

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 4 月 29 日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K17715

研究課題名(和文) W' で探るヒッグスポテンシャルの起源研究課題名(英文) The origin of the Higgs potential as explored in W'

研究代表者

阿部 智広 (Abe, Tomohiro)

名古屋大学・高等研究院(基礎理論)・特任助教

研究者番号：70712727

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円

研究成果の概要(和文)：素粒子質量の起源はヒッグスポテンシャルであるということは、2012年のヒッグス発見以降の様々な実験データと矛盾しない。一方で、ヒッグスポテンシャルの起源は未だ不明である。その起源を説明する1つの可能性として、ヒッグス粒子をよりミクロな粒子の結合状態とするシナリオがあり、そこでは理論的考察からスピン1の新粒子 W' の存在が予言される。

本研究では、模型の詳細によらない W' の性質の解明、 W' 起源でtwo-Higgs doublet模型(THDM)のよくある仮定が自然に説明できること、THDMと関連する暗黒物質模型の精密計算などを行い、理論の性質から実験による検証可能性まで明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、 W' の性質の一端が模型の詳細によらず明らかにすることができた。 W' を記述する模型が無数にあることを考えると、この結果は実験で W' と目される粒子が発見された際にどのような方向に進めばいいのかの指針となるため意義深い。また、 W' を考えることでtwo-Higgs doublet模型(THDM)のよくある仮定が自然に説明できたことは、THDMを足がかりにヒッグスポテンシャルの起源が探索可能なことを示せたことになり、模型研究の動機付けになる。暗黒物質模型の精密計算は、XENONnT実験やLZ実験などでの模型の検証可能性を明らかにできた点が重要である。

研究成果の概要(英文)：The picture that the origin of mass of elementary particles is the Higgs potential is consistent with various experimental data since the discovery of the Higgs boson in 2012. On the other hand, the origin of the Higgs potential is still unknown. A possible explanation of that origin is the scenario that introduces the Higgs boson as a composite object. In the scenario, spin-1 new particle (W') is expected.

We studied the nature of W' model-independent way. We also gave a natural explanation of the popular assumption in the two-Higgs doublet model (THDM) by using W' . Precise calculations in a dark matter model that contains the THDM were also studied. We have shown the property of the W' from a theoretical point of view and also revealed how to test the models at experiments.

研究分野：素粒子

キーワード：ヒッグス 電弱対称性 暗黒物質

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

LHC実験におけるヒッグス粒子の発見およびその結合定数などの測定から、電弱対称性の破れはヒッグスポテンシャルによって引き起こされるという標準的な描像は、基本的には正しいものと考えられる。しかし、このヒッグスポテンシャルが、果たして一義的な存在なのか、それとも二義的存在であり背後により基本的理論が存在するのかは、素粒子物理学における大きな問いの1つである。

ヒッグスポテンシャルが二義的存在で、電弱対称性の破れの背後に存在する未知の強結合理論のダイナミクスからの帰結である場合、量子色力学からの類推および理論に対する現象論的要請から、数TeVの質量をもったスピン1の新しい粒子(以下 W' と呼称)の存在が期待される。

強結合理論のダイナミクスを解くことは、その非摂動論的性質のため、一般に極めて困難である。しかし、その帰結と期待される W' の物理は比較的容易に扱える。そのため、様々な W' 模型の現象論的帰結を導き、それを実験と比較することで、 W' 模型の構造に対する制限を理解することは、電弱対称性の破れの背後に存在する理論を理解するための第一歩として重要である。

また、ATLAS 実験における 2TeV diboson excess [JHEP 12 (2015) 55]を W' によって説明できることも示されており、 W' それ自体も魅力的な研究対象として非常に注目を集めている。

私はこれまでも、「電弱対称性の破れの起源」をキーワードにその背後に強結合理論が存在する模型の構築、およびその現象論の解析に取り組んできた。そのなかでも特に、(1)摂動論的ユニタリティーの議論から開発した、 W' の標準模型粒子との結合を用いることで模型の背後に強結合理論があるのかどうかを判別する方法[Phys. Rev. D 92, 055016 (2015)]、(2)模型の構造によって $W'WZ$ 結合の大きさが $m^2_{W'}/m^2_W$ 程度よりも大きくなるか小さくなるかを判定する方法(Phys. Rev. D 95, 075022 (2017))、の2点は、本研究の遂行に重要な役割を果たす。

