

令和 3 年 6 月 14 日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2015～2020

課題番号：15K05066

研究課題名（和文）ヒッグスと重いクォークセクターから探るTeV領域を超える素粒子物理

研究課題名（英文）Exploring elementary particle physics beyond the TeV scale through Higgs and heavy quark sectors

研究代表者

岡田 安弘（Okada, Yasuhiro）

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・その他部局等・理事

研究者番号：20212334

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：素粒子標準模型を超える未知の素粒子模型を探るために、TeV領域の有効相互作用を用いた理論的枠組みを構築した。特に、トップクォークの重いパートナー粒子が2つ含まれる場合について、様々な実験に起因する制約を満たしたうえで、LHC実験における新粒子の生成や崩壊過程をについて理論的に解析し、探索可能性を議論した。また、同様な有効相互作用の考え方をヒッグス粒子の精密測定に用い、将来のILC実験の科学的意義づけの検討に寄与した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

素粒子標準模型を超える素粒子模型を探ることは、現代の素粒子物理学で最も重要な課題である。LHC実験や将来のILC実験などのエネルギーフロンティア実験により、ヒッグスセクターや重いクォークセクターを通じて、素粒子の世界の自然法則と宇宙初期の謎を解明を目指すことは、最も基本的なアプローチと言える。この研究成果は、その有効性を示す例として、学術的意義がある。

研究成果の概要（英文）：In order to search for unknown particle models beyond the Standard Model, a theoretical framework using effective interactions in the TeV energy scale region is developed. In particular, we theoretically analyze the production and decay processes of new particles in the LHC experiment and discuss the feasibility of the search for the case with two heavy partners of the top quark, satisfying the constraints arising from various existing experiments. The same concept of effective interaction is applied to the precise measurement of the Higgs boson, which contributes to clarifying the scientific implications of the future ILC experiment.

研究分野：素粒子理論

キーワード：素粒子物理学 ヒッグス粒子 クォーク TeV領域 標準模型を超える物理

1. 研究開始当初の背景

研究開始当初は、2012年夏のLHC実験によるヒッグス粒子の発見により、素粒子物理学が新しい段階に入ったと広く認識されるようになっていた。20世紀を通じて素粒子物理学は三つの基本的な力(強い力、弱い力、電磁力)をどのように理解するかということを中心に発展してきた。ヒッグス粒子の発見は、三つの力はゲージ理論という統一的原理のもとに理解されるという素粒子標準模型の枠組みが正しいことを明らかにした。しかし、電弱対称性を破り、ヒッグス粒子を生み出す背後にある物理は未知の領域であり、それを解明することがこれからの素粒子物理学の重要課題である。電弱対称性の破れの背後の物理としては、複合ヒッグス模型、超対称模型等様々なさまざまな、新しい力や対称性の導入が考えられている。どのシナリオが正しいかということ、TeVからプランクスケールの素粒子物理の大きな方向付けを決めることになり、素粒子と宇宙のさまざまな基本課題(ニュートリノ質量生成機構、暗黒物質の正体、宇宙のバリオン数生成など)の解決にも深く関係している。MeV領域からTeV領域の解明が20世紀の素粒子物理であったとしたら、TeV領域からプランクスケール領域の解明が21世紀的な課題であり、そのために、理論研究、実験研究、将来実験の立案を強力に進めるべきであると認識が研究者コミュニティに共有されていた。その認識は現在でも変わっていない。

