

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 27 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25400298

研究課題名(和文) ヒッグス粒子を用いた未知素粒子セクターの探索

研究課題名(英文) A Search for the new particle sector via Higgs boson

研究代表者

陣内 修 (JINNOUCHI, Osamu)

東京工業大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号：50360566

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：世界最高エネルギーの加速器LHCを用いて、未知の素粒子セクターの探索を行った。未知セクター粒子は、標準模型粒子とは弱く結合するために、検出器中心の衝突点では崩壊せず、検出器内部に崩壊点(2次崩壊点)をもつ長寿命粒子となる。2次崩壊点をより高効率で検出する手法、並びに検出器物質中での背景事象を評価する手法を開発し、2012年の全データに適用して探索を行った。今回の探索領域では事象の超過は見られなかった。現象論模型に新たな制限を与える学術論文として結果を公表した。また将来の検出器の高度化に向け、放射線耐性に優れ、高密度粒子環境下で動作する新型半導体ピクセル検出器の開発を行った。

研究成果の概要(英文)：The Search for a new particle in the hidden sector is carried out with the world highest energy collider, LHC. The particle in this sector has a weak coupling to the Standard Model particles, and is expected to decay in the middle of the detector away from the interaction point. These decay points are called, secondary vertices, and is the signature of the long lived particles. The developments have been made to improve the detection efficiency of the secondary vertices and the method for estimating the backgrounds occurring inside the detector materials. These methods were applied to 2012 data, and observed no significant events. The exclusion limit on the specific phenomenology models were obtained, and published in the journal paper. The silicon pixel detector is newly developed towards the High-Luminosity LHC upgrades, which is required to have a high radiation tolerance, and the capability to being operated in the very high particle flux environment.

研究分野：素粒子物理学実験

キーワード：ピクセル検出器開発 検出器物質質量測定 長寿命粒子探索 国際研究者交流 スイス CERN

## 1. 研究開始当初の背景

(1)世界最高エネルギーLHCでの陽子陽子衝突を用いて、ATLAS及びCMSの二大実験が2012年にヒッグス粒子を発見した。発見後ヒッグス粒子の諸性質の測定が急務である。性質の一つとして崩壊モード及び崩壊率の測定があげられる。ヒッグス粒子を媒介として、これまで未発見であった粒子セクターとの結合が起こる可能性がある。新粒子・新現象のLHCにおける探索が、大きく注目されている。

ヒッグス粒子が隠れたセクターに存在する長寿命中性粒子に崩壊し、さらにこの粒子がある距離を飛翔した後、複数の $\mu$ 粒子に崩壊するというシナリオがある。先行研究では、最外層に設置されている $\mu$ 粒子検出器を用いてこの探索を行ってきた。内部飛跡検出器内で、比較的短い寿命の後、二次崩壊点を作り崩壊するような新物理の探索は、別の先行研究で行われていたが、信号検出・背景事象評価手法などに大きく改善の余地があった。

(2)また平成36年度以降から実施される予定のLHCの高輝度プログラム(HL-LHC)に向け、検出器の高度化も計画されている。HL-LHCでは過酷な放射線環境と、超高粒子密度下での検出器運転が要求され、その条件を満たす検出器の開発が急務となっている。

(3)加速器・実験シャットダウン中の平成25年度に最内層飛跡検出器(IBL)が新たに設置された。この新検出器、及びIBLを含む4層のPixel検出器の実データを用いたコミッションニングと性能評価が重要となる。

## 2. 研究の目的

(1)検出器内で崩壊する程度の長寿命をもち、検出器内に二次崩壊点を残すような未知粒子の探索にとって、二つの課題がある。

①背景事象の多くは、通常の標準模型粒子と検出器を構成する物質との反応によるハドロン相互作用反応である。この背景事象を抑えるには物質の存在する領域に発生した事象を正確に取り除けばよい。ハドロン相互作用そのものを利用し、実際のデータを用いて検証する必要がある。その様な事象は検出効率が低く、特に検出器中心からの距離が増加するに伴い、検出・評価がより困難となる。本課題開始時にはIBLを除いた内層3層のPixel検出器の物質分布までしか正確に把握できておらず、探索の領域は限られていた。この物質質量マップの領域を大幅に更新し、探索領域を大幅に拡大することが1つ目の目的である。

