

令和 6 年 6 月 3 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2023

課題番号：19K03846

研究課題名（和文）素粒子標準模型低エネルギー有効理論の統一理論

研究課題名（英文）Unification of Low Energy Standard Model Effective Field Theories

研究代表者

棚橋 誠治（Tanabashi, Masaharu）

名古屋大学・理学研究科・教授

研究者番号：00270398

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：低エネルギー有効理論の統一理論として、一般化されたヒッグス有効場理論（HEFT）の一般化（一般化HEFT、GHEFT）を定式化した。この理論のスカラーボソンの散乱振幅がスカラー多様体のリーマン曲率テンソル（幾何学）とポテンシャルの共変微分で記述されることを示した。1ループ発散項の係数もキリングベクトル（対称性）とリーマン曲率テンソル（幾何学）で記述できる。

また、任意の電荷と色電荷を持つ任意の数のスカラー場とフェルミオン場を含むヒッグス有効場理論の拡張を定式化した。有効ラグランジアン¹の記述冗長性は、スカラー/フェルミオン場空間における共変量のみで殻上の散乱振幅を記述することによって解決した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

その起源が量子色力学の次元変性であることが知られているQCDスケールと異なり、電弱対称性の破れのスケール、つまり素粒子質量の起源はいまだ明らかになっていない。これまで多くの素粒子標準理論を超える物理の可能性が検討されてきたが、本研究は、これらの素粒子標準理論を超える物理を個々に調べるのではなく、統一的な有効理論を構築するアプローチをとった。具体的には、ヒッグス有効理論を拡張し、任意個数、任意電荷、任意色荷をもつスピン0、スピン1、スピン1/2粒子を含む有効理論での素粒子散乱振幅や輻射補正の一般的表式を与え、コライダー物理やフレーバー物理で行われている新粒子探索に対して統一的な理解を与えた。

研究成果の概要（英文）：We formulate a generalization of Higgs effective field theory (HEFT) including arbitrary number of extra neutral and charged Higgs bosons (generalized HEFT, GHEFT). It is shown that the scalar boson scattering amplitudes are described in terms of the Riemann curvature tensor (geometry) of the scalar manifold and the covariant derivatives of the potential. The coefficients of the one-loop divergent terms can also be written in terms of the Killing vectors (symmetry) and the Riemann curvature tensor (geometry).

We also formulate an extension of Higgs effective field theory which contains arbitrary number of scalar and fermion fields with arbitrary electric and chromoelectric charges. The chiral order counting rule is arranged consistently with the loop expansion. The parametrization redundancy in the effective Lagrangian is resolved by describing the on-shell scattering amplitudes only with the covariant quantities in the scalar/fermion field space.

研究分野：素粒子理論

キーワード：素粒子質量の起源 電弱対称性の破れ 有効理論 標準模型を超える物理 素粒子現象論

1. 研究開始当初の背景

素粒子標準理論は、数百 GeV 程度までのエネルギースケールの素粒子現象を精度良く記述する理論として現在までに大きな成功を納めており、実際、素粒子標準理論が预言した素粒子は、そのすべてが発見されるに至っている。一方、LHC 実験開始当初に期待された、標準理論を超える新粒子(拡張ヒッグス粒子、W/Z 粒子、カラー荷をもつ新素粒子などの発見は、いまだ達成されていない。近未来に実行が計画されている高エネルギー素粒子実験は、その重心系衝突エネルギーを現在の値からあまり上昇させることなく、統計量の増加を図るものであり、これらの実験によって、素粒子標準理論を超える新素粒子が発見される見込みは薄い。一方で、今後の実験のデータ蓄積による統計量の増大に伴い、既存素粒子の性質を表す物理量の測定精度は着実に向上していく。

