

令和 5 年 6 月 30 日現在

機関番号：52301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2022

課題番号：16K17712

研究課題名（和文）微分重力結合した素粒子模型とインフレーション宇宙の融合的研究

研究課題名（英文）Inflationary universe in the elementary particle models derivatively coupled with gravity

研究代表者

渡邊 悠貴（Watanabe, Yuki）

群馬工業高等専門学校・一般教科（自然）・准教授

研究者番号：80644731

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000 円

研究成果の概要（和文）：本研究は一般相対論をより一般的な重力理論に拡張することにより、素粒子標準模型がインフレーション宇宙とどこまで整合性を保って記述されるかを、時空のゆらぎとその統計性を用いて定量的に解明した。宇宙マイクロ波背景放射などの詳細な観測結果との比較により、インフレーション宇宙理論のミクロな素粒子的描像の解明に迫った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果により、初期宇宙において、ヒッグス粒子がどのような役割を果たしうるか、インフレーションの起源となるエネルギーの正体、粒子と熱の創成過程を解明する新しい手がかりを得た。さらに、暗黒物質の生成起源を説明する可能性についても新たな知見を得た。

研究成果の概要（英文）：By extending general relativity to a more general theory of gravity, this study quantitatively clarifies to what extent the Standard Model of elementary particles can be described in a consistent manner with the inflationary universe, using space-time fluctuations and their statistical properties. Comparison with detailed observations of the cosmic microwave background radiation and other data provides a microscopic particle picture of the inflationary cosmology.

研究分野：宇宙物理（理論）

キーワード：インフレーション宇宙論

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 時空の量子的ゆらぎは宇宙の構造の種：宇宙には星や銀河・銀河団など、階層的な構造が存在することが知られている。ビッグバン宇宙論のもとでは、宇宙が熱く小さな状態から始まり、一般相対論に統括される万有引力により、次第に速度を緩めながら膨張して現在に至った。では、このような宇宙の構造はどこから来たのだろうか？宇宙が誕生した頃、宇宙を満たす物質の密度に僅かなゆらぎがあり、そのゆらぎが万有引力により成長して構造を成すように、適切な初期条件を必要とする。この問いに対して、1980年代に提唱されたインフレーション理論は、宇宙初期の時空の量子的ゆらぎが、急激な加速膨張期(インフレーション)により引き延ばされて密度ゆらぎへと転化し、宇宙の構造の種となることを予言する。現在、138億年前の熱かった時代の名残である宇宙マイクロ波背景放射(CMB)の詳細な観測により、インフレーション理論の予言は支持されている。

しかし、宇宙論の最終的な目標は、宇宙の創生から現在までの進化を統一的に明らかにすることにある。また宇宙が何でできているのかも明らかにする必要がある。

CMBの温度ゆらぎは、時空の量子的ゆらぎが起源のためガウス統計に従うと期待されている。しかし同時に、インフレーションを引き起こすスカラー場(インフラトン)は他の場と相互作用するため、非ガウス性の統計量も微小ながら出てくる。この非ガウス性ゆらぎは個々のインフレーションモデルを選別する上で、非常に重要な役割を果たす。複数のスカラー場がインフレーションを引き起こした場合の非ガウス性ゆらぎの進化を、摂動的・非摂動的に計算する手法が確立されている。本研究はこれを、一般相対論を内包するより一般的な重力理論の枠組みで捉え直し、より根源的な重力相互作用と素粒子自由度への手がかりを探る。既に、単一場インフラトンが曲率テンソルと微分結合するモデルにおいて、時空のゆらぎとその統計性を詳細に計算し、一般相対論では不可能であったヒッグス場やアクシオン場がインフラトンの役割を果たせることが示されている。これは我々の知る物質の起源への重大な手がかりとなる。

(2) 粒子と熱の創生：インフレーション直後の宇宙はまだインフラトンのエネルギーに支配されており、粒子密度は非常に希薄である。これが何らかの機構によって熱に転化されて、熱いビッグバン宇宙が生まれる。この現象は場の量子論的に取り扱われ、インフラトンから粒子への崩壊率がビッグバン宇宙の温度を決定する。このとき取り得るエネルギースケールは素粒子モデルを同定しなければ、 $10\text{ MeV} \sim 10^{14}\text{ GeV}$ と幅がある。なぜなら、インフラトン場そのものが未知であるし、素粒子との相互作用も未知だからだ。

