

令和元年6月24日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K17697

研究課題名（和文）コライダー実験によるヒッグス自己結合の検証

研究課題名（英文）Probing Higgs Self-Coupling at Colliders

研究代表者

津村 浩二（Tsumura, Koji）

京都大学・理学研究科・助教

研究者番号：40648101

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,900,000円

研究成果の概要（和文）：ヒッグスボソンの自己相互作用の測定を念頭において研究を行った。(1) ヒッグスボソン一個を生成する過程から高次補正や分散関係を通じて自己相互作用の情報を取り出す方法について検討した。(2) 隠れたセクターを起源として電弱対称性の破れが引き起こされるモデルを仮定し、重力波をプローブとしたスカラー自己相互作用の検証方法を研究した。(3) 強く自己相互作用をするスカラー暗黒物質を起源とするニュートリノ質量モデルを構築し、ニュートリノ振動実験やフレーバー実験で検証する方法を研究した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ヒッグスボソンの発見により素粒子標準モデルは一応の完成をみたが、「なぜ電弱対称性が破れたか？なぜ電弱スケールがプランクスケールに比べて小さいのか」などの問題が手付かずに残った。ヒッグスボソンとその背後の物理を探るために、すなわち電弱対称性の破れの起源の解明するために、ヒッグス自己結合の検証方法を確立することが必要である。

研究成果の概要（英文）：We have studied the physics relevant to the Higgs self-coupling constant in order to probe the Higgs boson self-interactions. (1) We have explored the method to extract the information of the Higgs boson self-coupling in the single Higgs production processes by focusing the radiative corrections and the dispersion relations. (2) We have investigated the gravitational wave signal of the scalar self-interactions of the hidden sector, which also triggers the electroweak symmetry breaking. (3) We have constructed a neutrino mass model originated from the strongly self-interacting scalar dark matter.

研究分野：素粒子現象論

キーワード：ヒッグスボソン

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

1. 研究開始当初の背景

ヒッグスボソンの発見により素粒子標準模型は一応の完成をみた。標準模型では、ヒッグスボソンの真空期待値が全ての素粒子の質量起源を担うため、“ヒッグスボソンと素粒子の結合の強さ”と“素粒子の質量(または質量の二乗)”が比例する。結合と質量の比例関係は、依然として大きな実験的不定性を残すものの LHC 実験で部分的に確認された。今後の高輝度 LHC 実験や ILC 計画などが順調に進展することで、素粒子の質量起源の精密検証は着実に進むことが期待される。精密測定が進めば標準模型からのズレが見えてくる可能性があり、ヒッグスボソンをプローブとした新物理探索も期待できる。

ヒッグスボソンの発見とその後の進展において素粒子の質量起源の解明が進む一方、電弱対称性の破れの起源は未だ何も分かっていない。すなわち、“なぜ電弱対称性が破れるのか”という基本的な問題が残ったままである。標準模型では対称性の破れの機構は、ヒッグスポテンシャルの単なるパラメタ(負の質量項)で記述されていて、標準模型のヒッグスセクターが理論的に不十分と信じられる理由となっている。いくつかの新物理学模型(超対称性模型など)において、負の質量項はダイナミカルに誘起される構造をしており、自然な帰結として対称性の破れが実現する。このような電弱対称性の破れの起源は、新物理の予言する粒子とその性質を調べる他に、ヒッグスセクターの構造から検証することが出来る。素粒子標準模型のヒッグスポテンシャルは、ヒッグスボソンの真空期待値(崩壊の崩壊定数から決まる)と LHC 実験で発見されたヒッグスボソンの質量の2つのパラメタで完全に決まる。したがって、3つめの観測量となるヒッグス自己結合を測定することで、我々の世界が標準模型の対称性の破れの機構に従うかどうかを検証できる。ヒッグス自己結合に標準模型からのズレが観測されれば、電弱対称性の破れの起源の背後の物理に迫ることが出来る。

