

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25年5月15日現在

機関番号：13101

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22540269

研究課題名（和文）離散世代対称性をもつ超共形ダイナミクスに基づく素粒子模型

研究課題名（英文）Particle models based on superconformal dynamics with discrete flavor symmetries

研究代表者

中野 博章（NAKANO HIROAKI）

新潟大学・自然科学系・准教授

研究者番号：60262424

研究成果の概要（和文）：超対称性は、電弱対称性の破れの起源を探る上で魅力的なアイデアである。本研究では、フレーバー非保存過程の抑制機構と暗黒物質の関係に着目した。フレーバー非保存を抑制機構としては、超共形相互作用によるものと連続的 R 対称性によるものの二つの場合を検討した。特に後者において、 R 対称性の破れを表すグラビティーノ質量と、ニュートリノ質量の生成機構および陽子安定性の関係を得た。

研究成果の概要（英文）：Supersymmetry (SUSY) is an attractive idea for seeking the origin of electroweak symmetry breaking. In this study, we focused on a possible relation between a mechanism for suppressing flavor violating processes and a candidate of dark matter. We examined two different scenarios for the suppression mechanism of flavor violations: The first one is models with superconformal interactions while the second one is models with $U(1)R$ symmetry. Specifically we found relations between R -breaking gravitino mass, generation mechanism of tiny neutrino mass and proton stability.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	800,000	240,000	1,040,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
2012年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	2,200,000	660,000	2,860,000

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：素粒子論、超対称性、ニュートリノ質量、陽子崩壊

1. 研究開始当初の背景

超対称性は、素粒子物理学の魅力的なアイデアである。電弱対称性の破れの機構を解明する手がかりを与え、ゲージ相互作用の大統

一の可能性を示唆するだけでなく、宇宙暗黒物質の有力候補を予言する理論的枠組みである。大型ハドロン加速器（LHC）実験が重心系エネルギー $7\text{TeV} \sim 8\text{TeV}$ で本格的に稼動

したここ数年、そのような超対称粒子の発見が期待されてきた。

このような超対称理論を実験的に検証するには、超対称性の破れ—その伝達機構やスケール依存性—について、深い理解が重要である。超対称性から存在が予言される超対称粒子が LHC 実験で到達可能なエネルギー領域に存在するためには、その質量スペクトルはフレーバー非保存過程の実験結果と矛盾しない必要がある。つまり、クォーク・レプトンの超対称パートナーであるスクォーク・スレプトンの質量が十分縮退していないと、超対称粒子によるフレーバー非保存過程が実験的制限を越えてしまう。この場合、三世代の物質場の質量に関して、クォーク・レプトンの階層構造とスクォーク・スレプトンの縮退構造をいかに両立させるかが理論的な課題であり、「超対称フレーバー問題」と呼ばれてきた。

「超対称フレーバー問題」を解決するアイデアとしては、超対称性の破れ、特にその伝達機構が特殊な形になる模型がいくつか知られており、精力的に研究されてきた。これら従来の模型に加えて、ここ数年来、別の可能性が提唱されていた。一つは、問題の解決を湯川階層性の生成機構に求めるもので、くりこみ群の赤外固定点として実現する超共形ダイナミクスを用いるアプローチである。もう一つの可能性として、連続的 R 対称性を持つように模型を拡張すると、フレーバー非保存過程が抑制される可能性も比較的最近になって指摘されていた。

2. 研究の目的

本研究では、超対称フレーバー問題を超対称理論の大きな課題と捉え、その解決へのアプローチを暗黒物質との関係から検討することを主要な目的とした。つまり、超対称理論の枠内で、フレーバー非保存過程を抑制する機構と、暗黒物質の存在理由の関係を解き明かすことが第一の目的である。

