

令和 2 年 6 月 11 日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K14284

研究課題名(和文)高輝度環境下で安定動作する究極の統合トリガー系の開発と超対称性の検証

研究課題名(英文)Development of the Trigger System for High Luminosity Environments and Verification of Supersymmetry

研究代表者

中浜 優(Nakahama, Yu)

名古屋大学・素粒子宇宙起源研究所・准教授

研究者番号：10786180

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,700,000円

研究成果の概要(和文)：技術開発成果として、今後の高エネルギー加速器実験における高輝度・高頻度粒子衝突の環境下においても安定動作し、どのような物理事象をも網羅する究極の統合トリガー系を開発した。LHC-ATLAS実験で実証し、物理解析データ取得を可能にした。物理成果として、LHC-ATLAS実験Run2全データ139 fb⁻¹を用いて超対称性粒子発見に対する感度が高いモードでグルイーノを包括的に探索し、2.4 TeV/c²以下の質量域を棄却した。これまで物理的重要性にも関わらず未探索だった第3世代のトップスクォークが他の超対称性粒子らと縮退している質量域を新たに探索した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

次世代エネルギーフロンティア実験のためのデータ収集系において技術的な貢献した。今後の高エネルギー加速器実験における高輝度・高頻度粒子衝突の環境下においても安定動作し、どのような物理事象をも網羅する究極の統合トリガー系を開発した。最新技術マルチスレッドを導入したトリガーを新たに開発し、持続可能なトリガー・データ処理システムを現行実験で実証した。現行LHC-ATLAS実験Run-2全データで到達可能な全質量域の超対称性粒子探索に決着をつけ、もって素粒子標準理論を超える新物理を実験的に発見するかあるいは理論モデルに厳密な制限を与えた。

研究成果の概要(英文)：As technical achievements for higher luminosities at future high-energy experiments, we developed the ultimate trigger system that can collect any physics events in interests and operate stably. We verified the system for the data-taking at the LHC-ATLAS experiment.

As physics results, we performed two new SUSY searches (1) inclusive search for gluinos using the full Run-2 dataset (139 fb⁻¹) in the most-sensitive channel (all-hadronic final state) with new machine-learning technique and (2) search for top-squarks whose mass is degenerated from the other SUSY particles and thus was not yet explored. An exclusion limit at the 95% confidence level on the mass of the gluino is set at 2.4 TeV/c².

研究分野：素粒子実験

キーワード：トリガー 超対称性粒子 エネルギーフロンティア ATLAS実験 統合トリガー系 ミューオントリガー

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

2012年のヒッグス粒子発見以降も、CERN-LHC実験においては、超対称性粒子などの新しい物理現象の発見・ヒッグス粒子の精密測定・標準理論現象の超精密測定などの目的で、加速器の高輝度化を段階的に進めている。一方、ATLAS検出器では、事前に設定したオンラインでの事象選別(トリガー)を用いて、40 MHzという高頻度でのビーム交差から、ハードウェアを使った初段トリガーで100 kHz、ソフトウェアによる後段トリガーで1000 Hzまで絞り込まなくてはならない。しかし、高輝度化後も同じトリガーを使い続けると上記のデータ収集系のレート制限を軽く超えてしまうので、実験データが取得できなくなってしまう。

素粒子標準理論を超える新しい物理の中で最も期待されている一つが超対称性理論である。数 TeV/c^2 付近の質量領域に一連の超対称性粒子が存在すると予想されている。最も軽い超対称性粒子は暗黒物質の候補であり、素粒子・宇宙物理両方面から注目が高い。一方階層性問題を解決するためにはグルイーノや第3世代のトップスクォークは比較的軽いと期待され、LHC実験で検出可能性がある。

2. 研究の目的

本研究の目的は、(1)今後の高エネルギー加速器実験における高輝度・高頻度粒子衝突の環境下においても安定動作し、どのような物理事象をも網羅する究極の統合トリガー系を開発・運転し、もって次世代エネルギーフロンティア実験のためのデータ収集系において技術的な貢献すること、(2)現行LHC-ATLAS実験Run-2全データで到達可能な全質量域の超対称性粒子探索に決着をつけ、もって素粒子標準理論を超える新物理を実験的に発見するかあるいは理論モデルに厳密な制限を与えることである。具体的な物理解析として、超対称性粒子発見に対する感度が高いグルイーノを $2.5 \text{ TeV}/c^2$ 以下の質量域で包括的に探索し、これまで物理的重要性にも関わらず未探索だった第3世代のトップスクォークが他の超対称性粒子らと縮退している質量域を新たに探索する。

3. 研究の方法

以下の目的を達成するために各研究項目を実施する。

(1)目的：超高輝度環境下でも安定動作可能な究極の統合トリガー系を実現する

- ①輝度 $2 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 用の選別条件セットの設定し、ビーム運転時で動作検証・改良する
- ②高輝度環境下に対応しうる統合トリガー系の仕様詳細を提案する

