

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 5 月 21 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26400239

研究課題名(和文)最新の精密宇宙観測及び素粒子理論に基づくインフレーションの研究

研究課題名(英文)Study of inflationary universe

研究代表者

諸井 健夫 (Moroi, Takeo)

東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・教授

研究者番号：60322997

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題においては、最新の精密宇宙観測及び素粒子理論に基づき、インフレーション宇宙に関する研究を行った。大きな研究成果としては、「ビッグバン元素合成に基づく標準模型を超える物理の研究」および「電弱真空の安定性に関する研究」があげられる。前者については、川崎雅弘氏および郡和範氏と共同研究を行い、長寿命粒子の性質に関する制限を得た。また、後者に関しては、遠藤基氏、野尻美穂子氏、庄司祐太郎氏とともに、不安定な真空の崩壊の崩壊率のゲージ不変な計算方法を確立した。さらにそれを用いて、庄司祐太郎氏および千草颯氏(東京大学)とともに、素粒子標準模型における電弱真空の崩壊率を高い精度で計算した。

研究成果の概要(英文)：In this project, inflationary universe has been studied based on most recent precise observation of our universe. In particular, the most important progresses are (1) the study of the beyond-the-standard-model (BSM) physics based on big-bang nucleosynthesis (BBN), and (2) the study of metastable vacuum.

For the BBN constraints on the BSM physics, constraints on the properties of long-lived particles have been derived in order not to spoil the success of the BBN scenario. In addition, upper bound on the reheating temperature after inflation has been derived in order not to overproduce gravitino in supersymmetric model.

For the decay rate of the metastable vacuum, a gauge invariant formulation of the calculation of the decay rate, which has not been known before, has been proposed. Then, such a formulation has been applied to the calculation of the decay rate of the electroweak vacuum in the standard model.

研究分野：素粒子理論

キーワード：素粒子論的宇宙論 インフレーション 真空崩壊

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

近年の精密宇宙観測は、宇宙初期のインフレーション時期の存在を極めて強く示唆している。COBE、WMAP等の過去の宇宙背景放射観測、及び他の精密宇宙観測は、現在の宇宙の密度揺らぎが(ほぼ)スケール不変、かつ断熱的な揺らぎに起因することを明らかにした。さらに最近、PLANCK実験はこのことを極めて高い精度で検証した。スケール不変、かつ断熱的な揺らぎはインフレーションによって生成される揺らぎの大きな特徴であるため、密度揺らぎの種が宇宙初期に起きたインフレーションによって作られたことは極めて強くサポートされている。近い将来の宇宙観測実験などにより、インフレーションモデルに対し、さらなる情報が得られることが期待される。

以上から、インフレーションに始まる宇宙の進化に関する多角的な考察を行うことは急務であると言える。インフレーションを素粒子標準模型の枠内で引き起こすことは不可能であり、その詳細はまだ理解されていない。従って、近年の観測的・実験的成果を基にインフレーションに関する理解を深め、それに基づいて宇宙進化を理解することは、現在の素粒子物理学・宇宙物理学分野において極めて重要な課題である。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、精密宇宙観測を基に宇宙初期に起きたと考えられるインフレーションについて考察し、その結果を用いて宇宙モデルを構築することにある。さらに、素粒子論的観点から、素粒子標準模型を超える物理の中にインフレーションがどのように埋め込まれ得るかを明らかにする。特に超対称模型におけるグラビティーノ(重力子の超対称パートナー)がビッグバン元素合成に与える影響を調べることで、インフレーション後の宇宙再加熱温度の上限が与えられるが、本研究においてはその精密な計算を行う。

### 3. 研究の方法

本計画ではまず、グラビティーノ崩壊がビッグバン元素合成で生成される軽元素量に与える影響を詳細に理解し、その結果を用いてインフレーション後の宇宙再加熱温度の上限を求める。このためには数値計算の手法が必要となるが、そのためのプログラムは過去に行った研究で得られたものをベースとする。近年の核子反応の断面積データの蓄積によりデータが入手可能となっている反応があるため、それらを考慮し、より精密な軽元素量の計算を行う。その結果を最新の軽元素量観測の結果と比較するこ

とで、宇宙初期に存在し得る長寿命粒子の量の上限を求める。さらにその結果を超対称模型に応用し、特に宇宙初期に作られたグラビティーノ(重力子の超対称パートナー)が軽元素量に与える影響を調べる。グラビティーノが宇宙初期に生成される量はインフレーション後の宇宙再加熱温度に(ほぼ)比例することを用い、宇宙再加熱温度の上限を求める。

