

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 5 月 29 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2008-2011

課題番号：20740125

研究課題名（和文）弦理論に基づく宇宙論

研究課題名（英文）String Cosmology

研究代表者

向山 信治（MUKOHYAMA SHINJI）

東京大学・数物連携宇宙研究機構・特任准教授

研究者番号：40396809

研究成果の概要（和文）：

銀河や銀河団などの宇宙の豊かな構造は、量子揺らぎを種として生まれたと考えられている。そのため、初期宇宙の量子揺らぎの起源は、宇宙論における最も重要な課題の一つである。本研究では、初期宇宙の量子揺らぎの起源として主に、DBI インフレーションや共系結合を持つインフレーション、rapid-roll インフレーション等の、超弦理論に基づくインフレーションモデルを考察し、宇宙背景輻射の観測量から理論に制限を与えた。

それらとは並行して、新しい量子重力理論（Horava-Lifshitz 理論）に基づく宇宙論の研究も行なった。特に、スケール不変な量子揺らぎを生成するシナリオを提唱した。この理論は高エネルギーにおける振る舞いが良く、そのために量子重力理論の候補と考えられているが、その本質的理由は、anisotropic scaling と呼ばれる性質である。本研究で提唱したシナリオは、この anisotropic scaling のみに基づいているため、現在までに提唱された、Horava-Lifshitz 理論の 3 つのバージョン（projectable version, non-projectable extension, U(1) extension）の全てにユニバーサルなシナリオである。

また、QGP 実験の状況に双対なブラックホール時空を構成し、AdS/CFT 対応によって、輸送係数を微分展開の任意のオーダーまで決定できることを示した。この結果は、ビッグバン直後を再現するとも言われる RHIC や LHC での QGP 実験を、AdS/CFT 対応を用いて研究するのに役立つと考えられる。

研究成果の概要（英文）：

Primordial fluctuations are thought to be the origin of rich structures in the universe such as galaxies and clusters of galaxies. For this reason, generation of quantum fluctuations in the early universe is one of the most important research subjects in theoretical cosmology. In this research project, I mainly focused on inflationary scenarios in string theory such as DBI inflation, conformal inflation and rapid-roll inflation, and obtained observational constraints on them from observables in the cosmic microwave background.

Simultaneously, I studied cosmological scenarios based on a new quantum gravity theory called Horava-Lifshitz gravity. In particular, I proposed a new scenario of generation of scale-invariant primordial fluctuations. This theory is considered as a new candidate for the theory of quantum gravity because of well-controlled high-energy behavior, which stems from the property called anisotropic scaling. Since the new scenario proposed in this project is based solely on this anisotropic scaling, it can be applied to any versions of Horava-Lifshitz gravity (projectable version, non-projectable extension, U(1) extension) universally.

I also proposed a geometry dual to a situation relevant to QGP experiments, and showed that transport coefficients can be determined up to any order in derivative expansion by using the AdS/CFT correspondence. This result is expected to be important towards studies of QGP experiments at RHIC and LHC, which are thought to realize environment similar to the early universe.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2009年度	700,000	210,000	910,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

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：宇宙論、初期宇宙、インフレーション理論、超弦理論、高次元理論、統一理論、量子重力

1. 研究開始当初の背景

宇宙では、様々なスケールの物理現象が互いに影響を及ぼしながら絶えず起こっている。その中でも、最も壮大なスケールの物理を対象とするのが宇宙論であり、最も基本的な最小スケールの物理が素粒子物理そして超弦理論であると言えよう。重要なことは、ノーベル賞受賞の理論物理学者 Sheldon Glashow が著書で述べているように、この両極端の物理は繋がっている、繋がらなければならぬ、ということである (Cosmic Uroboros)。生まれたばかりの宇宙は超高エネルギーの極限状態にあるため、ミクロの物理が本質的になるからである。

実は、2002年までは弦理論的宇宙論には大きな障害があった。弦理論の枠内で加速膨張宇宙を実現しようとしても、どうしてもできなかったのである。上述の3大謎のうちの2つ、インフレーションとダークエネルギーは、宇宙の初期と末期における加速膨張そのものである。これが実現できなければ、弦理論の枠内で現実的な宇宙論を構築することは不可能だろう。それにもかかわらず、「加速膨張宇宙は実現不可能である」という内容の no go 定理まで“証明”されていて、先行きは暗かった。

幸いにも、2003年に Kachru, Kallosh, Linde, Trivedi (KKLT)の4人は、以前は考慮されていなかった非摂動効果とブレーンという要素を取り入れることで、上述の no go 定理を回避して加速膨張宇宙を超弦理論の枠内で構成することに成功した。この結果により、弦理論と宇宙論の間の深い溝は取り

除かれた。一方、それとは独立に、宇宙背景輻射を始めとする観測データの量と質の飛躍的向上により、宇宙モデルを観測と比較することが非常に精度良くできるようになってきた。

2. 研究の目的

弦理論的宇宙論は、最小スケールの物理を記述する超弦理論を用いて宇宙論の謎に迫る試みであり、近年急速に発展している分野である。本研究の目的は、超弦理論によって宇宙より深い理解を得ることである。

3. 研究の方法

基礎理論から出発して観測との比較や新しい予言を行うトップダウン方式と、観測データから背後にある普遍的法則を導き出すボトムアップ方式を、相補的に用いて研究を推進する。具体的には、「弦理論的インフレーション宇宙モデルの構築」、「Multi-throat 宇宙における再加熱の問題」、「ブレーン宇宙における重力」の三課題を並行して行う。