このような状況のもとで標準理論を超える物理の兆候が見つかる有望なシナリオとしては、精密測定実験値が素粒子標準模型预言値から統計的に有意なレベルで乖離していることが発見される可能性があげられる。素粒子標準模型の理論的弱点である階層性問題は、標準模型へのスピンゼロ素粒子の導入によって引き起こされた問題である点を考慮すると、なかでも、唯一のスピンゼロ素粒子である 125GeV ヒッグス粒子(2012 年に発見)の性質を精密測定することによって、素粒子標準模型を超える物理の兆候が得られる可能性が高い。

しかしながら、新粒子の発見のような確固たる新物理のシグナルとは異なり、標準模型粒子の精密測定による新物理探索の成果は、間接的な手がかりを与えるに過ぎない。たとえある物理量について、その測定値と预言値の間に乖離が見つかったとしても、どのような新物理がどのエネルギースケールに潜んでいるかを指し示す決定的な証拠とはなり得ない。一般に、同一の低エネルギー現象を引き起こす新物理は、複数の可能性が存在しうるからである。この意味で、どのような新物理が存在すれば、低エネルギーでの精密測定値にどのような影響を与えるか、さまざまな可能性を考慮しつつ系統的で詳細なチャート作成研究が必要とされている。この研究課題では、低エネルギー有効理論を用いてそのような系統的なチャート作成研究の一端を担う。

2. 研究の目的

比較的低エネルギーの素粒子現象における標準理論预言からのずれを、模型の詳細に依らずに系統的に記述する手法として、**有効理論**を用いる方法はたいへん有用である。なんらかの有効理論を用いることによって、素粒子標準理論の持つ対称性、因果律、低エネルギー散乱でのユニタリティーなど、量子論として満たすべき最低限の性質を保つ体系が構築できるからである。

本研究課題の目標は、可能な新物理の種類およびエネルギースケールと、ヒッグス精密測定の結果のあいだの系統的で詳細なチャート作りを行うことである。現在までに、そのような有効理論として、「標準模型有効理論」と呼ばれる有効理論と「ヒッグス有効理論」と呼ばれる有効理論が定式化されており、各々 1 ループレベルまでの輻射補正の構造が明らかになっている。標準模型有効理論は、素粒子標準模型に質量次元 6 の高次元演算子(標準模型のゲージ対称性と矛盾しないもの)を加える理論であり、標準模型を超える新物理の効果が低エネルギーで脱結合(デカップリング)するタイプの模型において、系統的な展開を与える有効理論である。これに対し、ヒッグス有効理論は、新物理の効果が脱結合しない(ノンデカップリング)タイプの模型においても適用可能な有効理論であるが、標準模型有効理論に比べてもはるかに多くのフリーパラメータを持つ。

新物理の種類と有効理論のパラメータの間に関係をつける系統的なチャート作りのためには、より多くの種類の模型をカバーすることのできるヒッグス有効理論のほうが有利であると考えられるが、ヒッグス有効理論に存在するフリーパラメータの数の多さのため、標準模型有効理論に比べて、ヒッグス有効理論に基づく現象論的研究はそれほど進んでいるとは言えない。特に、ヒッグス有効理論に存在するフリーパラメータと、標準模型の背後に存在する可能性のある新物理のパラメータの間関係が解明されているとは言えない状況にある。

このような現状において、本研究計画では、以下のポイントに着目して、標準理論を超える物理探索を行うための低エネルギー有効理論アプローチにブレークスルーをもたらす。

3. 研究の方法

これまでに述べたように、本研究では、ヒッグス場の点変換の自由度に着目し、統一有効理論での粒子散乱振幅の具体形を求める。このことによって、標準模型散乱振幅からのずれがヒッグス多様体の幾何学量で記述されることになる。これまでの研究で、特に、高エネルギー散乱振幅において、エネルギーの増加に比例して増大する項は、ヒッグス多様体のリーマン曲率に比例する項であることがわかっている。統一有効理論を用いることで、従来の有効理論における制限とは異なる観点で、標準模型を超える模型（BSM 模型）に制限が得られる。

