

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 19 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2022

課題番号：19K14714

研究課題名（和文）強結合の力学が解く軽いヒッグス粒子の起源と素粒子・宇宙物理の未解決現象

研究課題名（英文）Strong dynamics as an origin of the light Higgs boson and phenomena beyond the standard model

研究代表者

柳生 慶 (Yagyu, Kei)

大阪大学・大学院理学研究科・助教

研究者番号：30825097

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本課題では、大域的対称性の破れ $S_0(6) \rightarrow S_0(4) \times S_0(2)$ に基づく複合2-Higgs Doublet ModelにおけるCP対称性の破れ(CPV)の現象論的性質を研究した。このシナリオでは強結合セクターに由来する非自明な複素位相により、低エネルギーでの湯川相互作用及びヒッグスポテンシャルにCPVが予言される。電弱精密測定等の既存実験の制限の下で、ヒッグスポソン質量、結合定数、崩壊分岐比等を計算しそれらの間の相関を調べた。特に、2個の付加的な中性ヒッグスポソンの弱ボソン対への崩壊分岐比が同時に最大で数パーセント程度なりえることを明らかにし、CPVを加速器実験で検証し得る可能性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

電弱対称性の自発的破れは、暫定的には素粒子の標準模型(SM)で仮定されるヒッグスポテンシャルにより誘起されると考えられているが、その背後にはポテンシャルを力学的に生成する機構が存在すると期待されている。一方でCP対称性の破れ(CPV)は宇宙のバリオン数非対称性を説明する上で重要な要素の一つであるが、SMの枠内ではその量が不十分であることが知られている。本課題は、上記の問題を「テラスケールにおける強結合の物理」という共通のキーワードで解決する試みである。実際に、強結合セクターを起源として、CPVを伴うヒッグスセクターを具体的に構築・計算し、バリオン数生成の問題を解決する新たな方向性を示した。

研究成果の概要（英文）：We have studied the phenomenological properties of violation of the CP symmetry (CPV) in the composite 2-Higgs Doublet model based on the global symmetry breaking $S_0(6) \rightarrow S_0(4) \times S_0(2)$. In this scenario, the CPV is predicted for the Yukawa interaction and the Higgs potential at low energies due to non-trivial complex phases originating from the strongly coupled sector. Under the constraints of existing experiments such as the electroweak precision measurements, the Higgs boson mass, coupling constants, and decay branching ratios are calculated, and correlations among them are investigated. In particular, we have shown that the decay branching ratios of two additional neutral Higgs bosons to weak boson pairs can be at most a few percent at the same time, indicating that the CPV can be tested by collider experiments.

研究分野：素粒子理論

キーワード：CP対称性の破れ 複合ヒッグス 強結合

1. 研究開始当初の背景

2012年にLHC実験でヒッグス粒子が発見され、100 GeV程度の加速器実験における現象がヒッグス機構を伴うSMで記述されることが実証された。しかしながら、SMの枠内では説明できない現象として、ニュートリノ振動、暗黒物質の存在、バリオン数非対称性が確立している。したがって、これらを説明するSMを超える新物理モデルが必要不可欠である。また、SMは弱い力と電磁気力の統一(電弱力)を果たしたが、電弱力と強い力の統一には至っていない。さらに、重力が取り入れられていないことから、SMは高いエネルギー領域では新物理に切り替わる有効理論として考えるべきである。