また、インフレーションシナリオの大きな予言として、インフレーション中の重力波生成があげられる。この性質の詳細な理解は、インフレーションのダイナミクスおよびインフレーション後の宇宙進化それぞれの理解にとって重要である。本研究では、インフレーション中に生成された重力波のスペクトルがインフレーションのモデルやインフレーション後の宇宙進化にどのように依存するかを定量的に議論する。

### 4. 研究成果

平成26年度はまず、インフレーション起源の重力波についての研究を行った。インフレーション中には重力場の揺らぎとして重力波生成が起こる。この重力波のスペクトルは、DECIGOなど将来の衛星重力波探査実験により測定される可能性がある。インフレーション起源の重力波のスペクトルには、インフレーションを起こすスカラー場のポテンシャルの構造やインフレーション後の宇宙再加熱温度などに関するさまざまな情報が含まれる。本研究においては、将来の衛星重力波探査実験により、それらについて、どの程度の情報を得られるかを定量的に見積もった。そして、重力波スペクトルのスペクトル指数や宇宙再加熱温度がどの程度の精度で決定できるかを明らかにした。また、高エネルギー宇宙線ニュートリノの起源についても研究を行った。近年、IceCube実験はPeV程度のエネルギーを持つ宇宙線ニュートリノを観測した。しかしその起源については未だ理解されていない。本研究では、PeVよりもきわめて重い長寿命粒子が過去にニュートリノに崩壊した場合、エネルギーの赤方偏移の効果によって、それが現在のエネルギーがPeV程度のニュートリノの起源となり得ることを明らかにするとともに、そのようなシナリオに対し元素合成や宇宙背景放射のスペクトルからどのような制限が与えられるかも明らかにした。さらに、宇宙初期の熱浴中でのスカラー場のダイナミクスについても研究を行った。本研究では特に、Peccei-Quinn対称性を持つ模型に現れるアクシオン場とその動径方向自由度(サクシオン場)について、熱浴の効果まで含めて宇宙初期の発展を考察した。そして、熱的散逸の効果により、これまで考えられていたよりもサクシオン場の運動が早く停止する可能性があることを明らかにした。

平成27年度は、ビッグバン軽元素合成を基に暗黒物質の対消滅断面積に対して制限を与えることに成功した。この研究においては、(1)暗黒物質対消滅から生じる反粒子の効果まで含めてビッグバン元素合成で生成される軽元素量を計算する数値計算コードを作成し、(2)その結果を最新の軽元素量の観測結果と比較することで暗黒物質の様々なモードの対消滅断面積に対し上限を得ている。上記2点は、過去の研究と比べて結果の信頼度を大幅に向上させるものであり、この計算が完成したことの意味は大きい。また、別の成果として、不安定な真空の崩壊率に関する研究を行った。不安定な真空は多くの素粒子模型に現れるため、我々の住んでいる真空が現在まで崩壊することなく持続できるかを考察するにあたってはその崩壊率の正確な理解が重要となる。本研究においては、特に真空の崩壊率に対するループ効果を正確に取り入れる数値計算コードを開発し、ループ効果を正しく取り入れていない計算と比べて、真空の崩壊率のスケール依存性が格段に小さくなることを確認した。さらに、開発したコードを用いて超対称素粒子模型における不安定な真空の崩壊率を計算し、これまでよりも高精度かつ信頼度の高い制限を導くことに成功した。

平成28年度はまず、高エネルギー宇宙線ニュートリノの起源についての研究を行った。IceCube 実験は PeV スケールのエネルギーを持つ高エネルギー宇宙線ニュートリノを観測しているが、その起源についてはまだ理解されていない。本研究においては、過去の宇宙において崩壊した粒子から放出されたニュートリノが PeV 宇宙線ニュートリノの起源となる可能性について研究した。とくに Peccei-Quinn 機構と呼ばれる強い CP 問題の解となる機構に付随する重たいフェルミオンの崩壊が PeV 宇宙線ニュートリノの起源となり得ることを定量的計算により明らかにした。また、連続群で記述されるフレーバー対称性が存在する場合、その自発的破れに伴う南部・ゴールドストーンボソンは、強い CP 問題を解決する axion として振る舞うことを指摘した。さらに、そのような模型における宇宙論を議論した。特に、フレーバー対称性を破るスカラー粒子がインフレーションを引き起こすという役割を果たし得ることを明らかにするとともに、その場合通常の axion 模型に存在する宇宙初期ドメインウォール生成の問題が解決され得ることを指摘した。さらに、そのようなシナリオにおける axion の物理とフレーバーの物理の関連についても明らかにした。

