

平成 21 年 4 月 15 日現在

研究種目：基盤研究（C）  
 研究期間：2005～2008  
 課題番号：17540246  
 研究課題名（和文）  
 超弦理論の有効理論の構造と  $\mu$  問題の TeV 領域解の研究  
 研究課題名（英文）  
 Study of effective theories for superstring and solutions for  $\mu$  problem at TeV regions  
 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：超弦理論の低エネルギー有効理論として期待される TeV 領域に付加的 U(1) 対称性を持つモデルの現象論的特性やニュートリノ質量の起源を中心課題として標準模型を越える理論構造の探索を行った。その結果、超対称模型における新たな暗黒物質の提案、ニュートリノ質量の起源と暗黒物質が関係する可能性の指摘、物質の起源についての新たな可能性の提案、超対称性の破れについての新たな可能性とその現象論的特徴の解明などの研究成果を得た。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2005 年度	1,700,000	0	1,700,000
2006 年度	600,000	0	600,000
2007 年度	600,000	180,000	780,000
2008 年度	500,000	150,000	650,000
年度			
総計	3,400,000	330,000	3,730,000

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：超弦理論、超対称性、 $\mu$  問題、暗黒物質、ニュートリノ、CP 対称性の破れ

## 1. 研究開始当初の背景

申請者は、研究開始時までに、超弦理論の有効理論にしばしば現れる新たな U(1) 対称性を持つモデルが、最小超対称標準模型 (MSSM) を含む多くの超対称模型に内在する  $\mu$  問題の解決を TeV 領域の物理に基づき、もたらし得ることを初めて指摘するなど、この種の模型が現象論的に興味深い数多くの性質を持つことを明らかにして来た。この種の模型は、TeV 領域に質量を持つ中性ゲージ粒子  $Z'$  の存在や最も軽い中性ヒッグス粒子の性質、ニュートラリーノの性質を通して、LHC 等を使用した TeV 領域の実験によって確認することが

可能であることを考慮するならば、LHC の稼働を間近に控えたこの時期に、超弦理論に基づき、その有効理論として導かれるこの種の模型を系統的に分類し、その各々に対して最も軽い中性ヒッグス粒子の質量や  $Z'$  の質量、ニュートラリーノの崩壊モードの特徴などを定量的に詳細に押さえること等を含むより詳細な模型の現象論的性質の解析を進めることが極めて重要であるとの認識に至り、本研究課題を提案することとなった。

## 2. 研究の目的

超対称性の導入は標準模型を拡張する最も

有望な可能性として研究が進められているが、超対称性による拡張を考える場合、ゲージ群の構造や物質場の自由度以外に超対称性の破れに関係したパラメータに代表される多くの任意性が入り込んでくる。このため、模型構成の観点からは、何らかの基礎理論に裏付けられた指導原理に基づく考察が可能となることが望まれる。重力を含む統一理論の有望な候補と考えられている超弦理論はその基本的対称性として超対称性を持っており、この理論を基礎理論とすることにより模型構成に際して導入される任意性をコントロールすることは素粒子の超対称模型を考える上で極めて有望な試みといえる。

一方、超弦理論の摂動論的真空は無限に縮退しており、理論の非摂動的な取り扱いができない限り、低エネルギー領域での有効理論の構造を一意的に決めることはできない。超弦理論を基礎理論と採る立場においても、現状では任意性を排除することができないことは良く知られている。さらに、この数年の非摂動超弦理論の発展に基づくブレーンの導入は模型構成上の可能性を著しく拡大させた。このような状況下で超弦理論を基礎に現実的模型を構成して行くにはしっかりと方法論に基づく研究が必要とされている。

本研究においては、双対性に代表される超弦理論に特徴的な対称性に基づき非摂動効果を適切にコントロールしつつ、弱い相互作用のエネルギー領域での現象論的情報を効果的に可能な限り取り入れるという方法を用いることにより、コンパクト化した標的空間の構造に制限を付け、超弦理論の低エネルギー領域の有効理論と考えられる超重重力理論の構造、特に超対称性の破れを代表とする種々の対称性の破れの起源や構造について新たな知見を得ることを目指すとともに、それに関わる新たな現象論的予言を与えることを目標とする。コンパクト化した標的空間の構造と素粒子の現象論的諸性質の関連を検討することは、近年急速な発展を遂げている純粋に理論的な超弦理論へのアプローチとは相補的な役割を果たし、超対称模型の現象論的研究に留まらず、超弦理論自体の発展にも大きな寄与を果たしうるものである。

