

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 8 日現在

機関番号：13301

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21540262

研究課題名（和文）初期宇宙との関連に基づく標準模型を越える理論の研究

研究課題名（英文）Study of physics beyond the standard model on the basis of the early universe

研究代表者

末松 大二郎（SUEMATSU DAIJIRO）

金沢大学・数物科学系・教授

研究者番号：90206384

研究成果の概要（和文）：近年の各種実験・観測を通して明らかにされたニュートリノ質量と暗黒物質の存在を説明する標準模型を越える理論的枠組みの構築とその現象論的性質についての解析を行った。その結果、輻射効果に基づくニュートリノ質量生成モデルにおけるニュートリノ質量・レプトンフレーバー混合と、暗黒物質の残存量や直接・間接検出実験に現れる性質についての定量的な関連性の解明、モデルの超対称化と超対称化されたモデルに現れる2種類の暗黒物質の存在可能性の指摘、およびそれらの暗黒物質の性質の定量的解明、これらのモデルにおける宇宙のバリオン数非対称の説明に関する複数の可能性の定量的解明などの研究成果を得た。

研究成果の概要（英文）：We studied possible theoretical frameworks beyond the standard model and their phenomenological features on the basis of both neutrino masses and dark matter which were found through various recent experiments and observations. We clarified the quantitative relation between nature of neutrinos such as masses and mixing and nature of dark matter which appears in the relic abundance, direct and indirect searches. We extended the model to be supersymmetric and suggested that there appears two types of dark matter. Their nature was analyzed in the quantitative way. We also studied the baryon number asymmetry in the universe in these models.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2010年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：素粒子物理学

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：ニュートリノ、暗黒物質、初期宇宙、超対称性、フレーバー、バリオン数生成

1. 研究開始当初の背景

申請者は、本研究開始以前に、超弦理論の有効理論として現れ、かつ MSSM における μ 問題の解決が TeV 領域の物理により可能になるという興味深い特徴を持つ「TeV 領域に新たな U(1) ゲージ対称性を持つモデル」に注目し、

Z' の質量、ヒッグス質量、ニュートラリーノの諸性質と暗黒物質としての可能性、バリオン数生成との関係など、諸々の現象論的特性の解析を進めて来た。一方で、ニュートリノ質量と暗黒物質の関連を示唆するモデルの研究を進め、この研究成果に対しては、複数

の海外の研究者が興味を持ち、国際会議やメールでの議論を通して共同研究へと発展させてきた。これらの研究で取り上げてきたモデルは、本研究において初期宇宙との関係という視点から、より広範に詳細かつ定量的な解析を目指す主要な対象として位置付けられるものであった。これらの本研究開始前に行ってきた研究を基礎におき、本研究計画は推進されることとなった。

2. 研究の目的

本研究においては、暗黒物質・暗黒エネルギーの存在に代表される宇宙観測から与えられる初期宇宙に関するデータと稼働間近な LHC 実験に代表される素粒子実験からのデータをもとに、標準模型を越える理論的枠組の構築と、その検証可能性及び高エネルギー領域における基礎理論の解明を目指した。これまで多様な実験事実を説明することに成功してきた標準模型は、ニュートリノ質量の存在の発見と暗黒物質の存在を明らかにした宇宙観測によって、大変革を迫られている。研究実施期間を含めた数年間に渡って、各種の実験データの公表が期待される素粒子実験・宇宙観測によって、このような状況がより精度を高めた形で進行することが予想される。このような状況を生かして、標準模型を越える理論的可能性について研究を進めることは極めて重要かつ有効である。

本研究では、素粒子模型において、初期宇宙との関連から特に重要な鍵となるバリオン数生成機構、暗黒物質の起源、ニュートリノ質量とフレーバー混合の起源に焦点を当て、それらを矛盾無く説明する可能性を持つモデルの構成を試みるとともに、そのようなモデルの背後に存在する基礎理論の解明を目標とした。これらの問題は、CP の破れ、陽子の安定性、ゲージ階層構造、クォーク・レプトンのフレーバー構造などの標準模型が抱える課題と極めて密接な関係を持ち、標準模型を越える理論を探索する上で極めて重要な研究方向であると考えられる。本研究の重要な視点は、これらの課題を個別・独立に扱うのではなく、1つの枠組の中で同時にとらえることにより、重要な端緒が切り開かれるという可能性を追求しようという点にある。モデルの検証可能性を十分検討しつつ、超弦理論などの高エネルギー領域における基礎理論への埋め込みの可能性についても視野に入れつつ検討を進めた。

