

令和 4 年 6 月 10 日現在

機関番号：11201

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2021

課題番号：18K03648

研究課題名（和文）有効場理論によるヒッグス相互作用の検証とその背後にある新物理探究

研究課題名（英文）Search for new physics via verification of Higgs interactions based on effective field theories

研究代表者

馬渡 健太郎（Mawatari, Kentarou）

岩手大学・教育学部・准教授

研究者番号：90814096

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、2012年に欧州のLHC実験で発見されたヒッグス粒子とその相互作用に着目し、素粒子標準理論を超える物理の探究を行った。今後ILC実験等のヒッグス精密測定において、有効場理論を用いた解析により素粒子標準理論の予言からのズレが観測された場合を想定し、拡張ヒッグス模型においてどの程度のズレが予言されるかを系統的に調べた。

また、高エネルギー実験における散乱振幅の新しい計算手法を提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

2012年に発見された新粒子は、その後の実験データの蓄積と解析により素粒子標準理論が予言するヒッグス粒子と矛盾が無いことが徐々に明らかになってきた。一方、標準理論は、階層性問題、暗黒物質の存在をはじめとし多くの未解決問題を含むことも知られており、見つかった粒子が真に標準理論の予言するヒッグス粒子なのか、それとも標準理論を超える物理から予言されるものかを理論的、実験的に検証することが最重要課題となっている。本研究は様々な模型について将来実験での検証可能性を包括的に吟味した重要な研究である。

また我々が提案した新たな計算手法により、数値シミュレーションの精度、速度の向上が得られ大きな貢献となった。

研究成果の概要（英文）：We focused on the Higgs particle and its interactions, discovered at the CERN LHC in 2012, in order to study physics beyond the standard model of elementary particle physics. Assuming that Higgs precision measurements at future colliders such as the ILC observe deviations from the predictions in the standard model, we investigated how large such deviations can be induced in extended Higgs models.

We also proposed a new calculation method of helicity amplitudes for high-energy scattering processes.

研究分野：素粒子物理学（理論）

キーワード：ヒッグス粒子 素粒子標準理論を超える物理 LHC ILC 有効場理論 精密計算 ヘリシティ振幅 暗黒物質

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、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

2012年に欧州原子核研究機構 CERN の大型陽子衝突 (LHC) 実験で約 125GeV の質量を持つ新粒子が発見された。これまでのデータの蓄積と解析で、その粒子は約 50 年前に予言されたゲージ粒子に質量を与える Brout-Englert-Higgs 機構に付随して現れるスピンゼロ粒子として同定された。また、湯川項を通してのクォークやレプトンとの相互作用も合わせて、現在のところ理論、実験の不定性の範囲内で素粒子標準理論のヒッグス粒子と無矛盾である。

一方、標準理論では説明のつかない事実が数多くあることも知られている。例えば、標準理論は電弱対称性の自発的破れを通して粒子に質量を与えるが、その破れのメカニズムやクォーク、レプトン質量の階層性には答えない。また、標準理論ではニュートリノは質量ゼロであり、様々な天体観測でその存在が確かになった暗黒物質になりえる粒子が存在しない。すなわち、これまでの実験結果と無矛盾なように標準理論を内包しつつこれらの諸問題を解決する標準理論を超える物理が必要となる。

では、どのように標準理論を超える物理、新物理に迫っていけばよいのか？

標準理論は $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ ゲージ理論と Brout-Englert-Higgs 機構からなる理論である。前者のゲージ理論は LHC 実験の前身である大型電子陽電子衝突 (LEP) 実験でゲージ粒子の 3 点結合等を通して詳しい検証が行われ確立した。一方、後者のヒッグス粒子に関する部分、ヒッグスセクターについてはまさにこれからより詳細な検証が行われるところである。見つかった粒子は標準理論のヒッグス粒子と無矛盾と述べたが、現時点での実験の統計・系統誤差は大きく、例えばヒッグスとボトムクォークの結合定数は標準理論の予言から 100% ずれても許される。言い換えると、100% の新物理の寄与が許されるということである。今後、高輝度 LHC (HL-LHC) 実験や国際リニアコライダー (ILC) 実験等の将来実験で実験精度が向上し、標準理論からのズレが観測されることが期待できる。すなわち、「ヒッグスセクターの構造はどうなっているのか？」という問いに答えることで新物理に迫っていくことができる。

