

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 13 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2013

課題番号：22540263

研究課題名(和文) LHC実験と精密宇宙観測から迫る暗黒物質の物理

研究課題名(英文) Dark Matter Physics from the Points of View of LHC and Cosmological Observations

研究代表者

諸井 健夫 (Moroi, Takeo)

東京大学・理学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：60322997

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円、(間接経費) 960,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、加速器実験と宇宙論的観測の結果を総合的に考慮しつつ暗黒物質の正体や起源、さらには素粒子標準模型を超える物理の性質について、新たな知見を得ることにあった。加速器実験との関連という観点からは、宇宙論的に重要となる極めて軽いグラビティーノの質量測定の手法の提案を行った。また、精密宇宙観測との関連と言う観点からは、特に高エネルギー宇宙線の起源に関して暗黒物質崩壊という新たな可能性を提案すると共に、ウィーノ暗黒物質を実現するシナリオについての詳細な解析を行い、さらには宇宙進化を理解する上で熱的効果がどのような場合に重要となるかを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this project is to acquire new insights into dark matter physics based on collider physics as well as on cosmological observations. Concerning the collider physics, a new method to measure the gravitino mass is proposed in the case where the gravitino is superlight, which is an important possibility in cosmology. In addition, from cosmology point of view, it has been discussed that the decay of dark matter can be a significant source of high energy cosmic rays. In addition, a detailed study of the Wino dark matter scenario is provided. Furthermore, implications of thermal effects on the evolution of the universe was also studied.

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：素粒子論 宇宙物理

## 1. 研究開始当初の背景

近年の様々な宇宙精密観測の発展から、現在の宇宙のエネルギー密度の約 20%は、暗黒物質と呼ばれる、相互作用が極めて弱く圧力が無視できる物質によって占められているということが明らかとなっている。しかし素粒子物理学的観点からは、暗黒物質に関してはほとんど何も理解されていないと言ってよい。特に、高エネルギー実験の結果を極めて良く説明する素粒子標準模型の枠内には、暗黒物質の候補は存在しない。このことは、暗黒物質の理解のためには、素粒子標準模型を超える物理の解明が必要不可欠であることを意味している。

素粒子標準模型を超える物理の研究を進めるにあたって特に重要となるのは、LHC 実験である。また、宇宙物理学に関連した実験・観測として、高エネルギー宇宙線フラックスの測定や暗黒物質の直接探査の新たな結果や、PLANCK 衛星等による宇宙背景放射揺らぎの精度の向上も期待されていた。

従って、本研究期間は、様々な実験・観測のデータを解析・解釈して、素粒子標準模型を超える物理の方向を明らかにするという時期であったと言える。

LHC 実験を用いて暗黒物質の起源に迫ると言う観点からの研究は、これまでも(私を含む)多くの研究者によってなされてきた。しかし、過去の研究で超対称模型の有力なシナリオ全てについての考察がされていたとは言いがたく、さらには超対称模型以外の素粒子標準模型を超える物理の可能性については、あまり手がつけられていなかった。

一方、最近の高エネルギー宇宙線フラックスの精密測定も、暗黒物質の性質の理解に重要な情報を与えると期待されていた。特に PAMELA 実験は、高エネルギー陽電子フラックスが標準的な宇宙線生成モデルの予言よりも過剰であることを示唆する結果を発表した。私は、このことは暗黒物質が暗黒物質が現在の宇宙年齢よりも 9 桁程度長い寿命で(例えば)ミュオン・反ミュオン対に崩壊すればうまく説明できることを明らかにしていた。高エネルギー宇宙線フラックスの測定は精度の向上が期待されていたため、この方向の研究はさらなる発展が期待されていた。

## 2. 研究の目的

本研究の研究期間は 2010 年から 4 年間であったが、この期間は LHC 実験の初期のデータが出せると期待される期間に相当していた。また、同じ期間には高エネルギー宇宙線フラックスの観測や暗黒物質直接探査実験の新たなデータも公開が期待されていた。それらを基に、素粒子標準模型を超える物理や宇宙進化に関連する諸問題解決

