

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月24日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K05047

研究課題名(和文) ヒッグス結合の精密測定から探る標準模型を超える物理

研究課題名(英文) Search for Physics Beyond the Standard Model from the Higgs Precision Measurements

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) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：ATLASの2TeVダイボソンアノマリーに対するW'粒子解釈に関連し、ユニタリティー和則とカストディアル対称性を用いて、一般的なW'模型の満たすべき結合定数関係式を導出した。ヒッグス有効理論を拡張し、任意個数の中性および荷電ヒッグス粒子を含みうる一般化ヒッグス有効理論を提案した。一般化ヒッグス有効理論のツリーレベル散乱振幅を計算するための表式を非線形シグマ模型の曲率テンソルとポテンシャルの共変微分によって与えた。我々はまた、隔離暗黒物質模型の新しい可能性を提案した。この新しいタイプの隔離暗黒物質模型では、暗黒物質粒子と媒介粒子の統一理論になっており、複合粒子暗黒物質模型では自然に実現される。

研究成果の学術的意義や社会的意義

2012年にLHC実験で発見されたヒッグス粒子は、素粒子標準理論の予言する唯一のスカラー素粒子であり、あらゆる素粒子の質量の起源を担うと考えられている。しかしながら、素粒子標準理論にはヒッグス粒子以外のスカラー素粒子は存在せず、ヒッグス粒子の正体は、いまだ謎に包まれている。本研究は、ユニタリティーやくりこみ可能性といった純理論的な制約が、ヒッグス粒子あるいはその拡張模型の性質にどのような制限を与えるかを明らかにするものである。今後、ヒッグス粒子結合の精密測定が進むことで、素粒子標準模型の破綻が明らかになることが期待される。

研究成果の概要(英文)：We investigate W' interpretations for the ATLAS 2 TeV diboson anomalies. We find the unitarity sum rules and the custodial symmetry are powerful enough to predict various nontrivial relations among WWZ, WZW, WW<sub>h</sub>, WW<sub>h</sub> and ZZ<sub>h</sub> coupling strengths in a model independent manner.

A generalization of Higgs effective field theory (HEFT) including arbitrary number of extra neutral and charged Higgs bosons (generalized HEFT, GHEFT) is formulated to describe non-minimal electroweak symmetry breaking models. 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.

We also proposed a novel possibility of the DM model buildings in which the mediator particle m is unified with the DM particle d in an approximate dark symmetry multiplet. A pion-like DM model is proposed to illustrate this idea in a renormalizable field theory framework.

研究分野：素粒子理論

キーワード：電弱対称性の破れ 低エネルギー有効理論 素粒子現象 ヒッグス

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

## 1. 研究開始当初の背景

LHC 実験によって 2012 年に約 125GeV の質量を持つヒッグス粒子が発見され、素粒子物理学は新たな局面を迎えた。ヒッグス粒子は、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を理解する上での重要な鍵となる粒子である。しかしながら、素粒子標準模型でのヒッグス場の凝縮による素粒子質量起源の説明は、電弱対称性の破れのエネルギースケールを輻射補正に対して安定化させる機構を内包しておらず、理論的に不完全なものであると見なされている。電弱対称性の破れのエネルギースケールを安定化させるためには、典型的には TeV スケールにヒッグス粒子以外の新素粒子が存在する必要があるため、その場合、ヒッグス粒子の他素粒子との結合は、標準模型の予言からずれることが期待される。

素粒子質量起源の安定化に加えて、ヒッグス粒子の性質解明が必要な理由としては、暗黒物質 (ダークマター) の存在が挙げられる。暗黒物質 (ダークマター) の存在量は宇宙観測により高精度に分かっているが、その正体は未だ解明されていない。ひとつの有望な仮説として、暗黒物質を説明する素粒子がヒッグス粒子を介してのみ標準模型粒子と相互作用している (ヒッグスポータルダークマター模型) ことが考えられるが、この場合、やはり、ヒッグス粒子の性質が標準模型の予言からずれることが期待されるからである。とくに研究実施期間中に、暗黒物質の直接探索実験の結果が報告されることが予定されていたため、有望視されていた。