2. 研究の目的

本研究の目的は、ボトムアップ的アプローチから構築可能な様々な W' 模型を、各種実験結果と比較し、どのような W' 模型が現実的であるのか絞りこむことである。実験事実と矛盾しない W' 模型 を明らかにすることで、それを低エネルギー有効理論として導く電弱対称性の破れの背後に存在する 強結合理論を探索する手がかりが得られると期待される。この目的達成のために、本研究では以下に取り組む。

【 1 模型の分類 】 ボトムアップ的アプローチからは、対称性および物質場の表現の選択の自由度のために、無数の W' 模型が構築可能である。そのため模型の分類は、効率的に研究を進める上でも、必要不可欠である。本研究では、 $W'WZ$ 結合が(A) $m^2_{W'}/m^2_W$ 程度より小さい場合、(B) $m^2_{W'}/m^2_W$ 程度以上の場合、の2つに模型を分類し考える。この結合の大きさによって、 W' のメインの崩壊モードが異なり、その現象論的帰結としてLHC実験における探索モードが異なる。結合が $m^2_{W'}/m^2_W$ 程度よりも大きい 場合、 W' は主にボソン2つに壊れ($W' \rightarrow WZ$, $W' \rightarrow Wh$)、小さい場合にはフェルミオン2つに 壊れる($W' \rightarrow qq$, $W' \rightarrow lv$)。これを利用すれば、LHC実験における W' 探索の各種崩壊モードから、模型の構造を明らかにすることが可能である。

【 2 それぞれの模型の現象論的帰結と実験との比較 】 模型の分類ののち、実験と比較するために分類したそれぞれの模型の現象論的帰結を調べる。具体的には以下のことに取り組む。

- W' の標準模型粒子への崩壊モード:分類した模型ごとに W' の崩壊分岐比を計算し、模型の構造によって確かに主要な崩壊先が異なることを、定量的に明らかにする。また、崩壊モードごとの LHC 実験における断面積を評価し、予定されている統計量とあわせ、探索可能な W' の質量の上限を見積もる。
- W' の低エネルギーの観測量への影響:電弱精密測定やフレーバー物理への影響とそれらからの模型の制限を調べる。フェルミオンの表現に関する強い制限を得られると期待されるため、模型の構造解明に重要である。
- h' の現象論:特にくりこみ可能な模型の範囲内で考えた場合、新しいスカラー粒子 h' が現れる。これも模型の検証にとって重要であるため、その LHC 実験における現象論(生成過程や崩壊モードなど)を調べる。
- W' のエキゾチックな崩壊モード探索: h' が存在し、これが W' よりも軽い場合、 $W' \rightarrow W h'$ というエキゾチックな崩壊モードが存在できる。この崩壊モードが W' 探索にどう影響するかを明らかにする。
- 理論的制限からの W' および h' への制限:摂動論的ユニタリティーやヒッグスポテンシャルへの量子補正への影響から、 W' および h' の質量や結合への上限値を調べる。

3. 研究の方法

【 模型の分類 】

具体的な考察の対象としては、最もシンプルな W' 模型である、電弱対称性を $SU(2) \times SU(2) \times U(1)$ と拡張したものを考える。その際、予言能力の担保のために、くりこみ可能な模型の範囲で考察する。そのうえで可能なヒッグス場およびフェルミオン場の表現の数だけ模型を構築し、それらを $W'WZ$ 結合の大きさが、 $m_{W'}^2/m_W^2$ 程度より小さいか大きいかで模型を分類する。

【 W' の標準模型粒子への崩壊モードの解析 】

分類した模型ごとに W' の崩壊分岐比を計算し、模型の構造によって確かに主要な崩壊先が異なることを、定量的に明らかにする。その後、各崩壊モードごとの LHC 実験における断面積を評価し、予定されている統計量とあわせ、探索可能な W' の質量の上限を見積もる。

【 W' の低エネルギーの観測量への影響 】

(1)電弱精密測定からの模型に対する制限を調べる。それによって、各模型におけるパラメータ空間内の許される領域を明らかにする。例えば、 W' とフェルミオンの結合の大きさに制限が得られる。また、 ρ パラメータへの制限からカストディアル対称性の破れがどこまで許されるかがわかるため、ヒッグス場の表現など、模型の構造に対する制限も得られると期待される。