の方向性を明らかにすることが、本研究の目的であった。

特に、あるタイプの超対称模型においては、宇宙進化を理解する上で重要となる超対称粒子が LHC 実験において生成可能となる。どのようなシグナルが可能であるか、またそこからどのような情報を引き出すことができるかを理解することは、本研究の重要なテーマのひとつであった。さらに、研究期間後半には、LHC 実験の結果がオープンとなると期待されていた。特に LHC によって素粒子標準模型を超える物理の姿が徐々に明らかとなっていく場合には、その枠内でどのような暗黒物質模型が可能であることを明らかにすることも目的のひとつであった。

また、宇宙観測を用いて暗黒物質の性質に迫ると言うことも重要な研究テーマのひとつであった。特に興味深い観測のひとつは、高エネルギー宇宙線の観測である。本計算では、暗黒物質崩壊による高エネルギー宇宙線のフラックスを精度良く計算し、その結果を本研究期間中にオープンとなる実験結果と比較することで、様々な(長寿命)暗黒物質模型のテストを行う。

## 3. 研究の方法

第一に、LHC 実験の結果から宇宙論的に重要となる超対称粒子の性質についてどのような情報が得られるかを、特に数値シミュレーションを用いて議論する。このような研究を進めるにあたっては、モンテカルロシミュレーションに基づく数値計算の手法によって、LHC で期待されるシグナルの振る舞いを定量的に解析する。この方面の研究は、私の指導していた学生(蘭藤卓実氏)と共同研究を行う形で推進した。

また、暗黒物質が宇宙年齢よりは極めて長いけれども有限の寿命を持つようなシナリオについても研究を行う。このようなシナリオは、特に平成 20 年度に PAMELA 実験が過剰な陽電子フラックスを報告して以来、多くの研究者の興味を集めている。研究目的にも述べたように、PAMELA によって観測された陽電子のフラックスのアノマリーは暗黒物質が  $10^{26}$  秒程度の寿命を持つと説明できると言うことは、既に過去の研究により明らかとなっている。本研究では、暗黒物質が有限の寿命を持つ様々なシナリオにおいて、高エネルギー宇宙線のフラックスを统一的に計算し、暗黒物質がどのような性質(寿命、崩壊生成物の種類等)を持つ場合に観測と無矛盾な高エネルギー宇宙線フラックスが得られるかを議論する。このような研究では、数値計算の手法によってフラックスを精密に計算し、観測結果と定量的な比較を行うことが重要である。

さらに、今後可能となる様々な実験観測(例えば電子・陽電子型線型加速器実験や重

力波の直接観測実験等)が、暗黒物質や初期宇宙の理解に果たす役割について、研究を行う。ここでも数値計算の手法を用いることで、高い精度での議論を可能とする。

#### 4. 研究成果

##### 平成22年度

第一の成果は、宇宙背景放射や宇宙初期ビッグバン元素合成からの、暗黒物質粒子の対消滅断面積に対しての制限の導出である。特に近年のPAMELA実験は、高エネルギー宇宙線中の陽電子の過剰フラックスを指摘した。(PAMELAアノマリー。)大きな速度依存性を暗黒物質の対消滅断面積が持てばPAMELAアノマリーが説明され得るという指摘がなされてきたが、そのようなシナリオは宇宙背景放射や宇宙初期ビッグバン元素合成から厳しい制限を受ける。本研究においてはこれらの制限を定量的に求め、様々な速度依存性に対して宇宙論からどのような制限が導かれるかを明らかにした。

第二には、長寿命スタウが存在する場合の、LHC実験における超対称イベントの再構成法の提唱である。長寿命スタウが存在すると、そのトラック情報が使用可能となるため、超対称イベントの再構成が極めて容易となる。本研究では、特にスタウトラックの情報をを用いて様々な超対称粒子の質量スペクトルやスピン情報を得る手法を開発した。そしてモンテカルロシミュレーションにより、本研究の提唱した手法によりどの程度の精度で質量やスピンを測定できるかを明らかにした。この結果は超対称暗黒物質の物理の研究の基礎となるものである。

##### 平成23年度

まず、極めて軽いグラビティーノの寿命測定の方法の研究である。極めて軽いグラビティーノは低エネルギーで超対称性が破れるモデルにおいて現れると共に、宇宙論を考える上でも重要となる。本研究においては、電子・陽電子線型加速器実験およびLHC実験において、インパクトパラメータ情報を用いることでグラビティーノ質量を測定できる可能性があることを明らかにした。