以上の研究目的の下、本研究において取り扱う具体的な課題として以下のようなものを想定した。

(1) 付加的 U(1) ゲージ対称性を持つ μ 問題解決可能なモデルの宇宙論的性質を含む現象論的諸性質の定量的解明。付加的 U(1) 対称性を持つモデルは、最小超対称標準模型(MSSM)に

内在する μ 問題を LHC 実験で検証可能な TeV 領域において解決する可能性を持ち、超対称模型としては極めて有望な模型であり、最も軽い中性ヒッグス、 Z' 、ニュートラリーノ等の質量や相互作用において MSSM とは大きく異なる性質を示すことから、これらの解析結果と LHC や MEG 実験等の結果との比較から、モデルの検証が可能である。また、暗黒物質の候補となるニュートラリーノは、MSSM 等の他の模型のニュートラリーノとは大きく異なる性質を持ち、今後行われる XMASS 等による暗黒物質探索をもとにモデルの検証が可能になることも期待される。さらに、U(1) 対称性に付随するポテンシャルが平坦となる場の配位の存在や中間エネルギースケールの導入可能性などは、ニュートリノ質量生成やバリオン数生成、インフレーションとの関連においても、重要な役割を果たす可能性を持つ。モデルの現象論的知見の整備を行い、今後の素粒子実験、宇宙観測によりモデルの検証を可能とする解析を目指す。この研究は、TeV 領域の物理を精査することにより、基礎理論と期待される超弦理論のコンパクト化等に関する重要な情報を与える可能性を持ち、超弦理論の真空構造の解明にも寄与することも期待される。

(2) 暗黒物質の起源に関する多様な可能性の考察。超対称模型における暗黒物質の最有力候補は、最も軽いニュートラリーノと考えられているが、MSSM における許容パラメータ領域は、WMAP 以降極めて限られたものとなってきた。この状況は、ニュートラリーノが従来考えられて来たものとは異なる新たな性質を持つ可能性を探る必要性を示唆するものとも、非超対称模型における暗黒物質の可能性を考える必要性を示唆するものとも考えられる。このことを踏まえ、暗黒物質の起源について、超対称性にとらわれることなく、多様な可能性についての検討を進める。その可能性の 1 つとして、標準模型では説明できない小さなニュートリノ質量の起源と深く関連する暗黒物質の可能性を超対称模型、非超対称模型の両方の枠組みで系統的に探る。その際、ニュートリノ質量の説明に関わるレプトン部分のフレーバー構造を制御する対称性の考察や、超対称性の破れのフレーバー構造の考察、レプトジェネシスとの関係等が研究推進上の重要な鍵となる。各々の模型において期待されるフレーバー現象、具体的には、 $\mu \rightarrow e\gamma$ などのレプトンフレーバーを破る過程、 μ 粒子の異常磁気能率、電子の電気双極子能率などについての解析も行う。

(3) 超対称性の破れの起源と超対称粒子の質量スペクトル構造の解明。超対称模型においては、採用する超対称性の破れのシナリオによって、バリオン数生成機構、暗黒物質の起源、ニュートリノ質量とフレーバー混合の

起源に関する可能性は大きく異なってくる。特に、重力相互作用によって媒介される超対称性の破れとゲージ相互作用によって媒介される超対称性の破れにおいては、超対称性の破れのスケールが大きく異なることから、双方の間でバリオン数生成や暗黒物質に対する考え方を大きく変える必要が出てくる。このため、本研究計画においては、超対称性の破れの起源とそれに対応した超対称粒子の質量スペクトル構造の解明は不可欠なものとなる。本研究課題において、超対称性の破れに関する新たな可能性の考察も当然重要な課題として位置付けることになる。