②信号とみなす事象の条件は二次崩壊点起源の荷電粒子数が多く(5本以上)、更に崩壊点の質量が大きい(10GeV以上)であり。標準模型粒子でこのような信号を直に作るもの

は非常に少ない。一方、1つの崩壊点に偶発的に、無相関の荷電粒子飛跡が重なった場合は、条件を満たすことがあり、背景事象の殆どはこの様な偶発事象が起源である。この背景事象の正確な見積りには、正確なモデリング、MCシミュレーションの検証が不可欠である。先行研究で十分に行われていなかったこの評価を、徹底して行うのが二つ目の目的である。

(2)HL-LHCに向けた検出器の高度化において、HL-LHC10年分の放射線照射をした後に、一様で高い検出率を維持できるPixel検出器を開発することを目標とする。印加電圧線などの表面構造により、その直下の領域で検出効率が低下することが判明している。その現象を解明し、対策を取ることが目標となる。

(3)IBL・Pixelの試運転に参加する。また平成27年度から始まるRun2において、IBLを含むピクセル検出器4層の性能評価を行い、オンライン・モニタリングに積極的に関わる。オンライン・モニタリングから飛跡再構成までのソフトウェア開発に従事する。

## 3. 研究の方法

(1)長寿命粒子探索に関して以下の方法を試みた。

①ハドロン相互作用を利用した物質質量測定に関して、2010年当初にこの測定方法を発案・実現した専門家と共同研究体制を組み、2012年のデータを用いて、より広範囲(特に半径の大きな領域)で適用できる物質質量マップの作成を試みた。これを初期には大学院修士課程学生と、後半から博士課程の学生と共同で取り組み、最終的に新しい物質質量マップを完成した。2で説明したように、このマップを用いて、物理解析で用いない検出器領域を決定した。

②背景事象の評価に関しては、質量の小さく(飛跡間の角度が小さい)、荷電飛跡数が限定的な二次崩壊点(数多く存在)に、偶発的に無相関の荷電飛跡が重なる現象の量を評価し、モデルをパラメータ化した。このモデルを実データで規格化・確認を行い、信号領域における背景事象の評価に用いた。この評価方法で得られた分布は、実データをよく再現しており、背景事象評価の系統誤差を大幅に抑えることができた。

③当初の計画では内部飛跡検出器内での $\mu$ 粒子ペアの検出を検討していたが、より発見感度が高く、現象論模型を包括的にカバーするチャンネルである二次崩壊点探索に集中し、このチャンネルでの研究を優先した。

(2)検出器のピクセル境界付近にある印加電圧構造による検出効率低下の原因をビーム試験から得られた結果を用いて分析し、原因を特定した。26年度以降、印加電圧構造を

電極で隠しこむ新しい設計を用いることで、検出効率が落ちないものにし、その後数回のビーム試験によって新設計が期待通り機能していることを実証した。

(3) IBLを含むピクセル検出器4層をモニタリングするグループに属し、コミッショニングから Run2 一年目(平成 27 年度)のオンライン・モニタリングを行った。また、飛跡再構成の性能評価を、d0, z0 などの飛跡パラメータの分布をもとに行った。

#### 4. 研究成果

(1) ① ② を大学院博士課程学生 (Pettersson), 九州大学助教(音野)と共に行い、学術論文[4]を出版した。本成果は、日本物理学会での発表 ([1][6]), 東京工業大学博士論文という形でも公表された。背景事象評価の結果、1 事象以下が予想値であるのに対し、検出は0 事象であった。この結果に基づきモデルのパラメータに新たな制限を与えた。また平成 27 年度から再開した Run2 のデータを用いた同解析に関しても、感度の見積りなどを報告している(学会発表[11])

