

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 10 日現在

機関番号：13301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24540263

研究課題名(和文)ニュートリノ質量・暗黒物質・バリオン数の起源から探る標準模型を越える理論構造

研究課題名(英文)Theoretical framework beyond the standard model studied from origin of neutrino masses, dark matter and baryon number asymmetry

研究代表者

末松 大二郎(Daijiro, Suematsu)

金沢大学・数物科学系・教授

研究者番号：90206384

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：近年の素粒子実験・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、暗黒物質の残存量、宇宙のバリオン数の同時説明という観点から、標準模型を越える理論構造に関する研究を現象論的制限を考慮しつつ進めた。その可能性を持つ拡張模型として、スカラー場部分を拡張し輻射効果によりニュートリノ質量を生成する模型を取り上げ、ニュートリノ質量・混合、暗黒物質質量、バリオン数生成について定量的な検討を行い、現象論的困難を引き起こすことなくこれらを整合的に説明し得ることを示した。さらに、この拡張は宇宙初期に観測結果に整合するインフレーションを引き起こす可能を持つことを指摘した。

研究成果の概要(英文)：We have studied some extended theoretical frameworks of the standard model from a view point that neutrino masses, dark matter abundance and baryon number asymmetry in the Universe should be explained in them, simultaneously. As such an interesting extension, we have adopted radiative neutrino mass models which are constructed by introducing new scalar fields to the standard model. We have examined the neutrino masses and mixing, the dark matter abundance and the generation of baryon number asymmetry in the model to find that they could be explained consistently. We have also shown that the model could realize inflation which is consistent with the data obtained through CMB observations.

研究分野：素粒子物理学

キーワード：標準模型の拡張 ニュートリノ 暗黒物質 宇宙のバリオン数 インフレーション

1. 研究開始当初の背景

申請者は、この数年来「ニュートリノ質量と暗黒物質の起源を関連づけるモデル」の研究を進め、非超対称モデルと超対称モデルの両方の枠組みにおいて、ニュートリノ振動と暗黒物質残存量の両者を同時に説明する拡張モデルを提案するとともに、その検証可能性について解析を行ってきた。また、「TeV 領域に新たな $U(1)$ ゲージ対称性を持つモデル」は、MSSM の重要な課題である μ 問題の解決を TeV 領域の物理により与えるという興味深い特徴を持ち、多くの研究者の注目を集めてきたが、申請者は、早くからこのモデルに注目し、 μ 問題との関係を最初に指摘するとともに、 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、この拡張モデルの現象論的特性の解析を進めて来た。このような研究実績を背景に、近年の実験・観測により定量的に明らかになってきた「ニュートリノ質量・混合、暗黒物質の存在、さらには宇宙のバリオン数」の同時説明という観点から、拡張標準モデルの持つべき理論構造の解明に取り組むことが、従来見落とされていた新たな可能性を見出す視点を与えるはずであるという発想のもと、当該研究に取り組むことになった。

2. 研究の目的

これまで多様な実験結果を説明することに成功してきた標準モデルは、ニュートリノ質量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。今後数年間に渡って、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。このような事態は、長い素粒子物理学発展の歴史の中でも、極めて稀なものと言っても過言ではなく、この類稀な状況を意識した視点から標準モデルを超える理論的可能性について研究を進めることは極めて有効である。本研究では、標準モデルを超える素粒子モデルの構築において、ニュートリノ質量とフレーバー混合の起源、暗黒物質の起源、宇宙のバリオン数生成機構の3つが極めて重要な鍵となるとの視点から、それらを矛盾無く同時に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持つべき特徴の解明を目標とする。これらの問題は、CP の破れ、ゲージ階層構造、クォーク・レプトンのフレーバー構造、陽子の安定性などの標準モデルの未解決問題と極めて密接な関係を持っており、標準モデルを超える理論を探索する上で極めて有効な研究方向であると考えられる。

他方、この 30 年近くに渡って続けられた標準モデルにおけるゲージ階層問題の解決という理論的動機付けにより進められた研究は、標準モデルの拡張に関して、超対称性の導入をはじめ、多くの理論的可能性を提示した。

