

令和 3 年 6 月 10 日現在

機関番号：12608

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2019～2020

課題番号：19K23439

研究課題名(和文) 最高エネルギー陽子衝突における超高輝度環境下での長寿命新粒子探索性能の追究

研究課題名(英文) Extending the reach of long-lived new particles searches in the world's highest energy proton-proton collisions under unprecedented luminosity environment

研究代表者

生出 秀行(Oide, Hideyuki)

東京工業大学・理学院・助教

研究者番号：60846294

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,200,000円

研究成果の概要(和文)：この研究では、世界最高エネルギーでの陽子・陽子衝突を起こすLHC加速器における汎用測定器ATLASを用いた「素粒子の標準模型」を超える新粒子探索にかかわる研究を進めました。従来の探索で新粒子が見つからなかったことを踏まえ、新しい探索手法の開拓が必要と考え、荷電粒子飛跡検出技術を活用した新しい探索法を開拓しました。また将来のビーム高輝度化時代にATLAS飛跡検出器で用いる半導体ピクセル検出器のセンサー部品の量産試験システムを開発しました。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ヒッグス粒子を含めた標準模型が非常によく確立したことは、「標準模型では説明できないこと」の謎が一層際立ったことを意味します。宇宙観測から存在が信じられているダークマターの謎を明らかにしうる新粒子の発見がLHCで期待されていますが、これまでの探索は否定的な結果になりました。従来光を当てることができなかった領域に、大統計の取得、または新規の探索法を開拓していくことが必要です。本研究はそれに対して効果的なアプローチを仕掛けることを意図したものです。

研究成果の概要(英文)：In this research program, studies for new particle searches beyond the "Standard Model" of particle physics using the ATLAS detector of the LHC achieving the world's highest energy proton-proton collider. Provided that the previous searches have not found new particles, new methods of finding new particle signatures making use of charged particle passage detection as a new approach of exploration. In parallel, testing equipments were developed for silicon pixel module mass-production of the new tracking system of the upgraded ATLAS detector adapted to the high-luminosity era of the LHC.

研究分野：素粒子実験

キーワード：高輝度LHC ピクセル検出器 長寿命粒子探索

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

素粒子の標準模型における「ヒッグス機構」は基本素粒子に有限の質量を与える「しくみ」を用意するものの、個々の素粒子の質量の「値」自体については具体的な説明を与えない。またよく知られているように宇宙観測からダークマターの存在が信じられており、これについて標準模型には対応候補の粒子がないことも、標準模型の拡張を強く要請するものである。標準模型は重力の理論を内包しないため、電弱スケールまでの低いエネルギースケールをよく記述できる「現象論」であることが推察され、このため先験的に標準模型を超える物理の存在が予見されてきた。

LHC の到達範囲に新粒子の存在を预言する新物理の可能性は多く示されているが、従前の探索ではその兆候が得られておらず、理論的可能性の多くが棄却された。このため、LHC の従来の探索でまだ網羅できていない探索領域で、探索可能性の残されている感度をいかに高めるべきか？ということが重要な観点となった。

2. 研究の目的

LHC における新物理の探索可能性を高めるために、ビーム輝度を高め統計を上げるという正面作戦と、従来探索感度が不十分であった領域や物理シナリオへの発見感度を創意工夫で高めていくという相補的なアプローチがあり、本研究はそれぞれに寄与することを狙ったものである。具体的には、(a) 現行の検出器を用いた長寿命粒子の包括的な新しい崩壊同定法の開発、(b) 将来の飛跡検出器のセンサ部品候補の性能評価と、量産化体制の整備、であった。ATLAS 測定器のような汎用コライダー検出器を長寿命粒子の可能性に対して積極的に用いる試みは十分に成熟しておらず、本研究の提案する新しいアプローチが成功すれば、今後の多くの長寿命粒子探索チャンネルに標準的に適用される可能性が見込まれ、大きな波及効果があると見込まれた。