2. 研究の目的

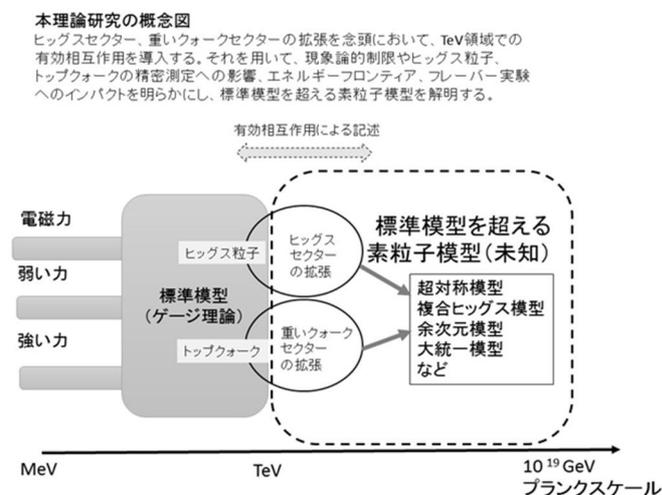
LHC実験によるヒッグス粒子の発見により、素粒子物理学は新たな段階に入った。つまり、これまでの三つの基本的な力をゲージ理論により理解することにより標準模型の枠組みを確立する段階から、TeVからプランクスケールを支配する新たな素粒子模型や原理を解明することへ中心的課題が移ったといえる。ヒッグス粒子やトップクォークは、ボトムアップアプローチによりこの課題を解決するための最大の手がかりとなる。この研究の目的は、ヒッグスセクターや重いクォークに関する物理がこの課題の解決にいかに関与しているかを理論的な研究により明らかにし、さらに将来の高エネルギー物理学実験の物理的な意義づけに役立てることである。

この問題に対する有効なアプローチとして、ヒッグスセクターと重いクォークのセクターを調べることがあげられる。標準模型の枠組みでは、素粒子の質量は結合の強さに支配される。今までに発見された素粒子で重いほうから二つの、トップクォークとヒッグス粒子に関する結合は、標準模型に現れる他の結合に比べて強い。TeVスケールより上のエネルギー領域のダイナミクスで、重要な位置を占めると考えられる。ここで、ヒッグスセクターや重いクォークセクターで表すものは、必ずしも、標準模型の1ヒッグスダブレット模型やトップクォークのみを考えるわけではない。むしろ、さまざまな模型では、ヒッグスセクターや重いクォークセクターの拡張が必要とされる場合が多い。たとえば、軽いヒッグスダブレット場をダイナミカルに生成するリトルヒッグス模型では、トップクォークに対して重いパートナー粒子を導入しなければならない。超対称模型では、ヒッグスセクターは最小でも2ヒッグスダブレット模型になり、また、スカラートップ粒子の導入はある意味では、トップセクターの拡張ととらえることができる。このような視点に立つと、現在発見されているトップクォークやヒッグス粒子は、重いクォークセクターやヒッグスセクターの全体の中の氷山の一角ととらえることができる。つまり、これらの粒子を調べることを手掛かりにして、ヒッグスセクターや重いクォークセクターの構造を解明し、それを突破口にして、ボトムアップのアプローチから、TeV領域からプランクスケール領域に広がる素粒子物理の全貌に迫るといった戦略が有望である。

この研究では、具体的な理論模型に依らない有効相互作用を用いて、ヒッグス、重いクォークセクターを拡張した模型を解析する統一な枠組みを構築する。それを用い、様々な現象論的な制限を取り入れたうえで、LHC実験における新物理の発見可能性を明らかにする。さらに、ILC実験などの将来のエネルギーフロンティア実験計画の物理的な意義の明確化に役立てる。

3. 研究の方法

(1)ヒッグスおよび重いクォークセクターの拡張を含む様々な素粒子模型を念頭に置いて、それらを総合的に記述するためのTeV領域の有効相互作用を用いた理論的な枠組みを構成する。ついで、LHC実験の進展を取り入れて、これらの有効相互作用がどのように現象論的に制限されるか、ヒッグス粒子やトップクォークの精密測定、さらにはエネルギーフロンティア実験やフレーバー物理の実験でどのように決められるかを明らかにし、TeV領域からプランクスケールを支配



する正しい素粒子模型を決める方法を構築する。

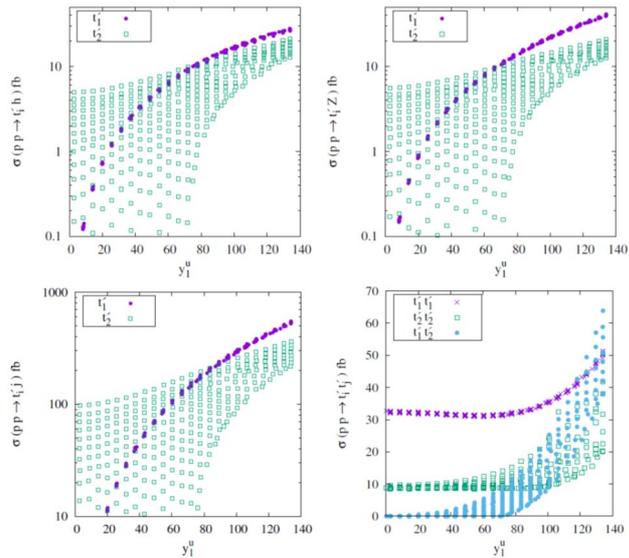
(2)有効相互作用の手法を用いて、将来のエネルギーフロンティア実験、特に ILC 実験について、ヒッグス粒子の精密測定などにより新しい物理の探索の可能性を評価する。この研究により、理論家と実験家の協力により国際的にすすめられている ILC 計画の物理的意義をより明確にするに検討作業に貢献する。

