

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 9 月 13 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2023

課題番号：20K14489

研究課題名（和文）新たな解析モードを用いたヒッグス粒子とcクォークの結合定数の検証

研究課題名（英文）Test for the coupling of Higgs and c-quark by a new analysis mode

研究代表者

廣瀬 稯 (Hirose, Minoru)

大阪大学・大学院理学研究科・助教

研究者番号：30816880

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）：LHC加速器の第3期運転にともなう陽子-陽子衝突データ収集のためのATLAS実験シリコンマイクロストリップ検出器（SCT）運転を行った。開発した安定運転のための性能監視システムは有効に動作し、質の高いデータを取得できた。同時並行でヒッグス粒子とcクォークの湯川結合定数の検証に向けて実験データを解析し論文を出版した。機械学習を用いた背景事象の推定法を新たに導入した解析手法を確立し、より感度の高い探索を行うための準備を進めた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

当研究課題で進めた、検出器の性能を最大化する性能監視システムは、大規模実験内の検出器サブシステムグループの垣根を超えたあらゆる情報をデータベース化するという新たな発想で開発したものである。これは、将来の実験においても同様の技術を用いて検出器の運転を効率化し、性能を最大化する基礎となる重要な成果となった。

また、物理解析に新たに導入した機械学習を用いる背景事象の推定法は、これまでの研究では系統誤差が大きく実用化できなかった困難を解決した末に導入できた。こちらも、ヒッグス粒子の物理だけでなく、より大統計化する今後のあらゆる物理解析において必須となる技術の基礎を固めたという点で重要な成果となった。

研究成果の概要（英文）：We have worked on the operation of the ATLAS SCT detector for the LHC Run-3. We developed a performance monitoring system of the SCT with a completely new concept for the stable and good quality data taking. It worked well and contributed for the stable operation. We have also worked on the analysis of the search for Higgs to a charm-quark pair events for the test of the Higgs to charm-quark Yukawa couplings. We have published some papers relating to it. For the future analysis, we developed a new estimation technique of background events using a machine-learning. We proved that it will contribute to further improve our sensitivity.

研究分野：素粒子実験物理学

キーワード：高エネルギー物理 ヒッグス粒子 ATLAS実験 シリコン検出器 半導体検出器

1. 研究開始当初の背景

欧州原子核研究機構(CERN)で行なっている陽子・陽子の衝突実験である ATLAS 実験と CMS 実験において、ヒッグス粒子と名付けられた素粒子が 2012 年に発見された。ヒッグス粒子は、素粒子に質量を与える相互作用を生む粒子だと考えられている。発見後にその性質を検証した結果、理論予想と矛盾のない強さの相互作用をいくつかの素粒子に対して起こしていることが確認された。これらの結果によって、発見した粒子は素粒子標準模型と呼ばれる理論が予言しているヒッグス粒子であると広く信じられるようになった。

しかしながら、まだヒッグス粒子との相互作用が確認されておらず、その質量の起源の解明が進んでいない素粒子が多数あった。それらの素粒子は、相互作用の強さが弱いため、ヒッグス粒子と相互作用を起こす事象数の期待値が少なく、また信号事象と似た終状態を持つ背景事象が多く、実験的に検証することが難しいと考えられていた。

2. 研究の目的

本研究では、研究開始当初には検証が難しいと考えられていたヒッグス粒子とチャームクォークの相互作用の検証を目的とした。これを検証することによって、未知であるチャームクォークの質量の起源を解明する。第二世代の素粒子で質量の起源が解明された粒子はいまだにひとつもないため、謎の多いヒッグス粒子の相互作用の一端を切り拓く結果となることが期待される。

3. 研究の方法

CERN の大型陽子加速器(LHC)を用いた ATLAS 実験において、ヒッグス粒子がチャームクォーク対に崩壊する事象を探索する。その事象の生成率などからヒッグス粒子とチャームクォークの相互作用の強さを検証することで、チャームクォークの質量の起源が理論の予測通りかを確認する。

本研究では主にふたつの課題がある。ひとつ目は LHC の第 3 期運転において良質なデータを取得すること。ふたつ目はヒッグス粒子とチャームクォークの相互作用の検証において問題となる、信号事象数の確保と背景事象の見積もり改善を行い、高い感度を達成するための研究を進めることである。

4. 研究成果

LHC の第 3 期運転において、私はシリコン検出器の一種であるシリコンマイクロストリップ検出器 SCT の運転に携わった。SCT はチャームクォークを含む事象を同定するために重要な情報となる、荷電粒子の飛跡を測定するための主となる検出器である。SCT の性能を最大限に発揮させた状態でデータ取得を行うことは、本研究を成功させ、さらに発展させるために必要不可欠な要素である。