## 2. 研究の目的

このような状況において、1) 標準模型有効理論による解析 (低エネルギー有効理論を用いた背後模型の詳細に依らない理論解析) と 2) 背後模型として具体的な拡張ヒッグス模型を想定した理論解析のふたつの方向性での研究が、盛んに進められていた。このうち、1) の標準模型有効理論による解析では、標準模型ラグランジアンに高次元演算子が導入され、新たに導入された高次元演算子の係数によってヒッグス相互作用は変更を受ける。このような有効理論の予言と実験結果を比較することで、ヒッグスの質量スケールでの高次元演算子の係数に現象論的制限が与えられており、さらにくりこみ群の効果による高次元演算子の演算子混合を考慮することで、任意のエネルギースケールでの高次元演算子の係数に制限を加えることが可能になっている。しかしながら、標準模型有効理論は、くりこみ可能性やユニタリティーといった場の理論として満たすべき基本的な性質が成立せず、あくまでもカットオフスケール以下のエネルギースケールでのみ利用可能な有効理論として考えざるを得ない。このような背景のもと、本研究は、前述の 1) と 2) の研究をつなぐ新たな研究の方向性を提案することを目的とした。

## 3. 研究の方法

特に中性ヒッグス粒子のみが拡張ヒッグスセクターに含まれる場合について本研究開始直前に詳細な解析を行い、その成果を Phys.Rev.D91(2015) 034030 に発表しており、本研究実施期間中にそのさらなる一般化を行うことを目標とした。また、LHC 実験によってなんらかの異常現象 (素粒子標準理論では説明できない現象) が報告された場合は、低エネルギー有効理論へのインパクトを明らかにすること、また、低エネルギー有効理論を用いた暗黒物質模型の構築についても適時行うこととした。

#### 4 . 研究成果

- (1) T. Abe, R. Nagai, S. Okawa and M. Tanabashi,  
`Unitarity sum rules, three-site moose model, and the ATLAS 2 TeV diboson anomalies,'  
Phys. Rev. D (2015) no.5, 055016

LHC ATLAS 実験から報告された 2TeV ダイボソン事象への  $W'$  粒子解釈を調べた。特に、縦波ゲージ粒子散乱振幅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の役割を強調した。ユニタリティー和則とカストディアル対称性が十分に強力であり、 $WWZ'$ 、 $WZW'$ 、 $WW_h$ 、 $WW'h$ 、 $ZZ'h$  結合のあいだに非自明な関係式が模型の詳細に抛らずに予言されることを発見した。我々はさらに、 $W'$  模型の一般的なパラメータ空間において 2TeV ダイボソン事象を説明することが可能かどうかを調べ、その結果、ATLAS 実験が報告した 2TeV ダイボソン事象が 3 サイトムース模型における  $W'$  粒子生成と解釈できることを見出した。この  $W'$  粒子は余剰次元模型の文脈ではカルツァ・クライン励起であると解釈できる粒子である。また、もし 2TeV ダイボソン事象が統計的な揺らぎや実験の間違いでない場合は、将来のヒッグス粒子の精密測定での、ヒッグス結合のずれが予言されることを理論的に明らかにした。その後、ATLAS のダイボソン事象は統計的な揺らぎであることが確定したが、この研究で報告した  $W'$  粒子のユニタリティー関係式は、今後、実際に  $W'$  粒子が発見された場合にはそのまま適用できる結果である。

- (2) S. Okawa, M. Tanabashi and M. Yamanaka,  
`Relic Abundance in a Secluded Dark Matter Scenario with a Massive Mediator,'  
Phys. Rev. D (2017) no.2, 023006

隔離された宇宙暗黒物質模型における暗黒物質残存量を計算した。隔離された宇宙暗黒物質模型では、暗黒物質粒子数の減少過程は暗黒物質の標準模型粒子への対消滅過程ではなく、媒介粒子への対消滅過程で記述される。媒介粒子はその後標準模型粒子に崩壊するので、暗黒物質の直接探索実験の制限と矛盾しない模型を容易に実現することができる。この論文では、媒介粒子の質量が暗黒物質粒子の質量に比べて無視できないほど大きい場合であっても、このような隔離された宇宙暗黒物質シナリオが実現する可能性を指摘した。特に、暗黒物質粒子の質量と媒介粒子の質量が縮退している場合には、現在の宇宙観測と矛盾しない暗黒物質残存量を、暗黒物質と媒介粒子の散乱振幅を十分に大きくし、媒介粒子の崩壊寿命を調整することで実現できることを明らかにした。この場合の初期宇宙における暗黒物質の熱史は、非常に特徴的な振る舞い（2段階の階段状の振る舞い）を示す。この状況を用いることで、これまでに提案されていない新規な暗黒物質 / 媒介粒子統一模型を提案した。この研究以前に調べられていた隔離された宇宙暗黒物質模型は、媒介粒子と暗黒物質を別個に導入するもの出会ったのに対し、我々の提案した暗黒物質模型は、媒介粒子と暗黒物質粒子の統一理論になっていることが特徴である。さらに、この枠組みをくりこみ可能なゲージ理論で実現するためのパイオニック暗黒物質模型を提案した。