3. 研究の方法

今後 10 年近くに渡って新たな実験データが公表されることが期待される LHC、T2K、XMASS、MEG 等の素粒子実験と PLANCK 等の宇宙観測の両方を見据えて、研究目的に掲げた研究課題を柱に、標準模型を越える理論的枠組の構築を目指して研究を進めた。研究の遂行にあたっては、申請者が本研究開始までに行ってきた一連の研究を通して明らかになった問題点、課題等を再度整理し直し、常時効果的研究方向を探りつつ、研究を推進した。研究の過程においては、指導中の大学院生に研究協力者として数値計算の実行とデータ処理、資料・情報収集等において一部助力を求めた。

個々の課題については、以下に示す研究計画・方法に従い研究を進めた。

(1) 超対称模型においては、従来 MSSM に関して多様な研究が進められてきたが、拡張された模型についての研究は、それほど深く行われているとは言えない。LHC が稼働し始めようという状況下では、MSSM に限らず、より広範な模型についての検討は急務であり、本研究は極めて時機を得た重要なものとなるとの考えに基づき、 μ 問題の解決に関与し得る新たな $U(1)$ 対称性を TeV 領域に持つ Z' 模型を中心に拡張標準模型の検討を進めた。これまで一部の模型に制限して進めて来た研究を、LHC の稼働に合わせて多様な模型の真空構造の決定を効率的に実行に対応できるように現有の数値計算プログラムの改良を進め、諸々の素粒子実験からの制限を考慮することにより、模型の許容パラメータ領域を明らかにすることを目指した。他方、対象とする Z' 模型の特徴に強く関連した初期宇宙に関わる現象について、暗黒物質に関する宇宙観測データを中心に詳細に検討し、それらに関わる必要な計算を実行することで、模型の許容パラメータ領域に対してさらなる制限を加えた。さらに、これらをもとに、様々な物理量に対して模型のもたらす予想値を具体的に提示することを目指した。特に、LHC 実験のデータが公表されるのに先だって、模

型における最も軽い中性ヒッグスの質量や Z' ゲージ粒子の質量、ニュートラリーノ崩壊過程などについて模型から期待される値を、より広範囲の模型に対して精度の高い形で提示できるよう試みた。

(2) ニュートリノ質量と暗黒物質の関わりについては、本研究開始までに進めていた研究を継続・発展させることを目指した。超対称模型、非超対称模型の両者において、この方向での新たな模型構築と各模型におけるニュートリノ質量及びフレーバー混合と暗黒物質残留量の定量的関係の解析、 $\mu \rightarrow e \gamma$ を代表とするレプトンフレーバーを破る過程、 μ 粒子の異常磁気能率、電子の電気双極子能率などの関連した現象論的予測に関する定量的計算を数値計算を含めて遂行することを中心的な研究として進めた。また、さらなる研究へ向けたの準備的作業として、様々なニュートリノ質量生成機構において導入される新たな粒子群の可能性を系統的に整理し、それが暗黒物質の候補となる可能性を検討するために、過去に遡って関係した文献を収集し、精読することを心がけた。暗黒物質の起源に関わる素粒子模型に制限を与える現象には特に注意を払い、特定の模型にとらわれず、新たな理論的可能性に対しては柔軟かつ迅速に対応するように心がけた。

(3) 新たな実験データの公表は本研究の背景を大きく変える可能性を持つ点に十分に配慮し、研究目的に関連した最新の文献を随時ネットワークを用いて入手するとともに、関連した分野を研究している国内の研究者を招聘することにより、必要な知識・情報を仕入れ、討論を行い、研究の進展をはかった。また、研究題目に関連した会議等へ参加し、理論面の必要な情報、及び最新の実験データの情報を収集し、研究の効果的進展をはかった。特に、LHC の稼働に伴い公表される実験データ、他の素粒子実験、宇宙観測からもたらされるデータには細心の注意を払い、それらに応じて柔軟に適切に研究の方向を修正できるように心がけた。

(4) 申請者が講義や教務関連の職務により、必ずしも十分な研究時間を数値計算の実行などに当てることができない状況にあることを克服するために、多くの時間を要する数値計算とデータ処理、及び資料・情報収集等に関して、指導中の大学院生の研究協力を求めた。