2. 研究の目的

一般的に新物理に迫っていくには大きく 2 つの方法がある。

一つは高エネルギー物理学の王道である新粒子直接探査である。例えば、代表的な標準理論を超える理論、超対称性、余剰次元、拡張ヒッグス理論はそれぞれ超対称粒子、カルツァクライン粒子、重いヒッグス粒子を予言し、LHC 実験で直接生成探査が精力的に続けられている。残念ながら現時点ではその兆候はなく新粒子の質量に対する制限がどんどん高くなっている。

一方、相補的な方法として標準理論からのズレに注目する方法があり、本研究では主にこちらの方法に着目した。

本研究は、将来の実験精度向上に伴う標準理論からのズレの検出可能性を見据えて、研究代表者が 2012 年ごろからヨーロッパで行ってきた有効場理論を用いたヒッグスセクターの研究を国内で継続、発展させ、さらに、その手法を用いて得られた標準理論からのズレのパターンから新物理理論との指紋照合を行い、ヒッグスセクターの構造に迫っていくことを目的とした。

3. 研究の方法

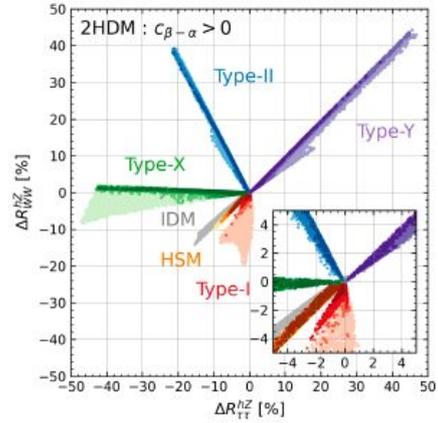
- (1) 主に大阪大学の兼村グループとの共同研究により、新物理理論の中でもいくつかの代表的な拡張ヒッグスモデル (例えば THDM: Two Higgs Doublet Model) に着目し、量子効果まで含めて発見された 125GeV のヒッグス粒子の崩壊、ILC における生成を系統的に調べた。
- (2) また、現在進行中の LHC 実験、さらには将来の HL-LHC 実験における重い付加的ヒッグス粒子の直接探索と ILC 実験等におけるヒッグス粒子精密測定の間相補性を調べた。
- (3) ILC 実験等で行われるヒッグス精密測定実験においては、理論予言の正確さ、精密さも必要不可欠となる。そのためにはイベント生成シミュレーションツールの開発、改良が鍵となる。我々はその点にも着目し、高エネルギー反応における散乱振幅の新しい計算手法を考案した。

4. 研究成果

3. 研究方法に対する研究成果をそれぞれ示す。

- (1) 様々な拡張ヒッグス模型におけるヒッグス粒子の崩壊分岐比 [PLB783(2018)140, NPB949(2019)114791] と、ILC 実験等の電子・陽電子高エネルギー衝突実験におけるヒッグス粒子生成の精密計算から、それぞれの崩壊モードにおける標準理論からのズレのパターンとその大きさを見積もった [EPJC81(2021)1000]。

右図はその一例である。横軸、縦軸は生成されたヒッグス粒子がそれぞれタウ粒子対、W 粒子対へ崩壊した場合の標準理論における予言(原点)からのズレの度合いを表す。色の違う6個のヒッグス拡張模型でズレのパターンが異なり、将来実験でそれぞれの崩壊モードでズレが観測された場合に新物理模型が特定できることを示している。また、色の濃さの違いは量子効果として現れる付加的ヒッグス粒子の質量を示しており(濃い方が重い)、ズレの度合いから新物理が現れるエネルギースケールが見積もれることを示している。



