

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 3 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2014

課題番号：23540298

研究課題名(和文)素粒子現象から探る電弱対称性の破れのユニタリティー保証機構

研究課題名(英文)Phenomenological studies of unitarity in the electroweak symmetry breaking sector

研究代表者

棚橋 誠治 (Tanabashi, Masaharu)

名古屋大学・基礎理論研究センター・教授

研究者番号：00270398

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：素粒子質量の起源はなんだろうか？その鍵を握るヒッグス粒子は素粒子標準模型における唯一のスピン0素粒子であり、その相互作用はゲージ原理によって規定されている訳ではない。その一方で、ヒッグス粒子の相互作用は、縦波ゲージ粒子の散乱振幅のユニタリティーや、理論のくりこみ可能性を保証するうえで重要なパラメータであり、もしその値が標準模型の予言からずれていることがわかると、なんらかの新物理の存在が必要となる。この研究では、ヒッグス粒子結合が標準模型の予言からずれている可能性をなるべく模型によらない枠組みを用いて考察した。これらの結果は、査読付き論文誌および国際会議で報告された。

研究成果の概要(英文)：What is the origin of elementary particle masses? Higgs boson is the particle predicted in the Standard Model to have spin-0. Its interactions cannot be determined by the gauge principle. On the other hand, the Higgs interactions play important roles to keep the unitarity of the longitudinal gauge boson scattering amplitudes and the renormalizability of the theory. If the measured values of the Higgs couplings would turn out to deviate from the Standard Model predictions, we need to introduce new physics to keep the unitarity and the renormalizability. We discussed this possibility using model independent framework. These results were reported in refereed journal papers and at international conferences.

研究分野：素粒子物理(理論)

キーワード：素粒子質量の起源 ヒッグス ユニタリティー 電弱精密測定 フレーバー精密測定

1. 研究開始当初の背景

(1) 本研究を開始した当初、LHC 実験が運転を開始したものの、いまだヒッグス粒子が発見されておらず、素粒子質量の起源、つまり電弱ゲージ対称性の破れの起源の実験的手がかりが得られていない状況であった。

(2) 弱い相互作用を伝達するスピン 1 の素粒子である W 粒子や Z 粒子は質量を有し、縦波の自由度を持つ。これら縦波編極された W 粒子や Z 粒子は、電弱ゲージ対称性の破れによって生成された南部・ゴールドストーン粒子であると考えられる。縦波 W、縦波 Z の性質の解明は、すなわち、電弱ゲージ対称性の破れの解明に他ならない。もし仮に、南部・ゴールドストーン粒子以外に電弱対称性の破れに関与する新素粒子や新現象がまったく存在しなければ、縦波 W や縦波 Z の高エネルギーでの散乱振幅は際限なく増大し、ついにはユニタリティー限界をも超えてしまう。逆に言えば、電弱ゲージ対称性の破れには、必ず、新素粒子ないしは新現象が存在せねばならない。有質量素粒子の散乱振幅におけるユニタリティー保証機構は、素粒子質量起源の問題に深く関わっているのである。現在の素粒子標準模型では、そのような素粒子としていわゆるヒッグス粒子が導入され、縦波 W 散乱振幅がユニタリティー限界を超えないように構成されている。そのため、ヒッグス粒子の発見は、LHC 物理の主要ターゲットでもあった。しかしながら、ヒッグス粒子による素粒子質量の説明は、理論として、唯一無二のものではないことも知られており、また、輻射補正に 2 次発散を含むなど、理論として問題の多いものである。したがって、LHC の本格運転開始がはじまった 2011 年当初、素粒子質量起源の説明としてあらゆる可能性を考慮した理論の整備が緊急の課題であった。

(3) 申請者は、この研究を開始する 2011 年までに、ヒッグス粒子を導入せずに素粒子質量起源を説明するヒッグスレス模型の可能性について、とくにその素粒子現象の観点から研究を進めていた。ヒッグスレス模型は余剰次元に基づく模型であり、余剰次元空間に広がるゲージ場のプレーン境界条件によって電弱ゲージ対称性を破る模型である。この模型では、縦波 W や縦波 Z の散乱振幅のユニタリティーは、スピン 0 のヒッグス粒子ではなく、電弱ゲージ粒子のカルツァ・クライン励起 (スピン 1 の KK 粒子) の交換により保証される。余剰次元の導入は、電弱ゲージ対称性の破れの説明に用いられるだけでなく、なぜ重力相互作用だけが非常に弱いのか (ゲージ階層性問題) を自然に説明しうる可能性のある模型でもあった。また、デュアリティーの観点から見ると、余剰次元模型は、ウォーキングテクニカラー模型など、4 次元