しかし、これらは本研究で重要な鍵と位置付ける上述の3つの課題に対して、一部個別な解答を与えてはいるものの、互いに整合した満足の行く解答を与えてはいない。本研究では、従来の拡張モデルの特徴や問題点を十分に参考にしつつ、上述の課題に対する整合した解答を与え得るモデルの構築を考える。本研究の重要な視点は、3つの課題を個別・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、従来見落とされていた重要なヒントが得られる可能性を追求するという点にある。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研究を進める。

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は以下のものである。

(1) ニュートリノ質量と暗黒物質の起源を出発点とした素粒子モデルの考察。

超対称モデル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、最新の LHC 実験の結果から、極めて制限されたものとなっている。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ことを示唆するものとも、非超対称モデル由来の暗黒物質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、超対称モデルにとられること無く、多様な可能性について検討を進める。特に、その一つの可能性である小さなニュートリノ質量やレプトンフレーバー混合の起源と深く関連した暗黒物質モデルにおけるバリオン数生成について検討を進める。また、このモデルに内在する特徴を、超対称モデル、非超対称モデルの両方の枠組みで系統的に調べ、レプトジェネシスを可能とする新たなモデルへの拡張を探る。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との関係等が研究上の重要な鍵となる。また、 μ e 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の解析が重要な課題である。

(2) 新たな $U(1)$ 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。

LHC での現時点までのヒッグス探索は、シングレットスカラーで拡張された最小超対称標準モデル (NMSSM) が一つの有望なモデルであることを示唆している。新たな $U(1)$ 対称性を持つモデルは、NMSSM に似た特性を持ち、かつ MSSM に内在する μ 問題をうまく解決する可能性を持つため、超対称モデルとしては極めて有望なモデルと言える。このモデルは、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 等の他のモデルのニュートラリーノとは大きく異なる性質を持ち、この点を詳細に分析することで、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。既に LHC 実験で軽いスカラトップクォークの存在が排除されたかに見えるが、その場合においてもこのモデルでは電弱相転移が 1 次相転移になり得るという特性から、電弱相互作用におけるバリオン数生成の可能性が残されており、この点についての詳細な解析も必要である。さらに、モデルに導入可能な中間エネルギースケールは、ニュートラリーノ質量生成や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。これらの総合的研究は研究目的に沿った一つの重要な研究方向である。

(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。

超対称モデルにおいて、本研究課題の研究を進める場合、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、ニュートラリーノ質量とフレーバー混合の起源に関するモデル構築は大きく影響を受ける。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。この理由から、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。現時点までの LHC 実験結果は超対称粒子の質量は想定していたものより大きくなることを示唆している。この点を考慮に入れ、超対称性の破れに関する新たな可能性の考察も含めて研究を進める。

3. 研究の方法

研究期間を含む数年間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、標準モデルを越える理論的枠組に要求される諸性質の解明とモデルの構築を目指して研究を進める。研究の遂行にあたっては、今後指導することになる大学院生に、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、平成 24 年度は、以下のような研究計画・方法に従い研究を進める。

(1)申請者がこれまでに行って来た一連の研究は、本研究課題と密接な関連を持っており、これら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、効果的研究方向を探るとともに、研究目的で掲げた研究課題を強力に推進する。