フレーバー非保存過程を抑制する機構として、まず最初に着目するのは、超共形ダイナミクスによるスカラー質量の縮退機構である。くりこみ群の赤外固定点において、クォーク・レプトンの異常次元が一意的に決定されるならば、それらの超対称パートナーのスカラー質量は縮退するという性質に着目する。そのような一意性の条件を満たすために、離散対称性を考える。当初の計画としては、クォーク・レプトンと強結合相互作用によって結ばれる超共形セクタの物質場に離散対称性を要求することで、超共形セクタの

束縛状態として、暗黒物質の候補が得られぬか検討することにあつた。

超対称模型における最軽ヒッグス粒子については、極小超対称標準模型 (MSSM) の枠内では、質量に上限が存在することがよく知られている。2011 年にヒッグス粒子らしき新粒子の発見が報告されたが、この粒子の質量 126GeV は、MSSM で超対称粒子が TeV スケール程度に存在する場合に期待される上限値を若干上回っている。したがって、極小模型でヒッグス粒子の質量を再現することは自明でない。この点からも、超対称標準模型を拡張した模型を考察することは急務である。したがって、本研究では、超共形模型、連続的 R 対称模型の以外にも、いくつかの拡張模型を取り上げ、最軽ヒッグス粒子の質量を検討することを第二の目的とした。

3. 研究の方法

拡張された超対称標準模型において、フレーバー非保存過程の抑制機構と暗黒物質の関係を二つの場合に検討した。

- (1) 一つは、超共形相互作用によりフレーバー非保存を抑制する模型において、超共形セクタの離散フレーバー対称性により、安定な束縛状態が暗黒物質となる可能性である。離散フレーバー対称性の選択に対してヒントを得るために、強結合理論と双対関係にあると期待されている非因子型余剰次元模型も取り上げた。
- (2) もう一つは、連続的 R 対称性によりフレーバー非保存過程を抑制する模型において、超重力による R 対称性の破れに伴う軽いグラビティーノや、拡張ヒッグスセクタと結合する超対称性の破れに伴う南部・ゴールドストーン粒子 (擬ゴールドスティーン) が暗黒物質になる可能性である。

超対称模型における最軽ヒッグス粒子に関しては、つぎの三つの拡張模型の場合にヒッグス質量がどこまで大きくできるかを検討した。

- (3) 非因子型余剰次元模型において、5 次元場のキルク質量項を用いると、ゼロモードの局在化を比較的自由に制御することができる。非因子型五次元背景時空に超対称性を実現した模型では、特に、トップクォークの第一励起モードが極端に軽い場合、ヒッグス質量への輻射補正が大きくなる可能性が指摘されており、それを精査することは重要な課題である。
- (4) 超対称性を破る強結合セクタが低エネルギーにある場合の有効理論として、超対称標準模型を非線形に拡張する模型を取り上げ、特にヒッグス粒子の質量への補正

がどこまで大きくできるかを検討する。
(5) 第三世代の超対称粒子であるスカラー
トップ(およびスカラーボトム)のみがTeV
スケールより軽い可能性を自然に実現す
る模型に split family 模型がある。標準
模型のゲージ対称性が10~100TeV スケ
ールで二倍に拡大した理論を想定し、第一・
第二世代の物質場と第三世代の物質場を
それぞれ別のゲージ群と結合させる。この
とき、余分なゲージ対称性が自発的に破れ
ることで、ヒッグス粒子に超対称性を破る
質量項が加わることを用いる。

なお、本研究で取り上げる拡張模型は互い
にまったく無関係というわけではなく、以下
のような相互関係がある。それらを比較検討
することにより、新しい展望を得ることが期
待される。

- (3) 非因子型の余剰次元模型は、強結合理論
と双対関係にあると期待されている。
- (4) 超対称な余剰次元模型からはN=2 拡張超
対称性を部分的に持つ模型が予想される
が、連続的R対称な超対称模型はその一例
になっている。
- (5) split family 模型は、ゲージノが超対称
性の破れを伝えるゲージノ伝達模型にお
いて、余剰次元方向を離散化したものの一
種に相当している。

