

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 4 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23340070

研究課題名(和文) 第3世代クォークを用いた最高エネルギー実験での新現象探索とシリコン検出器開発

研究課題名(英文) The search for new physics using the 3rd generation quarks at the LHC and the development of silicon detector

研究代表者

花垣 和則 (Hanagaki, Kazunori)

大阪大学・理学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：40448072

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,200,000円、(間接経費) 4,560,000円

研究成果の概要(和文)：質量の起源と深い関わりを持つヒッグス粒子がCERNにて行われているLHC実験で発見された。本研究では、LHC実験にてヒッグス粒子がボトムクォーク対に崩壊する事象を探索した。統計的に有意な信号を観測することはできなかったものの、背景事象やボトムクォーク起源のジェット同定性能の理解を格段に向上させ、2015年から再開されるLHC実験において、目指す事象を発見できる確度を向上させた。LHCのルミノシティ増強に備えたシリコン検出器開発においては、試験すべきセンサー等のビームテスト時に使用する検出器およびデータ収集システム一式の開発に取り組み、全体の80%程度まで完成させるに至った。

研究成果の概要(英文)：The Higgs boson, which is related to the origin of mass, was discovered by the LHC experiment at CERN. In this research, we searched for the decay of Higgs to bottom quark pair. Although we did not find the statistically significant signal, we achieved great improvements in understanding of the background and the bottom quark jet tagging performance, which leads to the improvement of the discovery sensitivity for the coming runs after 2015. As a part of the silicon detector R&D for the ATLAS upgrade for the high luminosity LHC, we developed the system including the detector and the data acquisition, which will be used for mainly the beam test of a newly developing rad-hard silicon sensors.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：ヒッグス ボトムクォーク 超対称性 HL-LHC シリコン検出器

1. 研究開始当初の背景

素粒子物理学の標準模型が提唱されて以来40年近く経ったにもかかわらず、ニュートリノの有質量の観測以外、標準模型を超える現象が見つかっていない。その閉塞感を打破できるのではないかと大きな期待のもとに、欧州原子核研究機構に建設されたLHCが稼働を開始し、ヒッグスボソンや超対称性事象の発見に対する期待が高まっていた。

一方で、LHCは10年後をめどにルミノシティ増強のためのアップグレードを行うことが計画され、そのための準備も各国で開始されていた。研究代表者が参画するATLAS実験では、増加する粒子密度に耐える検出器の微細化と放射線耐性の強化のために、衝突点近くに設置されている荷電粒子飛跡検出器を新しく建設し、2022年前後に現存する検出器との入れ替えを行う予定である。

2. 研究の目的

(1) 本研究の目的は、ATLAS実験にて第3世代クォーク、特にbクォークを終状態に持つ物理過程をプローブとして、標準模型を超える物理現象を探索することである。特に、ヒッグスボソンがボトムクォーク対に崩壊する事象($H \rightarrow b\bar{b}$)を精密測定することで、標準模型からのズレを探ることを目的とした。

関連して、ヒッグスボソン探索における重要な背景事象の一つであるトップクォーク対生成断面積の測定や、 W/Z ボソン生成時の運動学的変数の精査、そしてbクォーク起源のジェット同定方法の改善を試みた。

(2) 研究年度内に収集するデータでは、仮にヒッグスがボトムクォーク対に生成する事象を発見できたとしても、標準模型とのズレを議論するほどの精度で生成断面積およびヒッグスの崩壊比を測定することはできない。また、ヒッグスの物理で最も重要な自己結合測定は研究年度内では到底不可能である。そこで、LHCのルミノシティ増強計画に合わせたATLAS検出器アップグレード計画の一環として、荷電粒子飛跡検出器の開発を行う。

3. 研究の方法

(1) 重心系エネルギー7TeVで収集したデータからトップクォーク対生成断面積を測定した。ヒッグス探索における背景事象として重要であると同時に、人類未踏の高エネルギー領域でのQCD検証、および標準模型からのズレの探索という重要な意味を持つ。

