

## 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 15 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009 ～ 2011

課題番号：21740160

研究課題名（和文）素粒子理論に基づくインフレーション宇宙と密度揺らぎの研究

研究課題名（英文）Research on inflationary universe and density perturbation based on particle theory

研究代表者

高橋 史宜（TAKAHASHI FUMINOBU）

東北大学・大学院理学研究科・准教授

研究者番号：60503878

研究成果の概要（和文）：LHC における ATLAS 及び CMS 実験グループが報告した Higgs 粒子の兆候に基づき、その Higgs 質量を自然に説明する 100-1000TeV の超対称性の破れの起源について宇宙論的な観点から考察を加えた。特に、U(1)B-L ゲージ対称性におけるヒッグス粒子をインフラトンとするインフレーション模型を提唱し、超対称性の破れのスケールがインフレーションによって決定されているという極めて斬新なアイデアを提案した。

研究成果の概要（英文）：The ATLAS and CMS collaborations at the LHC experiment reported hints of a standard model Higgs boson at about 125GeV, which can be naturally explained in a supersymmetric framework with supersymmetry breaking at 100-1000TeV. I studied its cosmological implications and proposed an inflation model based on U(1)B-L gauge symmetry. In this model the inflationary scale places an upper limit on the supersymmetry breaking which explains the Higgs mass naturally.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2010 年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2011 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：数物系化学

科研費の分科・細目：原子核・素粒子・宇宙線・宇宙物理

キーワード：宇宙物理、素粒子論

## 1. 研究開始当初の背景

インフレーションは密度揺らぎの起源として WMAP 衛星等による CMB 観測から強く支持され、新しい宇宙論のパラダイムとして確立した。一方で、現状のインフレーションに対する理論的な理解は不十分と言わざるを得ない。どのようにインフレーションが生じたのか、そのダイナミクスを記述する理論は何か、如何に再加熱過程が生じて熱い宇宙が生まれたのか、など重要な疑問が未解明である。

このような疑問に答える為には、超重力理論や超ひも理論といった素粒子理論に立脚した初期宇宙シナリオを多角的に考察し、インフレーションから現在の宇宙まで首尾一貫した宇宙像を描く事が必要であり、密度揺らぎに関する研究はその中で中心的な役割を果たす事になる。

## 2. 研究の目的

WMAP 衛星に代表される宇宙背景輻射(CMB)の

温度揺らぎの精密観測によって、インフレーションという初期宇宙現象の探索が可能になった。その一方で、どのようなインフレーションが生じたのか、インフレーション後に如何なる進化を経て現在の宇宙に至ったのか等、未解明の事項が山積している。本研究の目的は、CMBの温度揺らぎ及び大規模構造の観測結果を用いて、密度揺らぎの生成機構、揺らぎの統計的性質（特に非ガウス性）及びその後の進化について明らかにし、インフレーションとその後の宇宙の熱史に対する新たな理解を得ることである。

### 3. 研究の方法

本研究は、CMB温度揺らぎの観測結果に基づき、密度揺らぎの生成機構、特に非ガウス性の生成を含めたモデルを構築し、インフレーション宇宙およびその後の宇宙進化シナリオに対する新たな知見を得る事を目的とする。この目的の遂行の為に以下にあげる次の3つのテーマに沿って研究をすすめる。

#### (1) インフレーションモデル構築とその後の宇宙進化の研究

2009年に打ち上げ予定のPlanck衛星をはじめとして、QUIET、Cloverなど様々なCMB観測実験が予定されている。それらの観測結果に合致するインフレーションモデルを絞り込む。その為に、超重力理論・超弦理論に基づくインフレーションモデルにおける密度揺らぎの詳細な計算を行い、更に新たなインフレーションモデルを構築する。その成果を基に再加熱過程、暗黒物質・バリオン非対称性の生成など初期宇宙現象を統合的に取り入れた宇宙の熱史を研究する。

