

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 9 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2014

課題番号：23540283

研究課題名(和文)電弱対称性の破れとフレーバーの物理の新展開

研究課題名(英文)Electroweak symmetry breaking and new developments of flavor physics

研究代表者

山口 昌弘(Yamaguchi, Masahiro)

東北大学・理学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：10222366

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)：125GeVの質量をもつヒッグス粒子の発見は、電弱対称性の破れの機構の解明や今後のフレーバー物理の展開に大きな影響力を持つ。我々は超対称標準模型の中で、125GeVの質量を持つ自然な模型構築とその性質の研究及びフレーバー物理への影響について研究した。特に、最小超対称標準模型にゲージ重項を加えた模型について詳細に研究し、ゲージ重項を加えた模型の困難とされるタッドポール問題などをPeccei-Quinn対称性を導入することで解決した。また、一般的な模型において、一重項と二重項の混合によってヒッグス粒子の質量が測定値まで大きくなること、軽い粒子が存在することで起こる特徴的な実験的信号を指摘した。

研究成果の概要(英文)：The discovery of the Higgs particle with the mass of 125 GeV has impacts on the understanding of the electroweak symmetry breaking and future developments of flavor physics. Within the framework of supersymmetric standard models, we considered viable models giving the observed Higgs particle mass and explored the effects to the flavor physics. In particular we investigated an extension of the minimal version of the supersymmetric standard model by adding standard-model gauge singlets. It was shown that the tad-pole problem and others known as difficulties of the singlet extension can be solved by imposing the Peccei-Quinn symmetry. In addition, in a generic class of models with the gauge singlet, we found that the mixing between the singlet and the doublet increases the Higgs particle mass to the experimentally measured value, and pointed out some intriguing experimental signatures characteristic to this scenario with some light sparticle.

研究分野：素粒子論

キーワード：素粒子論 素粒子実験 超対称性 ヒッグス粒子 フレーバー物理

1. 研究開始当初の背景

素粒子標準模型の電弱対称性の破れが内包するエネルギースケールの問題の新たな物理スキームは「エレメンタリー・シナリオ」と「ダイナミカル・シナリオ」に大別される。研究開始当初は、ラージハドロンコライダー (Large Hadron Collider: LHC) でのヒッグス粒子探索が始まろうとしていた段階であり、ヒッグス粒子発見の前であった。その段階において、来る将来の電弱対称性の破れの物理の解明に向けて電弱対称性の破れの研究を特にフレーバーの物理を念頭に入れながら進めることは重要な視点であった。

2. 研究の目的

電弱対称性の破れが内包するエネルギースケールの問題を解決する物理スキームについて、自然で有望と思われるモデルを構築し、その性質や LHC での信号について明らかにするとともに、テラスケールで現れるフレーバー構造を調べ、フレーバー混合などについて実験的に検証できる現象論的帰結を導くことが本研究の目的である。

3. 研究の方法

解析的及び数値的な手法を用いて理論的な観点から研究を行う。研究に当たっては LHC 実験の結果を十分に参照し、ヒッグス粒子の探索結果や電弱スケールの新たな物理の探索結果に踏まえて実験的な制限を取り入れた上での研究を行う。

4. 研究成果

LHC 実験におけるヒッグス粒子の探索の結果は、2011 年 12 月の時点で比較的軽いヒッグス粒子の存在を示唆し、2012 年 7 月について新しい粒子の発見の報告があった。この結果は、電弱スケールのエネルギーの階層性の問題の解がエレメンタリー・シナリオで与えられることを強く示唆している。我々はとりわけ超対称理論に照準を当てて研究を進めた。主な研究結果は以下のとおりである。

(1) 異常 $U(1)$ ゲージ対称性を持つ理論における超対称性の破れの混合伝播:

異常 $U(1)$ ゲージ対称性を持つモデルには超対称性の破れを持ちうる様々な場が含まれている。それらは例えば $U(1)$ ベクトル場、モジュライ場やディラトン場、 $U(1)$ 電荷をもっている場、さらには超重力場等である。この研究では、これらの場の伝搬する超対称性の破れの強さのあるクラスのモデルについて調べた。その結果、 D 平坦な方向の特徴と D 平坦な方向がどのように安定化されるかによって、モジュライ、ゲージ、アノマリーと D 項の伝播の相対的な重みが決定されることを示した。さらに、この場合に KKLТ シナリ

オと類似のモジュライ場の安定化の機構が働くことを示した。

(2) 重いグラビティーノシナリオにおける軽いヒッグシーノの研究:

最小超対称標準模型の範疇において、不安定なグラビティーノの問題に付随する宇宙論的な困難から示唆されるグラビティーノの質量が 10^6 GeV よりも大きいシナリオについて考察した。ここでグラビティーノは超対称性に関わるゲージ粒子で重力子 (グラビトン) の超対称対であり、スピン $3/2$ を持つ粒子である。その質量は超対称性の破れのエネルギースケールと密接に関係することが知られている。2 つのヒッグス二重項の混合を表す超対称性の破れのパラメータである B パラメータがグラビティーノ質量と同程度に大きくスクォークや他の超対称粒子の質量が 10^4 GeV のオーダーだとすると、電弱対称性のスケールが正しく出るためには、ヒッグシーノが軽くなる必要があることを示した。この場合ヒッグシーノは最も軽い超対称粒子で R パリティが保存している場合には宇宙の暗黒物質となりうるということが知られている。我々はグラビティーノの崩壊によって生成されるヒッグシーノが宇宙の暗黒物質の残存量を説明することができることを示した。また、重いスクォークの質量による量子補正によってヒッグス粒子の質量を観測値である 125 GeV まで持ち上げることができることを示した。さらにこの場合の超対称粒子が中間状態に現れる量子効果によるフレーバー混合は十分に抑制され標準模型のフレーバー混合からあまりずれないことを議論した。

(3) ゲージ重項を含む最小超対称標準模型の拡張:

LHC で発見された 125 GeV のヒッグス粒子の質量を説明するには前述のようにスクォークの質量が大きいのか、最小超対称標準模型を拡張する必要がある。中でもゲージ重項を加えるモデルは、それがヒッグシーノの超対称な質量 (μ 項) を自然に与えることもあり大変魅力的なモデルである。我々はこのモデルに着目し以下のような研究成果を上げた。

ゲージ重項を入れた拡張された超対称標準模型 (NMSSM) において、Peccei-Quinn 対称性を持つモデルを構築し、通常の NMSSM の困難とされるタッドポール問題やドメインウォール問題が解決されることを指摘した。アクシオン超場と非線り込み相互作用を考慮することで自然に電弱スケールの μ 項が与えられることを示した。このモデルでは、シングリーノが最も軽いニュートラリーノになる。また、このモデルをどのように大統一理論の中の低エネルギー有効理論として実現するか例示した。

我々はさらに研究を進め、ヒッグスセクターにおいて軽いシングレット (一重項) とダブルレット (二重項) ヒッグス場の混合によ

て標準模型的なヒッグス粒子の質量が数 GeV 大きくなり実験地である 125GeV を説明できることを示した。

必ずしも Peccei-Quinn 対称性を持たないより一般的な NMSSM におけるヒッグスセクターの一重項と二重項のヒッグス場の混合の影響を広範に研究した。混合の効果によりこのモデルでのヒッグス粒子の結合は一般に最小標準模型の結合とは違ってくる。しかしながら我々はヒッグス粒子が一重項成分を持っている場合でも ZZ や WW チャンネルでのヒッグス粒子の生成割合 (production rate) は標準模型と非常に近くなりうることを指摘した。この場合、チャージ ノ ヒッグシーノのループによる寄与によって 2 光子へ崩壊するモードが大きくなりうること、また bb や $\tau\tau$ への崩壊が抑制されうることを指摘した。我々は現在の LHC 実験などからくる制限を加味したうえで、2 光子への崩壊モードが標準模型に比して 1.5 倍大きくなりうること、逆に bb や $\tau\tau$ への崩壊モードが 0.5 倍になりうることを示した。