この背景から、「新物理の現れるエネルギースケールとその方向性は何か?」という問いが生じるが、ヒッグスポソンの本質を解明することがこの問いに答える鍵となる可能性がある。なぜなら、SMのようにヒッグスポソンの本質を素スカラー場であると考え、質量の量子補正に2次の紫外発散が現れ、SMがプランクスケール等の超高エネルギーまで成り立つという描像が極めて不自然となるからである。すなわち、新物理は最も自然には電弱スケールで現れるべきであり、そこでは2次発散の出ない構造が組み込まれていることが考えられる。また、そのような新物理の枠組みにおいて上記の未解決現象も説明されることが期待される。一方で、様々な既存実験の結果は、オーダー1 TeVまで直接的な新物理の兆候が無いことを示唆している。この事実は、テラスケールに対して1-2桁小さいヒッグスポソンの質量(約125 GeV)の起源に対する謎を新たに想起させる。したがって、軽いヒッグスポソンと未解決現象を統一的に説明するテラスケールの新物理を解明することが極めて重要である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、(A)軽いヒッグスポソンを自然に導くテラスケールの新物理を低エネルギーに現れるヒッグスセクターの構造を明らかにすることによって決定し、(B)その枠組みの中で無矛盾にSMの未解決現象を説明するシナリオを構築することである。

3. 研究の方法

目的(A)では、将来の高輝度LHC実験や、電子・陽電子衝突型加速器実験で、非最小ヒッグスセクターの直接検証と間接検証の両方を用いて、コンポジットヒッグスのシナリオを立体的に検証する方法を明らかにする。直接検証においては、付加的なヒッグスポソンの質量スペクトル、崩壊分岐比、生成断面積を計算し、加速器実験でのシグナル・バックグラウンド解析を行うことで、これらの発見可能性を示す。さらに、強結合セクターに現れる新しいベクトル粒子やフェルミオンに対しても同様の解析を行う。間接探索では、既に発見された125 GeVのヒッグスポソンの結合定数に対する予言を計算し、SMの予言からのずれの大きさやずれ方のパターンを調べる。また、直接探索と間接探索との相乗効果によって上記のシナリオを検証することも考える。

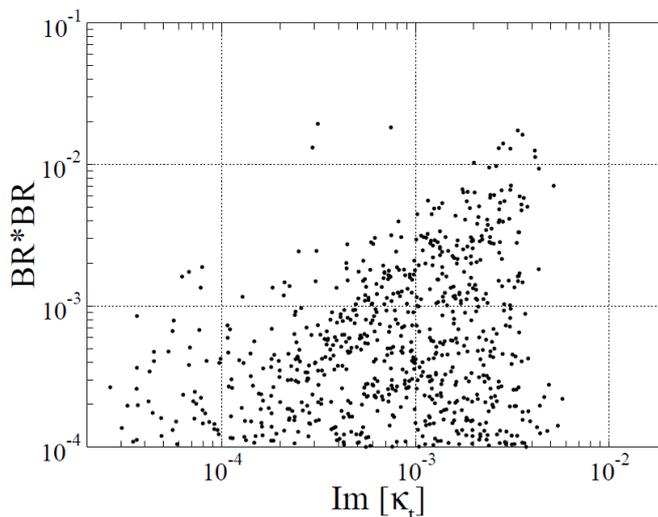
目的(B)ではまず、ニュートリノ振動、暗黒物質、宇宙のバリオン数生成の問題をコンポジットヒッグスの枠内で説明できるモデルの構築が可能かを精査する。有望なモデルの構築が実現した場合、既存の加速器実験及び宇宙観測実験のデータを満たした上で未解決現象の説明が無矛盾に可能であることを明らかにする。また、そのようなシナリオを将来の加速器実験や重力波探索等の宇宙観測実験で検証する可能性を示す。特に後者では、強い一次的相転移に由来する特徴的な重力波スペクトルの検出によってシナリオを検証する可能性を示す。

4 . 研究成果

本研究の主な成果は学術論文 S. De Curtis, S. Moretti, R. Nagai and K. Yagyu, JHEP10 (2021), 040 (以下、論文[1]とする) に掲載されている。以下その概要を述べる。