3. 研究の方法

新粒子の探索感度を高めるために、現行の測定器において新しい探索アイデアと具体的な手法を開発することで、将来、高輝度化が達成された際にも恩恵のある探索ツールを揃える。また取得済みのデータに対して探索を行い、先駆的な結果とする。高輝度化を見据えたピクセル検出器の量産体制を具体化し、高輝度環境でのピクセル検出器の実現を目指す。具体的には、イメージングによる外観検査システムの構築、冷却読み出し試験装置の開発、X線照射装置の開発を目標とした。

4. 研究成果

(a) 現行の検出器を用いた長寿命粒子の包括的な新しい崩壊同定法の開発

飛跡性能に着目した物理解析については、理論的側面から飛行中の崩壊のシナリオを種々、検討した際に、特に「荷電ヒグシーノ」のケースについて予想外に重要な気づきを得たため、緊急性が高いと考え、これを提案論文としてまとめ上げた。これに引き続いて、ATLAS 測定器の本格的な背景事象シミュレーションを用いて提案論文段階での簡易な予測が大筋で合致していることを確認でき、探索戦略の妥当性・有効性を追確認できたため、探索チャンネルとして結実した。

長寿命の重たい荷電粒子探索を行う際に重要となる、電離損失の応答関数を実データから抽出して信号事象への適用するパッケージを新規に開発した。放射線損傷における数年間の応答の時間変化も良好に較正されており、高輝度 LHC においても適用可能なスキームであるという特徴がある。この較正を適用した重荷電粒子の探索については感度の最適化・背景事象の見積も

りを完了し、信号領域の観測を行った上で出版準備が進行中である。

長寿命粒子探索においては、標準的な再構成ではその対象から外れてしまうような飛跡を特殊に再構成するケースについて、従来の欠点を補う新しい交点再構成アルゴリズムの開発を進めた。「B ハドロン」を含む比較的ソフトな崩壊点をより効率的に再構成が可能なアルゴリズムの開発研究では、従来の再構成法では再構成効率が不十分な要因を系統的に明らかにし、崩壊点を構成する飛跡を「群」として機械学習の入力に取り込むことで、標的とする再構成効率を高めることができる余地があることを新たに見出した。実際に機械学習を実装すると、従来アルゴリズムに比して2倍程度まで収量を増加させつつ、効果的に背景事象を抑制を行った種交点を生成できることが分かった。今後、種交点をクラスター化して「ファジーな交点」としてまとめあげることで、実際の探索へと進める展望がある。

(b) 将来の飛跡検出器のセンサ部品候補の性能評価と、量産化体制の整備

高輝度 LHC の放射線環境にて使用される次世代ピクセル検出器について、最大の焦点であったピクセル・センサーの画素サイズについては、最内層を除いては $50 \times 50 \mu\text{m}^2$ のものを採用することが決定した。これにより、FE モジュールの設計は初期量産の準備が整い、センサーおよびモジュールの型式が本格的に確定した。

本研究を通じて、モジュール量産時におけるアセンブリ工程下での品質担保のための検査項目の策定が進んだ。製造の各フェーズにおける外観検査・形状測定・モジュール動作確認試験・耐熱試験の策定が行われた。最終量産時における最終的な試験体制の確立に向けて、仮の試験項目に基づいた模擬量産の体制が整備された。具体的には以下に挙げる成果を得た。

(1) 外観検査のための設定について、各国に分散した検査を行う機関で同等の確認ができるよう、ワイヤ・ボンドの状態等を確認するために十分な光学性能と再現性が市販製品において確立できることを確認し、推奨条件の提案を行った。また検品に従事する者の作業を均一化するための支援ソフトウェアを開発し、実用ツールとした。また、ワイヤ・ボンドの接続状態を評価するための画像認識アルゴリズムの開発を進めた。開発したアルゴリズムは目視確認を行う検査の支援ツールとして一定の実用性があることが認められた一方、背景パターンのコントラストが低い状況では判定が難しくなるという課題も見いだされた。今後、軸上光源を用いることでより堅牢な判定が可能になるという可能性がある。