4. 研究成果

本研究における第一の方法(当初計画)で
は、「超対称なフレーバー問題」に対して超
共形セクタとの強結合相互作用による解決
を目指したが、このアプローチの特徴は第
一・第二世代の超対称粒子が比較的軽い(か
つ縮退する)ことである。一方、LHC 実験の
最新結果は少なくとも第一・第二世代の超対
称粒子が1.5TeV より重いことを示唆してお
り、このアプローチは修正が必要なことが判
明した。

一方、第二の方法は、フレーバー非保存過
程を抑制するために連続的R対称性を導入す
るものである。このアプローチの特徴は、ま
ずゲージセクタでは、ゲージ粒子の超対称パ
ートナー(ゲージノ)に対し従来のマヨラナ
型ではなくディラック型質量項を仮定する
こと、またヒッグスセクタでは、ヒッグス二
重項を二倍に拡張し、ヒッグス場の超対称パ
ートナー(ヒグシーノ)がディラック型質量
項を持つことである。

ディラック型ゲージノの理論における最
大の特徴は、スカラー質量に対する量子補正
が有限になることである。その結果、電弱対
称性の破れにおける階層性問題を避けつつ、

強い相互作用のゲージノ(グルイーノ)を数
TeV より重くすることが可能になり、LHC 実
験の結果を矛盾なく解釈することができる。

我々はさらに、ヒッグス場と結合する一重
項場を導入することで、ヒッグスセクタでも
超対称性が自発的に破れる模型を取り上げ、
その模型において、超重力理論の枠組みで予
想されるR対称性の破れの効果を考察した。
特に、ニュートリノ質量スケールを自然に再
現できるR電荷を見出した。つまり、右巻
きニュートリノのR電荷を変更することで、
階層的に小さな湯川結合を仮定することな
く、ニュートリノの小さな質量がR対称性の
破れの効果として生成できることを示した。
これは、質量の小ささにもかかわらず、ニュ
ートリノが大きな湯川相互作用を持ちえる
ことを意味し、レプトンフレーバー構造に与
える影響(ミュー粒子異常磁気能率やレプト
ンフレーバー非保存過程)が期待される。

また、ニュートリノが大きな湯川相互作用
を持ちえることの別の影響として、陽子安定
性からの制限を検討した。その結果、R対称
性の破れを特徴付けるグラビティーノ質量
として、100eV 以下の軽い領域と、10keV 以
上の重い領域が許されることを示した。(ま
た、フレーバー対称性を併用することで、ニ
ュートリノ質量の正しいスケールを容易に
再現できることも示した。)

この模型から得られる暗黒物質の候補と
しては、超重力理論におけるグラビティーノ
の他、拡張ヒッグスセクタにおける超対称性
の破れに伴う南部ゴールドストーン粒子とし
て、軽い擬ゴールドスティーンが現れる。こ
の擬ゴールドスティーンは、暗黒物質やさら
には暗黒輻射になる可能性を宇宙論的に検
討するためのステップとして、ゲージノがデ
ィラック型の極限で、擬ゴールドスティーン
を含む質量行列の固有値や混合角について
詳細な解析を行い、部分的な結果を発表した。

超対称模型における最軽ヒッグス粒子に
関しては、以上に関連するいくつかの文脈で、
予備的考察を行った。

- (3) 超対称化された非因子型余剰次元模型に
おいて、5次元場のキंक型質量項はゼロ
モードの局在化を制御するパラメータで
あり、これらをフレーバーごとに自由な値
を仮定することにより、現実的なクォーク
・レプトンの質量行列を再現できる。特
に、トップクォークの第一励起モードが極
端に軽い場合を検討し、トップクォーク質
量の微調整やヒッグス質量への輻射補正
が大きくなる可能性を検討した。しかし、
電弱精密測定からの制限等を考慮す