ニュートラリーノ質量と暗黒物質を関連付けるモデルについては、この数年に渡って進めてきた研究を、特に宇宙のバリオン数生成問題に焦点を当て発展させることを目指す。これまで検討してきた超対称モデル、非超対称モデルの両者において、ニュートラリーノ質量及びフレーバー混合と暗黒物質残留量、 μ e を代表とするレプトンフレーバーを破る過程、バリオン数生成のすべてを無矛盾な形で説明し得るモデルへの拡張を試みることを中心的研究計画として設定する。各モデルにおいては、 μ 粒子の異常磁気能率、電子の電気双極子能率などに関する定量的計算を数値計算を含めて遂行する。ここで取り上げることになるモデルは、加速器実験と宇宙観測の両者との間に強い関連を持ち得る点で非常に興味深い。この研究課題はこれまでに海外研究者との共同研究という形で進展した経緯もあり、本研究計画においても研究を進める中でそのような形での展開が可能となるよう努力したいと考えている。また、さらなる研究に向けた準備的作業として、様々なニュートラリーノ質量生成機構において導入される新たな粒子群（特に中性粒子）の可能性を系統的に整理し、それら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モデルを取り扱った文献を収集し精読し参考にする。暗黒物質の起源に関わる素粒子モデルに制限を与える現象には特に注意を払い、特定のモデルにとらわれず、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。

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' 模型は、現時点における LHC 実験結果からも極めて興味深いモデルである。このモデルのより深化した解析に関しては、これまでの経験を踏まえるならば、設定課題に関連する研究としてすぐに取り組める状況にある。具体的には、まず電弱相転移に際してのバリオン数生成の問題に焦点を当て、LHC 実験で得られつつある超対称性粒子の質量下限を考慮に入れ、1 次相転移を実現する際のヒッグス質量の解析を手始めに研究を進める。これまでに解析してきたモデルの拡張を含め検討を進めるため、従来使用してきた数値計算プログラムの改良を進め、効率的に真空構造の決定を実行できるようにした上で、諸々の素粒子実験からの制限を考慮することにより、個々のモデルの許容パラメータ領域を明らかにする。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、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、モデルの許容パラメータ領域に対してさらなる制限を加える。これらをもとに、様々な物理量に対してモデルのもたらす予想値を具体的に提示することを目指す。既に公表されている LHC 実験のデータ

考慮に入れ、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、それぞれの模型に対して精度の高い形で提示できるよう試みる。超対称模型においては、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。現在までに得られた LHC 実験の結果は、ここで取り扱おうとしている模型の優位性を示唆しており、本研究計画の遂行は極めて時機を得た重要なものとなっていると思われる。

(2)LHC の新たな実験データの公表は研究の背景を大きく変える可能性を持つ。この点に十分に配慮し、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適宜訪問し、あるいは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、研究の進展をはかる。また、研究題目に関連した研究会等へ積極的に参加し、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る。特に、LHC 実験に関して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する。

(3)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の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、指導予定の大学院生に研究協力を依頼する。

平成 25 年度以後については平成 24 年度の方針を基本的には継承するが、以下のような点に注意を払い、適切な研究計画と方法を設定する。

(1)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は細心の注意を払い、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する。当初の研究計画を強く意識して研究を推進することは言うまでもないが、それらに必要以上に捕われることなく、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、そのような可能性が見出された場合には、それを最大限効果的に達成できるよう研究計画・方法等の見直しも柔軟に行い、研究目的の達成をはかる。

(2)申請者の講義や教務関連の職務のため、十分な研究時間を多くの時間を必要とする

数値計算の実施とそのデータ処理等に当てることのできない事態は継続することが予想される。これに対処するため、平成 24 年度と同様に、この時期に在籍予定の大学院生に研究協力を依頼する予定である。

(3)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する。また、最終年度には研究の結果を総合的にまとめ、それに基づき本研究計画を基礎に、将来大きく進展することが期待される研究方向について検討し、これらの成果を公表する。一般市民や学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ホームページの充実を図る。

4. 研究成果

近年の素粒子実験・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、暗黒物質の存在と残存量、宇宙のバリオン数の同時説明を可能とすることを拡張標準模型の必要条件として課し、模型の構築とその現象論的性質の解明を系統的に進めた。現時点での LHC 実験結果が、仮に超対称性が存在したとしても TeV より高いエネルギースケールで破れていることを示唆していることを考慮して研究対象を非超対称模型に絞り、上記の条件を満たす可能性を持つ有望かつ単純な模型として、輻射ニュートリノ質量生成模型及びその拡張模型を取り上げ詳細な考察を進めた。得られた主要な成果を次に示す。

