

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 7 日現在

機関番号：13601

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2023

課題番号：20K14485

研究課題名（和文）トップクォークの超精密測定を用いた標準模型の解明と新物理探索

研究課題名（英文）Revealing the standard model and searches for new physics beyond the standard model via precision top quark measurements

研究代表者

川出 健太郎（Kawade, Kentaro）

信州大学・学術研究院理学系・助教

研究者番号：90749243

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）：本研究計画では、標準模型で最も重い素粒子であるトップクォークに着目し、その性質を高精度で測ることで標準理論の精密検証と新物理による逸脱の探索を目的としている。本研究では、大きな誤差要因となっている系統誤差をパラメータとするベイズ統計に基づくフィッティング手法の適用による大幅な誤差改善を実現し、初めて有意なトップクォーク荷電非対称度の証拠を見つけた。また機械学習やAIを駆使した、解析手法の改善にも取り組み、運動学再構成手法やフレーバータグ手法の開発を行い、既存の手法からの一定の改善を明らかにした。今後の精密測定にも応用可能であり、発展が期待できる成果を達成できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

トップクォークの有限の荷電非対称度は標準理論でも予言されているが、その値は0に近く超高精度な測定が要求される。この精度での測定手法が達成されたのは初めてであり、その手法を広く応用していくことで標準理論に隠れた新物理の僅かな兆候を探す手段が確率されたことにもなりうる。これは15年に渡る様々な新物理探索にもかかわらず未だ発見されない新物理探索の状況を変える可能性もある。

研究成果の概要（英文）：In this research project, we focus on the top quark which is the heaviest elementary particle in the Standard Model, with the aim of performing precise measurements of its properties to test the Standard Model and search for deviations due to the presence of new physics. During this research, we achieved significant systematic error reduction by applying a Fully Bayesian Unfolding method that treats systematic errors as nuisance parameters. As a result, we succeeded in finding the first evidence of top quark charge asymmetry. Additionally, we worked on improving analysis methods using machine learning and AI, developing kinematic reconstruction techniques and flavor tagging methods, and demonstrating certain improvements over existing methods. These achievements can be applied to future precision measurements and show promising potential for further development.

研究分野：素粒子実験

キーワード：トップクォーク

1. 研究開始当初の背景

欧州原子核研究機構に建設された大型陽子加速器(LHC)では、テラ電子ボルトのエネルギーまで加速した陽子を互いに衝突させることで、宇宙誕生直後の高温状態を再現し、素粒子の本質に迫る研究を行っている。2012年にはLHCでの実験によってヒッグス粒子の存在が実証され、素粒子の標準理論における全ての素粒子の発見を達成した。ところが標準理論は完璧ではなく、「なぜ宇宙には3世代の素粒子が存在するか」、「階層性の問題」など根本的な問題を説明できない。したがってLHC実験では、それらを解決しうる新物理の発見を目指している。

本研究計画が始まった2020年度は、LHC Run2で測定した 140 fb^{-1} の大統計データを用いたデータ解析が本格化に行われていた時期であり、かつ2022年に始まるLHC Run3に向けた感度向上のための研究も平行して行う必要がある時期でもあった。標準理論の中でも最も重いトップクォークの測定はLHCの重要な物理テーマの一つだが、しかし一部の測定では系統誤差が支配的になり、大統計を完全に活かした精密測定が十分にできていない状況にある。本研究計画は、トップクォーク対の荷電非対称度測定や、質量測定などの精密化を目指すことで同時に新物理の寄与を探索するものであった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、本研究では、トップクォークの性質として、

- ① トップクォーク対のスピン相関
- ② トップクォーク対の荷電非対称度
- ③ トップクォーク質量などその性質

を測定することで標準理論の精密な検証と新物理のわずかな寄与の探索を同時に行う。

これらのトップクォークの性質を精密に測ることで、間接的に新物理の兆候を探ることが可能である。これは直接探索では見えないわずかなずれも発見可能であり、独自性のある研究といえる。特に、2020年頃までの新物理の未発見であった状況を考えると、既存の手法とは独立な方法での探索は有効であった(2024年現在も未発見である)。