以上の観点に基づき、本研究において、取り扱う具体的な課題を以下のようなものに設定した。

- (1)  $\mu$  問題を解決する新たな  $U(1)$  対称性を持つ模型の現象論的性質の精査。特に、最も軽い中性ヒッグスや  $Z'$ 、ニュートラリーノなどの質量や相互作用の詳細を定量的に検討する。
- (2) 超弦理論の低エネルギー有効理論の構造の解明、特に、 $\mu$  問題を解決する新たな  $U(1)$  対称性を持つ模型の系統的分類。純粋に

理論的な解析ではなく、素粒子の現象論的諸性質との関連に重点を置いた研究を行う。

(3) 超対称模型に特徴的な諸性質とコンパクト化との関係の解明。超対称模型の持つ複数の特性、例えば、 $\mu$  項、 $R$  対称性、平坦なポテンシャルを持つ場の配位等の存在が様々な低エネルギー領域の現象に与える影響を調べ、コンパクト化した標的空間が満足すべき条件を明らかにする。

(4) 超対称性の破れの起源と構造、及び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。

(5) コンパクト化に伴う諸現象の低エネルギー領域の物理への影響。特に、コンパクト化した標的空間の構造と  $CP$  位相やゲージ構造、フレーバー構造等との関係を追求する。

### 3. 研究の方法

以下に挙げる研究計画・方法に従い研究を進めた。

(1) 本研究計画開始時までの研究を通して明らかになった問題点、課題等を改めて整理し直し、本研究を効果的に推進するうえでのヒントを探る。特に、 $\mu$  問題の解決に関与し得る新たな  $U(1)$  対称性を  $TeV$  領域に持つ模型の真空構造を決定するための繰り込み群方程式を使用した現有の数値計算プログラムの改良を、多様な模型に使用可能な方向で進める。超対称性の破れのパラメータを含め、膨大なパラメータ空間の中でポテンシャル最小点を効率的に求めることを可能にすることが、本研究課題を遂行する上で非常に大きな要因となる点に十分配慮し、この問題に精力的に取り組む。同時に対象とする  $Z'$  模型の特徴に強く関連した現象について、新たな立場から再検討し、それらについて必要な基礎的計算を実行し、真空構造の解析から選択されたパラメータに対して模型のもたらす様々な物理量に対する予想値を与えることを目指す。

これらを効率的に実行するために、これまでに行われて来た超対称模型特有の性質に関する現象論的研究に関する関連文献を中心に改めて収集・精読し、研究計画遂行の最良の道筋を選択できるように配慮する。その上で、特に重点を置いて研究を進めるべき現象、特に LHC 実験において重要となり得る現象を選択し、それに焦点を合わせて研究を進める。その際、高エネルギー領域の基礎理論としての超弦理論に関する情報を与えうる物理現象には特に注意を払う。

- (2) 初年度は上に述べた課題(1)に関わる作業と並行して、既に従来の研究を通して準備段階の研究を終え、いくつかの研究成果を挙げ、具体的研究をより深く進めることが可能と考えられる研究目的にあげた課題の(3)と(4)について本格的な研究を進める。

同時に(2)と(5)を中心とする超弦理論の理論的側面と大きく係わる研究課題については、本格的遂行の準備期間として位置づけ、過去に発表された関連文献の収集・精読を系統的に行い、研究計画遂行の最良の道筋を探る。その上で、特に重点を置いて研究を進めるべき項目を細部に渡って設定する。これらについては、2年次以後の研究の基礎を築くことに重点を置き、視野を広く持てるよう心がける。

(3) 研究題目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。

(4) 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収集を行うとともに、高エネルギー研究所等へ適宜赴き、最新の実験データ等の情報を収集し、研究の効果的進展をはかる。