#### (2) 非ガウス性を持つ密度揺らぎに関する研究

超重力理論・超弦理論に立脚した非ガウス性揺らぎの生成機構の構築。また様々な非ガウス性揺らぎ（例えば等曲率揺らぎに付随した非ガウス性）が与えるCMB温度揺らぎ、構造形成への影響、および観測結果からの制限を評価する。また具体的な生成機構に関して、そのモデルの予言能力や地上実験・観測から検証が可能かどうか検討する。特に、アクシオンなどの擬・南部ゴールドストーン粒子に付随する等曲率揺らぎの持つ非ガウス性が与えるCMB温度揺らぎへの詳細な評価を行う。

#### (3) LHCや暗黒物質の直接・間接測定結果を基に描く宇宙進化シナリオ

本研究期間に発表される新たな実験・観測結

果を基に、直ちに初期宇宙シナリオへの示唆を引き出す。LHCにおいて暗黒物質の同定には時間がかかる可能性が高いが、長寿命荷電粒子の存在については初期の段階で分かる期待される。更に、PAMELA、Fermi (GLAST)などの宇宙線観測衛星によって、暗黒物質の性質が明らかになる可能性がある。これらの観測データを基に、直ちに可能な暗黒物質候補を絞り込み、その生成過程から初期宇宙進化に対する新たな理解を得る。また、標準理論を超える物理に対する実験的示唆から、インフレーションモデルおよび熱史に対する新たな予言を引き出し、CMB観測との整合性を検証する。例えば、超重力理論におけるグラビティーノ質量が明らかになれば（たとえ正確に決定できなくても）、超対称性の破れの機構及び再加熱過程におけるグラビティーノ生成から、インフレーションモデルを相当絞り込む事が可能である。

### 4. 研究成果

新しいCMB観測結果を用いながら、これまで検証した既存のインフレーションモデルの改善すべき点を基に、統合的な宇宙熱史を実現するインフレーションモデルの構築を行った。ひとつの大きな成果は、運動項がインフレーション中に変化し、その為にインフレーション中のポテンシャルの形が大きく変化するRunning kinetic inflationモデルを提唱した点にある。このモデルではシフト対称性を複合場に要求することにより、従来知られていたカオティックインフレーションモデルから非常に幅広いモデルが容易に作れるようになった。特に、超弦理論の枠組みにおける線形ポテンシャルを持ったインフレーションモデルを4次元用重力理論の枠組みで実現できた。また、インフレーション後にポテンシャルの形が急になるという性質から、重力波が小さいスケールで成長するという特徴があり、地上および衛星による重力波観測計画での検出が期待される。更にこのモデルを応用し、標準理論および超対称性標準理論におけるヒッグス場がrunning kinetic termによってインフレーションを引き起こす可能性について検証した。これは近年注目を集めたヒッグスインフレーションとは異なる独立なモデルであり、しかもより大きな重力波を生成するため、検証が容易である。このモデルの応用性は広く、ほぼ同じダイナミクスが超弦理論においても実現されている事が分かってきた。

また、最近のCMB観測、および大規模構造の観測から、かねてより指摘されていたspectral indexのスケール依存性の存在が示唆されて

いる。このスケール依存性を説明する為に、線形ポテンシャルに周期的な補正を加えたインフレーション模型を考察し、自然に観測結果を説明できることを示した。この模型も超弦理論において自然に現れるなど、UV理論との相性がよく、近い将来に検証が可能であると考えられる。

また、ヘリウム4の観測とCMB観測から、dark radiationと呼ばれる過剰の輻射成分の存在が示唆されている。我々はこの観測結果を自然に説明する模型として、TeVスケールで破れたU(1)ゲージ対称性とカイラルフェルミオンの存在を提唱した。この模型の具体的な実現として、E6 GUT模型に含まれるB-Lとは独立のU(1)ゲージ対称性を考え、E6の27表現の中に、暗黒輻射の候補となるカイラルフェルミオンが確かに存在することを示した。面白いことに、このような宇宙観測を自然に説明する模型がLHCなどで検証可能なTeVスケールの物理を予言し、近い将来にその検証が待たれる。