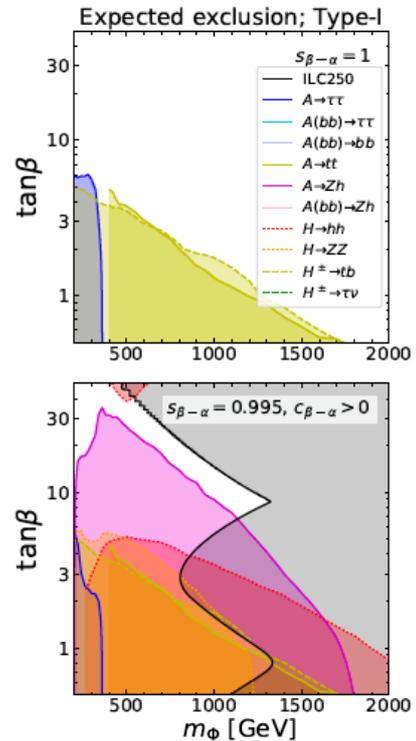
将来のヒッグス精密測定実験において素粒子標準理論からのズレが観測された場合に、新物理理論からの予言と照合し、新物理探索の方向性を定める際に必要不可欠な研究である。

- (2) 現在進行中の LHC 実験における付加的ヒッグス粒子の直接探索の実験データをもとに、拡張ヒッグス模型のパラメータ領域の精査を行った。また、将来の HL-LHC 実験におけるパラメータ探索可能領域の吟味も行った [NPB966(2021)115375]。

右図に一例を示す。色が塗られた領域は、HL-LHC 実験における THDM の模型パラメータである付加的ヒッグス粒子(A, H, H[±])の質量(横軸)と tan β (縦軸)の探索可能領域を示す。s_{β-α} は 125GeV ヒッグス粒子と W, Z 粒子の結合の強さを表すパラメータで、1 の場合は標準模型が予言する強さであることを示す。

さらに、ILC 実験等のヒッグス精密測定で標準模型からのズレが観測された場合に間接的に付加的ヒッグス粒子の質量へ上限がつくことも示してある(右図の灰色の領域)。明らかに直接探索不可能な領域をカバーしており、LHC 実験と ILC 実験が互いに相補的であることを示している。

この研究は、新物理探索には LHC 実験だけでは不十分で、ILC 実験が重要な役割を果たすことを示しており、今後の素粒子物理学が進むべき方向性を示す重要なものである。

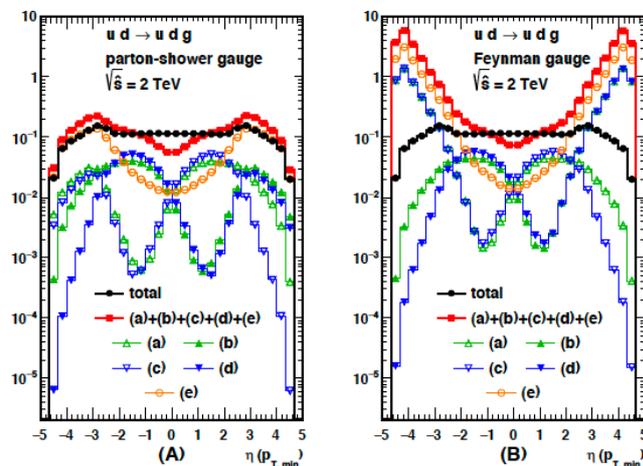


- (3) 陽子-陽子衝突である LHC 実験においてはグルーオン、電子-陽電子衝突である ILC 実験においてはフォトン(光子)による輻射をゲージ理論に基づき正しくシミュレーションすることが実験データとの比較の際に重要となる。