## 2. 研究の目的

本研究では宇宙初期に一般相対論が変更される可能性を追求する。近年、曲率テンソルとスカラー場が特別な形で微分結合した重力理論が、世界的に再注目を集めている。4次元ではホルンデスキーが1970年代にすでに同等な理論を発見していたが、当時は宇宙論に応用されなかった。この理論では場の方程式を導くに際し、高階微分の項がうまく打ち消し合い2階の微分方程式を与えるので、物理的自由度を増やさない。これは素粒子の自由度を同定する上で、重要な性質である。かつ、一般相対論の特性でもある任意の一般座標共変性を留める。本研究では、スカラー場以外の素粒子も含め全ての場が非ミニマル微分結合した重力理論の枠組みの中で、これまで取り扱われなかった量子補正効果を取り入れて、無矛盾に標準模型ヒッグス場が宇宙論的に果たし得る役割を解明する。具体的には以下の3つのサブテーマを設定する。

- (1) モデルの構築：非ミニマル微分結合型の重力理論・素粒子標準模型におけるインフレーション・再加熱モデルの構築をする。暗黒物質とバリオン数の生成など宇宙論的に必要があれば、素粒子モデルも最小限度に拡張する。
- (2) 量子補正効果の検証：同モデルにおける量子補正効果の定量的検証を行い、インフレーションモデルとして一貫性があるかチェックする。
- (3) 観測への予言：同モデルから生成される時空ゆらぎ、その非ガウス統計性を解析して、観測への理論的予言を与える。特にヒッグス場やアクシオン場がインフラトンになり得るか、観測データを説明する曲率ゆらぎを生成できるかという点を解明する。

## 3. 研究の方法

本研究ではヒッグス場のみならず、全ての素粒子が高エネルギー領域で重力と非ミニマルに結合し、場の方程式が2階までの微分方程式で与えられる一般的な理論を構築する。それらの自由度を素粒子標準模型と同定し、観測と無矛盾なインフレーション・再加熱モデルが構築可能か検証する。もし自由度を拡張する必要があるときには、それらが宇宙論的にどのような役割を果たす

か明確にする。特に、暗黒物質は素粒子標準模型の中に存在しないので、再加熱時に熱的・非熱的に生成される機構を明らかにし、密度ゆらぎと統計性の分析から観測に対し定量的な予言を与える。一方、非自明な重力背景下でこの理論が持つ、興味深い現象論的性質も同時に探求して行く。

- (1) 非ガウス性ゆらぎの計算には in-in formalism, N formalism などを使用する。
- (2) 非ミニマル重力結合のパラメータを密度揺らぎと重力波の振幅・スケール依存性・非ガウス統計性から決定する。
- (3) 構築した模型から生成される時空ゆらぎ、その非ガウス統計性を解析して、観測への理論的予言を与える。
- (4) プランク衛星などの公開観測データとの比較を行う。
- (5) 将来的な始原重力波観測への理論的な予言なども行う。

#### 4. 研究成果

(1) スカラー場が曲率テンソルと非ミニマルに様々な形で結合し、場の方程式において高階の項がうまく打ち消しあい、かつ一般共変性を損なわない重力理論において、多様なインフレーション模型が構築できることが先行研究により示されている。このような可能性により例えば、素粒子標準模型のヒッグス場が非ミニマルな重力結合を持つことによりインフレーションを起こす場の役割を果たすことが期待される。同時に非ミニマルな重力結合の関数自由度が大きいため、理論模型の峻別が必要である。

本研究では当該模型のインフレーション後のスカラー場振動期において、曲率ゆらぎの時間発展を解析した。この結果、ミニマル結合した重力理論（一般相対論）におけるインフレーション模型と異なり、ニュートンポテンシャルが超ホライズンスケールで非常に大きな値に成長する可能性があることが示された。もし非常に大きな値になりその影響が放射優勢期まで残れば、線型摂動解析が破綻し、宇宙マイクロ波背景放射の観測値に対する理論予言が非常に困難になる。またそのようなクラスのインフレーション模型は宇宙観測と整合性が取れないため、支持されないということになる。この成果により微分重力結合したインフレーション模型の峻別がある程度可能になったと言える。

