

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 16 日現在

機関番号：13101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26400243

研究課題名(和文)連続的R対称性をもつ超対称模型によるヒッグス粒子と暗黒物質の研究

研究課題名(英文)A study on Higgs particle and dark matter candidates in a SUSY model with a continuous R symmetry

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,600,000円

研究成果の概要(和文)：超対称性は、素粒子物理学に於ける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、大型加速器実験の結果と矛盾しない理論的可能性として、Dirac型ゲージノを含み、連続的R対称性を持つ模型を研究した。具体的には、一重項拡張模型において、相互作用の摂動論的大統一と矛盾しない条件の下、ヒッグス粒子の質量の観測値を再現する課題が解決できることを示した。また、ヒッグス崩壊過程や暗黒物質の探索を通じて、模型を検証する可能性を探った。

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 have focused on experimentally viable SUSY models with Dirac type gaugino and a continuous R symmetry. Specifically we have examined an R symmetric model which we named "Next-to-Minimal R symmetric model" and found that the observed Higgs mass can be well-reproduced even when a perturbative unification condition is imposed. We also discussed how the model can be tested through the invisible decay width of Higgs particle and properties of dark matter candidates.

研究分野：素粒子論

キーワード：素粒子論 超対称性 ヒッグス粒子 暗黒物質

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研究する手がかりを与えるだけでなく、ゲージ相互作用の大統一の可能性を示唆し、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 $7\text{TeV} \sim 8\text{TeV}$ で本格的に稼動して以来、そのような超対称粒子の発見が期待されてきた。

しかしながら、現在までのところ、超対称粒子は想定されていた 1TeV 以下の質量スケールには存在しないことが確からしくなりつつある。これは、超対称理論が電弱対称性の破れの起源をパラメータの微調整なしに説明するという考え方に再考を迫るものであり、その成否を注意深く検討することは重要な課題である。

また、2012年にヒッグス粒子が発見され、その質量が 125GeV と確定したことも、超対称理論に強い制限を課すものとなっている。ヒッグス粒子が比較的軽い領域に存在すること自体は超対称模型と整合的であるものの、観測値 125GeV を極小超対称標準模型 (MSSM) の枠内で再現するには、超対称粒子が 10TeV 程度かそれ以上に重いことが要求される (重い超対称性シナリオ)。

一方、極小超対称標準模型を拡張する可能性が精力的に調べられてきた。中でも、本研究では連続的 R 対称性を持つ超対称模型に着目する。この拡張模型の著しい特徴は、ゲージノ (ゲージ粒子の超対称パートナー) に対して、従来のマヨラナ型ではなく、ディラック型の質量項を考える点にある。

(1) ディラック型ゲージノを含む模型には、以下の理論的長所が知られており、その結果、階層性問題を回避しつつ、LHC 実験結果を矛盾なく解釈することが可能になる：

“supersoft 性”：スクォークなどのスカラー場の質量に、二次発散はおろか対数発散もなくなる。このため、グルイーノが重くてもスクォークを十分軽く保つことが可能になり、電弱対称性の破れにおける微調整を避けることが出来る。

“supersafe 性”：マヨラナ型ゲージノの場合に比べて、スクォークの主要な生成過程が禁止または抑制される。このため、グルイーノが $2 \sim 3\text{TeV}$ 程度に重ければ、LHC の直接探索によるスクォーク質量の制限が大幅に緩和される。

“flavor-safe 性”：連続的 R 対称模型では、フレーバー非保存過程が抑制される。

(2) しかし一方で、ディラック型ゲージノを含む模型には、次のような課題が知られており、そのままでは現実的な模型と考え

ることが出来なかった。

ゲージ大統一との整合性：ゲージノにディラック質量を与えるため、新たに随伴表現のカイラル場を導入する。このため、極小超対称標準模型で成立していたゲージ大統一が非自明になる。

“D 項相殺”とヒッグス質量の問題：随伴スカラー場との三点相互作用のため、ヒッグス粒子の質量に主要な寄与を与える四点結合 (いわゆる D 項) が相殺されてしまい、古典極限でヒッグス粒子がゼロ質量になってしまう。量子補正を考慮しても、LEP 実験による下限 114GeV を超えることさえ困難とされてきた。