(2)フレーバー物理への影響とそこからの模型の制限を調べる。フレーバー物理はゲージボソンを媒介とする弱い相互作用で記述される物理であるが、 W' 模型における弱い相互作用は、
 (i) W' の存在により W の標準模型粒子との結合の大きさが標準模型の場合からずれる、
 (ii) W' 自体も弱い相互作用として振る舞う、という2つの理由のために、標準模型のそれとは異なったものになる。K 中間子や B 中間子の崩壊過程や振動現象への影響等から、 W' の質量およびフェルミオンとの結合の大きさに上限が得られる。これは LHC 実験から得られる制限と相補的である。特に、フェルミオンの表現や世代の構造に対する制限が得られることが期待される。

【 h' の現象論 】 くりこみ可能な模型の範囲内で考えると、ヒッグス場が複数存在するために、ヒッグス粒子(h と呼ぶ)以外の新しいスカラー粒子が少なくとも1つ存在する(まとめて h' と呼ぶ)。これも模型の検証、模型 がくりこみ可能かどうかの判定、にとって重要であるため、模型ごとに h' の生成過程や崩壊モードを調べ、LHC 実験でどのように探索可能か調べる。

【 W' のエキゾチックな崩壊モード探索 】

h' が存在し、これが W' よりも軽い場合、 $W' \rightarrow W h'$ というエキゾチックな崩壊モードが存在できる。 W' と h' の質量の大小関係で、さらに細かく模型を分類し、この崩壊モードが W' 探索にどう影響するか、コライダーシミュレーションも含め、調べる。

【 理論的制限からの W' および h' への制限 】

(1)標準模型の場合には、ボソン粒子の散乱振幅に対する摂動論的ユニタリティーの要請から、ヒッグス粒子の質量の上限が 1TeV 程度であることがわかっていた。同様の解析により、各 W' 模型 における、 W' および h' の質量の上限を求める。

(2)ヒッグスポテンシャルへの量子補正を計算し、ポテンシャルの安定性、およびランダウポールの存在の有無を調べる。これらからヒッグス場の4点結合や各ヒッグス場の真空期待値の値に対する制限が得られる。LHC 実験から得られる制限よりも強いものが得られる場合があり、調べる価値がある。

4 . 研究成果

2016年度は、模型の分類と W' の崩壊率の整理を 目的に取り組んだ。効率的な模型の分類のために、理論へ摂動論的ユニタリティーを要求した。これは理論の計算可能性と内部無矛盾性を要求すること に相当する。結果として W' の主崩壊モードがフェルミオンかボソンかを判定する事、またその崩壊率から新粒子の相互作用の強さ が推定する事は、模型の詳細に立ち入る事なく物質場の表現のみから可能である事を示す事に成功した [Phys.Rev. D95 (2017) 075022]。新粒子として W' 以外のものがない場合には、計算可能性を放棄しない限り W' の WZ への崩壊率は模型によらず必ず 2% 以下になる事を示せた事は大きな成果と言える。

素粒子標準模型を超える物理模型の1つに two-Higgs doublet model (THDM) がある。この模型は現象論的制限や解析の都合等から 3つの性質、すなわち(i) ソフトに破れた Z_2 対称性 (ii) カストディアル対称 (iii) ヒッグスポテンシャルの CP 不変性、が仮定される事がしばしばである。しかし、これら仮定の理論的根拠が議論される事はほぼなかった。私は W' 模型が低エネルギーで THDM として有効的に記述できる事に着目し、これら 3つの仮定が、たった1つの仮定から導ける事を示した [JHEP 1608 (2016) 021]。これにより既存の仮定を正当化する理論的根拠を与えることができた。

2017年度までに、 W' の質量が LHC 実験によりかなり強く制限された。余計なフェルミオンを導入するか理論的な無理をしない限り、摂動計算が可能な W' 模型では、 W' 質量の下限は 3TeV 程度と見積もれた。これは W' がヒッグスポテンシャルの起源に関わっているとするには若干重い。そこで 2017年度は、 W' 自体ではなく拡張された ヒッグスセクターを詳しく調べることにした。これは、くりこみ可能な W' 模型を考えるとヒッグス場が複数存在するために、ヒッグス粒子以外の新しいスカラー粒子が少なくとも1つ存在することが背景にある。