- (3) R. Nagai, M. Tanabashi, K. Tsumura and Y. Uchida,  
`Symmetry and geometry in generalized Higgs effective field theory - Finiteness of oblique corrections v.s. perturbative unitarity-,'  
arXiv:1904.07618 [hep-ph]. 査読誌に投稿中

任意個数の中性および荷電ヒッグス粒子が含まれるようにヒッグス有効理論(HEFT)を拡張し、一般化されたヒッグス有効理論(GHEFT)を構築した。一般化されたヒッグス有効理論は非最小な電弱対称性の破れ模型を一般的に記述することが可能である。GHEFT ラグランジアンはスカラー多様体上の非線形シグマ模型として構築されているが、GHEFT 模型におけるスカラー粒子散乱振幅をスカラー多様体のリーマン曲率テンソルとポテンシャル項の共変微分によってあらわす表式を得た。電弱精密測定パラメータ  $S$  と  $U$  の 1 ループ発散の係数も、キリングベクトルとリーマン曲率によって支配されることを確認した。ヒッグス粒子や縦波ゲージボソン散乱振幅の散乱振幅が摂動論的なユニタリティー条件を満たすことが、スカラー多様体の平坦性条件と一致することを証明し、摂動論的ユニタリティーと電弱精密測定パラメータ  $S$ 、 $U$  の 1 ループ有限性の間の関係を、非線形シグマ模型の幾何学の立場で明らかにした。つまり、ツリーレベルの摂動論的ユニタリティーを散乱振幅に課すことによって、 $S$  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を模型の詳細によらずに証明した。

## 5 . 主な発表論文等

[雑誌論文](計 4 件)

- 1) [M.~Tanabashi](#) {¥it et al.} [Particle Data Group], 査読あり  
`Review of Particle Physics,'  
Phys.¥ Rev.¥ D {¥bf 98}, no. 3, 030001 (2018).  
doi:10.1103/PhysRevD.98.030001
- 2) S.~Okawa, [M.~Tanabashi](#) and M.~Yamanaka, 査読あり  
`Relic Abundance in a Secluded Dark Matter Scenario with a Massive Mediator,'  
Phys.¥ Rev.¥ D {¥bf 95} (2017) no.2, 023006  
doi:10.1103/PhysRevD.95.023006  
[arXiv:1607.08520 [hep-ph]].
- 3) C.~Patrignani {¥it et al.} [Particle Data Group], 査読あり  
`Review of Particle Physics,'  
Chin.¥ Phys.¥ C {¥bf 40} (2016) no.10, 100001.  
doi:10.1088/1674-1137/40/10/100001
- 4) T.~Abe, R.~Nagai, S.~Okawa and [M.~Tanabashi](#), 査読あり  
`Unitarity sum rules, three-site moose model, and the ATLAS 2 TeV diboson anomalies,'  
Phys.¥ Rev.¥ D {¥bf 92} (2015) no.5, 055016  
doi:10.1103/PhysRevD.92.055016  
[arXiv:1507.01185 [hep-ph]].

[学会発表](計 3 件)

- 1) Roles of perturbative Unitarity in Extended Higgs scenarios, M. Tanaabashi, KIAS-CFHEP Workshop and the 5<sup>th</sup> KIAS Workshop on Particle Physics and

Cosmology, Nov. 9-13, 2015, KIAS, Korea

- 2) スリーサイト模型における  $W'$  と  $Z'$ 、棚橋誠治、テラスケール研究会、2015年6月27日、東大
- 3) Japanese PDG Collaboration, M.Tanabashi, 2018 PDG Collaboration and Advisory Committee Meetings, October 25-28, 2018, LBNL, USA

〔その他〕

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号（8桁）：

### (2) 研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。