

令和 4 年 5 月 30 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2021

課題番号：17K14268

研究課題名（和文）LHC-ATLAS実験における高統計データを用いた超対称性粒子探索

研究課題名（英文）Search for supersymmetric particles in big data at LHC-ATLAS experiment

研究代表者

齋藤 智之（Saito, Tomoyuki）

東京大学・素粒子物理国際研究センター・助教

研究者番号：50749629

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）：本研究課題ではCERN研究所の最高エネルギー陽子陽子衝突型加速器LHCにおいて、ATLAS検出器を用いた高純度の衝突データ取得を可能にするデータ収集システムを構築し、高統計データを用いて超対称性粒子の発見に挑戦した。多くの異なる検出器を有機的に統合することで、大幅な背景事象抑制を可能にするトリガーシステムの構築を完遂した。取得した大統計衝突データを用いて超対称性粒子の探索を行い、100 GeVからTeVのオーダーの質量を持つ超対称性粒子グルイーノ、電弱ゲージノの研究を遂行した。本研究成果によって超対称性模型の理解を大きく進め、今後の素粒子標準模型を超えた新しい理論の研究の重要な指針となった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果として、最新のエレクトロニクスの技術を駆使し先進的なトリガーシステムの構築に成功した。高速データ通信技術と大規模回路実装技術を組み合わせることで、リアルタイムの大規模データ処理を実現した。これは将来の加速器実験の大規模データ収集システム系の基礎となる重要な成果である。また未開拓であった100 GeVからTeVスケールの質量を持つ超対称性粒子の理解を大きく進めることができた。この新たに得た知見は素粒子標準模型を超える新しい物理理論の今後の研究指針となる重要な成果であり、学術的意義は大きい。

研究成果の概要（英文）：In this grant, we worked to search supersymmetric particles in proton-proton collisions using a large dataset at Large Hadron Collider (LHC) by development of an advanced data acquisition system, where many different detectors were complementarily integrated. We developed the new data acquisition system to suppress huge background particles in real time process so that the system bandwidth is able to be used efficiently for data of interest. We searched the gluinos and electroweak gauginos with masses of  $O(100-1000)$  GeV in the large dataset using new techniques and got new understandings of the supersymmetric particles. These results brings important information to the supersymmetric models and to next step for searches on new physics beyond the Standard Model.

研究分野：高エネルギー物理学、素粒子物理学

キーワード：素粒子標準模型 超対称性 LHC加速器 ATLAS実験 データ収集システム エレクトロニクス FPGA DAQ

## 1. 研究開始当初の背景

2012年にCERN(ジュネーブ、スイス)の最高エネルギー陽子陽子衝突実験であるLHC-ATLAS・CMS実験が、素粒子標準模型が预言する最後の粒子・ヒッグス粒子を発見した(参考文献[1])。これは標準模型の完成を意味するが、一方、暗黒物質等の標準模型では説明できない問題が多く存在しており、我々の宇宙を記述するためには標準模型を超えた新しい物理模型が必要であることも明確であった。

LHC加速器では加速した陽子同士の衝突により超高エネルギー状態を作り出すことで、新物理模型が预言する重い新粒子の研究を実現する。2015年より衝突エネルギーを前人未踏の13 TeVにあげ、本研究を開始した2017年はまさにエネルギーフロンティアを開拓中であった。新粒子を発見し新しい物理模型の研究を通じて、宇宙創成の謎の解明が期待されていた。

2016年夏までに蓄積した約 $15 \text{ fb}^{-1}$ のデータを用いた結果では、超対称性粒子グルイーノの探索質量範囲が1.8 TeVまで到達した。グルイーノの反応断面積は質量増加とともに指数関数的に小さくなるため、今後さらに高い質量領域を探索するためには大量のデータが必要であった。そのために高純度高統計データの取得を実現する先進的なデータ収集システム系の開発が急務であった。さらに大統計データを効果的に用いた超対称性粒子の研究手法の開発も必要であった。