我々はシミュレーションの精度、速度向上を念頭に、散乱振幅の新しい計算手法(パートンシャワーゲージ)を開発した [EPJC80(2020)11]。

右図は従来のファインマンゲージによる計算との比較を示しており、新手法では非物理的なゲージ相殺がほとんどないことが分かる。これは数値計算を行う上では非常に重要な要素であり、この分野への大きな貢献となった。

現在、質量を持つ W, Z 粒子への拡張を試みており今後大きな発展が見込まれる課題である。



5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 5件/うちオープンアクセス 8件）

1. 著者名 Kanemura Shinya, Kikuchi Mariko, Mawatari Kentarou, Sakurai Kodai, Yagyu Kei	4. 巻 257
2. 論文標題 H-COUP Version 2: A program for one-loop corrected Higgs boson decays in non-minimal Higgs sectors	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Computer Physics Communications	6. 最初と最後の頁 107512 ~ 107512
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.cpc.2020.107512	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
1. 著者名 Hagiwara Kaoru, Kanzaki Junichi, Mawatari Kentarou	4. 巻 80
2. 論文標題 QED and QCD helicity amplitudes in parton-shower gauge	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The European Physical Journal C	6. 最初と最後の頁 11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1140/epjc/s10052-020-8154-9	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 Aiko Masashi, Kanemura Shinya, Kikuchi Mariko, Mawatari Kentarou, Sakurai Kodai, Yagyu Kei	4. 巻 966
2. 論文標題 Probing extended Higgs sectors by the synergy between direct searches at the LHC and precision tests at future lepton colliders	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nuclear Physics B	6. 最初と最後の頁 115375 ~ 115375
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nuclphysb.2021.115375	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
1. 著者名 Aiko Masashi, Kanemura Shinya, Mawatari Kentarou	4. 巻 797
2. 論文標題 Exploring the global symmetry structure of the Higgs potential via same-sign pair production of charged Higgs bosons	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 134854 ~ 134854
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2019.134854	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 Kanemura Shinya, Kikuchi Mariko, Mawatari Kentarou, Sakurai Kodai, Yagyu Kei	4. 巻 949
2. 論文標題 Full next-to-leading-order calculations of Higgs boson decay rates in models with non-minimal scalar sectors	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nuclear Physics B	6. 最初と最後の頁 114791 ~ 114791
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nuclphysb.2019.114791	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

1. 著者名 Frixione Stefano, Fuks Benjamin, Hirschi Valentin, Mawatari Kentarou, Shao Hua-Sheng, Sunder Marthijn P. A., Zaro Marco	4. 巻 2019
2. 論文標題 Automated simulations beyond the Standard Model: supersymmetry	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP12(2019)008	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

1. 著者名 Kanemura Shinya, Kikuchi Mariko, Mawatari Kentarou, Sakurai Kodai, Yagyu Kei	4. 巻 783
2. 論文標題 Loop effects on the Higgs decay widths in extended Higgs models	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 140 ~ 149
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2018.06.035	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

1. 著者名 Kanemura Shinya, Mawatari Kentarou, Sakurai Kodai	4. 巻 99
2. 論文標題 Single Higgs production in association with a photon at electron-positron colliders in extended Higgs models	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 35023
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.99.035023	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 -