#### 4. 研究成果

本研究課題において得られた主たる研究成果は以下の通りである。

(1) TeV 領域に付加的 U(1) ゲージ対称性を持つモデルは、 $\mu$  問題に自然な解決を与える。このようなモデルではニュートラリー部分が拡張されることから、最小超対称標準モデルで予想される暗黒物質の候補とは異なる性質を持つ暗黒物質が可能となる。この暗黒物質の候補について、WMAP の観測結果を再現するパラメータ領域を調べ、その領域において、LHC で測定され得る  $Z'$  の質量や崩壊分岐比、最も軽い中性ヒッグス粒子の質量、ニュートラリーの質量等の物理量に対する予想を与えた。さらに、モデルをニュートリノ質量の説明が可能となるように拡張することで、暗黒物質、バリオン数の起源、ニュートリノ質量の間に密接な関連が存在するモデルの可能性を調べた。

(2) ゲージ相互作用により超対称性の破れを媒介するモデルでは、FCNC が強く抑制されるなど現象論的に望ましい性質を持つ一方、 $\mu$  問題が深刻な問題として残る。この最小モデルを  $\mu$  問題の解決を容易にするように拡張すると、ゲージノ質量に物理的 CP 位相が残存し、電子や中性子の電気双極子能率の実験的制限に抵触する可能性が生じる。この問題について、ゲージノ質量が物理的 CP 位相を持つ場合には、他の超対称性の破れのパラメータが大きな CP 位相を持つ場合にも電気双極子能率の実験的制限と矛盾しないことがあり得ることを示し、その場合のヒッグス質量などの評価を与えた。さらに、このモデルにおける CP 位相の LHC 実験における検証可能性について検討を進めた。

(3) 暗黒物質は何らかの対称性により、その安定性を保証される必要があるが、この対称性はニュートリノ質量の起源と関連している可能性がある。ヒッグス部分を拡張し、ニュートリノ質量が輻射補正により生成されるモデルにおいて、この可能性を検討し、ニュートリノ振動実験からのデータを説明しつつ、同時に暗黒物質の存在量を説明しうるパラメータ領域を与えた。さらに、その様なパラメータ領域で期待される他のいくつかの現象、レプトンフレーバーを破る過程の発生確率や  $\mu$  粒子の異常磁気能率、LHC で作られる可能性のある超対称粒子の崩壊過程に対する予想を与えた。また、暗黒物質の安定性を保証する対称性が U(1) 対称性から導かれる場合についても、同様の可能性を検討した。(4) 付加的 U(1) 対称性を持つ超対称モデルにおいては、U(1) ゲージノの運動項混合により超対称性の破れの一部分が観測可能部分に伝達される可能性を持つことを指摘し、その場合、U(1) ゲージノは十分に重くなり、他の超対称性の破れのパラメータに輻射補正を通して大きな影響を与え得ることを示した。さらに、その影響が電弱対称性の破れに伴って現れる微調整問題を緩和する可能性を持つことを示した。

(5) 現在の宇宙において、バリオンと暗黒物質の存在量が同じ程度であることを合理的に説明する理論は知られていない。この問題について、新たな可能性を提案するとともに、超対称モデルにおいては、この問題が  $\mu$  項と関係している可能性を指摘した。また、暗黒エネルギー、暗黒物質及びバリオンが共通の起源から生じているモデルを具体的に構成することにより、そのような可能性も存在し得ることを示した。

#### 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 15 件)

(1) D. Suematsu, T. Toma and T. Yoshida, Reconciliation of CDM abundance and  $\mu \rightarrow e \gamma$  in a radiative seesaw model, arXiv:0903.0287 [hep-ph], 2009, 査読無.

