂動的に入れたもので、その正当性には疑問が残る。実際、Kodama-Uzawa (2006) によって示されたように、4次元有効理論の解はブレインの存在する高次元非一様時空の厳密解になっていない場合があり、注意深い解析が必要である。研究代表者は、上記のブラックホール解構成の経験を基礎に、ブレインの反作用を考慮した宇宙モデルの解析を行い、インフレーションの起源を素粒子基礎理論から解明しつつある。

また、超弦理論やその有効理論である超重力理論に基づき、量子効果による曲率高次項や高階微分項の影響について考察した。この量子補正項は場の再定義の不定性があり、その不定性の元でのインフレーションモデルの可能性について解析した。その結果、従来の補正項では存在しなかった加速膨張解、特に de Sitter 指数膨張解が存在しうることを示した。

一方、量子重力理論の候補として近年注目されている Horava-Lifshitz 重力理論を基礎に初期宇宙モデルを解析した。その結果、その理論には特異点を避ける傾向があり、一般相対性理論を基礎にしたビッグバン宇宙論の困難である「宇宙初期特異点問題」を解決

する可能性を持つことを明らかにした。さらに、この理論が内在すると考えられる特異点回避についての一般性を解析するため、上記のモデルを非等方 Bianchi モデルに拡張し、宇宙初期特異点回避がこの理論の普遍的な性質である事を明らかにした。

一方、ダークエネルギー問題に関しては、提案されている種々の重力理論を系統的に解析し、観測・実験との整合性を明らかにするとともに、特に本研究の後半では、近年提唱されているゴーストを伴わない massive gravity (dRGT 理論) を拡張した bi-gravity 重力理論について解析した。dRGT 理論は線形ではゴーストを含まない Fierz-Pauli massive gravity を非線型理論に拡張したもので、一般相対性理論の拡張としては自然な重力理論である。しかしながら、この理論は、平坦な FLRW 宇宙モデルが解でないなど、曲がった時空に応用する場合に問題を含んでいた。それを拡張した bigravity 理論では、2つの計量が相似的な場合、一般相対性理論に帰着され、相互作用項(質量項)が宇宙定数となり、ダークエネルギー問題を説明可能にする。本研究では、この bigravity 理論を基礎に、2つの計量が相似になる時空の安定性を解析し、ダークエネルギーがこの理論で自然に導かれるかについて調べた。主に、非等方 Bianchi 時空について解析し、そのような相似計量時空がアトラクターとして実現されることを明らかにした。

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 14 件)

- 1) Kei-ichi Maeda, Mikhail S. Volkov, Anisotropic universes in the ghost-free bigravity, Phys. Rev. D87. 104009 (2013), 査読有
- 2) Kei-ichi Maeda, Kei Yamamoto, Inflationary Dynamics with a Non-Abelian Gauge Field, Phys. Rev.