また、この方法では、ヒッグスの相互作用が標準模型のそれとは乖離していることが実験的に明らかになった場合、高エネルギー散乱振幅の摂動論的ユニタリティーを最小の方法で満たすために必要とされる BSM 粒子の性質についても示唆を得ることができる。この場合は、高エネルギーでの摂動論的ユニタリティーを満たす模型において、多くの物理量が 1 ループ有限であることを活用することで、そのような BSM 粒子の質量に対してより精度の高い予言を行う。逆に、ヒッグスの相互作用の測定値が標準模型の理論値と無矛盾であった場合には、BSM 粒子の質量下限を模型の詳細に依ることなく導く。また、紫外完全な理論が存在しえないパラメータ領域をあらかじめ排除しておくことで、有効理論パラメータの測定精度向上を目指す。

4. 研究成果

電弱対称性の破れを記述する低エネルギー有効場理論として、125GeV ヒッグス粒子以外の余分なヒッグス粒子を含む一般化ヒッグス有効場理論（GHEFT）を定式化した。この理論におけるスカラー散乱振幅が、GHEFT のスカラー多様体の幾何学形状（リーマン曲率）と対称性（キリングベクトル）によって表されることを示した。素粒子現象研究にとって重要な、電弱斜め補正に対する 1 ループ放射補正も、スカラー多様体の幾何学および対称性の観点から表現されることがわかった。この結果を用いることで、GHEFT 理論における摂動ユニタリティと斜め補正の紫外有限性の関係を明らかにした。

特に、ツリーレベルのユニタリティーが保証されると、S パラメータと U パラメータの 1 ループ有限性が自動的に保証されることが示された。スカラー振幅のツリーレベルの摂動的ユニタリティーには、真空におけるスカラー多様体の完全な平坦性が必要である一方で、電弱斜め補正の 1 ループ有限性は完全な平坦性を必要としない。この発見により、拡張ヒッグスシナリオでは、ツリーレベルのユニタリティー条件が 1 ループ UV 有限条件よりも強力であることを示された。また、S パラメータと U パラメータの発散の係数と、将来の衝突型加速器実験で測定できる粒子散乱振幅の関係をあきらかにし、将来のコライダー実験での探索に有望なチャンネルを考察する指針を与えた。このことにより、現在発見済みのヒッグス粒子の相互作用、断面積、および斜めパラメータの将来の精密測定が、一般化されたヒッグスセクターにおけるスカラー多様体の幾何学的形状と対称性を決定するために非常に重要であることが示された。衝突型加速器/精密実験データと効果的な理論的アプローチを組み合わせることで、標準模型を超える物理への展望が得られることを示した。

次に、任意電荷と QCD 色電荷をもつ任意個数のスピン 0 粒子とスピン 1/2 粒子を含むことができるよう、一般化ヒッグス有効理論（GHEFT）をさらに拡張した。これらの粒子には、標準模型のクォークやトプトンだけでなく、標準模型を超える物理における拡張ヒッグスやフェルミオン粒子をも含むことができる。このことによって、GHEFT 理論は標準模型を超える新粒子を含む散乱振幅の計算にも用いることができる。これは、既存の有効理論である標準模型有効理論やヒッグス有効理論といちじるしい対照をなす。既存の有効理論では、これら標準模型を超える物理の新粒子が積分されてしまっており、新粒子の生成断面積や崩壊幅を計算できないのに対し、GHEFT 理論は新粒子の直接生成をも取りあつかうことができる有効理論になっている。GHEFT 理論のリーディングオーダーラグランジアンを、輻射補正と演算子展開との整合性をたもつよう、解ラール勘定ルールにのっとって構成する方法を提案した。