4. 研究成果

20年度は、(i)インフラトンが時空曲率と共形結合するモデルの予言と観測データとの比較、(ii)宇宙論的摂動の非線形発展方程式の定式化、(iii)崩壊するDブレーン上の開弦の自由度を記述する場の理論の研究、(iv)QGP実験の状況に双対なブラックホール時空の構成、等をおこなった。それぞれの研究は、以下の意義・重要性を持つ。(i)共形結合をもつブレーンインフレーションの理論を、観測か

ら制限することを可能にする。(ii)DBI インフレーション等の生じる、揺らぎの非ガウス性の発展を解析するのに有効である。(iii)ブレーンインフレーションはDブレーン・反Dブレーン対の崩壊・消滅によって終わるが、非一様に崩壊が進む状況を理解するのに役立つと期待される。(iv)ビッグバン直後を再現すると言われる RHIC や LHC での QGP 実験を、AdS/CFT 対応を用いて研究するのに役立つ。

21 年度は、(i)Rapid-roll インフレーションモデルへの観測からの制限、(ii)弦理論に基づく Curvaton モデルの提唱、(iii)フラックスコンパクト化の安定性の解析、(iv)新しい量子重力理論 (Horava-Lifshitz 理論) に基づく宇宙論についての研究、等をおこなった。それぞれの研究は、以下の意義・重要性を持つ。(i) インフラトンが比較的大きな質量を持つモデルを、観測から制限することを可能にする。(ii)CMB 等で観測されている揺らぎを生成する新しいシナリオを与える。(iii)コンパクト化の理論的整合性を解析できる。(iv)新しい理論による新しい宇宙像が得られる。

22 年度は、(i)インフレーション中の軽い場の効果の解析、(ii)Gradient expansion を用いた宇宙論的非線形摂動の解析、(iii)ブラックホールに関する余剰次元の効果、(iv)新しい量子重力理論 (Horava-Lifshitz 理論) に基づく宇宙論、(v)ゴースト凝縮に基づく宇宙論、等についての研究をおこなった。それぞれの研究は、以下の意義・重要性を持つ。(i) インフラトン以外の場が揺らぎを生成することで、観測によるモデルの制限が変更を受ける可能性がある。(ii)揺らぎの非ガウス性を解析する既存の方法 (δN formalism) の適用限界を超えて計算可能になる。(iii)ブラックホールの情報消失問題に関する新しい知見が得られる可能性がある。(iv)新しい理論による新しい宇宙像が得られる。(v)自発的ローレンツ対称性の破れについての新しい知見が得られる。

23 年度は、(i)新しい量子重力理論 (Horava-Lifshitz 理論) に基づく宇宙論、(ii)新しい massive gravity 理論に基づく宇宙論、についての研究をおこなった。(i)においては特に、gradient expansion の方法を用いて低エネルギーでの非線形揺らぎの振る舞いを調べ、一般相対性理論への極限が連続的になっていることを示した。(ii)においては、一様等方解を発見し、その周りの線形摂動を詳しく解析した。それぞれの研究は、以下の意義・重要性を持つ。(i) Horava-Lifshitz 理論に含まれるスカラー重力子の低エネルギーでの振る舞いについての知見が得られ、(少なくとも) gradient expansion の適用範囲においては) 暗黒物質の様に振る舞うことが確認できた。(ii)本研究によって発見した一様等

方解により、新しい massive gravity が宇宙の加速膨張を説明できる可能性が確認できた。

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 31 件)

1. T. Kobayashi and S. Mukohyama, "Curvatons in Warped Throats", Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, 0907(2009) 032-1~20, 査読有
2. Shunichiro Kinoshita, Shinji Mukohyama, Shin Nakamura and Kin-ya Oda, "Consistent Anti-de Sitter-Space / Conformal-Field-Theory Dual for a Time-Dependent Finite Temperature System", Physical Review Letters, 102(2009)031601-1~4, 査読有
3. Shinji Mukohyama, "Scale-invariant cosmological perturbations from Horava-Lifshitz gravity without inflation", Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, 0906 (2009) 001-0~8, 査読有
4. Shinji Mukohyama, "Dark matter as integration constant in Horava-Lifshitz gravity", Physical Review, D80 (2009) 064005-1~6, 査読有

[学会発表] (計 44 件)

1. Shinji Mukohyama, "Cosmological implications of Horava-Lifshitz gravity" (招待講演), Pre-Planckian Inflation, 2011 年 10 月 8 日, U of Minnesota, USA.
2. 向山信治, "CMB と超高エネルギー物理" (招待講演), CMB ワークショップ 2010, 2010.06.08, 国立天文台 (三鷹)
3. Shinji Mukohyama, "What is cosmology telling us about fundamental physics?" (招待講演), 16th ICEPP Symposium, 2010.02.14 - 15, 白馬 (長野)
4. Shinji Mukohyama, "Brane inflation in string cosmology" (招待講演), Quarks 2008, 2008 年 5 月 24 日, Sergiev Posad, Russia

[図書] (計 0 件)

[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

向山 信治 (MUKOHYAMA SHINJI)

東京大学・数物連携宇宙研究機構・

特任准教授

研究者番号 : 40396809

(2) 研究分担者

()

研究者番号 :

(3) 連携研究者

()

研究者番号 :