この研究はこうした一連のモデルがヒッグス粒子の生成崩壊を実験的に調べることで検証・棄却されていくことを指摘したもので今後の研究動向に影響を与えている。

我々は一般の NMSSM におけるヒッグスセクターの混合について更なる研究を進めた。ヒッグシーノ質量や一重項と二重項の相互作用の大きさがヒッグス粒子の質量や混合核と密接に関連していることを利用し、現在のヒッグスセクターの実験的な制限がこうしたパラメータにどのような制限を与えるかを研究した。その結果、ヒッグス粒子の生成・崩壊に関する LHC のデータを加味すると、ヒッグシーノの質量は比較的小さくなることを見つけた。さらにヒッグスと 2 光子の結合は大きく補正を受けうることを確認した。

一般の NMSSM においては、超対称粒子の質量が 1TeV 程度にとどませつつ、ヒッグス粒子の質量を 125GeV まで上げることができる。これは最小超対称標準模型 (MSSM) との大きな違いである。したがって NMSSM においては、超対称粒子が中間状態に寄与するフレーバー混合過程が大きくなりうることが期待される。どの過程に対して大きな寄与があるかについては、超対称性の破れの伝播機構や超高エネルギーでの新たなフレーバー混合の有無などによることが分かる。

(4) 将来の国際リニアコライダーにおけるヒッグス粒子の研究：

ヒッグス粒子は今後の高エネルギー実験において焦点をあてて研究されていく対象となっている。将来の建設が計画されている国際リニアコライダーにおいてもヒッグスセクターは重要な研究対象である。我々は将来ヒッグス粒子の結合を精密に測定することがいかに重要であるかについてこれまでの研究を踏まえてまとめ直し、その結果をプ

レプリントの形で報告した (F. Borzumati and E. Kato, The Higgs boson and the International Linear Collider, arXiv:1407.2133)。

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 6 件)

K. Choi, K.S. Jeong, K. Okumura and M. Yamaguchi, Mixed Mediation of Supersymmetry Breaking with Anomalous U(1) Gauge Symmetry, Journal of High Energy Physics, 査読有, Vol.1106, 2011, 049
DOI: 10.1007/JHEP06(2011)049

K.S. Jeong, Y. Shoji and M. Yamaguchi, Peccei-Quinn invariant extension of the NMSSM, Journal of High Energy Physics, 査読有, Vol.1204, 2012, 022
DOI: 10.1007/JHEP04(2012)022

K.S. Jeong, M. Shimosuka and M. Yamaguchi, Light Higgsino in Heavy Gravitino Scenario with Successful Electroweak Symmetry Breaking, Journal of High Energy Physics, 査読有, Vol.1209, 2012, 050
DOI: 10.1007/JHEP09(2012)050

K.S. Jeong, Y. Shoji and M. Yamaguchi, Singlet-Doublet Higgs Mixing and Its Implications on the Higgs mass in the PQ-NMSSM, Journal of High Energy Physics, 査読有, Vol.1209, 2012, 007
DOI: 10.1007/JHEP09(2012)007

K. Choi, S.H. Im, K.S. Jeong and M. Yamaguchi, Higgs mixing and diphoton rate enhancement in NMSSM models, Journal of High Energy Physics, 査読有, Vol.1302, 2013, 090
DOI: 10.1007/JHEP02(2013)090

K.S. Jeong, Y. Shoji and M. Yamaguchi, Higgs Mixing in the NMSSM and Light Higgsinos, Journal of High Energy Physics, 査読有, Vol.1411, 2014, 148
DOI: 10.1007/JHEP11(2014)148

[学会発表](計 1 件)

山口昌弘, NMSSM/重い SUSY の物理, テラスケール 2014, 2014 年 11 月 29 日, 大阪大学 (豊中市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山口 昌弘 (YAMAGUCHI, Masahiro)
東北大学・大学院理学研究科・教授
研究者番号：10222366

(2) 研究分担者

ボルツマティ フランチェスカ (BORZUMATI,
Francesca)
東北大学・国際教育院・准教授
研究者番号：50599719