(5) 研究内容については、研究目的に挙げた課題に関する研究を強力に推進しつつも、様々な実験を通して得られる実験データの公表に細心の注意を払い、それに基づき研究の方向性を柔軟に調整できるような体制を作るよう配慮し、常に新たな研究の発展の可能性を見出すよう積極的に心がけ、研究計画・方法等の見直しも適宜柔軟に行い、研究

目的の達成をはかった。

(6) 各年次ごとに新たな具体的研究成果を
発表できるペースで研究をすすめ、得られた
研究成果は国内、国際会議の場で発表すると
ともに、研究論文として発表した。また、最
終年度には研究結果の総合的な検討を進め、
それに基づき本研究計画を基礎に、次期の研
究計画を策定した。一般・高校生に向けた研
究成果の公表にも配慮し、公開講演会や出前
授業を実施するとともに、研究成果を分かり
易く解説する機会を設けた。

4. 研究成果

標準模型を超える理論的枠組みの可能性
を、ニュートリノ質量生成機構を中心として、
ニュートリノ質量生成と暗黒物質の関連性
に焦点を当てながら模型の構築を行い、その
現象論的性質の解析を進め、以下のような結
果を得た。

(1) 輻射効果によるニュートリノ質量生成
模型について検討を進め、ニュートリノ振動
実験から得られたニュートリノ質量と混合
に対する制限をうまく説明するニュートリ
ノ湯川結合のフレーバー構造を提案し、その
もとで暗黒物質の候補となる安定な右巻き
ニュートリノの残留量とレプトンフレーバ
ーを破る過程を評価することで模型の整合
性を示した。さらに、宇宙線中で発見され
た陽電子束の異常の起源について、このフレ
ーバー構造に基づき、右巻きニュートリノ暗
黒物質の崩壊と対消滅からの説明を与えた。
崩壊においては、不安定だが宇宙年齢よりも
長い寿命を持つ暗黒物質を含めて2つの暗黒
物質候補を持つ超対称模型での量子異常に起
因する相互作用により、その説明が可能性と
なること指摘した。対消滅においては、対消
滅断面積が Breit-Wigner 共鳴を持つよう
模型を拡張することで、暗黒物質の残留量と
矛盾することなく宇宙線の異常が説明され
ることを示した。

(2) 超対称 E6 模型から導出される新しい
タイプの拡張された MSSM を、E6 の 27 次元表現
へ世代によって異なる形でクォーク・レプト
ンの埋め込みをおこなうことにより構築した。
この模型では、付加的 U(1) 対称性の自発
的破れに基づき、MSSM における μ 問題が解決
されると同時に、ニュートリノ質量が通常
のシーソー機構と輻射シーソー機構の2つによ
って生成されることを示した。新たなダウ
ンタイプクォークの存在によりもたらされる
クォーク混合の小林・益川行列からのずれ等、
模型の持つ現象論的特徴についても検討を
加えた。

(3) 量子異常を持つ可換ゲージ対称性を持
つ超対称模型を考え、この対称性が輻射補正
による小さなニュートリノ質量生成を可能
とすること、ニュートリノを含むクォーク・

レプトンの質量階層構造とフレーバー混合
をうまく説明すること等を示した。さらに、
この対称性から生じる残存離散対称性のた
めに、超対称模型で通常想定されるニュート
ラリーノ暗黒物質とは異なる暗黒物質候補
を含むことを指摘した。この新たな暗黒物質
候補は、必要とされる暗黒物質の残存量を
ニュートラリーノとともに説明する可能性
を持つことを示し、この条件のもとで
PAMELA/Fermi-LAT 実験で観測された宇宙線
中の陽電子の異常をうまく説明することが
可能であることを指摘した。さらに、この新
たな暗黒物質は、宇宙線中のガンマ線束にも
新たな特徴的な異常をもたらすこと、及び、
この新たな暗黒物質が存在する場合には、模
型に含まれるもう一つの暗黒物質候補であ
るニュートラリーノが、直接観測において最
小超対称標準模型のものとは異なる性質を
示すことを指摘した。