LHCにおけるATLAS及びCMS実験グループが素粒子標準理論におけるヒッグス粒子の兆候から宇宙論的な応用を考察した。ヒッグス粒子は、標準模型におけるクォークやレプトンの質量の起源を説明する。具体的にはSU(2) $\times$ U(1)ゲージ対称性の自発的破れを引き起こし、その結果としてヒッグス場は有限の期待値を持つ。この期待値が質量の起源である。ATLAS/CMS両グループの報告したHiggs粒子の兆候から、その質量がおおよそ125GeV程度であると考えられる。この比較的軽いヒッグス粒子は超対称性の存在を強く示唆する。特に、従来積極的に調べられてきた100GeV-1TeV程度のスケールではなく、10TeV-PeVのスケールに超対称性、すなわち超対称性粒子が存在するものと期待される。この観測に基づき、Higgs質量を自然に説明する100-1000TeVの超対称性の破れの起源について宇宙論的な観点から考察を加えた。特に、U(1)B-Lゲージ対称性におけるヒッグス粒子をインフラトンとするインフレーション模型を提唱し、超対称性の破れのスケールがインフレーションによって決定されているという極めて斬新なアイデアを提案した。また、ヘリウム4や宇宙背景輻射、大規模構造の観測から暗黒輻射の存在が一層確からしくなったことをうけ、アクシオンが暗黒輻射となる模型について詳細に調べた。この模型は、前述の重い超対称性の破れのスケールが実現した場合であっても、比較的軽い超対

称性粒子(Higgsino)がいることを予言するため、LHC実験という観点からも非常に興味深い。更に、密度揺らぎ生成機構のひとつであるmodulated reheatingにおけるモジュライが暗黒輻射となる模型を提唱し、観測的制限を求めた。また、モジュライ問題を解決するひとつの方法である、Adiabatic suppression機構に関して、詳細な検討を行い、従来知られていなかった新たなモジュライの寄与が有ることを明らかにした。それが与えるインフレーション模型への制限を調べ、近い将来の宇宙背景輻射観測からの検証可能性について論じた。

#### 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 28 件)

1. Kazunori Nakayama and Fuminobu Takahashi, "Low-scale Supersymmetry from Inflation", JCAP 1110:033, 2011年(査読有り)
2. Masahiro Kawasaki, Takeshi Kobayashi, and Fuminobu Takahashi, "Non-Gaussianity from Curvatons Revisited", JCAP 1101:026, 2011年(査読有り)
3. Kazunori Nakayama, Fuminobu Takahashi, Tsutomu Yanagida, "A theory of extra radiation in the Universe", Phys. Lett. B 697:275-279, 2011年(査読有り)
4. Alexander Kusenko, Fuminobu Takahashi, Tsutomu Yanagida, "Dark matter from Split Seesaw", Phys. Lett. B 693:144-148, 2010年(査読有り)
5. Fuminobu Takahashi, "Linear Inflation from Running Kinetic Term in Supergravity", Phys. Lett. B 693L 140-143, 2010年(査読有り)
6. Chuan-Ren Chen, Sourav Mandal, and Fuminobu Takahashi, "Gamma-ray Constraints on Hadronic and Leptonic Activities of Decaying Dark Matter", JCAP 1001:023, 2010年(査読有り)

[学会発表] (計 3 件)

1. 高橋史宜, 「インフレーションの再加熱過程における非熱的グラビティーノ問題の発見」、日本物理学会、2011年9月17日、弘前大学
2. 高橋史宜, "Dark matter from Split Seesaw", 日本物理学会、2010年9月13

- 日、九工大
3. 高橋史宜、「グラビティーノ問題とその後の発展」、日本物理学会、2009年9月13日、甲南大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高橋 史宜 (TAKAHASHI FUMINOBU)  
東北大学・大学院理学研究科・准教授  
研究者番号：60503878

(2) 研究分担者

( )

研究者番号：

(3) 連携研究者

( )

研究者番号：