## 2. 研究の目的

本研究ではLHC-ATLAS実験で、新しいミュオントリガーシステムを導入することで背景事象を大幅に削減しシステム帯域幅を効率よく利用することで、高純度高統計の衝突データの収集を実現し、重い超対称性粒子の発見に挑戦した。現行のデータ収集系では莫大な背景事象がシステム帯域幅を圧迫しデータ取得に重大な問題を引き起こす。大幅な背景事象の抑制をリアルタイムで実現するために、多くの異なる検出器を有機的に統合する新しいトリガーシステムを開発する。さらに、高統計データを用いた新しい超対称性粒子の探索手法を開発し、感度の大幅な改善を目指す。本研究によりエネルギーフロンティアを開拓し新しい物理模型が预言する新粒子の探索を実現する。

## 3. 研究の方法

### (1) 高純度高統計のデータ取得を実現する先進的なデータ収集系の研究

まず大幅な背景事象削減を可能にするトリガーロジックの開発を行い、それをハードウェア上(FPGA)に実現する。テストベンチで詳細な動作検証を行いロジックを仕上げる。その後実機エレクトロニクスを地下100 mのATLAS実験の回路室に設置する。実験本番の環境で動作検証を行い、他のシステムと接続し統合試験を行うことで、検出器の信号から正しくトリガー信号を供給できることを保証する。

### (2) 衝突エネルギー13 TeVのデータを用いた超対称性粒子の研究

高統計データを用いた超対称性粒子探索の新しい手法の研究を行う。本研究前半ではデータの統計が少なくても探索可能な比較的反応断面積の大きい超対称性粒子グルイーノ探索に注力する。この研究で問題となる背景事象の理論モデリングの系統誤差を削減するために、衝突データを用いた新しい背景事象評価法を開発し大幅な感度改善を狙う。本研究後半では反応断面積が小さく大統計データが必要な電弱ゲージノ探索に取り組み、超対称性粒子の兆候の観測を狙う。

## 4. 研究成果

### (1) 高純度高統計のデータ取得を実現する先進的なデータ収集系の研究

#### 1-1 新型内層ミュオン検出器を用いたトリガーロジックの開発

マイクロパターンガス検出器の一種であるマイクロメガス検出器を新しくトリガーシステムへ組み込むことに取り組んだ。マイクロメガス検出器は比較的遅い応答を持つため、高速応答が要求されるトリガー信号への利用には不向きである。それを克服するために専用のトリガー処理エレクトロニクスを開発し、そこに実装するロジックの構築を行った。高速処理を実現する専用ロジックを開発し、トリガーシステムへ統合を可能にした(図1)。この成果は国際会議TWEPPで報告した。

このマイクロメガス専用トリガー処理エレクトロニクスと後述する後段のトリガー判定ボードとの接続試験を行い、6.4 Gbpsのデータ転送速度でエラー頻度は十分低いことを確認し、質の高いデータ転送が可能であることを示した。

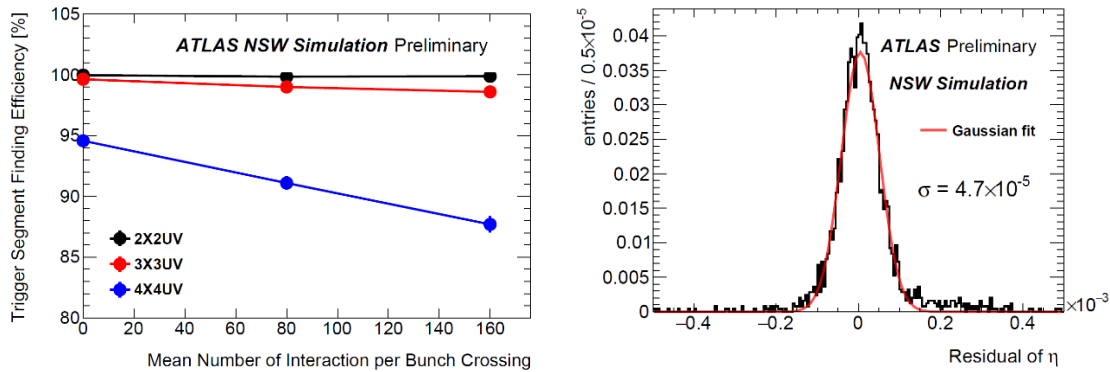


図 1: (左) 陽子衝突多重度[横軸]の関数として評価したトリガー効率[縦軸]。高多重度環境下でも高い効率を実現できることを示した。(右)位置分解能の評価。要求性能を満たす分解能を実現するロジックの開発に成功した。