SCT はモジュールと呼ばれる約 6x12 cm の大きさの検出器を 4088 個用いて構成されている。それぞれのモジュールには 1536 本の 80 um 幅のセンサーがあり、それぞれに対して荷電粒子の通過情報となる電荷の増幅率や検出のための閾値や検出タイミングの調整などを行うことができる。これらの膨大な数のチャンネルが、データ取得中に期待通りに動いているかどうかを確認し、動いていない場合には即座に適切な対処を行うことが求められる。

そこで、私はこれらの情報をデータベース化し、運転チームのメンバが性能とその時間的変化を簡単に可視化できるウェブベースのユーザインターフェースを開発した(図 1)。この新しい SCT の性能監視システムはよく機能し、これまで見逃されてきた軽微な性能低下を発見することができるようになった。さらに、性能に関連する情報を集めた専用のデータベースのおかげで、様々な要因で起こり得る性能低下の原因を特定するために、散逸した情報を運転チームが手作業で調べる必要がなくなるなど、安定したデータ取得にかかる手間を省力化することに大きく貢献した。

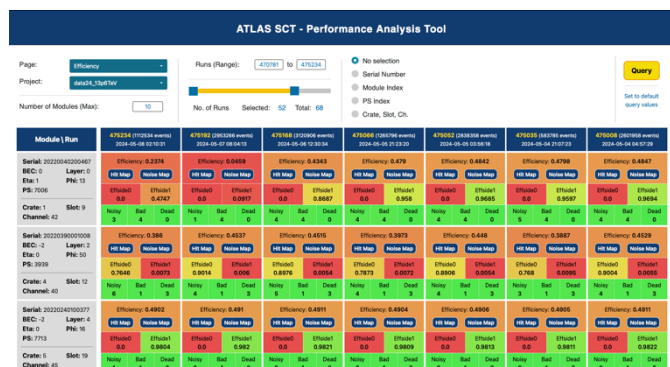


図 1 性能監視システムのユーザインターフェース

上記のデータ取得と並行して、ヒッグス粒子がチャームクォーク対に崩壊する事象探索の感度向上に向けた研究を進めた。ヒッグス粒子の崩壊で生成されたチャームクォークはチャームクォークを含むハドロンなどの多数の粒子が束となっておよそ同じ方向へ飛び出すジェット事象として観測される。このようなジェット事象は、軽いクォークが生成された際にも同様な反応として検出器に記録されるため、観測されたジェット事象の中からチャームクォークを起源とするジェットを同定する必要がある。この同定には、チャームクォークを含むハドロンの寿命がある程度長く、陽子・陽子の衝突点から離れた点から飛来した荷電粒子がジェット中に比較的多く含まれる、という情報を利用して行う。しかしながら、ボトムクォークを含むハドロンも長い寿命を持っているため、荷電粒子の発生点が衝突点から近すぎず遠すぎずという中間の性質を持っているジェットをチャームクォーク起源のジェットであると同定せざるを得ず、必然的に同定効率は30%程度と低くなってしまふ。これが原因で、信号事象のアクセプタンスが小さくなってしまふのは問題であるが、シミュレーションを用いた信号事象数や背景事象数の見積もりに十分な統計量を用いることが出来ないことも問題となる。その結果、それらの系統誤差が大きくなってしまふ感度の向上が妨げられていることに本研究では着目した。

そこで、我々はシミュレーションの統計を効率的に使うために、これまで捨てられていた事象も含めた全統計量を用いてシミュレーション時の真の情報から計算できるイベントごとの“重み”を推定して信号事象数や背景事象数を推定する新たな手法を開発した。この“重み”の推定には、ジェットの起源を同定するアルゴリズムの同定効率を用いるが、この効率はジェットのエネルギー、飛来方向、事象中の他のジェットの影響など、多くの要素によって変化してしまふことが知られており、重みの推定の不定性からくる余分な系統誤差を抑えなければ全体的な系統誤差を小さくすることが出来ない。そのため、これらの多変数を入力としたグラフニューラルネットワークと呼ばれる機械学習アルゴリズムを用いて、同定効率を正確に推定する手法を開発し、本手法に取り入れた。結果として、背景事象数の推定にかかる系統誤差を従来の手法よりも劇的に減らすことが出来た。最終的なチャームクォーク対崩壊事象探索の感度に対する改善は数%程度にとどまっていることが判明した。これは現在使用可能な統計量では予想信号事象数の統計誤差が支配的であるためであり、今後統計が十分にたまった際には、より大きな効果を発揮することが期待できる。