まず、拡張されたヒッグスセクターとしてベンチマークである two-Higgs doublet model (THDM)を用い、ミューオンの異常磁気能率の実験と理論のずれが説明可能か調べた。THDM は素粒子標準模型に余分にヒッグス場を追加したもので、様々なバリエーションがある。私は、

追加されたヒッグス場がミュオンとのみ強く結合する模型を構築した。そして、ミュオンの異常磁気能率の実験と理論のずれが説明可能であることを示した。また、同時に、LHC 実験で多量のミュオンが生成されることを示した。このシナリオは 100 fb⁻¹ 程度の実験データがたまれば十分に検証できることも示した。素粒子の電気双極子能率は、観測されることが素粒子標準模型を超える物理の存在証明になる重要な物理量である。これを理論的に計算する仕事は過去になされていたが、限定的な模型数個にしか適用できない結果であった。私は、この理論計算を改善し、より多くの模型に適用できる公式を導出した。この公式はスカラー場とフェルミオン場の相互作用が CP 対称性を破っている場合に適用できる。従って、スカラー粒子が複数存在する模型の検証に重要な道具となる。

2018 年度は、超対称標準模型において Bino と呼ばれる粒子が暗黒物質の主たる成分であるシナリオについて考察した。前年度得られた電気双極子能率(EDM)を求める公式を使い、暗黒物質の物理と電子、水銀、中性子の EDM との間に相関が現れるか調べた。これらを組み合わせることで超対称性模型の CP の破れのパラメータがかなり制限できることを定量的に明らかにした。

また、暗黒物質が擬スカラー粒子を媒介として標準模型粒子と相互作用する模型(THDM+a)における、暗黒物質の直接検出実験との比較に必要な理論計算を完遂した。この模型は現在の直接検出実験の制限を逃れつつ、現在の宇宙に存在する暗黒物質の量を説明できる模型として提案された。しかし、直接検出実験との比較に必要な理論計算には、定性的な見積もりに過ぎない箇所や項の見落としなど、不完全な部分があった。前年度に EDM 公式を導出する時に用いた手法などを用い、私は共同研究者と共に世界で初めて完全な理論計算を完成させた。これによって、実験との比較が定量的に曖昧さなく行えるようになった。また結果は、THDM+a 模型の working group の白書にも採用された。

現在の直接検出実験の制限を逃れつつ、現在の宇宙に存在する暗黒物質の量を説明できる暗黒物質模型としては、上記の模型の他に、CP 対称性を暗黒物質セクターで破る模型がある。それをくりこみ可能な範囲で最も簡単に実現する模型である singlet-doublet model について精査した。XENONnT 実験や LZ 実験、Darwin 実験などの直接検出実験が順調に進み、かつ電子の EDM 測定があと 3 桁更新すれば、模型はほぼ確実に検証可能であることを示した。またヒッグスポテンシャルの安定性に対する制限から、新粒子の質量の上限を見積もった。

2019 年度は、前年度に調べた THDM+a 模型をより精査した。具体的には、ヒッグスポテンシャルの安定性、摂動論的ユニタリティーといった理論的制限を考慮してパラメータ空間をスキャンし、その上で第 3 年度に得られた公式を用いて暗黒物質と核子との散乱断面積結果を評価することで、将来の暗黒物質の直接検出実験で模型が検証されるかどうかを徹底的に調べた。結果として、XENONnT 実験および LZ 実験でこの模型は十分検証されうることを明らかにすることができた。このことは近い将来にこれら実験で暗黒物質が検出された際にはこの模型をベンチマーク模型として提供できるという意義がある。