(2) 原始元素合成より前の宇宙の熱的進化史は素粒子標準模型を超える物理(BSM)の法則により左右される。しかし、観測的にはこれまであまり制限されてこなかった。現在と将来の宇宙マイクロ波背景放射(CMB)の精密観測により、原始元素合成より前の時代の重要な情報を得ることができる。これを用いることで異なる BSM 理論による宇宙論的予言をテストすることができる。有力な BSM 理論の一つである超対称性に基づいた重力理論は超重力理論と呼ばれている。超重力インフレーション模型では、宇宙の再加熱温度やエントロピー生成の制限から異なる対称性の破れの機構が異なる宇宙進化史を辿ることが期待される。

本研究では超対称性とインフレーション後に非熱平衡の時期を仮定し、異なった宇宙進化史による CMB 観測量への影響を一般的に定式化・定量化した。次にニュートラリーノやグラビティーノを暗黒物質として仮定し、テラ電子ボルトスケールで超対称性の破れる機構を採用した場合について分析した。高階微分を含む超重力理論において、統一的に暗黒物質の存在量と CMB 観測量である曲率揺らぎと重力波揺らぎのスペクトルを定量的に求めた。この成果により高階微分を含む超重力理論におけるインフレーション模型がある程度峻別され、高エネルギー実験による暗黒物質の探索と相補的な情報をもたらす。最終的にはインフレーションを起こす場の正体のみならず、暗黒物質の正体と物質の起源に迫ることが期待される。

(3) インフレーション宇宙において、非可換ゲージ場が非自明な一様平方解を持ち得ることが知られている。このような非可換ゲージ場が存在しアクシオン場と相互作用する宇宙では、インフレーション中にスピン 2 を持つ揺らぎが生成される。このスピン 2 の揺らぎは重力波揺らぎに転換され、宇宙背景放射の B モード偏光成分として将来的に観測もしくはその存在が制限されることが期待される。

本研究では、インフレーション宇宙に存在し得る非可換ゲージ場を素粒子標準模型の  $SU(3) \times SU(2)$  非可換ゲージ場として仮定し、強い相互作用の CP 対称性がアクシオン場の存在により保たれるようなモデルを構築した。アクシオン場がインフレーション中にポテンシャル項を持つためには、上述の非可換ゲージ場に加えて高エネルギー領域で強結合する隠された非可換ゲージ場とその場と結合するフェルミオン場を導入する必要がある。新たに導入したフェルミオン場の数と性質により、生成される宇宙論的揺らぎのスペクトルが変化することを定量的に明らかにした。

この成果により、インフレーション宇宙における素粒子像に新たな光が当てられ、従来想定されてきたものより重いアクシオン場が暗黒物質となる可能性について観測的な制限が加わるようになった。宇宙背景放射の B モード偏光成分の観測は、今後 10 年で飛躍的に進むことが期待されており、さらなる理論模型との比較検討によりインフレーション宇宙像の解明に繋がることを期待される。

(4) インフレーション宇宙に一様等方な非可換ゲージ場が存在すると仮定し、シフト対称性を持つスカラー場(アクシオン)の低エネルギー有効理論を考えた。このような理論においてアクシオン場が高階の微分結合を持つことにより、ポテンシャル項に依らずインフレーションを起こすことができるモデルを構築した。このモデルにおいて、アクシオン場と非可換ゲージ場の相互作用を通して重力波揺らぎが急激に生成されることを定量的に示した。この重力波揺らぎは一方のヘリシティ成分がもう一方と非対称に成長し、かつ非ガウス統計性を持つことを定量的に示した。同時に生成される曲率揺らぎのスペクトルとの割合に対する下限値が0.5%であることを明らかにした。また、これまで無視できる程度の寄与しかしないと考えられていた重力チャー・サイモン相互作用が、この重力波揺らぎに寄与する効果を定量的に示した。

この成果により、インフレーション宇宙における素粒子像に新たな光が当てられ、素粒子標準模型の非可換ゲージ場もしくは標準模型を超える枠組みの非可換ゲージ場が初期宇宙に果たし得る役割が明らかにされた。宇宙マイクロ波背景放射のBモード偏光成分の観測は、今後10年で飛躍的に進むことが期待されており、本研究で構築したモデルの预言値を検証することができる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 3件／うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Leila Mirzaghali, Eiichiro Komatsu, Kaloian D. Lozanov, Yuki Watanabe	4. 巻 2006
2. 論文標題 Effects of Gravitational Chern-Simons during Axion-SU(2) Inflation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 0-14
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1475-7516/2020/06/024	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Dalianis Ioannis, Watanabe Yuki	4. 巻 1802
2. 論文標題 Probing the BSM physics with CMB precision cosmology: an application to supersymmetry	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 0-47
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/JHEP02(2018)118	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Cristiano Germani, Nina Kudryashova and Yuki Watanabe	4. 巻 1608
2. 論文標題 On post-inflation validity of perturbation theory in Horndeski scalar-tensor models	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 0-15
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1475-7516/2016/08/015	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計17件（うち招待講演 0件／うち国際学会 14件）