上記の研究の成果は、後述の国内外の学会等で発表されている。2022年に公表された論文ではチャームクォーク対事象の探索感度を従来の4倍程度更新して、ヒッグス粒子とチャームクォークの相互作用の理解を進めることが出来た(図2)。いずれの成果も現状で成し得るチャームクォーク対事象の探索結果を向上させるだけでなく、今後同様の手法で大統計量を用いた検証を進める際により大きな効果を発揮する。本研究を今後も継続することによって、LHC実験によって第二世代の粒子の質量起源の解明に取り組んでいきたい。

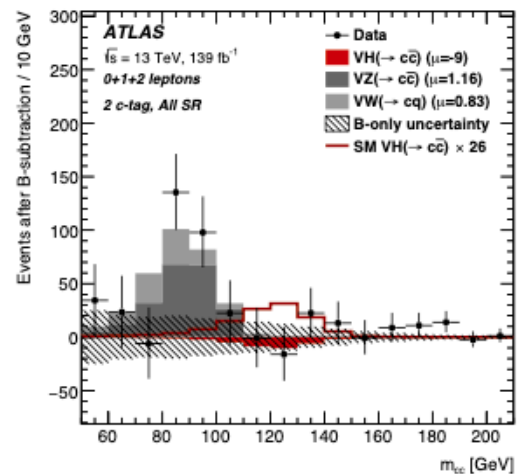


図2 ヒッグス粒子のチャームクォーク対崩壊の探索結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 ATLAS Collaboration	4. 巻 82
2. 論文標題 Direct constraint on the Higgs-charm coupling from a search for Higgs boson decays into charm quarks with the ATLAS detector	5. 発行年 2022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/s10052-022-10588-3	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 ATLAS Collaboration	4. 巻 83
2. 論文標題 Calibration of the light-flavour jet mistagging efficiency of the b-tagging algorithms with Z+jets events using 139 fb ⁻¹ of ATLAS proton-proton collision data at sqrt(s) = 13 TeV	5. 発行年 2023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/s10052-023-11736-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 ATLAS Collaboration	4. 巻 83
2. 論文標題 ATLAS flavour-tagging algorithms for the LHC Run 2 pp collision dataset	5. 発行年 2023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/s10052-023-11699-1	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

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 1件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Lakmin Wickremasinghe, Hajime Nanjo, Minoru Hirose, Shigeki Hirose, Hidetoshi Otono, ATLAS SCT Collaboration
2. 発表標題 Development and commissioning of the LHC-ATLAS Semiconductor Tracker Performance Analysis Tool
3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 廣瀬 穰
2. 発表標題 高輝度LHCとATLAS検出器高度化の最前線から~ 着々と進む高輝度実験に向けた準備と物理の展望
3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Minoru Hirose
2. 発表標題 Properties of the Higgs boson at the LHC (ATLAS+CMS)
3. 学会等名 Interplay between Particle and Astroparticle Physics 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Lakmin Wickremasinghe
2. 発表標題 Graph Neural Network (GNN) based Truth-tagging Tool in ATLAS
3. 学会等名 14th International Workshop on Boosted Object Phenomenology, Reconstruction and Searches in HEP (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Lakmin Wickremasinghe, 南條創, 廣瀬 穰, 増淵達也, Francesco Di Bello, Nilotpal Kakati, Amy Tee, Martino Tanasini
2. 発表標題 Jet tagging efficiency parametrization using Graph Neural Networks for Higgs to charm-quark decay analysis in the LHC-ATLAS experiment
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会(2022年)(オンライン)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 岩田和志, 南條創, 廣瀬穰, 音野瑛俊, 廣瀬茂輝, 山内大輝, 他アトラスSCTグループ
2. 発表標題 LHC-ATLAS実験シリコンストリップ検出器の性能モニタツールの開発
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会(2021年)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

所属研究室のWebページ https://osksn2.hep.sci.osaka-u.ac.jp ATLAS実験の公表結果のWebページ https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/AtlasPublic

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
研究協力者	ウィクラマシンハ ラクミン (Wickremasinghe Lakmin)		

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			
スイス	欧州原子核研究機構(CERN)			
英国	オックスフォード大学			
イタリア	INFN Sapienza Univ. of Rome	INFN Univ. of Genova		

共同研究相手国	相手方研究機関			
米国	Univ. of Wisconsin			
ドイツ	Max Planck Institute			
カナダ	モントリオール大学			
ドイツ	DESY			