(2) Zボソンを伴い生成されたヒッグスボ

ソンがボトムクォーク対に崩壊する事象の探索を行った。

(3) bクォークジェット同定のアルゴリズム開発の一環として、グルーオン分裂によるボトムクォーク対生成を起源としたジェットと、単一のbクォークを起源としたジェットの分離識別を試みた。

(4) 飛跡検出器としてATLAS実験ではシリコンピクセルおよびストリップ型検出器を使用する。シリコン検出器開発においては、検出効率の測定や位置分解能測定のためにビームテストが不可欠となる。そこで、ビームテストを遂行する際に必要となる、荷電粒子の位置測定用測定器(テレスコープ)の開発に取り組んだ。

(5) ビームテスト時のビームプロファイル測定、あるいは、宇宙線を使ったシリコン検出器試験時の参照用測定器としてファイバートラッカーを製作する。

(6) 放射線耐性の向上がシリコンセンサー開発における最重要課題の一つである。放射線耐性の指標としては電荷収集効率がよく使われる。ATLASグループが使用するシリコンピクセル型検出器では、電荷収集効率の測定は単純ではない。そこで、電荷収集効率尾測定方法の確立を目指した。

4. 研究成果

(1) 2つの孤立レプトンとbクォークジェットの存在を要求することで、高純度のトップクォーク対事象を抽出し、その生成断面積を 176 ± 5 (統計誤差) ± 13 (系統誤差) ± 8 (ルミノシティ不定性)pbと測定した。重心系エネルギー7TeVでもQCDの予言能力が失われていないことを確かめた。

(2) Zボソンがダイレプトンに崩壊する事象を要求することで、比較的S/Nの高い $H \rightarrow b\bar{b}$ 探索を行った。背景事象であるWおよびZを伴うボトムクォーク生成事象の理解などは大きく改善したが、 $H \rightarrow b\bar{b}$ の発見には至らなかった。しかしながら、終状態が2つの γ 、あるいはZZおよびWWというモードを用いてヒッグスボソンは発見された。それゆえ、フェルミオンであるボトムクォーク対への崩壊事象探索は、今後、最も重要な物理過程の一つとなっている。

(3) グルーオン分裂を起源とするボトムクォーク対からのbクォークジェットは、単一のbクォークを起源としたジェットよりも、粒子数が多いことや、ジェット内部の粒子の分布の違いを利用して、多変数解析を行った。その結果、単一のbクォークジェットの選別効率を80%程度の保ちつつ、グルーオン起源

のジェットを 30%程度に抑えることに成功した。

(4) テレスコープには $10\mu\text{m}$ 程度の高い位置分解能が要求されるので、シリコンストリップセンサーと、アナログ情報読み出し可能な ASIC である SVX4 を用いてシリコンストリップ検出器を開発した。SVX4 の読み出し試験用の基板を数回に分けて製作し、1 個の SVX4 の読み出しから開始して、テレスコープに必要な 4 個の SVX4 からの同時読み出しに成功した。加えて $50\mu\text{m}$ 間隔のストリップセンサーを SVX4 と接続することで、テレスコープ試作品を完成させた。

(5) ファイバートラッカーとして、シンチレーションファイバーと MPPC を組み合わせて使用する。多チャンネルの MPPC 読み出しのための NIM モジュールを開発・製作した。64 チャンネル読み出し可能で、MPPC へのバイアス電源も装備させた。データ通信は FPGA を介した TCP/IP 通信を実現し、極めて汎用性の高いモジュールである。その有用性が広く認知され、様々な分野の研究室からモジュール製作依頼があり、すでに 30 台以上を製作、さらに 20 台程度の増産がすでに決まっている。