## 1-2 複数の異なる検出器を統合する新しいトリガーシステムの構築

莫大な背景事象環境下で高純度のデータ収集を実現するためにリアルタイムで複数の異なる検出器を統合するトリガーシステムの開発に取り組んだ。

まずトリガー判定ロジックの核の部分の開発、実装を行った。特にトリガーシステムの構築で必須となる時間較正手法を考案し、より正確な時間較正を可能にする機構をシステムに導入した。また上流のエレクトロニクスと接続試験を通じて、データ通信規格の最終調整をし、データ通信を成功させた。

新しいトリガーエレクトロニクスを実験現場に設置した。背景事象の多い検出器の前方後方領域をカバーするために 72 台のトリガー判定エレクトロニクスの設置作業を行い、ATLAS 検出器システムに組み込んだ。データ読み出し用ラックマウント型 PC も設置し、実験に必要なハードウェアの設置作業を完了した。入力・出力用の 1000 本を超える光ファイバー・ケーブルの接続も完了した。

1-1 で取り組んだ新型内部ミュオン検出器との通信試験を実験室で行い、本番用の通信規格でデータの受信に成功した。さらに FPGA 間の通信に必要な時間を実測し、通信時間のふらつきが通信エラーに発展しない程度に抑制可能な機能が働いていることを実証した。これは実験本番で通信エラーによるデータ損失を防ぐことができる重要な成果である。

実験現場でトリガーシステムの統合試験と、安定運転へ向けたシステム試運転を遂行した。具体的には、4 種類の異なる検出器とトリガー判定エレクトロニクス間の通信を確立した。また通信が切れた場合の回復機構を導入することで、実験中に大きなデータ損失を起こさないような対策を施した。チャンネル固有の信号を用いて 1000 本以上のファイバーが正しく配線されていることを確認した。信号受信エラーを最小限に抑えるために 6.25ns 単位で受信タイミングの微調節も行った。大量の検出器信号の処理を可能にする FPGA 上の Look-Up-Table を用いた大規模ロジックの開発も行い、試験信号を用いた動作検証も行った。出力先である後段の中央トリガーシステムとの通信の確立にも成功し、2022 年 6 月開始予定の本衝突実験への準備を完了したといえる。

## (2) 衝突エネルギー 13 TeV のデータを用いた超対称性粒子の研究

### 2-1 超対称性粒子グルイーノの研究

まずデータの統計が少なくとも探索可能な比較的応断面積の大きい超対称性粒子グルイーノ探索に注力した。特に背景事象のモデリングに関する系統誤差の削減に取り組むことで、より高い質量のグルイーノ探索を目指した。従来の評価手法では、信号領域とできるだけ近い運動学を持つコントロール領域を定義し、そこでモンテカルロシミュレーションサンプルをデータで規格化し、理論モデリングを用いて信号領域へ外挿していた。このため理論モデリングの不定性の影響を避けられない。最も問題になるのは Initial State Radiation (ISR) ジェットモデリングであった。信号領域は多数のジェットを要求するため、ISR のジェットを持つ背景事象が残りやすい傾向にある。そこで本研究では ISR モデリングをデータから導出する手法を開発し、背景事象評価の妥当性を向上させ、2016 年までに取得した  $36 \text{ fb}^{-1}$  のデータを用いて超対称性グルイーノの探索結果を論文にまとめることができ、また国際会議でも報告した。

次に 2018 年までに取得した  $139 \text{ fb}^{-1}$  大統計データを用いてグルイーノ探索を行った。新しく機械学習を導入することで、従来の研究では利用していなかった終状態の各ジェットの横運動量

の相関を利用し、信号の探索感度を向上させることに成功した。特定の超対称性模型に過度に最適化することを避け、幅広い質量領域の探索が可能になる解析手法を構築した。超対称性粒子の発見には至らなかったが、最大 2.3 TeV の質量までのグルイーノ探索結果を公表できた (図 2 左)。