平成29年度は真空の安定性に関する研究、並びに素粒子標準模型を超える物理がビッグバン元素合成に与える影響に関する研究を行った。真空の安定性に関する研究においてはまず、特にゲージ対称性を持つ模型における真空の崩壊率計算の正しい定式化を行った。ゲージ対称性がある模型においては、真空の

崩壊率に対する複写補正の効果の計算に際し、対称性に付随したゼロモードが現れることは知られていたが、その効果をゲージ不変に取り入れる手法についてはこれまで理解されていなかった。本研究ではゼロモードの効果をゲージ不変に取り入れることのできる定式化を完成させた。さらにそこで得られた結果を素粒子標準模型の電弱真空の崩壊率の計算に応用し、素粒子標準模型の電弱真空の崩壊率を高い信頼度で計算することに成功した。また、素粒子標準模型を超える物理がビッグバン元素合成に与える影響に関しては、特に長寿命の粒子が存在する場合、その宇宙初期における崩壊がビッグバン元素合成で生成された軽元素量に与える影響を定量的に解析した。この研究においては、長寿命粒子の崩壊から生じる高エネルギー粒子が軽元素を壊す効果まで取り入れたボルツマン方程式を数値的に解いて軽元素量を高い信頼度で計算し、その結果を軽元素量に関する最新の観測結果と比較することで、長寿命粒子の性質に関する制限を得ることに成功した。さらにその解析をグラビティーノ（超対称模型における重力子の超対称パートナー）に応用し、宇宙初期にグラビティーノが作られすぎないという制限から、インフレーション後の宇宙再加熱温度の上限を得ることに成功した。

## 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25件）

以下、全て査読あり。

[1] M. Kawasaki, K. Kohri, T. Moroi and Y. Takaesu, “Revisiting Big-Bang Nucleosynthesis Constraints on Long-Lived Decaying Particles,” *Phys. Rev. D* 97 (2018) no.2, 023502.

DOI: [10.1103/PhysRevD.97.023502](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.97.023502)

[2] S. Chigusa, T. Moroi and Y. Shoji, “State-of-the-Art Calculation of the Decay Rate of Electroweak Vacuum in the Standard Model,” *Phys. Rev. Lett.* 119 (2017) no.21, 211801.

DOI: [10.1103/PhysRevLett.119.211801](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.119.211801)

[3] M. Endo, T. Moroi, M. M. Nojiri and Y. Shoji, “False Vacuum Decay in Gauge Theory,” *JHEP* 1711 (2017) 074.

DOI: [10.1007/JHEP11\(2017\)074](https://doi.org/10.1007/JHEP11(2017)074)

[4] M. Endo, T. Moroi, M. M. Nojiri and Y. Shoji, “On the Gauge Invariance of the Decay Rate of False Vacuum,” *Phys. Lett. B* 771 (2017) 281.

DOI: [10.1016/j.physletb.2017.05.057](https://doi.org/10.1016/j.physletb.2017.05.057)

[5] Y. Ema, K. Hamaguchi, T. Moroi and K. Nakayama, “Flaxion: a minimal extension to solve puzzles in the standard model,” JHEP 1701 (2017) 096.

DOI: [10.1007/JHEP01\(2017\)096](https://doi.org/10.1007/JHEP01(2017)096)

[6] Y. Ema and T. Moroi, “Early decay of Peccei-Quinn fermion and the IceCube neutrino events,” Phys. Lett. B 762 (2016) 353.

DOI: [10.1016/j.physletb.2016.09.048](https://doi.org/10.1016/j.physletb.2016.09.048)

[7] T. Moroi, T. T. Yanagida and N. Yokozaki, “Upper Bound on the Gluino Mass in Supersymmetric Models with Extra Matters,” Phys. Lett. B 760 (2016) 681.

DOI: [10.1016/j.physletb.2016.07.061](https://doi.org/10.1016/j.physletb.2016.07.061)

[8] M. Endo, T. Moroi, M. M. Nojiri and Y. Shoji, “Renormalization-Scale Uncertainty in the Decay Rate of False Vacuum,” JHEP 1601 (2016) 031.