ると、励起モードを極端に軽くできるかに疑義が生じ、現実的な可能性ではないことが判明した。

- (4) 超対称性を破る強結合セクタが低エネルギーにある場合の有効理論として、超対称標準模型を非線形に拡張する模型を取り上げ、特にヒッグス粒子の質量への補正がどこまで大きくできるかを検討した。超対称性の破れのスケールが電弱スケール 100 GeV と同程度の低エネルギーで起こる場合、超対称性の自発的破れに伴う南部・ゴールドストーン粒子（ゴールドスティーノ）との非線形相互作用が無視できないという意味で非線形な拡張になっている。ゴールドスティーノ超場が誘導するヒッグスポテンシャルから、新たなヒッグス自己相互作用が生成され、ヒッグス粒子の質量を輻射補正なしでもち上げる可能性がある。このことを古典近似のヒッグス質量行列を対角化し、質量固有値を数値的に計算することで確認した。
- (4) split family 模型では、第一・第二世代の物質場と第三世代の物質場がそれぞれ別のゲージ群と結合するため、ゲージ結合定数の大統一が自明でなくなる。大統一が回復する条件の下、余分なゲージ対称性の破れから誘導されるヒッグス質量項の上限を得られることに着目した。また量子補正の大きさを計算コード“FeynHiggs”を用いて見積もった結果、LHC 実験で報告された値 126GeV を十分再現可能であることを追確認した。

なお、宿泊型国際研究集会 Summer Institute 2010 の運営に組織委員長として携わり、超対称理論から、宇宙論、素粒子実験にわたる多岐の分野の専門家を招待し、彼らと議論することができたのは大変有意義であった。

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 1 件)

- ① Yusuke Morita, Hiroaki Nakano, and Takashi Shimomura, “Neutrino mass and proton decay in a $U(1)_R$ symmetric model”, Progress of Theoretical and Experimental Physics, (2013), 053B02 (21pages), 査読有, DOI: 10.1093/ptep/ptt016

[学会発表] (計 7 件)

- ①角田拓也, 中野博章, “Higgs mass bound in SUSY Randall-Sundrum model”, 2010 年 9 月 13 日, 日本物理学会 (九州工業大学)
- ②森田悠介, 中野博章, 下村崇, 武田一浩, “Effects of R symmetry breaking in visible

SUSY breaking scenario”, 2011 年 3 月 24 日, 日本物理学会 (関西学院大学)

- ③Y. Morita, H. Nakano, and T. Shimomura, “Effects of R symmetry breaking in visible SUSY breaking scenario”, 2012 年 8 月 19 日, SI2012 (日月潭教師会館, 台湾)
- ④Y. Morita, H. Nakano, and T. Shimomura, “R-breaking effects of an R symmetric model by supergravity”, 2012 年 10 月 1 日, Japanese-German symposium on neutrino, dark matter, Higgs and beyond (石川県しいのき迎賓館, 金沢市)
- ⑤Y. Morita, H. Nakano, T. Shimomura, “Neutrino mass and proton decay in a $U(1)_R$ symmetric model”, 2013 年 2 月 19 日, Toyama International workshop HPNP (富山大学)
- ⑥Y. Morita, H. Nakano, T. Shimomura, “Neutrino mass and proton decay in an R symmetric model”, 2013 年 3 月 3 日, KEK-ph2013 (KEK, つくば)
- ⑦森田悠介, 中野博章, 下村崇, “Neutrino mass and proton decay in an R symmetric model”, 2013 年 3 月 29 日, 日本物理学会 (広島大学)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中野 博章 (NAKANO HIROAKI)
新潟大学・自然科学系・准教授
研究者番号: 60262424

(2) 研究分担者

谷本 盛光 (TANIMOTO M ORIMITSU)
新潟大学・自然科学系・教授
研究者番号: 90108366

浅賀 岳彦 (ASAKA TAKEHIKO)
新潟大学・自然科学系・准教授
研究者番号: 70419993

(3) 連携研究者

吉岡 興一 (YOSHIOKA KOICHI)
慶応義塾大学・理工学部・准教授
研究者番号: 80363323