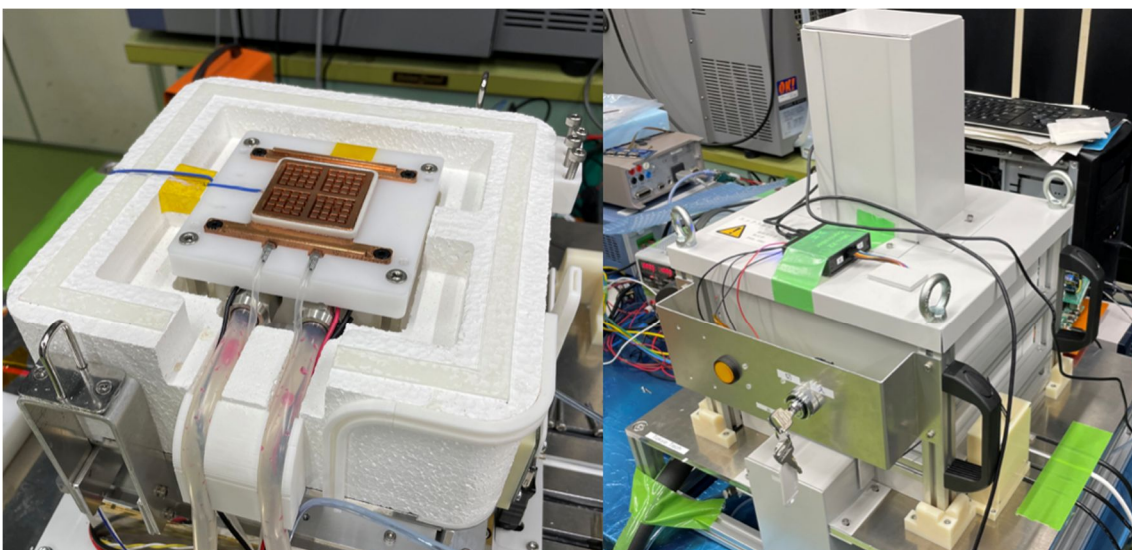


図 1 (左) ITk ピクセルモジュールを搭載し冷却読み出し試験を行うための冷却箱の外観。(右) 冷却箱と組み合わせてバンプ接合度合いを検査するための X 線照射装置。

(2) 冷却環境の構築については 10W 程度の発熱があるモジュールを約-15℃まで冷却するという条件が測定器の運転要件から決まり、低温チラーとペルチェ冷却素子を組み合わせたハードウェアのプロトタイプを作成した。読み出し検査を行うためのペルチェ・モジュールを用いた冷却箱を 1 基実際に製造し、要求される約 10W でのモジュール駆動時において、安全に除熱を行いながらでの-15℃での冷却制御と、モジュール非駆動時における-35℃での安定制御を実現した(図 1 左)。結露を防ぐための冷却箱の雰囲気管理が課題であったが、モジュールを保持するホルダーおよび冷却ヘッドを一体化した密閉空間とした形状を作ることで、乾燥ガスを置換させなければいけない体積を極小化し、低露点を実現させた。露点のモニタにおいては、このような極小空間において低温・低露点環境を十分に信頼できるセンサの候補は限られていたが、SHT85 という温湿度計が候補として選定された。早稲田大学と共同でこのセンサの低温・低露点における読み出しの較正および安定性の試験を行い、実機においてフェイルセーフのためのインターロックに使用可能な較正を得ることができた。ITk ピクセルモジュールの製造を担当する欧米各国にも先駆けて、初めて実用となる本格的な試験システムの開発に成功した。