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

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

(4) D. Suematsu, Dark matter and

leptogenesis in a non-SUSY model for neutrino masses, J. Phys.: Conf. Ser. 136, 042025, 2008, 査読有

(5) D.Suematsu, Leptogenesis and dark matter unified in a non-SUSY model for neutrino masses, Eur. Phys. J. C56, 379-387, 2008, 査読有

(6) D.Suematsu, Phenomenological features in a model with non-universal gaugino CP phases, Eur. Phys. J. C52, 211-221, 2007, 査読有

(7) S.Nakamura and D.Suematsu, Supersymmetric extra U(1) models with a singlino dominated LSP, Phy. Rev. D75, 055004-1-16, 2007, 査読有

(8) J.Kubo, D.Suematsu, Neutrino masses and CDM in a non-supersymmetric model, Pjhs. Lett. B643, 336-341, 2006, 査読有

(9) D.Suematsu, SUSY breaking based on Abelian gaugino kinetic term mixings, JHEP 0611, 029-1-8, 2006, 査読有

(10) J.Kubo, E.Ma and D.Suematsu, Cold Dark Matter, Radiative Neutrino Mass,  $\mu \rightarrow e \gamma$ , and Neutrinoless Double Beta Decay, Phys. Lett. B642, 18-23, 2006, 査読有

(11) D.Suematsu, Dark world and baryon asymmetry from a common source, JCAP 0601, 026-1-21, 2006, 査読有

(12) D.Suematsu, Singlino dominated lightest supersymmetric particle as a CDM candidate in supersymmetric models with an extra U(1), Phys. Rev. D73 035010-1-12, 2006, 査読有

(13) D.Suematsu, Non-thermal production of baryon and dark matter, Astropart. Phys. 24, 511-519, 2006, 査読有

(14) D.Suematsu,  $\mu$ -term as the origin of lepton number asymmetry, J. Phys. G31, 445-458, 2005, 査読有

(15) T.Baba and D.Suematsu, Neutrino Texture saturating the CP asymmetry, Phys. Rev. D71, 073005-1-10, 2005, 査読有

[学会発表] (計 9 件)

(1) 末松大二郎, 藤間崇, 吉田哲郎, coannihilation の効果による残留量とダークマター, 2008 年度日本物理学会北陸支部定例学術講演会, 2008.11.29, 福井

(2) 末松大二郎, 藤間崇, 吉田哲郎, E6 模型のニュートリノ質量, 2008 年度日本物理学会北陸支部定例学術講演会, 2008.11.29, 福井

(3) 福岡寛規, 中村悟史, 末松大二郎, Phenomenology of extended gauge mediated supersymmetry breaking model, 日本物理学会 2008 年秋季大会, 2008.9.22, 山形

(4) D. Suematsu, Dark matter and

leptogenesis in a non-SUSY model for neutrino masses, Neutrino 2008, 2008.5.26, Christchurch, NZ

(5) 中村悟史, 末松大二郎, 超対称 Extra U(1) 模型におけるシングリーノ暗黒物質の起源, 日本物理学会第 62 回年次大会, 2007.9.24, 札幌

(6) 中村悟史, 末松大二郎, 超対称 Extra U(1) 模型におけるシングリーノ暗黒物質の直接検出について, 日本物理学会 2007 年春季大会, 2007.3.27, 東京

(7) S. Nakamura and Daijiro Suematsu, A CDM Candidate in Supersymmetric Extra U(1) Models, Neutrino 2006, 2006.6.16, Santa Fe, USA

(8) 中村悟史, 末松大二郎, 暗黒物質に基づく Extra U(1) 超対称模型の解析, 日本物理学会第 61 回年次大会, 2006.3.27, 愛媛

(9) 中村悟史, 末松大二郎, extra U(1) 超対称模型におけるシングリーノ優勢な暗黒物質, 2005 年度日本物理学会北陸支部定例学術講演会, 2005.12.3, 福井

[その他]

○ 高校生・一般向け講演

末松大二郎, 「小林・益川理論: 粒子反粒子対称性の破れ」, 2008 年度ノーベル物理学賞受賞記念講演会, 2008.10.30, 金沢大学自然科学研究科

末松大二郎, 「宇宙と素粒子の世界—暗黒物質で作られた宇宙—」, 2007.7.11, 福井県立美方高等学校

末松大二郎, 「暗黒物質から成り立っている宇宙」, 2006.9.28, 富山県立南砺総合高等学校福野高等学校

## 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