以上の他、次のような難点も知られていた：

随伴表現のカイラル場が大統一対称性の破れの後に軽く残ることについて、なんらかの説明が必要である。

ゲージノにディラック質量を与える “supersoft 項” の起源が明確ではない。暗黒物質の有力候補が知られていない。

2. 研究の目的

本研究では、連続的 R 対称性を持つ超対称模型を取り上げ、上述の課題 ~ を克服することで、電弱対称性の破れを自然に実現する可能性を追求しようとするものである。特に、ヒッグスセクタを拡張することにより、ヒッグス粒子の質量として観測値 125GeV が十分再現可能であることを示すことが第一の目的である。

拡張ヒッグスセクタとしては、2011年に Izawa らによって提案された、複数共存する超対称性の破れがヒッグス場と直接結合する模型を採用する。この模型は、ディラック型ゲージノの持つ R 対称性と整合的に、連続的 R 対称性を持つ。この模型では、R 荷電を持つゲージ重項場が新たに追加されるが、この一重項場とヒッグス二重項場との湯川相互作用 (一重項湯川相互作用) がヒッグス質量に新たな寄与を与えることにより、観測値が再現できると期待される。この自然な可能性を肯定的に確かめること、さらに望ましいパラメータ領域を特定することが本研究の第一目的である。

本研究で採用する R 対称模型の大きな特徴は、軽いスカラー及びフェルミオン自由度の存在である。前者は、拡張ヒッグスセクタにおけるスカラーポテンシャルの平坦性に伴う “擬モジュライ” であり、後者は拡張ヒッグスセクタにおける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 (“擬ゴールドスティーノ”) として理解される。後者は、超重力理論におけるグラビティーノとともに、この模型における暗黒物質の候補になる。それに加えて、これらの軽い自由度は、ヒッグス粒子の崩壊過程にも影響を与える可能性がある。これらに関する詳細な研究を通じて、模型の検証可能性を探ることを第二

の目的とした。

3. 研究の方法

ゲージ重項を含む模型におけるヒッグス粒子の質量は、高エネルギー領域における摂動可能性から制限される。拡張模型から得られるヒッグス質量の上限を求めるため、超対称スケール（超対称粒子の質量スケール）以上の高エネルギー領域におけるくりこみ群の解析を行う。

(1) ゲージ結合定数の大統一と矛盾しないディラック型ゲージノ模型を特定する。連続的R対称性を持つ大統一模型の構築から始めるのではなく、ヒッグス質量の解析を先行させるため、まずボトムアップ・アプローチを採った。低エネルギーでの極小R対称模型から出発して、ゲージ大統一が実現するように新たな物質場の自由度を加えていく方法である。

具体的には、ゲージ大統一を最小限の拡張で実現する可能性として、 $SU(3) \times SU(3) \times SU(3)$ 群に基づく模型を採用した。1ループ近似では、全ての超対称粒子が縮退するとの仮定の下にゲージ大統一が実現する。さらに、2ループ近似のくりこみ群を数値的に解析し、代表的なパラメータセットを複数見出した。

(2) 一重項場や随伴表現場とヒッグス場の湯川結合定数が大統一スケールまで発散しない条件から、低エネルギーにおける結合定数の上限を評価する。特に、追加された物質場の効果により、高エネルギー領域でゲージ相互作用が強結合になる効果とトップ湯川相互作用が強結合になる効果が競合するので、いずれが支配的かを精査する。このため、2ループ近似までのくりこみ群方程式を数値的に解析する。超対称スケールとしては、ディラック型ゲージノ模型の特長を生かし、1TeV程度の比較的小さい値を設定した。

(3) ヒッグス粒子の質量の計算については、有効ポテンシャルの方法ではなく、くりこみ群に基づく簡便法を用いた。つまり、摂動的大統一の条件から得られた結合定数の上限を、超対称スケールにおいて標準模型のくりこみ群方程式と接続することで、ヒッグス質量の上限値を計算した。

