

令和 5 年 6 月 27 日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2022

課題番号：18K03685

研究課題名(和文) 新しい物理素過程を利用した荷電レプトンフレーバーの破れの探索

研究課題名(英文) Search for lepton-flavor violation using new physics topology

研究代表者

津野 総司 (Tsunno, Soshi)

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・研究機関講師

研究者番号：30451834

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,600,000円

研究成果の概要(和文)：素粒子標準理論に於いて、素粒子の一つであるレプトン種(フレーバー)の混合は、強く抑制される。一方、レプトンの一種であるニュートリノは、振動効果を経由して、フレーバーが混合していることが観測されている。これは、広く、フレーバーの謎として認識されている。本研究は、この現象を説明するために、ヒッグス粒子にフレーバー混合を許す相互作用を導入し、高次の量子効果によって、レプトン・フレーバーを破る物理素過程を新たに提唱した。また、この理論計算を可能にする数値計算プログラムを開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現在の素粒子標準理論に於いて、フレーバー混合が強く抑制されるのは、場の理論に於けるユニタリー条件からの要請であり、理論の根幹を為す部分である。唯一、ヒッグス粒子のみが、このユニタリー条件から解放される可能性があるため、その検証は、学術的意義に極めて重要である。素粒子標準理論では、ヒッグス粒子は、粒子種を区別することができる唯一の粒子であるため、ヒッグス粒子を理解することは、なぜ、我々の宇宙がこれほど多様性に満ちているのかを探る手掛かりとなる。

研究成果の概要(英文)：In the Standard Model of the particle physics, the lepton-flavor violation is strongly suppressed, while the recent experimental results from the neutrino oscillation experiment suggests the flavor-violation is possible as the sizeable order. This is known as a puzzle of the flavor physics. This study propose the new physics process with the lepton-flavor violation through the interaction with the Higgs boson. Such lepton-flavor violating process is only possible at the higher order perturbative effect. The theoretical calculation program has been developed.

研究分野：素粒子加速器実験

キーワード：ヒッグス粒子 ニュートリノ振動 レプトンフレーバーの破れ LHC実験

1. 研究開始当初の背景

2012年のヒッグス粒子の発見によって、素粒子標準模型に於ける素粒子群はすべて発見され、一応、標準模型の完成を見た。また、発見以降、精力的にその粒子の精密測定が行われ、目下のところ、発見されたヒッグス粒子は、素粒子標準模型から予測されるヒッグス粒子と良く一致することが報告されている。しかし、一方で、素粒子標準模型では説明できない現象も観測されている。例えば、ニュートリノ振動に見られるように、中性レプトン・セクターに於いては、そのフレーバーが保存しないことが観測されている。これは素粒子標準模型にはない現象で、ニュートリノ・フレーバーの謎として知られている。

この2つの事実を両立させる理論模型候補の一つが、ヒッグス・セクターに最小限の拡張を施したヒッグス・ダブルレット模型(Two Higgs Doublet Model, THDM)を内包する理論体系である。例えば、超対称性理論がそれに該当する。THDMは、複数(5つ)のヒッグス粒子を予言するが、各々のヒッグス粒子は、レプトン・フレーバーを僅かに破る相互作用を考える。その僅かな相互作用の大きさのために、現在の観測結果からのレプトン・フレーバー非保存の制限結果とは矛盾せず、かつ、ヒッグス粒子の直接崩壊では、観測できない。そのため、現在観測されている標準模型ヒッグス粒子の性質と整合性も取れる。素粒子標準模型に於いて、電弱相互作用はすべてユニタリー条件が、場の理論により要請され、粒子フレーバーの非保存は、強く制限される(GIM機構)。一方、ヒッグス粒子との相互作用は、粒子の質量と関係、つまり粒子のフレーバーに依存した相互作用となるため、ユニタリー条件を満たさない。したがって、ヒッグス粒子を介した物理素過程の探索が、粒子フレーバーの保存則を検証する機会を与える。

研究開始当初は、ヒッグス粒子がフレーバーを保存しない崩壊モードへ探索は行われていた。その相互作用の強さに実験的な制限が付けられている。しかし、前述の標準模型の性質に近いヒッグス粒子は、理論的にもその相互作用が、極度に小さいと予測されているため、研究代表者は、直接崩壊モードではない、新たな物理素過程を提唱したことが、本研究の背景である。

2. 研究の目的

本研究で提唱した新規の物理素過程は、未だ誰も探索したことのない現象で、欧州原子核研究機構 CERN にある大型陽子・陽子衝突型加速器 LHC を使って、理論研究の構築とともに、実験データの解析を行うことを目的とする。

新規の物理素過程とは、高次の量子効果の中に、レプトン・フレーバーを破る相互作用が介在するとき、最低次のオーダーでは、その物理素過程は存在しないが、高次のオーダーでのみ存在する物理素過程である。例えば、ヒッグス粒子は、質量のないグルーオンとは直接相互作用することができないが、高次のフェルミオンのループ効果を通して、反応する効果と同様である。高次の量子効果に、レプトン・フレーバーを破る荷電ヒッグス粒子が介在すると、量子効果の中で、ニュートリノ・フレーバーの混合を経由し、終状態に異種フレーバーのレプトンが現れる。相互作用の強度は、 $\tan\beta$ で規定され、まだ、この $\tan\beta$ に対する実験的な制約は緩い。また、新粒子の寄与が量子効果の中にあるので、その新粒子の広い質量領域に渡って探索が行えることが利点である。簡易シミュレーションによる結果によると、現在の実験的な制限を大きく更新できることが分かった。

