

平成 22 年 4 月 20 日現在

研究種目：基盤研究(C)
 研究期間：2007～2009
 課題番号：19540255
 研究課題名（和文） 超対称模型に基づく宇宙進化シナリオの構築と、そのLHC・ILCを用いた検証
 研究課題名（英文） Constructing cosmological scenario based on supersymmetric model and its confirmation with LHC and ILC experiments
 研究代表者
 諸井 健夫 (MOROI TAKEO)
 東北大学・大学院理学研究科・准教授
 研究者番号：60322997

研究成果の概要（和文）：本研究においては、超対称模型に基づく宇宙進化のシナリオを考察すると共に、そのシナリオを現在・将来の高エネルギー加速器実験によって検証する手法を研究した。特筆すべき成果としては(1)長寿命荷電粒子が存在するシナリオに対するビッグバン元素合成からの制限の導出、(2)LHC実験における荷電ウィーノ粒子探索手法の確立、(3)不安定な暗黒物質が存在する場合にその崩壊から生じる高エネルギー宇宙線の研究、などが挙げられる。

研究成果の概要（英文）：In this project, I have studied the cosmological scenario based on supersymmetric model and its confirmation by using future high energy colliders. In particular, I have made remarkable progress in the following areas: (1) I have derived constraints on scenarios with long-lived charged particles from big-bang nucleosynthesis, (2) I have proposed a method to detect charged Wino particle at the LHC, and (3) I have studied high-energy cosmic rays from unstable dark matter.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2008年度	900,000	270,000	1,170,000
2009年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

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：超対称素粒子模型、暗黒物質、インフレーション

1. 研究開始当初の背景

近年、宇宙の観測の精度は飛躍的な向上を見せているが、その結果と無矛盾で、かつ素粒子論的見地からも満足のできる宇宙進化のシナリオは、まだ提唱されていない。また、宇宙進化の理解には、どうしても素粒子標準模型の拡張が要求される。従って、自然な宇宙進化のシナリオを与え得る素粒子模型の

構築を行う一方、素粒子標準模型を超える物理の様々な可能性が宇宙進化にどのような影響を与えるかについての考察は素粒子論・宇宙論双方にとって不可欠の課題である。また、宇宙観測から示唆される素粒子標準模型の拡張が、将来の高エネルギー実験、特にLHC・ILCによってどのように検証され得るかを議論することも重要なテーマであ

る。近い将来、加速器実験により電弱対称性の物理を明らかにするということが期待されているため、電弱対称性の破れの背後にある物理が宇宙進化に対しても大きな影響を与える場合、LHC・ILC実験によって宇宙進化に対してもある種の定量的な検証を行うことができる可能性がある。

素粒子標準模型を超える物理の候補の中でも、特に多くの研究者が興味をもっているものが超対称性を持つ模型である。このクラスの模型は、標準模型に内在する自然性・階層性問題の解となり得ると共に、標準模型のゲージ群統一の可能性を与えるため、多くの研究者の興味を引いてきた。さらに、超対称模型を考えることで、標準模型の枠内では理解することができなかった宇宙暗黒物質の起源や宇宙のバリオン非対称性の起源についても、新たな可能性が現れる。超対称模型に基づく宇宙進化のシナリオは、超対称性の破れの機構がどのようなかによってさまざまな可能性が生じる。さらに、超対称模型においては、特に重力子の超対称パートナーであるグラビティーノが宇宙論的に様々な問題を引き起こし得ることも知られている。(グラビティーノ問題と呼ばれる。)このため、まず、グラビティーノが引き起こす問題、特にグラビティーノに関連した崩壊過程が宇宙初期の軽元素合成に与える影響を正確に理解し、グラビティーノに対する宇宙論的な制限を正しく理解することが、超対称模型に基づく宇宙進化のシナリオを構築する上できわめて重要である。さらに、得られた制限と整合性のある宇宙進化のシナリオ、さらにはそれを実現しえる超対称模型を構築することは、素粒子物理学・宇宙物理学それぞれの分野にとって、大きな重要性を持つことになる。私は本研究を開始する前から、宇宙進化に対するグラビティーノの影響に関する研究を進めて、一定の成果を挙げてきた。しかし過去においては、まだ様々な可能性について、十分に研究を行うには至っていなかった。さらに、得られた制限と無矛盾な宇宙進化のシナリオも、未だ構築できていない。

一方、宇宙論的議論から示唆される超対称模型を実験的に検証するということが、将来の素粒子物理学にとって重要である。特に、Large Hadron Collider (LHC) 実験は超対称模型を重要なターゲットとしている。このため、宇宙論的議論から示唆される超対称模型がLHC実験においてどのようなシグナルを与えるか、されにはその模型の予言がどの程度定量的にテストされ得るかを議論することは、超対称模型をLHC実験において