特に本研究では、系統誤差の大幅に削減を達成し、荷電非対称度などのわずかに0からずれる値を測定し、標準理論の検証と新物理の寄与を探索するものである。また、より効率的にトップクォーク事象を同定する方法を解析することで将来のデータ解析に展開可能な手法を開発することも目的に含んでいる。

3. 研究の方法

本研究では、以下の3点を重点的に研究し、実験感度を向上させようと試みた。

- ・系統誤差をパラメータとする最尤法フィットを導入し、系統誤差を低く抑える

系統誤差をフリーパラメータとして実験データに対してシミュレーションの値をフィッティングすることにより、各系統誤差に制限を与えて、全体的な系統誤差を抑える手法が用いられている。同様の手法を更に発展した方法(Fully Bayesian Unfolding)を適用し、系統誤差の削減と検出器の分解能の効果補正を同時に行う手法による感度を明らかにした。

- ・トップクォーク対と光子もしくはZボソンの随伴生成事象など稀モードの解析

始状態に光子やZボソンが随伴生成する過程は、通常のトップクォーク対とは異なるプロセスで生成されるため、スピン相関がより強調されうる。しかし、現状では理論的な不定性があまりに大きく、測定感度を十分に高めることが難しいことが明らかになった。Run-3のデータを活かして実際に随伴生成事象でのスピン相関、荷電非対称度を調べるため、稀モードを効率的に解析するための選別方法などを研究した。

- ・トップクォークの力学再構成の改善

感度としては非常に優れるダイレプトン終状態は、ニュートリノを複数含むため、一般に力学変数の再構成が難しい。さらに光子やZボソンの随伴生成を要求した場合、非常に複雑な系を解析することになるので再構成の精度は落ちる。本研究では機械学習を用いた力学再構成手法を開発した。これらの手法は、高度な問題に適用できるメリットがある反面で計算時間が長いデメリットがある。

4. 研究成果

本研究計画では、ベイズ統計に基づく Fully Bayesian Unfolding を用いることで系統誤差を大きく削減し、初めて有意なトップクォーク対の荷電非対称度の測定に成功した (JHEP08(2023)077)。最終的に得た結果では、荷電非対称度 0.0068 ± 0.0015 と測定され、0 から 4.7 の有意差で非対称度の証拠を見つけた。また、微分非対称度や荷電レプトン対の非対称度の測定も同時に行うことで、標準理論の正しさを検証し、有意な新物理の超過は見つからなかった。しかし、まだ統計的に有意ではない領域も残されており、Run-3 データを用いた追測定が期待される。

また、機械学習や AI を用いたトップクォーク対識別や運動学再構成手法を確立した。特に CNN を用いた運動学変数の回帰分析手法では、従来手法を大きく上回る効率で遜色ない結果を得ることを明らかにした。また、グラフニューラルネットワークを用いた事象弁別方法を研究し、効率よく背景事象を削減する方法を開発した。しかし、GPU などの性能の制限により随伴生成には適用できてはならず、より強力な GPU などのコンピューターリソースの導入が必要である。

トップクォークを含む事象には必ず重いフレーバーのジェットが存在するため、稀事象を効率よく背景事象から弁別するために、トランスフォーマーを用いたフレーバー同定手法の開発を試みた。最先端のアルゴリズムと遜色ない結果を得るにとどまったが、物理感度の向上が、見込めることを明らかにした。こちらにより多くのトレーニングデータを処理できるコンピューターリソースがあれば更に性能を向上できることを明らかにした。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 The ATLAS collaboration	4. 巻 2023
2. 論文標題 Evidence for the charge asymmetry in pp ttbar production at s = 13 TeV with the ATLAS detector	5. 発行年 2023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(2023)077	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1件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 鈴木雄飛, 川出健太郎, 長谷川庸司
2. 発表標題 LHC-ATLAS実験におけるParticleNetを用いたフレーバータギングの性能評価
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2023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
---------	---------