(2)目的：現行ATLAS実験Run-2全データで到達可能な超対称性粒子探索に決着をつける

- ①第3世代トップスクォークが他の超対称性粒子らと縮退する質量域を新たに探索する
- ②高統計Run-2全データでグルイーノを包括的に探索する

(1)①ATLAS実験全物理解析を網羅するような $2 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 用選別条件セットを準備する。その際、閾値を上げてレートを削減するだけでなく、終状態がソフトな物理事象に対しても感度を保つ様に、終状態における粒子間の位置関係などを利用した複雑な選別条件を追加する。準備した統合トリガー系を運転し、レートや取得効率などのトリガー性能を検証した上で、安定動作する様に改良する。各事象選別条件の閾値を可能な限り下げ、超高輝度化に備えトリガー系を安定動作させる。トリガー検出が困難な物理事象(例えば、長寿命の超対称性粒子やソフトな終状態を持つ事象)をも網羅するトリガー選別条件セットを開発導入し、究極の統合トリガー系を実現する。②運転・検証で蓄積した知見を元に、統合トリガー系への要請・仕様概要をまとめ、次世代高輝度LHC実験技術仕様設計書や仕様詳細へのインプットとする。

(2)①トップスクォークとニュートラリーノもしくはチャージーノ間の質量差が小さい(縮退し

た)事象を探索する。縮退により崩壊粒子の運動量が小さく、実験的に検出が困難であるので、以下の特別な解析手法を開発する。レプトンの運動量が非常に小さい終状態をカバーするような解析手法を開発し、更なる感度向上を目指す。背景事象を大幅に削減するために、信号事象に大きな初期放射ジェットが付随した特殊な事象パターンを使った解析(ISR 同定)を確立する。②最も発見感度が高い解析モード(0 レプトン)に着目し、高統計解析に向けて解析手法を確立する。特に、支配的な背景事象であるにもかかわらずシミュレーションを用いた推定に頼っている W/Z ボゾン対生成事象の事象数を高統計の実データを用いて見積もり、事象数推定の不定性を極限まで削減する。Run-2 全データを用いて解析結果を更新し、グルイーノの探索質量域を $2\text{-}3\text{TeV}/c^2$ まで拡大する。超対称性粒子の兆候が見られない場合は、pMSSM など様々な崩壊を含むモデルにも感度が高い、複雑な解析も同時に行う。

4. 研究成果

(1)トリガー研究では、LHC Run-2 において ATLAS 実験の多彩な物理プログラムを網羅する統合トリガー系を完成した。最高瞬間輝度 $2 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ まで対応可能な統合トリガー系の開発・運転を成功させた(結果は CERN ノート 2 本で公表済)。トリガー性能を詳細評価し、精密測定を含む物理データ解析に使用できるレベルでの安定動作を確認した(ミュオントリガーでの評価結果を査読付き論文 JINST に投稿済)。当初の予定を超えて、2021 年開始 Run-3 に向けた統合トリガー系実装のための新技术を開発した。次世代トリガー系「並列処理マルチスレッド対応フレームワーク」では、トリガー処理用計算機資源(50k CPU コア)におけるメモリー使用を効率化し半減できる。ミュオンを例にマルチスレッド対応トリガーへの移行を完了させ、動作確認・性能評価を行った。今後ビッグデータ化する大型実験で、本技術は計算機資源の効率的な使用を実現できる。

(2)超対称性粒子の研究では、Run-2 データ 36 fb^{-1} (2015-2016 取得)、 140 fb^{-1} (2015-2018 取得)を用いて、グルイーノとスクォークを包括的に探索した。高統計を活かした解析技術として、機械学習や複雑な統計処理などを用いた発見感度が高い解析手法を新たに完成させた。 140 fb^{-1} を用いた最終結果においても、残念ながら超対称性粒子の兆候がなかった。しかしながら、グルイーノとスクォークの質量が、それぞれ $2.4, 2.0 \text{ GeV}/c^2$ 以下と最も厳しい制限を課した (36 fb^{-1} での結果は査読付論文 PRD で公開し 167 論文から引用。 140 fb^{-1} での公表結果は、既に 21 論文から引用)。当初の予定を超えて、長期データ保存の技術開発も行った。pMSSM・レプトクォーク・暗黒物質などを仮定した様々なモデルに対しても結果を随時再解釈(RECAST)可能にした。将来実験の物理戦略議論のために、高輝度 LHC でのグルイーノの質量到達感度を推定した。また、物理的重要性にも関わらず未探索だった第 3 世代のトップスクォークが他の超対称性粒子らと縮退している質量域を新たに探索した(査読付論文 JHEP で公開し、110 論文から引用)。

学術的意義や社会的意義としては、(1) 次世代エネルギーフロンティア実験のためのデータ収集系において技術的な貢献した。今後の高エネルギー加速器実験における高輝度・高頻度粒子衝突の環境下においても安定動作し、どのような物理事象をも網羅する究極の統合トリガー系を開発した。最新技術マルチスレッドを導入したトリガーを新たに開発し、持続可能なトリガー・データ収集システムを現行実験で実証した。(2) 得られた一連の超対称性粒子の探索結果は従来理論的に好まれていた数多くの超対称性模型を棄却した。現行LHC-ATLAS実験Run-2全データで到達可能な全質量域の超対称性粒子探索に決着をつけた。理論側の模型拡張や実験側の探索戦略双方に対して、今後の新物理研究の進むべき方向性を示すことに成功した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 6件/うちオープンアクセス 7件）