(6) ピクセル検出器用信号読み出し ASIC である FE-I4 は、閾値を超えたチャンネルだけ読み出すバイナリー読み出しであるが、閾値を超えた時間 (Time over Threshold: ToT) 情報も出力する。この ToT を用いて入力電荷量を求める手法として、まずは、既知電荷量と ToT の間の較正を行った。その後、閾値を設定することで検出することができなかつた電荷量の補正を試みた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 360 件)

- ① J. J. Teoh, K. Hanagaki et al., Development of readout system for FE-I4 pixel module using SiTCP, Nucl. Instrum. Meth. A731 (2013), 237-241, 査読あり
- ② G. Aad, K. Hanagaki et al., Evidence for the spin-0 nature of the Higgs boson using ATLAS data, Phys. Lett. B726 (2013), 120-144, 査読あり
- ③ G. Aad, K. Hanagaki et al., Measurement of Higgs boson production and couplings in diboson final states with the ATLAS detector at the LHC, Phys. Lett. B726 (2013), 88-119, 査読あり
- ④ N. Haba et al., Higgs Pair Production at the LHC and ILC from general potential, Phys. Rev. D89 (2014), 015018, 査読あり

- ⑤ G. Aad, K. Hanagaki et al., A particle consistent with the Higgs boson observed with the ATLAS Detector at the Large Hadron Collider, Science, 338 (2012), 1576, 査読あり
- ⑥ G. Aad, K. Hanagaki et al., Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC, Phys. Lett. B716 (2012), 1-29, 査読あり
- ⑦ G. Aad, K. Hanagaki et al., Measurement of the cross section for top-quark pair produced in pp collisions at $\sqrt{s} = 7\text{TeV}$ with the ATLAS detector using final states with two high-pt leptons, JHEP, 1205 (2012), 59, 査読あり
- ⑧ N. Haba et al., Enhancement of Higgs to diphoton decay width in non-perturbative Higgs model, Phys. Lett. B718 (2013), 1441-1446, 査読あり
- ⑨ G. Aad, K. Hanagaki et al., Measurement of the top quark pair production cross section in pp collisions at $\sqrt{s} = 7\text{TeV}$ in dilepton final states with ATLAS, Phys. Lett. B707 (2012), 459-477, 査読あり
- ⑩ G. Aad, K. Hanagaki et al., Measurement of the cross-section for b-jets produced in association with a Z boson at $\sqrt{s} = 7\text{TeV}$ with the ATLAS detector, Phys. Lett. B706 (2012), 295-313, 査読あり
- ⑪ N. Haba et al., Parity Violation in QCD Process, Phys. Rev. D85 (2011), 014007, 査読あり

[学会発表] (計 28 件)

- ① K. Hanagaki, Search for the Higgs boson in fermionic channels using the ATLAS detector, 19th International Symposium on Particles, Strings and Cosmology, 2013.11.20, Taipei, Taiwan
- ② 花垣和則, LHC におけるヒッグス研究の展望, 日本物理学会 2012 年秋季大会シンポジウム講演 (招待講演), 2012.9.11, 京都産業大学
- ③ N. Haba, Why is TeV-scale a geometric mean of neutrino mass and GUT-scale, BENE-2012 (招待講演), 2012.9.17-21, ICTP, Trieste
- ④ 花垣和則, 最新結果を踏まえたコライダー実験の将来展望, 日本物理学会秋季大会シンポジウム講演 (招待講演), 2011.9.17, 弘前大学文京町キャンパス

[図書] (計 1 件)

- ① 戸本誠, 花垣和則, 山崎祐司, ヒッグス粒子の見つけ方, 丸善出版, 2012

[その他]
ホームページ等
<http://osksn2.hep.sci.osaka-u.ac.jp/atlas/index.php?language=japanese>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

花垣 和則 (HANAGAKI Kazunori)
大阪大学・理学研究科・准教授
研究者番号：40448072

(2) 研究分担者

波場 直之 (HABA Naoyuki)
島根大学・総合理工学研究科・教授
研究者番号：00293803