標準模型を超える理論的枠組みは、近年、
素粒子実験・宇宙観測を通して明らかにな
ってきたニュートリノ質量とレプトン混合、
暗黒物質の存在、宇宙のバリオン数非対称を
同時に説明することが要求される。この観点
から、輻射ニュートリノ質量生成模型を中
心に、ニュートリノ質量・レプトンフレーバ
ー混合と暗黒物質残存量の定量的説明、レ
プトンフレーバーを破る過程等に対する実
験的制限等を条件として課しつつ、同一の
枠組みの中で、宇宙のバリオン数の起源を
説明する可能性について定量的な検討を進
め、以下の結果を得た。

(1) 輻射効果によりニュートリノ生成を可
能とする超対称模型において、超対称模型
に特有の平坦な場の配位を利用する
Affleck-Dine 機構に基づき、TeV スケール
でのレプトジェネシスの可能性を検討し、
宇宙の再加熱温度がグラビティーノ問題
を回避できるほどに低い場合においても、
十分なバリオン数の生成が可能であることを
示した。

(2) TeV 領域に質量を持つ最も軽い右
巻きニュートリノを暗黒物質候補とし、
次に重い右巻きニュートリノの CP を破
る崩壊に基づく熱的レプトン数非対称生
成を考える場合、現在観測されている宇
宙のバリオン数を説明するには、レプト
ン数を破る散乱過程を十分に抑制するた
めに非常に高い精度の質量縮退を新た
に導入された場に対して要求することが
必要であることを示した。これは、従
来考えられてきた共鳴効果に基づくレ
プトジェネシスとは異なり、輻射ニュ
ートリノ質量生成模型に含まれる場
に対して許される新たな可能性である。

(3) 初期宇宙のインフレーションを実現
するよう輻射ニュートリノ質量模型を
拡張することにより、インフラトンの
崩壊に基づきグラビティーノ問題を
回避するのに十分に

低い再加熱温度に対しても要求されるバリオン数生成が可能となることを示した。この拡張は、ニュートリノ質量の小ささを説明する際に本質的なパラメータの小ささをも自動的に説明することを指摘した。

(4) 付加的 U(1) 対称性を持つ超対称模型において、軽いストップが存在しない場合について電弱 1 次相転移について解析を、中性ヒッグス粒子の質量、 Z' 粒子の質量等についての制限を考慮しつつ進めた。現在、詳細な数値計算を継続中である。

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 13 件)

- (1) D. Suematsu, Extension of a radiative neutrino mass model based on a cosmological viewpoint, Phys. Rev. D85, 073008(1--6), 2012, 査読有.
- (2) D. Suematsu, Thermal leptogenesis in a TeV scale model for neutrino masses, Eur. Phys. J. C72, 1951(1--10), 2012, 査読有.
- (3) H. Fukuoka, D. Suematsu, T. Toma, Signals of dark matter in a supersymmetric two dark matter model, JCAP 07, 001(1--20), 2011, 査読有.
- (4) H. Higashi, T. Ishima, D. Suematsu, Affleck - Dine leptogenesis in the radiative neutrino mass model, Int. J Mod Phys. A26, 995-1009, 2011, 査読有.
- (5) D. Suematsu, T. Toma, Dark matter in the supersymmetric radiative seesaw model with an anomalous U(1) symmetry, Nucl. Phys. B847, 567-589, 2011, 査読有.
- (6) D. Suematsu, A CDM candidate in supersymmetric extra U(1) models, Nucl. Phys. (Proc. Suppl.) 221, 402, 2011, 査読有.
- (7) D. Suematsu, Neutrino mass and dark matter, Prog. part. Nucl. Phys. 64, 454-456, 2010, 査読有.
- (8) D. Suematsu, T. Toma, T. Yoshida, Enhancement of the annihilation of dark matter in a radiative seesaw model, Phys. Rev. D82, 013012(1-13), 2010, 査読有.
- (9) D. Suematsu, T. Toma, T. Yoshida, Neutrino mass and μ term in a supersymmetric extra U(1) model, Int. J. Mod. Phys. A25, 4033--4053, 2010, 査読有.
- (10) H. Fukuoka, J. Kubo, D. Suematsu, Anomaly induced dark matter decay and PAMELA/ATIC experiments, Phys. Lett. B678, 401-406, 2009, 査読有.
- (11) D. Suematsu, T. Toma, T. Yoshida, Reconciliation of CDM abundance and $\mu \rightarrow e \gamma$

γ in a radiative seesaw model, Phys. Rev. D79, 093(1-7), 2009, 査読有.