- D87. 023528(2013), 査読有
- 3) Hideki Maeda, Kei-ichi Maeda, Creation of the universe with a stealth scalar field, Phys. Rev. D86, 124045(2012), 査読有
 - 4) Kei-ichi Maeda, Kunihiro Uzawa, Dynamical brane with angles: Collision of the universes, PhysRevD. 85. 086004(2012), 査読有
 - 5) Kei-ichi Maeda, Tetsuya Shiromizu, Takahiro Tanaka, Innovation to probe higher dimensions through black holes: Introduction, Prog. Theor. Phys. Suppl. 189 (2011) 1-6, 査読有
 - 6) Kei-ichi Maeda, Nobuyoshi Ohta, Ryo Wakebe, Accelerating Universes in String Theory via Field Redefinition, Eur.Phys.J. C72, 1949 (2012), 査読有
 - 7) Kei-ichi Maeda, Nobuyoshi Ohta, Yukinori Sasagawa, AdS Black Hole Solution in Dilatonic Einstein-Gauss-Bonnet Gravity, Phys. Rev. D83. 044051 (2011)
 - 8) Masato Nozawa, Kei-ichi Maeda: Cosmological rotating black holes in five-dimensional fake supergravity, Phys.Rev. D83. 024018 (2011)
 - 9) Kei-ichi Maeda, Yosuke Misonoh, Tsutomu Kobayashi, Oscillating Universe in Horava-Lifshitz Gravity, Phys. Rev. D82. 064024 (2010)
 - 10) Kei-ichi Maeda, Masato Minamitsuji, Nobuyoshi Ohta, Kunihiro Uzawa, Dynamical p-branes with a cosmological constant, Phys. Rev. D82. 046007 (2010)
 - 11) Kei-ichi Maeda, Masato Nozawa, Black Hole in the Expanding Universe with Arbitrary Power-Law Expansion, Phys. Rev. D81, 124038 (2010)
 - 12) Kei-ichi Maeda, Nobuyoshi Ohta, Makoto Tanabe, Ryo Wakebe, Supersymmetric Intersecting Branes on the Waves, JHEP 1004, 013 (2010)
 - 13) Kei-ichi Maeda, Masato Nozawa, Black Hole in the Expanding Universe from Intersecting Branes, Phys. Rev. D81, 044017 (2010),
 - 14) Gary W. Gibbons, Kei-ichi Maeda, Black Holes in an Expanding Universe, Phys. Rev. Lett. 104, 131101 (2010)
- [学会発表] (計 13 件)
- 1) 御園生洋祐、前田恵一、*A Wormhole Black Hole in Horava-Lifshitz Gravity*, 日本物理学会、2013. 03. 29、広島大学
 - 2) Kei-ichi Maeda, *Inflation with Gauge*

- Fields*, Workshop Cosmology Montpellier12, 2012. 10. 11, Montpellier, France[招待講演]
- 3) 鶴沢報仁、前田恵一, *Dynamical brane with angles in string theory*, 日本物理学会、2012. 09. 12, Montpellier, France
 - 4) Kei-ichi Maeda, *Accelerating Universe in Effective String Theory*, Ginzburg Memorial Conference, 2012. 05. 31, Moscow, Russia[招待講演]
 - 5) Kei-ichi Maeda, *Field Redefinition and the Observed Universe*, Workshop on Testing Gravity with Astrophysics and Cosmological Observations, 2012. 01. 27, IPMU, Tokyo[招待講演]
 - 6) Kei-ichi Maeda, *Black holes in an expanding universe*, BIRS workshop on Black Holes: New Horizons, 2011. 11. 23, Banff, Canada[招待講演]
 - 7) Kei-ichi Maeda, *Anisotropic spacetime in Horava-Lifshitz gravity*, Chinese conference on gravity and cosmology, 2011. 08. 17, Shanxi, China[招待講演]
 - 8) 御園生洋祐、前田恵一、小林努、*Oscillating Bianchi IX Universe in Horava-Lifshitz Gravity*, 日本物理学会. 2011. 03. 26. 新潟大学
 - 9) Kei-ichi Maeda, *Time dependent black holes from higher dimensions*, IPMU Workshop on Black Holes, 2011. 02. 21-25, IPMU, Tokyo[招待講演]
 - 10) Kei-ichi Maeda, *Time-dependent Black Hole from Higher Dimensions*, APCTP conference on Frontiers of Black Hole Physics, 2010. 12. 14, Pohang, Korea[招待講演]
 - 11) Kei-ichi Maeda, *Dimensional Reduction*, JGRG20, 2010. 09. 23, Kyoto Japan[招待講演]
 - 12) 分部亮、前田恵一、太田信義、*Accelerating Cosmologies in Dilatonic Einstein-Gauss-Bonnet Gravity in the String Frame*, 日本物理学会. 2010. 09. 12, 九州工業大学
 - 13) 御園生洋祐、前田恵一、小林努、*Oscillating Universe in Horava-Lifshitz Gravity*, 日本物理学会. 2010. 09. 12, 九州工業大学
6. 研究組織
- (1) 研究代表者
前田恵一 (MAEDA KEI-ICHI)
早稲田大学・理工学術院・教授
研究者番号：70199610