研究・検証する上での重要な示唆を与えると考えられてきた。さらに、将来の加速器実験の重要な可能性として国際電子・陽電子線形加速器 (ILC) がある。この加速器が宇宙論的議論から示唆される超対称模型の研究に与えるインパクトを研究することも、将来の高エネルギー実験の方向を議論する上での有用な情報を与えると考えられる。これらに関して一定の知見を得ることが必要であるという認識が、本件研究を開始するにあたっての背景である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、最新の宇宙観測の結果を視野に入れつつ、素粒子論の知識と宇宙論の知識を融合して、新たな素粒子模型・宇宙像を作り出し、さらにはそこから示唆された素粒子模型を将来の加速器実験においてどのように検証するかを議論するということである。過去の素粒子論的宇宙論の研究は、様々な宇宙観測の結果を総合的に考慮しつつ、宇宙進化のシナリオの全体像を構築するという観点からの研究に乏しかったと言わざるを得ない。本研究においては、インフレーションや宇宙のバリオン非対称性生成、さらには宇宙暗黒物質の起源といった個々のテーマに関する研究を行うことはもちろん、様々な議論を総合的に考察しつつ、宇宙進化の自然かつ無矛盾なシナリオを構築するための様々なアイデアを産み出すことも重要な目的である。また、将来の加速器実験を用いた宇宙進化のシナリオのテストについても、最近ようやく議論が始まったばかりである。これらの視点からの素粒子論的宇宙論の研究は、世界的に見てもまだあまり進んでおらず、今後十分な発展が期待される。

本研究前期においては、まず超対称模型において、グラビティーノが宇宙進化に与える影響についての研究を行う。特にグラビティーノが不安定な場合については、これまでの研究において十分に詳細な議論を行ってきた(例えば K. Kohri, T. Moroi and A. Yotsuyanagi, *Phys. Rev. D* **73** (2005) 123511)。しかし、グラビティーノが不安定な場合については、まだ研究・議論の必要性が残っており、グラビティーノが宇宙進化に与える影響を総合的に理解するためには研究を継続する必要がある。グラビティーノが宇宙進化に与える影響の理解は、超対称模型に基づく宇宙進化のシナリオを構築するに当たってのきわめて基礎的かつ重要な制限を与える。それは今後の素粒子論的宇宙論の進展にとって欠かすことのできない情報となる。

3. 研究の方法

本研究課題においては、グラビティーノ宇宙論に関しては川崎雅裕氏・郡和範氏と、LHC現象論に関しては浅井祥仁氏と、そして高エネルギー宇宙線に関しては石渡弘治氏・松本重貴氏と共に研究を行った。全ての研究において様々な物理量を正確に計算するため、高速のコンピュータを導入した。

4. 研究成果

平成19年度は、大きく分けて二つのテーマに関する研究を行った。まず第1には、超対称模型が宇宙進化、特にビッグバン元素合成に与える影響に関する研究である。超対称模型においては多くの場合、1秒以上という極めて長い寿命を持つ粒子が現れる。それらは宇宙初期に生成され、ビッグバン元素合成後に崩壊することにより、標準的な元素合成過程で生成される軽元素（重水素、ヘリウム、リチウム等）の量に影響を与え、観測と矛盾する宇宙進化のシナリオを導く可能性がある。平成19年度には特に、ゲージメデイエーション模型と呼ばれる模型など超寿命スタウ粒子が現れるシナリオがビッグバン元素合成に与える影響について研究した。そして、超寿命スタウ粒子が現れるシナリオに対する制限を定量的に求めることに成功した。この結果は超対称模型に基づく宇宙進化のシナリオを構築する上での重要な情報を与える。

第2のテーマは、超対称模型のLHC実験における検証である。平成20年には開始されるLHC実験において超対称粒子は重要なターゲットのひとつであるが、LHCにおける超対称粒子探索の方法は超対称模型の詳細によるため、様々な場合についての研究を行っておく必要がある。平成19年度においては、特にアノマリーメデイエーション模型と呼ばれる模型がLHC実験において検証され得るかについての議論を行った。この模型の大きな特徴として、電荷を持ったウィーノ粒子が5cm程度という(素粒子論的観点からは)極めて長い崩壊長を持つことが挙げられる。本研究においてはこの粒子をLHC実験を用いて探索する手法を研究し、特にATLAS検出器内のTRT検出装置を用いることでウィーノ粒子の性質を探ることができる可能性があることを明らかにした。このことは、近い将来に開始されるLHC実験において、もしもアノマリーメデイエーション模型が正しかった場合、実験の進め方についての重要な指針を与えるものである。