(1)輻射ニュートリノ質量生成模型において、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の制限を条件とし、ニュートリノ質量が正規階層と逆階層をとる両方の場合について、宇宙のバリオン数の生成について定量的な検討を進め、以下の結果を得た。

原子炉ニュートリノ実験等を通して明らかになった θ_{13} の値を含め、すべてのニュートリノ振動実験結果を説明し得るパラメータ設定の具体例を与えた。さらに、このパラメータ設定の下で、TeV 領域に質量を持つ最も軽い不活性ヒッグスの中性成分を暗黒物質候補とした場合には、レプトンフレーバーを破る過程と矛盾なく容易に暗黒物質残存量の説明が可能となることを示した。

のパラメータ設定で、右巻きニュートリノが十分に重いか、あるいは TeV 領域の質量で共鳴レプトジェネシスが起る場合には、観測から要求されるバリオン数の生成が可能になることを示した。前者の場合には、

最も軽い右巻きニュートリノ質量は従来知られている下限値よりも一桁以上小さな値で十分であること、また、後者の場合には、右巻きニュートリノに要求される質量縮退の程度が通常のシーソー模型より大きく緩和されることを見出した。

のパラメータ設定で、暗黒物質の直接検出可能性について調べ、次世代の実験Xenon1Tで暗黒物質が観測される可能性に関する定量的な予想を与えた。

(2)標準模型では説明することのできない現象、すなわち、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の3つの同時説明を可能とする枠組みである(1)で取り上げた輻射ニュートリノ質量模型について一重項スカラー場による拡張を提案し、その現象論的諸特性について検討し、以下の点を明らかにした。

ニュートリノ質量生成においてニュートリノ質量の小ささの説明に本質的役割を果たす相互作用項が、この拡張模型では低エネルギー領域での有効相互作用として生じ、その結合定数の小ささは高エネルギー領域の物理から説明される可能性があることを示した。

TeVスケールでの共鳴レプトジェネシスにおいては、右巻きニュートリノの質量縮退と極めて小さなニュートリノ湯川結合の両方が必要となるが、この2つが一重項スカラーの導入により同時に実現され得ることを見出した。

ニュートリノ質量生成に關与する複素一重項スカラーに対して特殊なポテンシャルを仮定し、その時間発展を螺旋状経路に制限することで、単一インフラトンと同様のインフレーションがプランクスケールより小さな場の値により実現されることを示した。さらにこの模型では、宇宙背景放射の揺らぎのスペクトル指数とテンソル・スカラー比が最近の観測値をうまく再現することを示した。

のインフレーションにおいて、インフラトンの崩壊によりレプトン数の非対称性が生み出されることを使い、非熱的なレプトジェネシスを実現するシナリオを構成した。このシナリオでニュートリノ質量と暗黒物質の直接観測からの制限のもと十分なバリオン数が生成されるかについての数値的解析を行い、現実的なシナリオとなり得ることを見出した。この成果は現在、論文にまとめつつある。

(3)以上の成果に加えて、一重項スカラー導入に基づくインフレーションとレプトジェネシスについて、新たな別の可能性に関する

興味深いアイデアを得ている。現在、これについて更なる研究を進めつつある。また、輻射ニュートリノ質量模型において、暗黒物質の対消滅から生成される単色光子による暗黒物質の間接検出の可能性についての検討も進めている。これらに関しても結果がまとまり次第、論文として発表する予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計6件)

R.H.S.Budhi, S.Kashiwase, D.Suematsu, Inflation in a modified radiative seesaw model, Phys. Rev. D90, 113013(1-9), 2014, 査読有
DOI: 10.1103/PhysRevD.90.113013

D.Suematsu, Baryon asymmetry and dark matter in a radiative neutrino mass model, Nucl. Phys. Proc. Suppl. 237-238, 46-49 2013, 査読有
DOI: 10.1016/j.nuclphysbps.2013.04.055