1. 発表者名 Yuki Watanabe	
2. 発表標題 Gravitational Wave from Axion-SU(2) Gauge Fields in Kinetically Driven Inflation	
3. 学会等名 The 13th RESCEU International Symposium JGRG31 Workshop（国際学会）	
4. 発表年 2022年	

1 . 発表者名 Yuki Watanabe
2 . 発表標題 Gravitational waves from axion-SU(2) gauge fields: Kinetically driven inflation
3 . 学会等名 Zooming in on Axions in the Early Universe, CERN ( 国際学会 )
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 Yuki Watanabe, Eiichiro Komatsu, Kaloian D. Lozanov, Leila Mirzagholi
2 . 発表標題 Primordial gravitational waves from axion-SU(2) gauge fields
3 . 学会等名 JGRG workshop 2020 ( 国際学会 )
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 渡邊悠貴、小松英一郎
2 . 発表標題 アクシオン-SU(2)ゲージ場によるインフレーションからの原始重力波
3 . 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 Yuki Watanabe
2 . 発表標題 Role of QCD axion in an inflationary universe with non-Abelian gauge fields
3 . 学会等名 The 23rd Annual International Conference on Particle Physics and Cosmology, COSMO 2019 ( 国際学会 )
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Yuki Watanabe
2 . 発表標題 Signals from non-Abelian gauge fields coupled to axion during inflation
3 . 学会等名 Workshop on the non-Gaussian Universe ( 国際学会 )
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Yuki Watanabe
2 . 発表標題 Axion kinetic inflation with non-Abelian gauge fields
3 . 学会等名 B-mode from Space ( 国際学会 )
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Yuki Watanabe
2 . 発表標題 Gravitational waves from axion-SU(2) gauge fields: Kinetically driven inflation
3 . 学会等名 MPA Institute seminar
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 Yuki Watanabe
2 . 発表標題 Probing the Starobinsky R2 inflation with CMB precision cosmology
3 . 学会等名 Essential next steps for gravity and cosmology ( 国際学会 )
4 . 発表年 2018年

1. 発表者名 Yuki Watanabe
2. 発表標題 Probing the Starobinsky R2 inflation with CMB precision cosmology
3. 学会等名 International Conference on Modified Gravity, MOGRA 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yuki Watanabe
2. 発表標題 Probing the Starobinsky R2 inflation with CMB precision cosmology
3. 学会等名 The 22nd Annual International Conference on Particle Physics and Cosmology, COSMO-18 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yuki Watanabe
2. 発表標題 Probing the Starobinsky R2 inflation with CMB precision cosmology
3. 学会等名 The 28th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan, JGRG28 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yuki Watanabe
2. 発表標題 Probing the BSM physics with CMB precision cosmology: an application to supersymmetry
3. 学会等名 新学術領域「加速宇宙」シンポジウム (国際学会)
4. 発表年 2018年



1. 発表者名 Yuki Watanabe
2. 発表標題 Cosmological Perturbations during the Oscillation Phase in Horndeski Gravity Theories
3. 学会等名 CosPA 2017, International Symposium on Cosmology and Particle Astrophysics (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yuki Watanabe
2. 発表標題 On post-inflation validity of perturbation theory in Horndeski scalar-tensor models
3. 学会等名 APCosPA-Planet2 RESCEU summer school (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 渡邉悠貴
2. 発表標題 拡張重力インフレーション後の振動期における摂動論の有効性について
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Yuki Watanabe
2. 発表標題 Post-inflationary evolution of cosmological perturbations in Horndeski scalar-tensor models
3. 学会等名 The 26th workshop on general relativity and gravitation in Japan (JGRG26) (国際学会)
4. 発表年 2016年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
ドイツ	Max Planck Institute for Astrophysics			
スペイン	Universitat de Barcelona			
ギリシャ	National Technical University of Athens			
ドイツ	Ludwig-Maximilians-University			