本研究で採用した連続的R対称性を持つ模型の大きな特徴は、軽いスカラー（擬モジュライ）及び軽いフェルミオン（擬ゴールドスティーノ）の存在である。

(4) これら軽い自由度がZボソンやヒッグス粒子の崩壊過程に与える影響を詳しく調べ、特に、不可視崩壊（invisible decay）

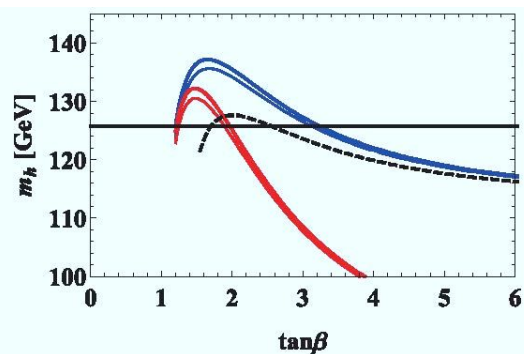
過程から、模型に対する制限を求める。まず、擬ゴールドスティーノの質量固有状態や相互作用を簡潔に表現するため、スカラーポテンシャルの平坦方向を表す角度変数を導入する。擬モジュライについては、R荷電スカラー場の質量パラメータが導入されるので、質量固有値や相互作用がこれらの質量パラメータのどのように依存するかを調べ、その特徴を明らかにする。

(5) 暗黒物質については、模型を超重力理論に埋め込んだ後、グラビティーノと擬ゴールドスティーノが候補となる。Morita et al.による先行研究の結果を修正・発展させ、グラビティーノ質量をR対称性の破れのパラメータとして、質量固有値や混合角を求め、それぞれの残存量や寿命を見積もる。その際、擬モジュライが擬ゴールドスティーノに崩壊する可能性も考慮する。

4. 研究成果

本研究は、ゲージ重項を含む拡張ヒッグスセクタがディラック型ゲージノと結合するR対称模型において、ヒッグス粒子の質量を再現できることを示し、さらに、ヒッグス崩壊過程や暗黒物質を通じた模型の検証可能性を探るものである。以下では、発表済みの内容を中心にまとめる。

(1) ゲージ大統一を最小限の拡張で実現する $SU(3) \times SU(3) \times SU(3)$ 群に基づく模型において、摂動的ゲージ大統一条件から得られるヒッグス質量の上限を2ループ近似のくりこみ群方程式で求めた。下図は結果の一例であり、ヒッグス粒子の質量の上限がヒッグス真空角 $\tan\beta$ の関数として示されている。



結果の注目すべき点としては、

D項相殺がない場合（青線）だけでなく、D項が完全に相殺される極限（赤線）でも、観測値（黒線）を上回る領域が存在する。図は、超対称スケールが1TeVの場合であり、ディラック型ゲージノの利点を生かしつつ、ヒッグス質量の問題が解決可能であることを示す例となっている。

それに加えて、以下の結果も得られた：

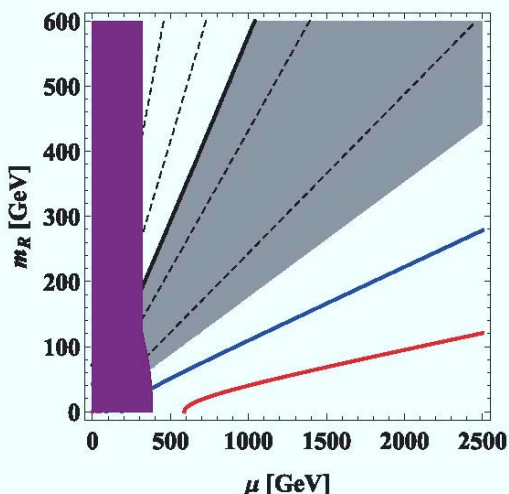
随伴湯川結合が無視できない場合についても、いくつかの代表的な場合を解析し

た。随伴湯川結合が無視できなくなると、一重項湯川結合の上限値、従って、ヒッグス質量の上限値が有意に下がることが判明した。

軽い擬モジュライが存在する場合、標準模型ヒッグス場との結合を通じて、ヒッグス質量を下げる効果が予想される。この効果を調べるため、標準模型に複素スカラー場が結合した理論のくりこみ群方程式を2ループ近似で求め、擬モジュライとの結合がヒッグス質量を下げる効果は高々2~3%程度にとどまることを示した。