## 2-2 超対称性粒子電弱ゲージノの研究

より高い質量領域を開拓するために、近年の新しい技術である大半径ジェット識別を利用した新しい電弱ゲージノ探索を遂行した。重い電弱ゲージノ崩壊からのボソン粒子はブーストしており、その崩壊からの2本のジェットはコリメートして放出され識別が難しい。そこで大半径ジェット識別手法を導入して重い電弱ゲージノ信号の再構成を実現することで、探索範囲の大幅な拡張を達成した。超対称性粒子の発見には至らなかったが、最大 1.1 TeV の質量まで探索ができ、その結果を公表できた (図 2 右)。

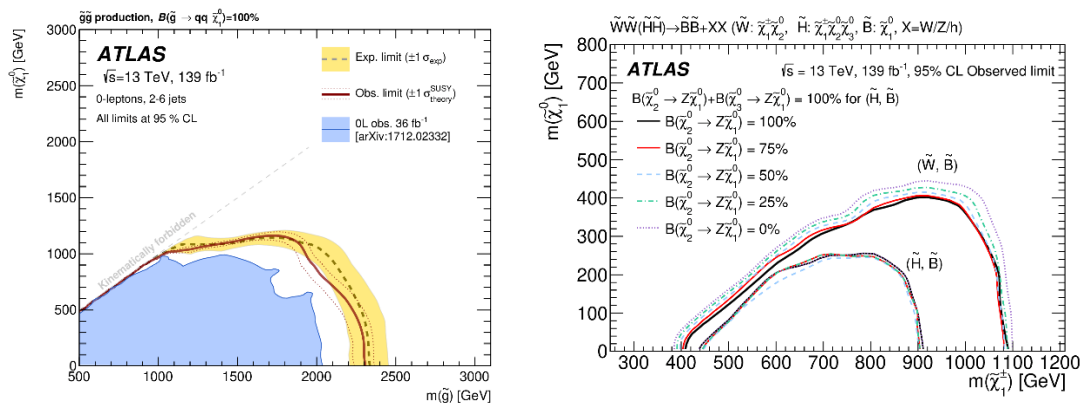


図 2: 超対称性粒子グルイーノ(左)、電弱ゲージノ(右)探索結果。グルイーノは質量で最大 2.3 TeV まで探索を行った。電弱ゲージノは質量で最大 1.1 TeV までの探索を行った。

## 参考文献

- [1] ATLAS collaboration, Phys. Lett. B **716** (2012), 1; CMS collaboration, Phys. Lett. B **716** (2012), 30.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計18件（うち査読付論文 16件 / うち国際共著 17件 / うちオープンアクセス 18件）