(12) E. Ma, D. Suematsu, Fermion triplet dark matter and radiative neutrino mass, Mod. Phys. Lett. A24, 583-589, 2009, 査読有.

(13) D. A. Sierra, J. Kubo, D. Suematsu, D. Restrepo, O. Zapata, Radiative seesaw: Warm dark matter, collider and lepton flavor violating signals, Phys. Rev. D79, 013011(1--10), 2009, 査読有.

[学会発表] (計 11 件)

- (1) 福岡寛規、末松大二郎、藤間崇、Anomalous U(1) 対称性を持つ輻射シーソー模型における 2 成分暗黒物質、2010 年度日本物理学会北陸支部定例学術講演会、2010. 11. 27、富山大学 (富山県)
- (2) 福岡寛規、末松大二郎、藤間崇、Phenomenology of neutrino mass models and PAMELA/Fermi-LAT experiments、日本物理学会 2010 年秋季大会、2010. 9. 13、九州工業大学 (福岡県)
- (3) 末松大二郎、藤間崇、吉田哲郎、Anomalous U(1) 対称性を持つ超対称輻射シーソー機構、日本物理学会 2010 年秋季大会、2010. 9. 14、九州工業大学 (福岡県)
- (4) D. Suematsu, Supersymmetric model for neutrino masses with two dark matter candidates, The XXIV International Conference in Neutrino Physics and Astrophysics, 2010. 6. 18, Athens (Greece)
- (5) 末松大二郎、藤間崇、吉田哲郎、Enhancement of the annihilation of dark matter in a radiative seesaw model、日本物理学会第 65 回年次大会、2010. 3. 21、岡山大学 (岡山県)
- (6) 末松大二郎、藤間崇、福岡寛規、吉田哲郎、Diffuse gamma from dark matter decay in a neutrino mass model、日本物理学会第 65 回年次大会、2010. 3. 21、岡山大学 (岡山県)
- (7) 末松大二郎、Neutrino mass models and dark matter、新潟冬の学校 2010、2010. 1. 9、越後湯沢 (新潟県)
- (8) 末松大二郎、藤間崇、吉田哲郎、Radiative seesaw 模型における暗黒物質の対消滅散乱断面積の増加、2009 年度日本物理学会北陸支部定例学術講演会、2009. 12. 5、金沢大学 (石川県)
- (9) D. Suematsu, Neutrino mass and dark matter, International School of Nuclear Physics 31st Course; Neutrino in Cosmology, in Astro- and Nuclear Physics, 2009. 9. 21, Erice, Sicily (Italy)
- (10) 末松大二郎、藤間崇、吉田哲郎、Radiative seesaw 模型における CDM abundance と $\mu \rightarrow e \gamma$ 、第 37 回北信越地区

素粒子論グループ合宿研究会、2009. 5. 22-23、
妙高高原（新潟県）

(11) 末松大二郎、藤間崇、吉田哲郎、E6 から
導かれる extra U(1) 模型のニュートリノ質
量と μ -term、第 37 回北信越地区素粒子論グ
ループ合宿研究会、2009. 5. 22-23、妙高高原
（新潟県）

〔その他〕

○高校生・一般向け講演

末松 大二郎、「宇宙の加速膨張が意味する
こと ―背後にある物理とは―」、2011 年度ノ
ーベル物理学記念講演会、2011. 10. 20、金沢
大学数物科学類

末松 大二郎、「暗黒物質で作られた宇宙」、
2011. 10. 17、星稜高校

末松 大二郎、「素粒子と宇宙 ―暗黒物質で
作られた宇宙―」、2010. 9. 3、石川県立金沢
錦丘高校

末松 大二郎、「素粒子と宇宙の世界 ―暗黒
物質で作られた宇宙―」、2009. 6. 24、福井県
立美方高校

6. 研究組織

(1) 研究代表者

末松 大二郎 (SUEMATSU DAIJIRO)

金沢大学・数物科学系・教授

研究者番号：90206384