なお、ヒッグス真空角 $\tan \beta$ の望ましい範囲を特定する目的で、SU(5)型ゲージ大統一に加えて、第三世代の湯川統一条件を検討した。しかしながら、従来模型(MSSM)に比べて、ボトム・タウ湯川結合の統一条件の実現が困難であることが判明し、大統一模型の構築に対する課題となった。

- (2) R対称模型の検証可能性に関連しては、Zボソンが擬ゴールドスティーノ対へ崩壊する過程やヒッグス粒子が擬モジュライ対へ崩壊する過程を検討し、不可視崩壊幅から模型のパラメータに対する制限を求めた。



上図は、解析結果の一例(超対称性を破る一重項場の質量パラメータがゼロの場合)である。ヒッグスセクタの質量パラメータのうち超対称を保つもの(横軸)と破るもの(縦軸)に対して、Zボソンおよびヒッグス粒子の崩壊幅が現在の実験制限を超える領域(紫および灰色)と将来計画での探索可能領域境界(青線および赤線)が示されている。

注目すべき点は、素朴な予想に反して、ヒッグス粒子より軽い擬モジュライを許すパラメータ領域の存在である。この結果の説明として、擬モジュライの質量固有状態がポテンシャルの平坦方向に一致する極限で、擬モジュライ対とヒッグス粒子の三点相互作用が抑制されていることから理解できることを指摘した。

- (3) ディラック型ゲージノ模型の大統一理論への埋め込みに関しては、S1/Z2型の5次元時空に基づくゲージ・ヒッグス大統一模型が有望である。随伴表現のカイラル場が大統一対称性の破れの後も軽く残ることや、それがゲージ一重項と直接結合しないことを自然と説明可能である。特に、ディラック型質量項(“supersoft項”)の起源に関する有力な解釈を得た。

- (4) 暗黒物質については、擬ゴールドスティーノが熱的に生成される場合、および、散乱により生成される場合を検討した。前者では、擬ゴールドスティーノが随伴湯川相互作用などを通してグラビティーノに効率的に崩壊する場合を除き、許される領域が存在しないことが判明した。後者では、宇宙再加熱温度が擬ゴールドスティーノ質量より軽い場合に解が存在する見通しを得たが、詳細は今後の課題となった。

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)

Hiroaki Nakano and Masaki Yoshikawa, “Next-to-minimal R-symmetric model: Dirac gaugino, and Higgs mass and invisible width”, *Progress of Theoretical and Experimental Physics*, **2015** (2015), 033B01 (28pages), 査読有, DOI: 10.1093/ptep/ptw007

[学会発表](計5件)

中野博章, “Dirac gauginoによる低エネルギー超対称模型と拡張ヒッグスセクタ”, 日本物理学会第70回年次大会, 2015年3月23日, 早稲田大学(東京都・新宿区)

中野博章, “超対称性は何処へ~Dirac gauginoの場合”, 研究集会「素粒子論の展望:80年代, 90年代から未来へ», 2015年2月14日, 大阪大学(大阪府・豊中市)

吉川真樹, 角田拓也, 中野博章, “ディラックゲージノ, 擬モジュライ, invisible width”, 第二回松江現象論研究会, 2014年11月28日, 島根大学(島根県・松江市)

吉川真樹, 角田拓也, 中野博章, “ディラックゲージノ, 擬モジュライ, invisible width”, 日本物理学会2014年秋季大会, 2014年9月20日, 佐賀大学(佐賀県・佐賀市)

H. Nakano, “Unification and Triviality in an R symmetric model with Dirac gaugino”, *Summer Institute 2014* 2014年8月23日, 富士Calm(山梨県・富士吉田市)

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 MORIMITSU)

新潟大学・自然科学系・フェロー

研究者番号：90108366

瀬戸 治 (SETO OSAMU)

北海道大学・国際連携機構・特任准教授

研究者番号：40547741

山下 敏史 (YAMASHITA TOSHIFUMI)

愛知医科大学・医学部・講師

研究者番号：90622671