また、将来の重力波観測によって、高エネルギーの物理モデルや初期宇宙を理解する手法についての研究も行った。特に超対称モデルに基づく宇宙進化のシナリオを考える上で重要な役割を果たす thermal inflation について考察し、thermal inflation 終了時に生成される domain wall の消滅に伴い生じる重力波が、将来観測される可能性がある事を示した。また、宇宙初期に相転移が起こった場合に、重力波のスペクトルに特徴的なシグナルが出ることを明らかにした。

さらに、最新のLHCの結果は125GeV程度の質量

をもつヒッグス粒子の存在を示唆している。このことが超対称モデルに与える影響をモデル構築の観点および宇宙論的観点から議論した。

##### 平成24年度

まず、moduli 場やグラビティーノなど、ビッグバン元素合成直前という宇宙進化の遅い段階で崩壊する場から Wino 暗黒物質が非熱的に生成される可能性について、詳細な解析を行った。特に Wino 生成量について Sommerfeld 効果を取り入れて定量的な解析を行い、正しい暗黒物質質量が実現されるパラメータ領域を明らかにした。

また、様々な素粒子モデルには、質量ゼロの粒子が現れるが、それらが宇宙初期に生成された場合、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どのような影響を受けるかを明らかにした。本研究で得られた結果は、BBO や DECIGO といった将来の重力波直接検出実験の持つ意義を明らかにするものである。

##### 平成25年度

AMS-02 実験が発見した高エネルギー宇宙線中の陽電子フラックスの過剰現象について、その起源がグラビティーノ暗黒物質崩壊である可能性を指摘した。特に、グラビティーノ暗黒物質の寿命が現在の宇宙年齢よりも9桁程度大きい場合、AMS-02 実験の結果が正しく説明できることを明らかにした。

また、初期宇宙における Peccei-Quinn 場の振舞いについて、詳細な解析を行った。その結果、これまで正しく取り入れられていなかった熱的效果(熱的トラッピングや熱的效果による振動の減衰)によって、Peccei-Quinn 場の発展が大きな影響を受け得ることを明らかにした。この結果は Peccei-Quinn 場対称性を持つ超対称素粒子モデルに基づいて宇宙進化を考える上での重要な情報を与えるものである。

さらに、前年度に引き続き、インフレーション中に作られた重力波についての解析を行った。特に、初期宇宙に相転移や暗黒輻射生成などが起きた場合、インフレーション起源の重力波がどのような影響を受けるかを詳細に調べ、BBO や DECIGO など将来の重力波直接検出実験で重力波のスペクトルが直接観測されれば宇宙発展についての詳細な情報が得られ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17件)

[1] M. Endo, K. Hamaguchi, S. Iwamoto, T. Kitahara and T. Moroi, "Reconstructing Supersymmetric Contribution to Muon

Anomalous Magnetic Dipole Moment,” Phys. Lett. B728 (2014) 274. 査読有、DOI: 10.1016/j.physletb.2013.11.068。

[2] R. Jinno, T. Moroi and K. Nakayama, “Inflationary Gravitational Waves and the Evolution of the Early Universe,” JCAP 1401 (2014) 40. 査読有、DOI: 10.1088/1475-7516/2014/01/040。

[3] T. Moroi, M. Nagai and T.T. Yanagida, “Lepton Flavor Violation in High-Scale SUSY with Right-Handed Neutrinos,” Phys. Lett. B728 (2014) 342. 査読有、DOI: 10.1016/j.physletb.2013.11.058。

[4] T. Moroi and M. Nagai, “Probing Supersymmetric Model with Heavy Sfermions Using Leptonic Flavor and CP Violations,” Phys. Lett. B723 (2013) 107. 査読有、DOI: 10.1016/j.physletb.2013.04.049。

[5] T. Moroi, M. Nagai and M. Takimoto, “Non-thermal Production of Wino Dark Matter via the Decay of Long-Lived Particles,” JHEP 1307 (2013) 6. 査読有、DOI: 10.1007/JHEP07(2013)066。

[6] M. Ibe, S. Iwamoto, S. Matsumoto, T. Moroi and N. Yokozaki, “Recent Result of the AMS-02 Experiment and Decaying Gravitino Dark Matter in Gauge Mediation,” JHEP 1308 (2013) 29. 査読有、DOI: 10.1007/JHEP08(2013)029。