本論文では、コンポジットヒッグスのシナリオの中でも特に大局的対称性の自発的破れとして $SO(6) \rightarrow SO(4) \times SO(2)$ を考え、擬南部・ゴールドストーンボソン(pNGB)が 8 個現れるシナリオに注目した。これらの pNGB は電弱対称性の下で 2 個のヒッグス 2 重項場として変換するため、低エネルギーの有効理論としてはヒッグス 2 重項場を 2 個含む模型(2HDM)が対応する。コンポジットではないエレメンタリーな 2HDM においては、様々な解析がこれまでになされており、CP を破る位相パラメータが理論に自然に現れることが知られている。今回の研究では、これをコンポジットヒッグスの枠組みで議論し、CP を破るパラメータを強結合セクターに導入することで、低エネルギーで実現される 2HDM において非自明な CP の破れの効果が現れることを示した。エレメンタリーな 2HDM では、湯川結合とヒッグスポテンシャルに現れる CP の破れはそれぞれ独立にとることが一般には可能であるが、コンポジットの枠内ではそれらが強結合セクターのパラメータから予言されるため、それらの間にある程度の相関が得られる。

図は、論文[1]より引用したもので、主要な数値解析の結果の一つである。横軸は 125 GeV ヒッグスボソンのトップ湯川結合の虚部を表し、縦軸は 2 個の付加的な中性ヒッグスボソンが弱ゲージボソン対へ崩壊する際の崩壊分岐比の積の値である。また図中の黒点は、強結合セクターのパラメータをスキャンする中で、発見されたヒッグスボソン質量約 125 GeV、トップクォーク質量約 173 GeV、ヒッグス場の真空期待値約 246 GeV そして電弱精密 パラメータの 1 からのずれの絶対値が 10^{-3} 以下であることを満たした上での予言を表す。CP が保存する極限においては、横軸・縦軸両方とも 0 となるが、上記の通り強結合セクターに CP の破れのパラメータを導入したことにより零でない寄与が得られていることが分かる。また、 $\text{Im}[\kappa_t]$ は湯川結合における CP の破れを表し、 $\text{BR}^* \text{BR}$ はヒッグスポテンシャルにおける破れを描写するため、エレメンタリーな 2HDM では関係のなかった二者の間に明らかな相関が生じていることが分かる。パラメータスキャンの結果、 $\text{Im}[\kappa_t]$ 、 $\text{BR}^* \text{BR}$ はそれぞれ最大 5×10^{-3} 、0.02 程度となることが明らかになった。



5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計13件（うち査読付論文 12件／うち国際共著 7件／うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Hamada Yuta, Kawai Hikaru, Kawana Kiyoharu, Oda Kin-ya, Yagyu Kei	4. 巻 81
2. 論文標題 Minimal scenario of criticality for electroweak scale, neutrino masses, dark matter, and inflation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The European Physical Journal C	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1140/epjc/s10052-021-09735-z	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 Matsui Toshinori, Nomura Takaaki, Yagyu Kei	4. 巻 971
2. 論文標題 Flavor dependent U(1) symmetric Zee model with a vector-like lepton	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nuclear Physics B	6. 最初と最後の頁 115523 ~ 115523
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nuclphysb.2021.115523	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 Chiang Cheng-Wei, Yagyu Kei	4. 巻 103
2. 論文標題 Radiative seesaw mechanism for charged leptons	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.103.L111302	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 De Curtis Stefania, Moretti Stefano, Nagai Ryo, Yagyu Kei	4. 巻 2021
2. 論文標題 CP-Violation in a composite 2-Higgs doublet model	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP10(2021)040	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、Kubota Mitsunori、Yagyu Kei	4. 巻 2021
2. 論文標題 Testing aligned CP-violating Higgs sector at future lepton colliders	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP04(2021)144	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 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 Hamada Yuta、Kawai Hikaru、Oda Kin-ya、Yagyu Kei	4. 巻 2021
2. 論文標題 Dark matter in minimal dimensional transmutation with multicritical-point principle	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP01(2021)087	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 Chen Kai-Feng、Chiang Cheng-Wei、Yagyu Kei	4. 巻 2020
2. 論文標題 An explanation for the muon and electron g-2 anomalies and dark matter	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP09(2020)119	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 Kanemura Shinya、Kubota Mitsunori、Yagyu Kei	4. 巻 2020
2. 論文標題 Aligned CP-violating Higgs sector canceling the electric dipole moment	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP08(2020)026	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 Nomura Takaaki、Yagyu Kei	4. 巻 2019
2. 論文標題 Zee model with flavor dependent global U(1) symmetry	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/jhep10(2019)105	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 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 Kanemura Shinya、Kikuchi Mariko、Mawatari Kentarou、Sakurai Kodai、Yagyu Kei	4. 巻 -
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 2019年
3. 雑誌名 -	6. 最初と最後の頁 -
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 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 Das Arindam, Enomoto Kazuki, Kanemura Shinya, Yagyu Kei	4. 巻 101
2. 論文標題 Radiative generation of neutrino masses in a 3-3-1 type model	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.101.095007	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 -