DOI: [10.1007/JHEP01\(2016\)031](https://doi.org/10.1007/JHEP01(2016)031)

[9] K. Hamaguchi, T. Moroi and K. Nakayama, “AMS-02 Antiprotons from Annihilating or Decaying Dark Matter,” Phys. Lett. B 747 (2015) 523.

DOI: [10.1016/j.physletb.2015.06.041](https://doi.org/10.1016/j.physletb.2015.06.041)

[10] M. Kawasaki, K. Kohri, T. Moroi and Y. Takaesu, “Revisiting Big-Bang Nucleosynthesis Constraints on Dark-Matter Annihilation,” Phys. Lett. B 751 (2015) 246.

DOI: [10.1016/j.physletb.2015.10.048](https://doi.org/10.1016/j.physletb.2015.10.048)

[11] Y. Ema, R. Jinno and T. Moroi, “Cosmological Implications of High-Energy Neutrino Emission from the Decay of Long-Lived Particle,” JHEP 1410 (2014) 150

DOI: [10.1007/JHEP10\(2014\)150](https://doi.org/10.1007/JHEP10(2014)150)

[12] T. Moroi, K. Mukaida, K. Nakayama and M. Takimoto, “Axion Models with High Scale Inflation,” JHEP 1411 (2014) 151

DOI: [10.1007/JHEP11\(2014\)151](https://doi.org/10.1007/JHEP11(2014)151)

[13] R. Jinno, T. Moroi and T. Takahashi, “Studying Inflation with Future Space-Based Gravitational Wave

Detectors,” JCAP 1412 (2014) no.12, 006.

DOI: [10.1088/1475-7516/2014/12/006](https://doi.org/10.1088/1475-7516/2014/12/006)

〔学会発表〕（計 1 2 件）

発表者は全て諸井健夫。

[1] “Stability of electroweak vacuum in the standard model and beyond,” NCTS Annual Theory Meeting 2017 (December 5 – 8, 2017), Hsinchu, Taiwan.

[2] “PeV Neutrinos from Heavy Relic Decays in Early Universe,” PAHEN (September 25 – 26, 2017), Naples, Italy.

[3] “Wino dark matter and supersymmetric model with heavy sfermions,” Dark Matter from aeV to ZeV, (November 21 – 25, 2016), Durham, United Kingdom.

[4] “Lectures on Cosmology,” 2016 Asia-Europe-Pacific School of High-Energy Physics, (October 12 – 25, 2016), Beijing, China.

[5] “Bottom-Tau Unification in Supersymmetric Model with Heavy Sfermions,” PASCOS 2016, (July 10 – 16, 2016), Quy Nhon, Vietnam.

[6] “Renormalization-Scale Uncertainty in the Decay Rate of False Vacuum,” IBS-PNU Joint Workshop on Particle Physics, String Theory and Cosmology, (December 2 – 5, 2015), Busan, Korea.

[7] “Beam-Dump Experiment at the ILC,” LCWS15, (November 2 – 6, 2015), Whistler BC, Canada.

[8] “Looking for New Physics at the ILC,” International Workshop on Particle Physics and Cosmology (September 14, 2015 – 18, 2015), Sendai, Japan.

[9] “Footprints of Supersymmetry on Higgs Decay,” PPC 2015 (June 29 – July 3, 2015), Deadwood, SD, U.S.A.

[10] “High-Energy Neutrino Emission from the Decay of Long-Lived Particle and Its Implication to IceCube Results,” CosPA 2014 (December 8 – 12, 2014), Auckland, New Zealand.

[11] “Cosmic-Ray Neutrinos from the Decay of Long-Lived Particle and Implications to IceCube Results,” IBS-MultiDark Joint

Focus Program: WIMPs and Axions (October 10  
– 21, 2014), Daejeon, Korea.

[12] “Studying Early Universe with  
Inflationary Gravitational Waves,”  
Capri 2014: 5th Workshop on Theory,  
Phenomenology, and Experiments in Flavor  
Physics (May 25 – 27, 2014), AnaCapri,  
Italy.

〔その他〕  
特になし。

## 6 . 研究組織

### (1) 研究代表者

諸井 健夫 (MOROI, Takeo)  
東京大学・大学院理学系研究科・教授  
研究者番号 : 6 0 3 2 2 9 9 7