このような学術的背景をもとに、ヒッグスボソンの自己結合に対する様々な研究が行われている。LHC 実験では、ヒッグス対生成の検出がヒッグス自己結合を測る方法として提案されている。この過程は摂動の高次過程であるため、反応率が小さい。さらにヒッグスボソンには数々の崩壊モードがあるが、ハドロンコライダーの圧倒的に多い背景事象のため解析に使えるモードは限られており統計的に難しいものとなる。また、ヒッグス自己結合の寄与は対生成過程の主要な寄与でないため、干渉効果からその寄与を抜き出す必要があり問題をさらに複雑にしている。これまでのシミュレーション研究で得られている測定感度は、高輝度 LHC (~2037 年)を想定しても3点自己結合の存在の有無が検証できる程度(50%の不定性)である。また、ILC 実験では背景事象の問題はある程度解決するものの、ヒッグス対生成の断面積がハドロンコライダーに遠く及ばないため、やはり測定感度を上げることは難しい。20 年の物理運転で~15%程度の精度まで決定できることがシミュレーション研究で示されている。最近では、さらなる高エネルギー(~100 TeV)の加速器実験で、4 点結合まで含めたヒッグス自己結合の測定可能性も議論されるようになってきているが、依然として精密測定の見通しは立っていない。

2. 研究の目的

本研究の目的は、ヒッグスボソンとその背後の物理を探るためにヒッグス自己結合の検証方法を確立することである。素粒子の質量起源である質量とヒッグス結合の関係は、LHC 実験で部分的に確認され、今後の実験でさらなる進展が期待される。一方、電弱対称性の破れの起源の解明は、手付かずで残った問題である。対称性の破れを特徴づけるヒッグス自己相互作用の検証は難しく、理論的にも実験的にも依然として大きな課題となっており、その測定に向けた新しいアイデアを出すことが目的である。

3. 研究の方法

(1) ヒッグスボソン対生成のみならず、ヒッグスボソン1個の生成に対する非相対論効果や高次補正などを通じたヒッグス自己結合の検証を検討する。特に対称性で強く制限されていないヒッグス自己結合は、大きな輻射補正を受けることがある。またそれらの結合の副次効果でその他の過程に大きな補正が出る可能性を検討する。

(2) 広く一般にスカラーボソンの自己相互作用について研究を行い、自己相互作用の総合的な検証方法を研究する。

(3) 拡張ヒッグスを含む新しいヒッグス有効理論について研究し、強く相互作用するヒッグスについて研究を行う。

(4) 標準理論の予言と実験の不一致を新物理と捉え、拡張ヒッグス理論を用いて説明するシナリオを研究する。

4. 研究成果

(1) ヒッグスボソン1個を生成する過程からヒッグス自己結合を探索する方法について研究を行った。これまでに得られている結果では、実験で観測できるほど大きな効果は得られていないが、より詳細な計算とより幅広い過程の検討を続けている。また、光学定理に基づく分散関係を使うことでヒッグス自己結合の情報を取り出す新しい方法が見出されたが、その測定には

統計量が充分でないことが分かった。そこで引き続き、解決策を検討している。また対称性から強い制限を受けないヒッグス自己結合は、大きな輻射補正を受けることがある。そこで、スケール不変な理論に基づくヒッグス自己結合に対する輻射補正の効果を調べている。このような理論では摂動の最低次ではヒッグス結合が標準模型の値から普遍的にズレるが、輻射補正の効果を見ればその背後の理論をも区別出来る可能性がある。

(2) LIGO による重力波発見の報告を受けて、重力波をプローブとしたスカラー自己相互作用検証方法を検討した。電弱対称性の破れが隠れたセクターにより生成される模型を仮定すると、そこで生成される重力波が将来観測にかかり得ることが分かった。[雑誌論文]

(3) 強い自己相互作用をするスカラー暗黒物質を起源とするニュートリノ質量模型を構築した。このような模型においては、宇宙観測のみならずニュートリノ振動実験およびフレーバーを通じて自己相互作用にアプローチ出来ることが分かった。[雑誌論文]

(4) フレーバー対称性を持つ拡張ヒッグスセクターによりミュオンの異常磁気能率を説明する模型を構築した。[雑誌論文]

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 9 件)

Kento Asai, Koichi Hamaguchi, Natsumi Nagata, Shih-Yen Tseng, Koji Tsumura,

“ Minimal gauged $U(1)_{L-L}$ models driven into a corner ”,

Phys. Rev. D99, 055029

<https://doi.org/10.1103/PhysRevD.99.055029>

Nabarun Chakrabarty, Cheng-Wei Chiang, Takahiro Ohata, Koji Tsumura,

“ Charged scalars confronting neutrino mass and muon $g-2$ anomaly ”,

JHEP 12 (2018) 104

[https://doi.org/10.1007/JHEP12\(2018\)104](https://doi.org/10.1007/JHEP12(2018)104)