〔学会発表〕 計24件（うち招待講演 12件 / うち国際学会 14件）

1. 発表者名 馬渡健太郎
2. 発表標題 Probing extended Higgs sectors by the synergy between the LHC and the ILC
3. 学会等名 International Workshop on Future Linear Colliders 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 馬渡健太郎
2. 発表標題 Probing extended Higgs sectors by the synergy between the LHC and the ILC
3. 学会等名 Higgs as a Probe of New Physics 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 馬渡健太郎
2. 発表標題 各種暗黒物質探索実験データと素粒子模型を系統的に照合するための枠組構築
3. 学会等名 新学術「地下宇宙」領域研究会（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 馬渡健太郎
2. 発表標題 ILC が切り拓く新物理の地平
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 馬渡健太郎
2. 発表標題 ILC study for degenerate scalars suppressing dark matter-nucleon scattering in a singlet extension of the SM
3. 学会等名 ILC summer camp 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 馬渡健太郎
2. 発表標題 ILC で何が分かるのか?
3. 学会等名 奥羽超素粒子研究会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 馬渡健太郎
2. 発表標題 H-COUP: basics and application
3. 学会等名 Opportunities at Future High Energy Collider (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 馬渡健太郎
2. 発表標題 QCD tool tutorial
3. 学会等名 KAIST-KAIX Workshop for Future Particle Accelerators (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 馬渡健太郎
2. 発表標題 Exploring the global symmetry structure of the Higgs potential via same-sign pair production of charged Higgs bosons
3. 学会等名 KAIST-KAIX Workshop for Future Particle Accelerators (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 馬渡健太郎
2. 発表標題 H-COUPで新物理を探る
3. 学会等名 YITP Workshop 2019 on Progress in Particle Physics
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 馬渡健太郎
2. 発表標題 H-COUP ver.2
3. 学会等名 ILC summer camp 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 馬渡健太郎
2. 発表標題 Exploring new physics via H-COUP
3. 学会等名 International Workshop on Future Linear Colliders 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 馬渡健太郎
2. 発表標題 Searching for Dark Matter at colliders
3. 学会等名 MadGraph school 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 馬渡健太郎
2. 発表標題 Single Higgs production in association with a photon at electron-positron colliders in extended Higgs models
3. 学会等名 3rd FCC Physics and Experiments Workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 馬渡健太郎
2. 発表標題 Higgs precision at the ILC
3. 学会等名 ILC-JP end-of-year physics and detector meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 馬渡健太郎
2. 発表標題 ILCが切り拓く新物理の地平
3. 学会等名 日本物理学会 第75回年次大会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 馬渡健太郎
2. 発表標題 Higgs production in association with a photon in extended Higgs models at ILC250
3. 学会等名 Asian Linear Collider Workshop 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 馬渡健太郎
2. 発表標題 MadGraph with emphasis on LC
3. 学会等名 Workshop on Top Physics at the LC 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 馬渡健太郎
2. 発表標題 Another Higgs production at ILC250
3. 学会等名 基研研究会 素粒子物理学の進展2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 兼村晋哉、馬渡健太郎、桜井 巨大
2. 発表標題 $e+e- \rightarrow h$ 過程を用いた拡張ヒッグス模型の検証
3. 学会等名 日本物理学会 2018 年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 馬渡健太郎
2. 発表標題 Another Higgs production at ILC250
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 馬渡健太郎
2. 発表標題 Another Higgs production at ILC250
3. 学会等名 Higgs Couplings 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 馬渡健太郎
2. 発表標題 Higgs production in association with a photon in extended Higgs models at ILC250
3. 学会等名 Higgs as a Probe of New Physics 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shao-Feng Ge、萩原薫、神前純一、馬渡健太郎
2. 発表標題 Initial state radiation with polarized electron and positron beams
3. 学会等名 日本物理学会 第74回年次大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

H-COUP http://www-het.phys.sci.osaka-u.ac.jp/~hcoup/ 岩手大学 研究紹介 https://www.iwate-u.ac.jp/cat-research/2021/04/004014.html

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2件

国際研究集会 22nd Regular Meeting of the New Higgs Working Group	開催年 2018年～2018年
国際研究集会 Higgs as a Probe of New Physics 2019	開催年 2019年～2019年

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			
ドイツ	カールスルエ工科大学			
ドイツ	Karlsruhe Institute of Technology	Universitat Munster		
フランス	Sorbonne Universite			
イタリア	INFN, Sezione di Genova			
スイス	ETH Zurich			
オランダ	Nikhef			
フランス	Sorbonne University			