の強結合場の理論と等価である可能性もあり、その意味でも興味深い模型であった。申請者は、2011 年までに、余剰次元ヒッグスレス模型の脱構築 (デコンストラクション) による低エネルギー有効理論の構成方法を明らかにし、またこの有効理論を用いて輻射補正まで含めた電弱精密測定との整合性について詳細な研究をおこない、ヒッグスレス模型がそれまでに得られた電弱精密測定の結果と無矛盾であることが示されていた。一方で、フレーバー精密測定との整合性についての研究は、まだそれほど進んでいない状況であった。また、ヒッグスレス模型において、W 散乱振幅のユニタリティーを保証するユニタリティー和則はすでに得られていたが、ユニタリティー和則と、この理論における電弱精密測定パラメータへの輻射補正の構造との関係を吟味する研究は進められていない状況にあった。

2. 研究の目的

(1) 前述の状況のもと、これまでの申請者の実績をふまえ、W 粒子や Z 粒子など質量をもつ素粒子の散乱振幅のユニタリティーを保証する物理法則について、標準模型のようにヒッグス粒子を導入する可能性、ヒッグスレス模型のようにヒッグス粒子を導入しない可能性の双方にわたる理論研究を行うことを目的とした。

(2) ヒッグスレス模型のようにスピン 1 の KK 粒子が導入される模型では、それらの粒子による輻射補正の効果で、フレーバーを破る相互作用が誘起されるため、フレーバー精密測定と無矛盾であるパラメータはどのような性質をもつかを解明する必要がある。したがって、この研究では、フレーバー精密測定と矛盾しないパラメータが存在するかどうか、また、そのようなパラメータがどのような性質をもつかを解明することを目的とした。

(3) 素粒子標準模型で導入されるスピン 0 のヒッグス粒子は、縦波 W 粒子や縦波 Z 粒子の散乱振幅のユニタリティーを保つのに寄与するだけでなく、理論をくりこみ可能にし、ループレベルでの電弱精密測定パラメータを有限に予言するうえでも重要な役割を果たしている。実験による電弱精密測定パラメータの測定結果は標準模型の予言と極めて高い精度で一致しており、このことが、縦波ゲージ粒子散乱振幅のユニタリティー保証機構を探るうえでの手がかりとなると考えられる。理論をあらかじめ決めてから、その素粒子現象を探るトップダウンアプローチではなく、もっとも一般的な枠組みから出発し、実験結果との整合性から可能な理論を決定していくボトムアップアプローチをとるうえで、このようなユニタリティーとくりこ

み可能性の間の関係を明らかにしておくことは大変重要である。そこでこの研究では、理論の摂動論的ユニタリティーを保証するユニタリティー和則が、どのように理論のくりこみ可能性に関連しうるかを解明することを目的とした。

3. 研究の方法

- (1) ヒッグスレス模型がこれまでのフレーバー精密測定と無矛盾であるかどうかを具体的に研究するうえでは、具体的に輻射補正まで含めて計算可能なヒッグスレス模型のラグランジアンを決定せねばならない。そのようなラグランジアンとしては、申請者がこれまでの研究で提案したスリーサイトヒッグスレス模型のラグランジアンを採用した。このラグランジアンは、余剰次元ヒッグスレス模型を高度に脱構築したもので、カイラル摂動論に準拠したやりかたで輻射補正計算が可能でラグランジアンである。具体的に研究をすすめるにあたっては、スリーサイトヒッグスレス模型を共同で提案したミシガン州立大学グループや、スリーサイト模型における電弱精密測定パラメータへの輻射補正計算の経験のある国内共同研究者との共同研究を遂行した。
- (2) ユニタリティー和則とループレベルの電弱精密測定パラメータの有限性の関係を研究するにあたっては、この両者を同時に研究することが可能な一般的な枠組みを用いる必要がある。そのような枠組みとして、電弱怪ラルラグランジアンに任意個数のスピン0中性ヒッグス粒子が結合したラグランジアンを用いた。この枠組みではカイラル摂動のような系統的な摂動展開はできないものの、ユニタリティー和則と1ループレベルでの電弱精密測定パラメータの関係を考察するうえでは、必要十分な枠組みとなっている。具体的に研究をすすめるにあたっては、ヒッグス物理の素粒子現象研究に強みをもつ国内研究者との共同研究を行った。

4. 研究成果

- (1) ヒッグスレス模型でのフレーバー精密測定からの制限の研究については、Phys. Rev. D85 (2012) 035015 に発表するとともに、国内外の幾つかの学会で講演を行った。この研究では、現在のフレーバー精密測定データを用いることで、スリーサイトヒッグスレス模型におけるフレーバー対称性の破れの構造が、ツリーレベルにおいて、いわゆるミニマルフレーバーバイオレーションの場合に限られることを明らかにした。また、1ループ

レベルにあらわれる対数的補正を評価したところ、ツリーレベルにおいて、ミニマルフレーバーバイオレーションのパラメータを選んでおけば、1ループレベルでの対数的補正は、現在の実験データの制限を十分満たすことが示された。この結果は、スリーサイトヒッグスレス模型が現象論的に有望であることを示すものであったが、2012年にヒッグス粒子がLHCで発見されたことによって、単純なヒッグスレス模型は実験的に棄却されることとなった。