(2) HL-LHC 用検出器に関しては適宜、日本物理学会、国際会議で成果報告を行ってきた(学術論文 [1-3][6][7], 学会発表 [3][4][7][9][10])。新設計の検出器で、検出効率の低下が抑制されていることを確認し、更に実機の製作に向けてセンサーを4枚並べた試作機の開発にも取り組んだ。

(3) IBL 検出器のコミッショニング(学会発表[2][5]), Pixel 検出器の Run2 におけるパフォーマンス研究(学術論文[5], 学会発表[8][12])など適宜報告している。定常的な Pixel 検出器のモニタリングにより、Run2 では設計通りの飛跡測定精度を維持している。

#### 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7件)

[1] R. Nagai, J. Idarraga, C. Gallrapp, Y. Unno, A. Lounis, O. Jinnouchi, et al., "Evaluation of novel KEK/HPK n-in-p pixel sensors for ATLAS upgrade with test beam", Nucl. Instrum. Meth. A, 査読有, 699, 2013, 78, 10.1016/j.nima.2012.04.081

[2] T. Kubota, T. Kishida, O. Jinnouchi, Y. Ikegami, Y. Unno, et al., "Beam test of novel n-in-p strip sensors for high radiation environment", Nucl. Instrum. Meth. A, 査読有, 731, 2013, 247, 10.1016/j.nima.2013.06.005

[3] K. Motohashi, T. Kubota, K. Nakamura, Y. Unno, O. Jinnouchi, et al., "Evaluation of KEK

n-in-p planar pixel sensor structures for very high radiation environments with testbeam", Nucl. Instrum. Meth. A, 査読有, 765, 2014, 125, 10.1016/j.nima.2014.05.092

[4] G. Aad, N. Pettersson, O. Jinnouchi, H. Otono, et al. (ATLAS Collaboration), "Search for massive, long-lived particles using multitrack displaced vertices or displaced lepton pairs in pp collisions at  $\sqrt{s}=8\text{TeV}$  with the ATLAS detector", Phys. Rev. D, 査読有, 92, 2015, 072004, 1-37, <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.92.072004>

[5] G. Aad, D. Yamaguchi, O. Jinnouchi, et al. (ATLAS Collaboration), "Track Reconstruction Performance of the ATLAS Inner Detector at  $\sqrt{s} = 13\text{TeV}$ ", ATLAS Publication Notes, 査読無, 2016-018, 2016, 1-37

[6] K. Kimura, D. Yamaguchi, K. Motohashi, K. Nakamura, Y. Unno, O. Jinnouchi, et al., "Test beam evaluation of newly developed n-in-p planar pixel sensors for use in a high radiation environment", Nucl. Instrum. Meth. A, 査読有, press article, 2016, 1-7, doi:10.1016/j.nima.2016.04.004

[7] K. Todome, O. Jinnouchi, et al., "Noise evaluation of silicon strip super-module with ABCN250 readout chips for the ATLAS detector upgrade at the High Luminosity LHC", Nucl. Instrum. Meth. A, 査読有, press article, 2016, 1-6, doi:10.1016/j.nima.2016.03.018

[学会発表] (計13件)

[1] Nora Pettersson, Osamu Jinnouchi, Vivek Jain, "Measurement of the Material in the ATLAS Inner Detector by using Hadronic Interactions in 7 TeV Collisions", 日本物理学会 2013 年秋季大会, 2013 年 09 月 20 日~2013 年 09 月 23 日, 高知大学

[2] 本橋和貴、陣内修、田窪洋介、et al. "ATLAS 実験 IBL 検出器の導入に向けた実機用センサー・モジュールの性能評価" 日本物理学会 2013 年秋季大会, 2013 年 09 月 20 日~2013 年 09 月 23 日, 高知大学