[7] T. Moroi, K. Mukaida, K. Nakayama and M. Takimoto, “Scalar Trapping and Saxion Cosmology,” JHEP 1306 (2013) 40. 査読有、DOI: 10.1007/JHEP06(2013)040。

[8] M. Asano, T. Moroi, R. Sato and T.T. Yanagida, “Non-anomalous Discrete Symmetry, Extra Matters, and Enhancement of the Lightest SUSY Higgs Mass,” Phys. Lett. B705 (2012) 337. 査読有、DOI: 10.1016/j.physletb.2011.10.025。

[9] T. Moroi, R. Sato and T.T. Yanagida, “Extra Matters Decree the Relatively Heavy Higgs of Mass about 125GeV in the Supersymmetric Model,” Phys. Lett. B709 (2012) 218. 査読有、DOI: 10.1016/j.physletb.2012.02.012。

[10] T. Moroi and M. Takimoto, “Thermal Effects on Saxion in Supersymmetric Model with Peccei-Quinn Symmetry,” Phys. Lett. B718 (2012) 105. 査読有、DOI: 10.1016/j.physletb.2012.10.014。

[11] R. Jinno, T. Moroi and K. Nakayama, “Probing Dark Radiation with Inflationary Gravitational Waves,” Phys. Rev. D86 (2012) 123502. 査読有、DOI: 10.1103/PhysRevD.86.123502。

[12] S. Matsumoto and T. Moroi, “Studying Very Light Gravitino at the ILC,” Phys. Lett. B703 (2012) 422. 査読有、DOI: 10.1016/j.physletb.2011.06.010。

[13] T. Moroi and K. Nakayama, “Domain Walls and Gravitational Waves after Thermal Inflation,” Phys. Lett. B703 (2012) 160. 査読有、DOI: 10.1016/j.physletb.2011.07.075。

[14] T. Asano, T. Ito, S. Matsumoto and T. Moroi, “Exploring Supersymmetric Model with Very Light Gravitino at the LHC,” JHEP 1203 (2012) 011. 査読有、DOI: 10.1007/JHEP03(2012)011。

[15] T. Asano, T. Ito, S. Matsumoto and T. Moroi, “Exploring Supersymmetric Model with Very Light Gravitino at the LHC,” JHEP 1203 (2012) 011. 査読有、DOI: 10.1007/JHEP03(2012)011。

[16] T. Ito and T. Moroi, “Spin and Chirality Determination of Superparticles with Long-Lived Stau at the LHC,” Phys. Lett. B694 (2010) 349. 査読有、DOI: 10.1016/j.physletb.2010.10.006。

[17] K. Ishiwata, S. Matsumoto, T. Moroi, “Decaying Dark Matter in Supersymmetric Model and Cosmic-Ray Observation,” JHEP1012 (2010) 006. 査読有、DOI: 10.1007/JHEP12(2010)006。

{ 学会発表 } ( 計 8 件 )

[1] 「Flavor and CP Violations as Probes of BSM Physics」、諸井健夫、2013年1月12日、The 3rd KIAS Phenomenology Workshop (ソウル、韓国)

[2] 「Probing Beyond the Standard Model Physics with Inflationary Gravitational Waves」、諸井健夫、2013年5月24日、PLANCK2013 (ボン、ドイツ)

[3] 「Supersymmetry, Peccei-Quinn Symmetry, and Cosmology」、諸井健夫、2012年8月16日、SUSY2012 (北京、中国)

[4] 「Studying long-lived gravitino at the ILC」、2011年9月28日、LCWS2011 (グラナダ、スペイン)

[5] 「Long-lived staus at the LHC」、諸井健夫、2011年4月29日、Emberking a

new era of discovery (バークレイ、アメリカ合衆国)。

[6] 「Non-thermal right-handed sneutrino as cold dark matter」, 諸井健夫、2010年10月18日、Non-thermal cosmological history of the universe (アナーバー、アメリカ合衆国)。

[7] 「LHC の初期段階に期待する新発見」, 諸井健夫、2010年9月27日、日本物理学会(九州工業大学)。

[8] 「 SuperWIMP dark matter candidates」, 諸井健夫、2010年7月20日、TeV Particle Astrophysics 2010 (パリ、フランス)。

## 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 : 60322997

### (2)研究分担者

( )

研究者番号 :

### (3)連携研究者

( )

研究者番号 :