- (2) ヒッグス粒子の発見後は、発見されたヒッグス粒子が標準模型ヒッグスなのかどうかについて、ユニタリティーとループレベルの電弱精密測定の観点からの研究に、研究の重点を移した。この研究成果は、Phys. Rev. D91 (2015) 034030 で発表するとともに、申請者および共同研究者が国内外の学会で講演を行った。この研究では、任意個数の中性ヒッグス粒子が電弱対称性の破れに関与する場合を想定し、一般的なユニタリティー和則を導いた。また、1ループレベルの電弱精密測定パラメータの有限性が、ユニタリティー和則のみから保証されることを明らかにした。このことにより、ユニタリティー和則からくる制限と電弱精密測定からくる制限を単一のグラフのなかで書き表すことが可能となり、LHCで発見された125GeVヒッグス粒子のヒッグス結合がどのくらい標準模型からずれる可能性があるかについて、2番目に軽いヒッグス粒子の質量との関係を議論することが可能となった。2番目に軽いヒッグス粒子はすでに実験的にその質量に下限が得られており、125GeVヒッグス粒子のヒッグス結合の標準模型の予言からのずれの可能性に非自明な上限を与えることが可能となった。

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 5件)

- (1) T. Abe, R. S. Chivukula, E.H. Simmons, M. Tanabashi, “The flavor structure of the three-site Higgsless Model”, Phys. Rev. D85 (2012) 035015. [査読あり], DOI: [10.1103/PhysRevD.85.035015](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.85.035015)
- (2) J. Beringer et al. (Particle Data Group Collaboration), “Review of Particle Physics”, Phys. Rev. D86 (2012)

010001. [査読あり], DOI: [10.1103/PhysRevD.86.010001](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.86.010001)

- (3) A. Freitas, K. Hagiwara, S. Heinemeyer, P. Langacker, P. Moenig, M. Tanabashi, G.W. Wilson, “Exploring Quantum Physics at the ILC”, Snowmass white paper contribution, [査読なし], arXiv:1307.3962
- (4) R. Nagai, M. Tanabashi, K. Tsumura, “Does unitarity imply finiteness of electroweak oblique corrections at one loop?”, Phys. Rev. D91 (2015) 034030. [査読あり], DOI: [10.1103/PhysRevD.91.034030](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.91.034030)
- (5) K.A. Olive et al. (Particle Data Group Collaboration), “Review of Particle Physics”, Chin. Phys. C38 (2014) 090001. [査読あり], DOI: [10.1088/1674-1137/38/9/090001](https://doi.org/10.1088/1674-1137/38/9/090001)

[学会発表] (計 10 件)

- (1) Masaharu Tanabashi, “Flavors of Three-site Higgsless”, December 12-14, 2011, Osaka, Japan, International Workshop: Extra Dimensions in the Era of LHC
- (2) Masaharu Tanabashi, “Shoichi Sakata: His Life and Physics”, October 27-28, 2011, Nagoya, Japan, Shoichi Sakata Centennial Symposium
- (3) Masaharu Tanabashi, “Higgs(less) confronts LHC”, November 22, 2011, Seminar at Osaka U., Osaka, Japan
- (4) 棚橋誠治 「素粒子質量の起源とユニタリティー」2012年1月7日、於福岡タワー、福岡、九州大学素粒子理論シンポジウム「質量起源と階層性」
- (5) 棚橋誠治、「ヒッグス粒子は存在するか?」、2012年3月13日、談話会、東京大学駒場キャンパス
- (6) Masaharu Tanabashi, “Longitudinal W boson scattering revisited”, March 2, 2012, IPMU, U. Tokyo, Workshop on Particle Physics of the Dark Universe
- (7) 棚橋誠治, 「物質と質量の起源の謎に挑む」、2012年6月23日、於豊橋市自然史博物館、あいちサイエンスフェスティバル2012サイエンストーク
- (8) 棚橋誠治、「LHCでヒッグス以外見えないとき何をすべきか」、2013年5月25日、名古屋大学、研究会「LHCが切り拓くテラスケールの素粒子物理学」
- (9) 西谷正、棚橋誠治、吉川直志、「名古屋大学坂田記念史料室の現状」、2014年3月、日本物理学会

- (10) Masaharu Tanabashi, “Constraining extra neutrall Higgs bosons from unitarity and the electroweak precision data”, December 26-28, 2014, GIS NTU Convention Center, The 2nd KIAS-NCTS Joint Workshop on particle Physics, String Theory and Cosmology

[図書] (計 2 件)

- (1) Y. Aoki, K. Hayasaka, T. Iijima, T. Maskawa, M. Tanabashi, K. Yamawaki (eds), “Quest for the Origin of Particles and the Universe”, Proceedings of the KI Inauguration Conference, October 24-26, 2011, Nagoya University
- (2) Y. Aoki, T. Maskawa, M. Tanabashi, K. Yamawaki (eds), Proceedings of Shoichi Sakata Centennial Symposium, October 27-29, 2011, Nagoya University

6. 研究組織

(1) 研究代表者

棚橋誠治 (TANABASHI MASAHARU)

名古屋大学・基礎理論研究センター・教授
研究者番号 : 00270398