(3) この冷却箱と適合する X 線照射システム(図 1 右)を KEK および阪大と協力して独自に開発した。特に小型の X 線照射装置と冷却箱の形状に最適化した軽量の鉛遮蔽を製作したもので、高い操作性を担保するものである。このシステムにより、短時間でピクセル・パンプ接合を検査可能になり、スループットが要求される量産化への道筋を拓いた。

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 Fukuda Hajime, Nagata Natsumi, Oide Hideyuki, Otono Hidetoshi, Shirai Satoshi	4. 巻 124
2. 論文標題 Cornering Higgsinos Using Soft Displaced Tracks	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 101801
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevLett.124.101801	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10件（うち招待講演 2件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 *金恩寵*, 生出秀行, 調翔平, 陣内修, Simone Pagan Griso, Ann Wang, Stefano Passaggio
2. 発表標題 LHC-ATLAS実験における荷電長寿命重粒子探索のための実データに基づくピクセル検出器dE/dx応答関数のモデル化
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 *池亀遥南*, 松崎貴由, 生出秀行, 調翔平, 陣内修, 南條創, 廣瀬穰, Lakmin Wickremasinghe, 小林大, 鷲津優維, 花垣和則, 外川学, 中村浩二
2. 発表標題 HL-LHC ATLASピクセル検出器量産に向けた品質管理試験装置の開発
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 *松崎貴由*, 池亀遥南, 生出秀行, 調翔平, 陣内修, 南條創, 廣瀬穰, Lakmin Wickremasinghe, 小林大, 鷲津優維, 花垣和則, 外川学, 中村浩二
2. 発表標題 HL-LHC ATLASピクセル検出器量産に向けた品質試験における温度制御システムの開発
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 生出秀行
2. 発表標題 LHCヒグシーノ探索におけるソフト飛跡の利用について
3. 学会等名 新学術領域研究 (研究領域提案型) ヒッグス粒子発見後の素粒子物理学の新展開 ~LHCによる真空と時空構造の解明~ 新テラスケール研究会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hideyuki Oide
2. 発表標題 Searches for New Long-Lived Particles with the ATLAS detector
3. 学会等名 9th International Conference on New Frontiers in Physics (ICNP 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hideyuki Oide
2. 発表標題 Higgs and Searches results summary and developments of analysis techniques with machine learning in ATLAS
3. 学会等名 KEK IPNS Invited Seminar (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 *潮田理沙*, 生出秀行, 調翔平, 陣内修, Christian Ohm, Lawrence Lee Jr, Simone Pagan Griso
2. 発表標題 LHC-ATLAS実験における低運動量bクォーク対を含む長寿命粒子崩壊点の再構成手法の開発
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 *金恩龍*, 生出秀行, 調翔平, 陣内修
2. 発表標題 LHC-ATLAS実験におけるピクセル検出器dE/dxを用いた荷電長寿命重粒子探索の感度改善のための研究
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 *池亀遥南*, 松崎貴由, 生出秀行, 調翔平, 陣内修, 南條創, 廣瀬穰, Lakmin Wickremasinghe, 小林大, 釣希夢, 鈴木隆仁, 秋山大也, 花垣和則, 外川学, 中村浩二
2. 発表標題 HL-LHC ATLASピクセル検出器量産に向けた動作試験のための環境制御用筐体の設計と製作
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 *池亀遥南*, 松崎貴由, 生出秀行, 調翔平, 陣内修, 南條創, 廣瀬穰, Lakmin Wickremasinghe, 小林大, 釣希夢, 鈴木隆仁, 秋山大也, 花垣和則, 外川学, 中村浩二
2. 発表標題 HL-LHC ATLAS ピクセル検出器量産に向けた動作試験のための環境制御用筐体の改良と性能評価
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2021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			
スイス	CERN			
米国	LBNL	University of Oregon	Harvard University	他1機関
イタリア	INFN	Universita di Genova		