理論研究の構築とは、ヒッグス粒子がレプトン・フレーバーを破る相互作用を導入し、高次の量子補正を含めた理論計算を実行することである。これは既存の数値計算プログラムではできないため、新たにプログラムを開発することである。1ループ量子補正に係るすべてのファインマン・ダイアグラム(総数約 20,000)、及びその干渉効果を系統的に計算する手法を開発する。

一方、実験データの解析では、LHC 加速器の衝突点の一つに設置されている ATLAS 実験グループと協力してデータ解析を進め、我々の提唱した理論モデルと実験データと突き合わせて検証することを目的とする。

3. 研究の方法

理論研究の構築では、すでに存在する数値計算プログラム・GRACE システムを当該物理素過程の高次の量子計算へ拡張していく方向で開発を進めた。GRACE システムは既に1次の高次補正効果(NLO)を計算することが可能であるが、当該物理素過程は、2次の1ループ量子補正(NNLO)を計算する必要がある。我々は、今まで採用されてきた手法とは異なり、全ての高次の相互作用項に、対応する量子補正項の係数、及び、テンソル行列を掛ける手法を開発した。利点は、物理理論計算の計算過程が見易くなることである。すべての2次のループ量子補正の相互作用に対応した参照関数を構築して、入力変数に対して、行列計算に係る添え字に対応した係数を出力することができるライブラリを開発した。これらの係数を最低次の相互作用項に適用すれば、それぞれ、2次の量子補正の入ったファインマン・ダイアグラムの計算を構築することができる。これをすべてのダイアグラムに適用し、約 20,000 個のダイアグラムの2乗和から LHC 実験に於ける陽子・陽子衝突からの生成散乱振幅断面積を計算する。我々の理論モデルの様々な入力パラメー

タに対して、計算を行い、これらが、実験で予測される観測量となる。

実験データの解析では、ATLAS 実験グループに所属し、我々の理論を解析する研究チームを立ち上げた。LHC・ATLAS 実験では、2018 年末の時点で、すでに 150fb⁻¹ のデータを蓄積しており、このデータセットを用いて解析を行う。まず、我々の理論計算から予測される信号を実際の検出器シミュレーションを通して、どういった信号事象となるか、検討しなければならない。また、物理データ解析のみならず、実際に検出器からの信号を正しく補正を施す必要もあり、グループと協働して取り組まなければならない。したがって、我々の理論モデルの実験グループへの実装、及び、解析プログラムを開発し、グループ内で議論を重ね、最終的に実験グループとして、結果を論文として公表する。

4. 研究成果

理論研究に対しては、学術論文として掲載された。ここでは、新規の物理素過程の提唱、及び、新しい計算手法を紹介し、簡易シミュレーションによる期待される結果を示している。また、将来計画に於ける実験に於いても、当該物理素過程の研究の重要性を示した。

実験データ解析に於いては、依然、実験グループ内で議論を進めている。コロナ禍のため、実働していた博士課程学生がいなくなってしまう事が、大きく遅延している原因である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 4件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Tsunno S., on behalf of the ATLAS and CMS Collaborations	4. 巻 28
2. 論文標題 Search for Beyond SM Higgs Bosons	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 World Scientific	6. 最初と最後の頁 23 ~ 36
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1142/9789811207402_0002	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 Aad G. et.al. ATLAS Collaboration	4. 巻 805
2. 論文標題 Test of CP invariance in vector-boson fusion production of the Higgs boson in the H channel in proton-proton collisions at $\sqrt{s}=13\text{TeV}$ with the ATLAS detector	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 135426 ~ 135426
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2020.135426	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 ATLAS Collaboration	4. 巻 99
2. 論文標題 Cross-section measurements of the Higgs boson decaying into a pair of τ -leptons in proton-proton collisions at $\sqrt{s}=13\text{TeV}$ with the ATLAS detector	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 72001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.99.072001	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 Asai K., Fujimoto J., Kaneta K., Kurihara Y., Tsuno S.	4. 巻 106
2. 論文標題 Measuring lepton flavor violation at the LHC	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 75014
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.106.075014	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8件（うち招待講演 3件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 和田 牙
2. 発表標題 LHC-ATLAS実験における荷電レプトンフレーバーを破るウィークボソン散乱過程の多変量解析を用いた探索感度評価
3. 学会等名 日本物理学会 2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 浅井 香奈江
2. 発表標題 LHC-ATLAS実験における荷電レプトンフレーバーを破るウィークボソン散乱過程探索の背景事象推定
3. 学会等名 日本物理学会 第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Soshi Tsuno
2. 発表標題 Operational Experience and Performance with the ATLAS Pixel detector at the Large Hadron Collider at CERN
3. 学会等名 40th International Conference on High Energy Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 浅井 香奈江
2. 発表標題 LHC-ATLAS実験における荷電レプトンフレーバーを破るウィークボソン散乱過程の探索感度の最適化
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 浅井香奈江
2. 発表標題 LHC-ATLAS実験における荷電レプトンフレーバーを破るウィークボソン散乱過程の探索感度の評価と改善に向けて
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 津野総司
2. 発表標題 Combined Higgs boson measurements at the ATLAS experiment
3. 学会等名 XXVII International Workshop on Deep Inelastic Scattering and Related Subjects (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 津野総司
2. 発表標題 LHC-ATLAS実験Run2におけるPixel検出器のパフォーマンスに関する総括
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 津野総司
2. 発表標題 Recent Higgs boson results from ATLAS
3. 学会等名 XI International Conference on New Frontiers in Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022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
---------	---------