Cheng-Wei Chiang, Koji Tsumura,

“ Model with a gauged lepton flavor $SU(2)$ symmetry ”,

JHEP 05 (2018) 069

[https://doi.org/10.1007/JHEP05\(2018\)069](https://doi.org/10.1007/JHEP05(2018)069)

Ernest Ma, Koji Tsumura,

“ Syndetic extension of baryon and lepton numbers: Proton decay and long-lived dark matter ”,

Phys. Rev. D98, 035037

<https://doi.org/10.1103/PhysRevD.98.035037>

Shu-Yu Ho, Takashi Toma, Koji Tsumura,

“ A Radiative Neutrino Mass Model with SIMP Dark Matter ”,

JHEP 07 (2017) 101,

[https://doi.org/10.1007/JHEP07\(2017\)101](https://doi.org/10.1007/JHEP07(2017)101)

Ernest Ma, Takahiro Ohata, Koji Tsumura,

“ Majoron as the QCD axion in a radiative seesaw model ”,

JHEP 07 (2017) 101,

<https://doi.org/10.1103/PhysRevD.96.075039>

Koji Tsumura, Masatoshi Yamada, Yuya Yamaguchi,

“ Gravitational wave from dark sector with dark pion ”,

JCAP 07 (2017) 044,

<https://doi.org/10.1088/1475-7516/2017/07/044>

Shu-Yu Ho, Takashi Toma, Koji Tsumura,

“ Systematic $U(1)_{B-L}$ Extensions of Loop-Induced Neutrino Mass Models with Dark Matter ”,

Phys. Rev. D94, 033007

<https://doi.org/10.1103/PhysRevD.94.033007>

Yuta Hamada, Hikaru Kawai, Kiyoharu Kawana, Koji Tsumura,

“ Models of LHC Diphoton Excesses Valid up to the Planck scale ”,

Phys. Rev. D94, 014007

<https://doi.org/10.1103/PhysRevD.94.014007>

[学会発表] (計 11 件)

Koji Tsumura,

“ Poster Summary ”,

Higgs as a Probe of New Physics 2019, 2019

Koji Tsumura,

“ Symmetry and Geometry in Generalized Higgs sector ” ,
The OIST-NTU-Kyoto High Energy Physics Workshop, 2018
津村浩二,
“ ILC の物理へのインパクト ” ,
日本物理学会 2018 年 秋季大会 素粒子実験-素粒子論領域合同シンポジウム, 2018 年
Koji Tsumura,
“ An $SU(2)_\mu$ model for Muon g-2 Anomaly ” ,
Workshop on Multi-Higgs models, 2018
津村浩二,
“ 対称性の破れと標準模型を超えた物理 ” ,
46 回北陸信越地区 素粒子論グループ 合宿研究会, 2018 年
Koji Tsumura,
“ Neutrinos Meet SIMP ” ,
Energy Frontier in Particle Physics: LHC and Future Colliders, 2017
Koji Tsumura,
“ Lepton Flavor Violation in the Lepton Sector ” ,
The 15th Conference on Flavor Physics and CP Violation, 2017
Koji Tsumura,
“ Maxion : Majoron as the QCD Axion in a Radiative Seesaw Model ” ,
The 7th KIAS Workshop on Particle Physics and Cosmology and The 2nd KEK-NCTS-KIAS
Workshop on Particle Physics Phenomenology, 2017
津村浩二,
“ $SU(2)_\mu$ 模型とミュオン異常磁気能率のずれ ” ,
日本物理学会第 73 回年次大会, 2017 年
Koji Tsumura,
“ Neutrino Meets SIMP Dark Matter ” ,
Workshop for Unification and Development of the Neutrino Science Frontier, 2017
Koji Tsumura,
“ Can the Models of LHC Diphoton Excesses be Valid up to the Planck scale? ” ,
East Asia Joint Workshop on Fields and Strings, 2016

〔 図書 〕 (計 0 件)

〔 産業財産権 〕

出願状況 (計 0 件)

名称 :
発明者 :
権利者 :
種類 :
番号 :
出願年 :
国内外の別 :

取得状況 (計 0 件)

名称 :
発明者 :
権利者 :
種類 :
番号 :
取得年 :
国内外の別 :

〔 その他 〕

ホームページ等

<http://www2.yukawa.kyoto-u.ac.jp/~koji.tsumura/>

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。