平成20年度は、大きく分けて二つのテーマに関する研究を行った。まず第1には、超対称模型に現れる不安定な暗黒物質から生じる、高エネルギー宇宙線の研究である。特にPAMELAや

ATICといった高エネルギー電子・陽電子線の観測は、宇宙線に含まれる電子や陽電子のフラックスが標準的な計算の結果を大きく超過していることを示唆している。本研究においては、Rパリティの小さな破れにより超対称模型における暗黒物質が極めて長い有限の寿命を持つ場合、それら観測されている電子・陽電子線のフラックスが正しく説明できることを明らかにした。また、このシナリオが正しい場合、近い将来行われるFermi実験によって測定されるガンマ線フラックスにも特徴的なシグナルが現れ得ることを明らかにした。また、同様のシナリオで期待される銀河内でのシンクロトロン放射線のフラックスについても議論をおこなった。また、第2のテーマとして、LHC実験における標準模型を超える新しい物理の探求の可能性に関する研究である。特に、この年度は長寿命粒子がLHCで生成され得る場合、その寿命を測定する方法について議論を行い、寿命が1msよりも短い場合に寿命測定が可能であることを明らかにした。

平成21年度は前年度に引き続き、超対称模型に現れる不安定な暗黒物質から生じる、高エネルギー宇宙線の研究を行った。PAMELAによって観測される高エネルギー陽電子線フラックスは、標準的な計算の結果を大きく超過していることを示唆されているが、本研究においては、Rパリティの小さな破れにより超対称模型における暗黒物質が極めて長い有限の寿命を持つ場合の高エネルギー線のフラックスの計算の精度を上げると共に、様々なモデルパラメータにフラックスがどのように依存するかについても詳細に議論した。

また、暗黒物質の対消滅によってPAMELAの結果を説明するようなシナリオについても考察を行った。そのようなシナリオでは元素合成中においても暗黒物質粒子の対消滅過程が頻繁に起こる可能性がある。本研究では暗黒物質対消滅が元素合成に与える影響を議論し、軽元素量が観測と無矛盾となるようなパラメータ領域を明らかにした。

さらに、スタウ粒子が超寿命となるような超対称模型を考えた場合、様々な超対称粒子の質量がLHC実験においてどのように、かつどの程度正確に測定されるかを議論した。とくにスタウ粒子の運動量情報を使うことにより、スクォークやニュートラリーノ、さらには重いスレプトンといった粒子の質量が高い精度で測定され得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 9 件)

- ① K. Ishiwata, S. Matsumto and T. Moroi, Cosmic gamma-ray from inverse Compton process in unstable dark matter scenario, Physics Letters (査読有), B679 (2009) 1-5.
- ② J. Hisano, M. Kawasaki, K. Kohri, T. Moroi and K. Nakayama, Cosmic rays from dark matter annihilation and big-bang nucleosynthesis, Physical Review (査読有), D79 (2009) 083522.
- ③ K. Ishiwata, S. Matsumto and T. Moroi, High energy cosmic rays from decaying supersymmetric dark matter, JHEP (査読有), 0909 (2009) 110.
- ④ K. Ishiwata, S. Matsumto and T. Moroi, High Energy Cosmic Rays from the Decay of Gravitino Dark Matter, Physics Letters (査読有), 669 (2008) 28-33
- ⑤ S. Matsumoto, T. Moroi and K. Tobe, Testing the Littlest Higgs Model with T-parity at the Large Hadron Collider, Physical Review (査読有), D78 (2008) 055018.
- ⑥ K. Ishiwata, S. Matsumto and T. Moroi, High Energy Cosmic Rays from the Decay of Gravitino Dark Matter, Physical Review (査読有), D78 (2008) 063525.
- ⑦ T. Kanzaki, M. Kawasaki, K. Kohri and T. Moroi, Cosmological Constraints on Neutrino Injection, Physical Review (査読有), D76 (2007) 105017.
- ⑧ M. Kawasaki, K. Kohri and T. Moroi, Big-bang nucleosynthesis with long-lived charged slepton, Physics Letters (査読有), B649 (2007) 636-939.
- ⑨ S. Asai, T. Moroi, K. Nishihara and T. T. Yanagida, Testing the anomaly mediation at the LHC, Physics Letters (査読有), B653 (2007) 81-87.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

諸井 健夫 (MOROI TAKEO)
東北大学・大学院理学研究科・准教授
研究者番号 : 6 0 3 2 2 9 9 7

(2) 研究分担者

()

研究者番号 :

(3) 連携研究者 ()

研究者番号 :