1. 著者名 The ATLAS collaboration (including Y. Nakahama)	4. 巻 40
2. 論文標題 Search for squarks and gluinos in final states with jets and missing transverse momentum using 139 fb ⁻¹ of sqrt(s)=13 TeV pp collision data with the ATLAS detector	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 CERN ATLAS conference note	6. 最初と最後の頁 47
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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

1. 著者名 The ATLAS collaboration (including Y. Nakahama)	4. 巻 2004.13447
2. 論文標題 Performance of the ATLAS muon triggers in Run 2	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 arXiv:hep-ex (submitted to JINST)	6. 最初と最後の頁 58
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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

1. 著者名 The ATLAS collaboration	4. 巻 6
2. 論文標題 Search for top-squark pair production in final states with one lepton, jets, and missing transverse momentum using 36 fb ⁻¹ of sqrt(s)=13 TeV pp collision data with the ATLAS detector	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 108
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1007/JHEP06(2018)108	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

1. 著者名 The ATLAS collaboration	4. 巻 97
2. 論文標題 Search for squarks and gluinos in final states with jets and missing transverse momentum using 36 fb ⁻¹ of sqrt(s)=13 TeV pp collision data with the ATLAS detector	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 112001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1103/PhysRevD.97.112001	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

1. 著者名 中浜 優	4. 巻 37
2. 論文標題 LHC ATLAS実験 最新の物理結果	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 高エネルギーニュース	6. 最初と最後の頁 1
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 -

1. 著者名 The ATLAS Collaboration	4. 巻 ATL-DAQ-PUB-2018-002
2. 論文標題 Trigger Menu in 2017	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 CERN public note	6. 最初と最後の頁 1
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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

1. 著者名 The ATLAS collaboration	4. 巻 3
2. 論文標題 Reinterpretation of searches for supersymmetry in models with variable R-parity-violating coupling strength and long-lived R-hadrons	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 ATLAS CONF NOTE	6. 最初と最後の頁 1-28
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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14件 (うち招待講演 6件 / うち国際学会 6件)

1. 発表者名 中浜優
2. 発表標題 LHC-ATLAS実験Run2における0レプトン終状態のグルイーン探索結果
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中浜優
2. 発表標題 Innovations from Basic Research - High Energy Physics
3. 学会等名 Tsukuba Conference 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 脇田萌、中浜優
2. 発表標題 LHC-ATLAS実験Run-3に向けたマルチスレッド対応ミュオントリガーの性能評価
3. 学会等名 日本物理学会2020年年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yu Nakahama for the ATLAS and CMS Collaborations
2. 発表標題 Searches for direct production of 3rd generation squarks
3. 学会等名 The Sixth Annual Conference on Large Hadron Collider Physics (LHCP2018) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yu Nakahama
2. 発表標題 Status and prospect of physics at LHC
3. 学会等名 4th KMI International Symposium (KMI 2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yu Nakahama
2. 発表標題 ATLAS SUSY search using machine learning and sophisticated statistical fit
3. 学会等名 2018 Joint workshop of TYL/FJPPL and FKPL (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 林田翔太, 中浜優 他ATLAS日本トリガーグループ
2. 発表標題 LHC-ATLAS実験Run-3に向けた新しいマルチスレッド対応ミュオントリガー系の性能評価
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 江角悠, 中浜優 他ATLAS日本トリガーグループ
2. 発表標題 LHC-ATLAS実験Run-3に向けた細分化カロリメータ情報を用いたレベル1タウ粒子トリガーの性能評価
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 林田翔太, 中浜優 他ATLAS日本トリガーグループ
2. 発表標題 LHC-ATLAS実験Run-3に向けたマルチスレッディング技術のミュオントリガーメニューへの実装
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 江角悠, 中浜優 他ATLAS日本トリガーグループ
2. 発表標題 LHC-ATLAS実験Run-3に向けた細分化カロリメータ情報を用いたレベル1タウトリガーアルゴリズムの開発
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 脇田萌, 中浜優 他ATLAS SUSY Upgrade Group
2. 発表標題 高輝度LHC-ATLAS実験におけるグルイーノとスクォークの探索感度推定
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yu Nakahama for the ATLAS and CMS Collaborations
2. 発表標題 Searches for direct production of 3rd generation squarks
3. 学会等名 The Sixth Annual Conference on Large Hadron Collider Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yu Nakahama
2. 発表標題 ATLAS SUSY search using machine learning and sophisticated statistical fit
3. 学会等名 2018 Joint workshop of TYL/FJPPL and FKPL (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 林田翔太, 中浜優
2. 発表標題 LHC-ATLAS実験Run-3に向けたマルチスレッディング実装フレームワークでのハイレベルミューオントリガー開発
3. 学会等名 日本物理学会第73回年次大会
4. 発表年 2017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
--	---------------------------	-----------------------	----