〔学会発表〕 計20件 (うち招待講演 7件 / うち国際学会 9件)

1. 発表者名 柳生慶
2. 発表標題 Composite 2HDMs and their CPV phenomena
3. 学会等名 LHC Higgs WG3 Subgroup: Extended Higgs Sector (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 長井遼
2. 発表標題 複合2HDMにおけるCPの破れ
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 長井遼
2. 発表標題 複合2HDMにおけるCPの破れ
3. 学会等名 基研研究会 素粒子物理学の進展 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 柳生慶
2. 発表標題 H-COUP: Towards determination of the Higgs sector via radiative corrections and future precision measurements
3. 学会等名 HPNP2021 Special Edition (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 柳生慶
2. 発表標題 Neutrino Physics and Beyond the SM
3. 学会等名 Exchange program between Osaka U. and Shanghai Jiao Tong U. (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 柳生慶
2. 発表標題 LHC/ILC Synergy for Exploring Extended Higgs Sectors
3. 学会等名 High Energy Frontier in Particle Physics: LHC and Future Collider (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 柳生慶
2. 発表標題 LHC/ILC Synergy for Exploring Extended Higgs Sectors
3. 学会等名 Snowmass Energy Frontier (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 柳生慶
2. 発表標題 Dark Sector as Origin of Lepton Mass Hierarchy
3. 学会等名 日本物理学第76回会年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 柳生慶
2. 発表標題 LHCにおける付加的スカラー粒子の直接探索とILCでのヒッグス粒子の精密測定の相乗効果
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 柳生慶
2. 発表標題 H-COUP Ver. 2 -Full NLO corrections of Higgs boson decays-
3. 学会等名 28th Regular Meeting of New Higgs Working Group
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yagyu Kei
2. 発表標題 Testing Composite Higgs Models at the Higgs Factory
3. 学会等名 International Workshop on Future Linear Colliders (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yagyu Kei
2. 発表標題 A 2HDM from 331 Gauge Theories
3. 学会等名 1st Mediterranean Conference on Higgs Physics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yagyu Kei
2. 発表標題 Zee Model with a Flavor Dependent Global U(1) Symmetry
3. 学会等名 7th RISE Collaboration Workshop: Non Minimal Higgs (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yagyu Kei
2. 発表標題 Strong dynamics as an origin of the light Higgs boson and BSM phenomena
3. 学会等名 Theory seminar at Osaka University (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yagyu Kei
2. 発表標題 SUSY VS Compositeness 2HDMs tell a story
3. 学会等名 Theory seminar at National Taiwan University (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yagyu Kei
2. 発表標題 輻射シーソー機構を伴う3-3-1ゲージ理論
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yagyu Kei
2. 発表標題 331模型の有効理論と加速器実験による検証
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yagyu Kei
2. 発表標題 Review of Higgs Physics
3. 学会等名 ILC夏の合宿(招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yagyu Kei
2. 発表標題 Zee Model with Flavor Dependent Global U(1) Symmetry
3. 学会等名 素粒子物理学の進展
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yagyu Kei
2. 発表標題 Higgs Phenomenology: An introduction to beginning grad students
3. 学会等名 関西地域セミナー（招待講演）
4. 発表年 2019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