[3] Daiki Yamaguchi, Osamu Jinnouchi, Y. Unno, K. Nakamura et al., "Results from beamtests of the new designs of pixel structures", 9th "Trento" Workshop on Advanced Silicon Radiation Detectors, 2014 年 02 月 26 日~2014 年 02 月 28 日, Genova, Italy

[4] 山口大貴, 陣内修, 萩原陸人, 木村公彦, 海野義信, et al., "HL-LHC アトラス検出器アップグレードに向けたプラナーピク

セル検出器の基礎測定”，日本物理学会第70回年次大会，2015年03月21日～2015年03月24日，早稲田大学

[5] 本橋和貴、陣内修、田窪洋介、et al., “LHC-ATLAS 実験ピクセル検出器のアップグレードと立ち上げ作業の現状報告”，日本物理学会第70回年次大会，2015年03月21日～2015年03月24日，早稲田大学

[6] Nora Pettersson, 陣内修、音野瑛俊，“Search for Long-Lived, Heavy Particles using signature of a high track-multiplicity displaced vertex at the LHC-ATLAS Experiment”，日本物理学会2014年秋季大会，2014年09月18日～2014年09月21日，佐賀大学

[7] 山口大貴、陣内修、本橋和貴、海野義信, et al., “LHC-ATLAS 実験内部飛跡検出器アップグレードに向けた新型構造プランナーピクセル検出器の性能評価”，日本物理学会2014年秋季大会，2014年09月18日～2014年09月21日，佐賀大学

[8] 山口大貴、本橋和貴、陣内修、留目和輝、田窪洋介、et al., “LHC-ATLAS 実験ピクセル検出器性能モニターシステムの開発”，日本物理学会2016年春季第71回年次大会，2016年03月19日～2016年03月22日，東北学院大学

[9] 木村公彦、陣内修、澤井宏美、山口大貴、海野義信, et al., “HL-LHC 実験 ATLAS 検出器アップグレードに向けた新型ピクセル検出器の検出効率低下の原因究明と構造の最適化”，日本物理学会2016年春季第71回年次大会，2016年03月19日～2016年03月22日，東北学院大学

[10] 澤井宏美、陣内修、木村公彦、山口大貴、海野義信, et al., “HL-LHC 実験 ATLAS 検出器アップグレードの実機に向けた複数読み出しチップ搭載型ピクセル検出器の開発”，日本物理学会2016年春季第71回年次大会，2016年03月19日～2016年03月22日，東北学院大学

[11] 本橋和貴、陣内修、音野瑛俊、et al., “LHC-ATLAS 実験 Run-2 における長寿命グレイノ探索の背景事象の見積もり”，日本物理学会2016年春季第71回年次大会，2016年03月19日～2016年03月22日，東北学院大学

[12] 山口大貴、本橋和貴、陣内修、留目和輝、田窪洋介、et al., “ATLAS 実験における Run2 用ピクセル検出器のモニタリングシステム開発と性能評価”，日本物理学会2015年秋季大会，2015年09月25日～2015年09月

28日，大阪市立大学

[13] Osamu Jinnouchi, “New physics searches at the LHC: Where do we go with run II?”, TeV Particle Astrophysics 2015 (国際学会), 2015年10月26日～2015年10月30日，柏の葉カンファレンスセンター

〔図書〕(計0件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www-hep.phys.titech.ac.jp/jlab/index.html>

<http://www-hep.phys.titech.ac.jp/jlab/enkyu-shokai/UpGrade.html>

<http://www-hep.phys.titech.ac.jp/jlab/enkyu-shokai/DataAnalysis.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

陣内 修 (JINNOUCHI Osamu)

東京工業大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号：50360566

### (2) 分担研究者

該当なし

### (3) 連携研究者

海野 義信 (UNNO Yoshinobu)

大学共同利用機関法人

高エネルギー加速器研究機構・教授

研究者番号：40151956