4. 研究成果

(1)重いトップクォークのパートナー粒子が2つ含まれるように素粒子標準模型を拡張した模型を有効相互作用の形で定式化し、様々な現象論的制限を考慮に入れたうえで LHC 実験における新粒子の探索可能性を理論的に調べた。この研究は、Lyon 第一大学、デリー大学などの共同研究者のチームとそれまで数年来実施している一連の研究プロジェクトの継続として実施した。それまでは、重いトップクォークのパートナー粒子を1つ含む模型について解析を行っていたが、ここでは2つ含む場合に拡張した。リトルヒッグス模型や複合ヒッグス模型な具体的な理論模型では、重いクォークのパートナー粒子が複数、様々なゲージ群の表現で現れてくる。この研究では、いろいろな理論模型を念頭におきつつ、クォークセクターの拡張に注目して、余分なベクターライククォークを導入した有効相互作用の立場から、標準模型の拡張を定式化して、解析した。

第一論文では、標準模型のゲージ群の表現によって可能な場合を分類し、それぞれの場合の現象論的解析を行った。それまでの LHC 実験の解析では、重いトップクォークパートナーは軽い世代のクォークと混合しない単純化された仮定を置いていたが、アップ、チャームクォークとの混合を考慮することによって、電弱精密測定や低エネルギーの実験からの現象論的制限が変わってくるので、その点に留意した解析結果を示した¹。第二論文では、現象論的に特に興味深い、ベクターライククォーク2重項を2つ導入した場合について、LHC 実験における新粒子の生成過程と崩壊モードを詳しく調べ、LHC 実験の発見の可能性について解析した。二つの重いトップクォークパートナーの単独生成や電弱相互作用による対生成などのこれまで LHC 現象論で注目されていなかった特徴を指摘した²。これらの研究成果は、今後の LHC 実験の物理解析に役立つことができる。

(2)ヒッグス粒子と重いクォークの物理は、将来の ILC 実験でも重要なテーマである。国際的な高エネルギー物理学研究者コミュニティでは、ILC でのヒッグス結合の有効場理論の枠組みを使った解析シミュレーションにより、標準模型からのずれのパターンから TeV 領域を超える素粒子物理模型を選別する手法を確立する研究が、理論家を実験家の協力によって進められたが、本研究もその推進に寄与した。この結果は、ILC 計画の重心系エネルギー250 GeV のヒッグスファクトリーとして科学的な意義づけを明確にし、ILC 計画を 250GeV から開始すべきというご国際的合意の形成に役立った。



トップパートナーの 13TeV LHC における生成断面積 2 参照

< 引用文献 >

¹ G.Cacciapaglia, A.Deandrea, N.Gaur, D.Harada, Y.Okada and L.Panizzi, “Interplay of vector-like top partner multiplets in a realistic mixing set-up” JHEP 9, 2015.