S.Kashiwase, D.Suematsu, Leptogenesis and dark matter detection in a TeV scale neutrino mass model with inverted mass hierarchy, Eur. Phys. J. C73, 2484(1-12), 2013, 査読有
DOI: 10.1140/epjc/s10052-013-2484-9

S.Kashiwase, D.Suematsu, Baryon number asymmetry and dark matter in the neutrino mass model with an inert doublet, Phys. Rev. D 86, 053001(1-12), 2012, 査読有
DOI: 10.1103/PhysRevD.86.053001

D. Suematsu, Supersymmetric model for neutrino masses with two dark matter candidates, Nucl. Phys. Proc. Suppl. 229-232, 477, 2012, 査読有
DOI: 10.1016/j.nuclphysbps.2012.09.114

D. Suematsu, Extension of a radiative neutrino mass model based on a cosmological view point, Phys. Rev. D85, 073008(1-6), 2012, 査読有,
DOI: 10.1103/PhysRevD.85.073008

〔学会発表〕(計13件)

Romy H.S.Budhi, 柏瀬翔一、末松大二郎, Inflation in a modified radiative seesaw model、日本物理学会第70回年次大会、2015.3.23、「早稲田大学(東京都・新宿区)」

Romy H.S.Budhi, 柏瀬翔一、末松大二郎, 修正輻射シーソー模型におけるインフレーション、2014年度日本物理学会北陸支部定例学術講演会、2014.12.13、「福井大学(福井

県・福井市)」

柏瀬翔一、松崎功志、末松大二郎、輻射シーソーのインフレーション可能な模型における preheating の評価、2014 年度日本物理学会北陸支部定例学術講演会、2014.12.13、「福井大学（福井県・福井市）」

柏瀬翔一、末松大二郎、遠山国也、Inert doublet model におけるダークマター対消滅起源の単色フォトンの解析、日本物理学会2014 年秋季大会、2014.9.18、「佐賀大学（佐賀県・佐賀市）」

末松大二郎、Leptogenesis and dark matter detection in a TeV scale neutrino mass model with inverted mass hierarchy、3rd Workshop on Next Generation Accelerator-based Neutrino、2014.6.21、「京都大学理学部セミナーハウス（京都府・京都市）」

S.Kashiwase, D.Suematsu, Leptogenesis and dark matter in a radiative neutrino mass model (Poster), Neutrino 2014, 2014.6.6, 「Boston (USA)」

柏瀬翔一、末松大二郎、Baryon number asymmetry in the degenerate right-handed mass model、日本物理学会第 69 回年次大会、2014.3.27、「東海大学（神奈川県・平塚市）」

柏瀬翔一、末松大二郎、Right-handed neutrino mass degeneracy in radiative seesaw model with an inert doublet、日本物理学会 2013 年秋季大会、2013.9.22、「高知大学（高知県・高知市）」

D. Suematsu, Neutrino mass and DM direct detection, International School of Nuclear Physics, 35th Course Neutrino Physics: Present and Future, 2013.9.21, 「Erice-Sicily (Italy)」

柏瀬翔一、末松大二郎、Baryon number asymmetry and dark matter in the neutrino mass model with an inert doublet、日本物理学会第 68 回年次大会、2013.3.26、「広島大学（広島県・東広島市）」

柏瀬翔一、末松大二郎、輻射シーソー模型におけるバリオン数非対称と暗黒物質、日本物理学会北陸支部定例学術講演会、2012.12.1、「金沢大学（石川県・金沢市）」

D. Suematsu, Baryon asymmetry and dark matter in a radiative neutrino mass model, Now 2012, 2012.9.12, 「Conca Specchiulla, Otranto (Italy)」

末松大二郎、標準模型の拡張とニュート

リノ・暗黒物質・バリオン数、瀬戸内サマーインスティテュート、2012.9.3-5、「国立大洲青少年交流の家（愛媛県・大洲市）」

〔その他〕
ホームページ等
<http://wwwhep.s.kanazawa-u.ac.jp/suematsu-hp/suematsu-home.html>

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

(2) 研究協力者

柏瀬 翔一 (KASHIWASE SHOICHI)