

博士論文の要旨及び審査結果の要旨

氏名 吉川 真樹
 学位 博士 (理学)
 学位記番号 新大院博 (理) 第 407 号
 学位授与の日付 平成 28 年 3 月 23 日
 学位授与の要件 学位規則第 4 条第 1 項該当
 博士論文名 $U(1)_R$ 超対称模型におけるヒッグス質量と invisible 崩壊

論文審査委員 主査 准教授・浅賀 岳彦
 副査 教授・大原 謙一
 副査 教授・小池 裕司
 副査 准教授・中野 博章
 副査 准教授・江尻 信司

博士論文の要旨

100 GeV 程度以下の十分低いエネルギー領域における素粒子現象は、 $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ をゲージ群とする標準模型によって非常に精度良く記述できることが現在までに確立している。しかしながら、標準模型には重力相互作用が取り込まれていないことや、電弱対称性の自発的破れを記述するヒッグス場のポテンシャルを理論的に制御する指導原理を欠いていることなどから、標準模型の背後にはより基本的な理論が存在し、標準模型をその基礎理論の低エネルギー有効理論とみなすのが自然である。中でも超対称理論は、標準模型を超える基礎理論の有力候補である。

しかしながら、現在稼働中の大ハドロン衝突加速器 (LHC) 実験により、超対称理論には厳しい制限が課されつつある。特に極小模型では、超対称粒子が TeV 以上の質量を持つことが確からしくなってきた。これは、超対称粒子が従来の想定より重いか、あるいは、極小模型が拡張されることを意味している。

このような状況において、本論文では、極小超対称模型を拡張する方向の試みとして、連続的 R 対称性をもつ拡張模型を取り上げている。具体的には、ゲージセクタに対しては、ゲージボソンの超対称パートナーであるゲージノが (従来とは異なり) ディラック型の質量をもつとするディラック型ゲージノの模型を、ヒッグスセクタにおいては、Izawa-Nakai-Shimomura による超対称性を自発的に破る模型 (INS 模型) を組み合わせたものである。後者は、R 不変性を持つヒッグスセクタをゲージ重項場の導入により拡張した模型に相当するため、拡張模型全体を次最小 R 対称模型 (Next-to-minimal R symmetric model) と呼ぶことが出来る。

本論文では、まずディラック型ゲージノを取り上げる動機として、従来の超対称模型にない利点を解説している。特に、ゲージノのディラック質量項を生成する supersoft 項を導入すると、随伴表現のスカラー粒子によってスカラー質量の発散が相殺する性質 (supersoft 性) およびマヨラナ質量項を持つ場合と比べてスクォークの生成断面積が抑制

される性質 (supersafe 性) が説明されている。また、この種の模型の理論的課題の一つとして随伴スカラーの交換によって、ヒッグス四点結合を含む D 項ポテンシャルが抑制されてしまい、ヒッグス粒子の質量の観測値 125GeV が再現困難になる問題が説明されている。

本論文では、ゲージ重項場とヒッグス二重項場の結合 (一重項湯川結合) により、ヒッグス四点結合に新たな寄与が生じ、ヒッグス質量の観測値 125GeV が再現できる可能性を検討している。従来の模型では、一重項湯川結合に対する摂動性の制限のため、ヒッグス質量の再現可能性は自明でないが、R 対称模型では、追加された随伴表現場等の効果でゲージ相互作用が強結合になるため、摂動的ゲージ大統一と矛盾することなく実際にこれが可能であることを、2ループくりこみ群方程式を解析することにより結論している。特に、D 項ポテンシャルが完全に相殺され、かつ、超対称粒子の質量スケールが 1TeV 程度に軽い場合でさえ、ヒッグス質量 125GeV を実現する解が存在することを指摘している。

本論文の後半では、ゲージ重項を含む R 対称な超対称模型の特徴として、擬モジュライなどの軽いモードの存在に着目し、それらがヒッグス粒子の質量や崩壊幅に与える影響を検討している。特に、擬モジュライと呼ばれるスカラー粒子がヒッグス粒子より十分軽くなるパラメータ領域では擬モジュライとヒッグス粒子の結合が弱くなることを発見し、先行研究の予想に反して、ヒッグス粒子の invisible 崩壊幅に対する現在の実験的制限から許されるパラメータ領域があることを指摘し、将来の実験での検証可能性を考察している。

審査結果の要旨

重力を除く三つの基本相互作用のゲージ結合定数が 10^{16} GeV 程度の高エネルギースケールで統一する可能性が指摘されて以来、超対称模型は素粒子の標準模型を超える理論的試みの最有力候補として精力的に研究されてきた。しかし、近年の LHC 実験の結果より、超対称模型のうち極小な模型には厳しい制限が課されつつある。これは、超対称粒子が従来の想定より重いか、あるいは、極小模型が拡張されることを意味している。

本論文の前半では、超対称模型、中でもその R 対称な拡張模型を考察する動機が階層性問題やゲージ大統一の可能性などの観点から説明された後、連続的 R 対称性を実現するために、ゲージセクタおよびヒッグスセクタに必要な拡張が要領よくレビューされている。特に、ディラック型ゲージノおよび R 不変ヒッグスセクタの各々での拡張が、ゲージ大統一と整合するのみならず、摂動可能性の条件から決まるヒッグス質量の上限を改善する効果があることが強調されており、それを踏まえて、摂動的ゲージ大統一が 2ループ近似の精度で実現できる例を複数指摘している。また、数値計算に必要なくりこみ群方程式や入力パラメータの詳細についても、付録で簡潔にまとめられている。

本論文の後半では、拡張模型の特徴として、軽いスカラー粒子である擬モジュライがヒッグス粒子より軽い場合に注目している。まず、擬モジュライがヒッグス質量を下げてしまう効果を指摘し、これが数値的に大きくないことを検証し、さらに、ヒッグス粒子の invisible 崩壊幅を通しての検証可能性を検討している。特に、超対称性を破るソフト質量項が重要でないパラメータ領域では、擬モジュライがヒッグス粒子より十分軽くなり、かつ、両者の結合が弱くなることを見出した。その結果として、先行研究の予想に反して、現在の実験的制限から許されるパラメータ領域が存在するとの指摘は、将来の実験での検証可能性との関連で今後の検証を期待させるものである。なお、今度の課題としては、本論文の模型を大統一理論に埋め込むこと、擬モジュライ以外の軽いモード (擬ゴールドスティーンやグラビティーン) に対する宇宙論的制限について最小限の指摘がなされている。

以上によって、本論文は博士 (理学) の博士論文として十分であると認定した。