また、電弱対称性をさらに拡張することで W' に加え、スピン 1 の暗黒物質が導入される模型を構築した。この暗黒物質は他のスピン 1 の暗黒物質粒子と異なり、標準模型のゲージボソンと直接結合する。模型はくりこみ可能なために予言能力も高い。フェルミオンセクターも標準模型と同程度に簡素である。模型は将来のコライダー実験や暗黒物質の間接検出実験で検証できる。結果はプレプリントで公開しており(arXiv:2004.00884)、現在論文誌に投稿中である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 7件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Tomohiro Abe, Motoko Fujiwara, Junji Hisano, Yutaro Shoji	4. 巻 1
2. 論文標題 Maximum value of the spin-independent cross section in the THDM+a	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 114
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/JHEP01(2020)114	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 -
1. 著者名 Tomohiro Abe, So Chigusa, Yohei Ema, Takeo Moroi	4. 巻 100
2. 論文標題 Indirect Studies of Electroweakly Interacting Particles at 100 TeV Hadron Colliders	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 55018
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevD.100.055018	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 -
1. 著者名 Abe Tomohiro, Sato Ryosuke	4. 巻 99
2. 論文標題 Current status and future prospects of the singlet-doublet dark matter model with CP violation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 35012
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevD.99.035012	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 -
1. 著者名 Abe Tomohiro, Fujiwara Motoko, Hisano Junji	4. 巻 2019
2. 論文標題 Loop corrections to dark matter direct detection in a pseudoscalar mediator dark matter model	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 28
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/JHEP02(2019)028	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 -

1. 著者名 Abe Tomohiro, Omoto Naoya, Seto Osamu, Shindou Tetsuo	4. 巻 98
2. 論文標題 Electric dipole moments and dark matter in a CP violating MSSM	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 75029
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.98.075029	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 -

1. 著者名 Abe Tomohiro, Sato Ryosuke, Yagyu Kei	4. 巻 2017
2. 論文標題 Muon specific two-Higgs-doublet model	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP07(2017)012	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 Abe Tomohiro, Hisano Junji, Nagai Ryo	4. 巻 2018
2. 論文標題 Model independent evaluation of the Wilson coefficient of the Weinberg operator in QCD	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 175
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 Tomohiro Abe, Ryo Nagai	4. 巻 D95
2. 論文標題 Classification of simple heavy vector triplet models	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review	6. 最初と最後の頁 75022
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.95.075022	査読の有無 無
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 -

1. 著者名 Tomohiro Abe, Yuji Omura	4. 巻 1608
2. 論文標題 Emergent two-Higgs doublet models	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Journal of High energy physics	6. 最初と最後の頁 21
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP08(2016)021	査読の有無 無
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 -

〔学会発表〕 計14件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 8件)

1. 発表者名 阿部智広
2. 発表標題 Current status of the singlet-doublet dark matter model
3. 学会等名 KMI school 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 阿部智広
2. 発表標題 Current status of the singlet-doublet dark matter model
3. 学会等名 KMI 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 阿部智広
2. 発表標題 Current status of the singlet-doublet dark matter model
3. 学会等名 KEK-PH2018 winter (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 阿部智広
2. 発表標題 Quantum corrections in a DM model with pseudo-scalar mediators
3. 学会等名 International Workshop on "Theoretical Particle Physics 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 阿部智広
2. 発表標題 Quantum corrections in a DM model with pseudo-scalar mediators
3. 学会等名 beyond the BSM (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 阿部智広
2. 発表標題 Current status of the singlet-doublet dark matter model
3. 学会等名 JPS Autumn Meeting 2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 阿部智広
2. 発表標題 Quantum corrections in a DM model with pseudo-scalar mediators
3. 学会等名 Cosmo18 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 阿部智広
2. 発表標題 任意の模型におけるGGG-の係数と中性子EDM
3. 学会等名 PPP2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 阿部智広
2. 発表標題 Muon-Specific two-Higgs doublet model
3. 学会等名 基研研究会 素粒子物理学の進展2017 (PPP2017)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 阿部智広
2. 発表標題 Model independent evaluation of the Wilson coefficient of the Weinberg operator in QCD
3. 学会等名 BURI2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 阿部智広
2. 発表標題 Contributions of Weinberg operators to EDM in scalar-fermion systems
3. 学会等名 JPS Annual (73th) Meeting
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 阿部智広
2. 発表標題 Model independent evaluation of the Wilson coefficient of the Weinberg operator in QCD
3. 学会等名 KEK-PH2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tomohiro Abe
2. 発表標題 Classification of Simple W' Models
3. 学会等名 The 3rd International Symposium on "Quest for the Origin of Particles and the Universe" (KMI2017)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Tomohiro Abe
2. 発表標題 Emergent two-Higgs doublet models
3. 学会等名 The 6th KIAS Workshop on Particle Physics and Cosmology & the 2nd Durham-KEK-KIPMU-KIAS Joint Workshop,
4. 発表年 2016年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

http://tomohiro_abe.droppages.com/

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
--	---------------------------	-----------------------	----