1. 著者名 T. Saito et al., The ATLAS Collaboration	4. 巻 104
2. 論文標題 Search for charginos and neutralinos in final states with two boosted hadronically decaying bosons and missing transverse momentum in pp collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV with the ATLAS detector	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 112010
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.104.112010	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 T. Saito et al., The ATLAS Collaboration	4. 巻 81
2. 論文標題 Search for chargino-neutralino pair production in final states with three leptons and missing transverse momentum in $\sqrt{s}=13$ TeV pp collisions with the ATLAS detector	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The European Physical Journal C	6. 最初と最後の頁 1118
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1140/epjc/s10052-021-09749-7	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 T. Saito et al., The ATLAS Collaboration	4. 巻 2021
2. 論文標題 Search for supersymmetry in events with four or more charged leptons in 139 fb <sup>-1</sup> of $\sqrt{s}=13$ TeV pp collisions with the ATLAS detector	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 167
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP07(2021)167	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 T. Saito et al., The ATLAS Collaboration	4. 巻 81
2. 論文標題 Search for R-parity-violating supersymmetry in a final state containing leptons and many jets with the ATLAS experiment using $\sqrt{s}=13$ TeV proton-proton collision data	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The European Physical Journal C	6. 最初と最後の頁 1023
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1140/epjc/s10052-021-09761-x	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 T. Saito et al., The ATLAS Collaboration	4. 巻 81
2. 論文標題 Search for squarks and gluinos in final states with one isolated lepton, jets, and missing transverse momentum at $\sqrt{s}=13$ TeV with the ATLAS detector	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The European Physical Journal C	6. 最初と最後の頁 600
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1140/epjc/s10052-021-09344-w	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 T. Saito et al., The ATLAS Collaboration	4. 巻 2021
2. 論文標題 Search for squarks and gluinos in final states with jets and missing transverse momentum using 139 /fb of $\sqrt{s}=13$ TeV pp collision data with the ATLAS detector	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 1-63
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP02(2021)143	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 T. Saito et al., The ATLAS Collaboration	4. 巻 101
2. 論文標題 Searches for electroweak production of supersymmetric particles with compressed mass spectra in $\sqrt{s}=13$ TeV pp collisions with the ATLAS detector	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 052005-1, 46
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.101.052005	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 T. Saito et al., 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 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 112001-1, -47
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 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 T. Saito et al., The ATLAS Collaboration	4. 巻 97
2. 論文標題 Search for electroweak production of supersymmetric states in scenarios with compressed mass spectra at $\sqrt{s}=13$ TeV 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 052010-1, 35
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.97.052010	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 T.Saito et al., ATLAS Collaboration	4. 巻 96
2. 論文標題 Search for squarks and gluinos in events with an isolated lepton, jets, and missing transverse momentum at $\sqrt{s}=13$ TeV with the ATLAS detector	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 112010-1, -37
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.96.112010	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 Tomoyuki Saito, on behalf of The ATLAS Collaboration	4. 巻 17
2. 論文標題 Simulation of the ATLAS New Small Wheel Trigger	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of Science, TWEPP	6. 最初と最後の頁 115
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 音野瑛俊、齋藤智之	4. 巻 36
2. 論文標題 LHC ATLAS実験の最新状況	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 高エネルギーニュース	6. 最初と最後の頁 1-8
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 T.Saito et al., ATLAS Collaboration	4. 巻 11
2. 論文標題 Search for supersymmetry in events with b-tagged jets and missing transverse momentum in pp collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV with the ATLAS detector	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 195-1, 195-49
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP11(2017)195	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 T.Saito et al., ATLAS Collaboration	4. 巻 9
2. 論文標題 Search for supersymmetry in final states with two same-sign or three leptons and jets using 36 fb/1 of $\sqrt{s}=13$ TeV pp collision data with the ATLAS detector	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 084-1, 084-44
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP09(2017)084	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5件 (うち招待講演 4件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 Tomoyuki Saito, on behalf of the ATLAS Collaboration
2. 発表標題 Searches for supersymmetry with the ATLAS detector
3. 学会等名 Lomonosov conference on elementary particle physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tomoyuki Saito
2. 発表標題 Dark Matter Search at ATLAS
3. 学会等名 KUBEC International Workshop on Dark Matter Searches 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年



1. 発表者名 Tomoyuki Saito
2. 発表標題 LHC-ATLAS Run2 data analysis
3. 学会等名 Joint Kavli IPMU - ICEPP Workshop on Future Directions for HEP (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tomoyuki Saito
2. 発表標題 Simulation of the ATLAS New Small Wheel Trigger
3. 学会等名 Topical Workshop on Electronics for Particle Physics (TWEPP) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Tomoyuki Saito
2. 発表標題 SUSY strong production in leptonic final state with ATLAS
3. 学会等名 5th Conference on Large Hadron Collider Physics (LHCP) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<ul style="list-style-type: none"> <li>- AGAINST COVID-19 コロナ禍を経て、研究は新天地へ <a href="https://www.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/what/focus/06.html">https://www.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/what/focus/06.html</a></li> <li>- researchmap: 齋藤智之 <a href="https://researchmap.jp/tomoyuki.saito">https://researchmap.jp/tomoyuki.saito</a></li> <li>- 2018 ATLAS Outstanding Achievement Awards <a href="https://atlas.cern/updates/atlas-news/outstanding-achievement-awards-2018">https://atlas.cern/updates/atlas-news/outstanding-achievement-awards-2018</a></li> <li>- 「ATLAS Outstanding Achievement Award 2018」を受賞 <a href="https://www.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/information/20181012.html">https://www.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/information/20181012.html</a></li> </ul>
---

## 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			
ブラジル	Juiz de Fora UF			
イスラエル	Weizmann Institute of Science			
イタリア	National Institute for Nuclear Physics			
ブラジル	Juiz de Fora UF			
米国	University of Illinois Urbana-Champaign	Harvard University	University of Massachusetts	
イタリア	National Institute for Nuclear Physics			
ドイツ	ミュンヘン大学			
イギリス	オックスフォード大学			