量子場の理論での散乱振幅は場の再定義によって変化しない。この事実は、亀淵・オラファティ・サラム定理 (KOS 定理) として知られている。場を座標変数とみなしたとき、場を座標変換することによって、同一の物理を記述するもの見かけが異なる有効理論を多数構築できることを示しており、見かけが異なる有効理論が同一の散乱振幅を表すことがあることを示している。したがって、有効理論を構築するうえでの場のパラメトリゼーションの方法はユニークではない。われわれは、GHEFT 理論におけるこのような冗長性を回避すべく、場の内部空間における曲率のような幾何学不変量を用いることで一見異なる有効理論の同一性を確認する方法論を与えた。我々はまた、特別な座標系である正規座標をもちいることで、有効理論における散乱振幅の計算が劇的に簡単になることを見出した。我々はまた、GHEFT 理論における質量殻上の粒子散乱振幅を具体的に評価した。これらの散乱振幅を、現代的なスピナー波動関数記述方法である、四角かっこ、三角かっこ記法を用いて表し、ユニタリティーの計算にとって重要な高エネルギー極限での粒

子散乱振幅を評価した。その際、4点散乱振幅がエネルギーとともに増加すること、その増加の計数が場の内部空間における曲率テンソルによって決定されることを見出した。このことにより、摂動論的ユニタリティーを保証するためには、場の内部空間の曲率テンソルが平坦にならねばならないことが見出した。このような平坦性として注目すべき点は、スカラー場の内部空間だけでなく、フェルミオンの内部空間にも曲率テンソルを導入できることを示した点であり、このことにより、従来は複雑な計算が必要であったフェルミオン散乱振幅を、ボーズ粒子と同様、内部空間の幾何学に由来するものだと理解することが可能となった。

この研究課題の研究成果を素粒子現象研究に応用する方向については、パーティクルデータグループ(PDG)共同研究で執筆に携わっているレプトクォーク粒子と励起クォーク、励起レプトン粒子の探索結果のレビュー論文に、有効理論の立場での解説を付け加えた。この成果は、2022年版のPDGレビューだけでなく、2024年夏に出版されるPDGレビューにも取り込まれる予定である。

論文

- 1) Review of Particle Physics, PDG Collaboration, R.L.Workman et al, PTEP 2022 (2022) 083C01
- 2) Scalar and fermion on-shell amplitudes in generalized Higgs effective field theory, R. Nagai, M.Tanabashi, K. Tsumura, Y. Uchida, Phys.Rev.D104 (2021) 015001.
- 3) Review of Particle Physics, PDG Collaboration, P.A.Zyla et al., PTEP 2020 (2020), 083C01
- 4) Symmetry and geometry in generalized Higgs effective field theory: Finiteness of oblique corrections versus perturbative unitarity, R. Nagai, M. Tanabashi, K.Tsumura, Phys.Rev.D100 (2019) 075020

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Ryo Nagai, Masaharu Tanabashi, Koji Tsumura, and Yoshiki Uchida	4. 巻 104
2. 論文標題 Scalar and fermion on-shell amplitudes in generalized Higgs effective field theory	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Phys. Rev. D	6. 最初と最後の頁 15001
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevD.104.015001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 P.A. Zyla et al. Particle Data Group Collaboration	4. 巻 8
2. 論文標題 Review of Particle Physics	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 PTEP	6. 最初と最後の頁 083C01
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/ptep/ptaa104	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Nagai Ryo, Tanabashi Masaharu, Tsumura Koji, Uchida Yoshiki	4. 巻 100
2. 論文標題 Symmetry and geometry in a generalized Higgs effective field theory: Finiteness of oblique corrections versus perturbative unitarity	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 75020
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevD.100.075020	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 P.A. Zyla et al. Particle Data Group Collaboration	4. 巻 2022
2. 論文標題 Review of Particle Physics	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 PTEP	6. 最初と最後の頁 083C01
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/ptep/ptac097	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 棚橋誠治
2. 発表標題 電弱対称性の破れとヒッグス機構
3. 学会等名 Flavor Physics Workship 2022 (招待講演)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------