² Cacciapaglia Giacomo, Deandrea Aldo, Gaur Naveen, Harada Daisuke, Okada Yasuhiro, Panizzi Luca, “The LHC potential of vector-like quark doublets” JHEP 11, 2018.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 6件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Cacciapaglia Giacomo, Deandrea Aldo, Gaur Naveen, Harada Daisuke, Okada Yasuhiro, Panizzi Luca	4. 巻 2018
2. 論文標題 The LHC potential of vector-like quark doublets	5. 発行年 2018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/JHEP11(2018)055	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 Barklow Tim, Fujii Keisuke, Jung Sunghoon, Karl Robert, List Jenny, Ogawa Tomohisa, Peskin Michael E., Tian Junping	4. 巻 97
2. 論文標題 Improved formalism for precision Higgs coupling fits	5. 発行年 2018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.97.053003	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 Barklow Tim, Fujii Keisuke, Jung Sunghoon, Peskin Michael E., Tian Junping	4. 巻 97
2. 論文標題 Model-independent determination of the triple Higgs coupling at e+e- colliders	5. 発行年 2018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.97.053004	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 K.Fujii, J. Tian, and H.Yokoya	4. 巻 94
2. 論文標題 Diphoton resonance at the ILC	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Phys. Rev. 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.94.095015	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 J.Yan, S.Watanuki, K.Fujii, A.Ishikawa, D.Jeans, J.Strube, J.Tian and H.Yamamoto	4. 巻 94
2. 論文標題 Measurement of the Higgs boson mass and $e^+e^- \rightarrow ZH$ cross section using $Z \rightarrow \mu^+\mu^-$ and $Z \rightarrow e^+e^-$ at the ILC	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Phys. Rev. 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.94.113002	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 G.Cacciapaglia, A.Deandrea, N.Gaur, D.Harada, Y.Okada and L.Panizzi	4. 巻 9
2. 論文標題 Interplay of vector-like top partner multiplets in a realistic mixing set-up	5. 発行年 2015年
3. 雑誌名 JHEP	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(2015)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 該当する

[学会発表] 計16件 (うち招待講演 15件 / うち国際学会 12件)

1. 発表者名 Yasuhiro Okada
2. 発表標題 Prospect of Accelerator-based Nuclear and High Energy Physics Programs in Asia
3. 学会等名 APS April Meeting 2020 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yasuhiro Okada
2. 発表標題 Future of High Energy Physics in Japan
3. 学会等名 The 40th Anniversary Symposium of the US-Japan S&T Cooperation Program in High Energy Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yasuhiro Okada
2. 発表標題 Status of ILC
3. 学会等名 2019 Joint Workshop of FKPPL and TYL/FJPPL (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yasuhiro Okada
2. 発表標題 Theory Overview
3. 学会等名 The 3rd International Conference on Charged Lepton Flavor Violation (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岡田安弘
2. 発表標題 エネルギーフロンティア加速器将来計画についてーILCとFCCを中心にしてー
3. 学会等名 第16回加速器学会年会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yasuhiro Okada
2. 発表標題 Status of ILC
3. 学会等名 Workshop on High Energy Physics Phenomenology XVI (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yasuhiro Okada
2. 発表標題 Status in Japan
3. 学会等名 Asian Linear Collider Workshop 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yasuhiro Okada
2. 発表標題 ILC Project (Status and Prospect)
3. 学会等名 The 4th International Workshop on "Higgs as a Probe of New Physics 2019" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岡田安弘
2. 発表標題 ILCプロジェクト
3. 学会等名 京都大学基礎物理学研究所研究会 素粒子物理学の進展 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 岡田安弘
2. 発表標題 趣旨説明 国際リニアコライダー計画の実現へ向けて - 250 GeV ILCの物理と展望 -
3. 学会等名 日本物理学会 2017 秋季大会 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 岡田安弘
2. 発表標題 趣旨説明 Belle II 実験の拓く新物理 ~B2TiP book 完成と展望~
3. 学会等名 日本物理学会第73回年次大会(2018年)(招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yasuhiro Okada
2. 発表標題 ILC Decision Timeline in Japan (KEK/JAHEP) and Asian LC overview
3. 学会等名 2017 International Workshop on Future Linear Colliders (招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yasuhiro Okada
2. 発表標題 Status and prospect of KEK
3. 学会等名 AFAD 2018 (招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yasuhiro Okada
2. 発表標題 Beyond the Standard Model
3. 学会等名 BEAUTY 2016 (招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Yasuhiro Okada
2. 発表標題 Composite models and thier phenomenology at the LHC
3. 学会等名 2016 joint workhop of FKPL and TYL/FJPL (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Yasuhiro Okada
2. 発表標題 Physics of ILC project and its status
3. 学会等名 2015 joint workshop of TYL/FJPL and FKPL (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2015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
連携研究者	藤井 恵介 (Fuji Keisuke) (30181308)	大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・教授 (82118)	

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			
フランス	リヨン第一大学			
インド	デリー大学			
スウェーデン	ウプサラ大学			

共同研究相手国	相手方研究機関			
イタリア	ピサ大学			
中国	浙江大学			
イギリス	サザンプトン大学			