

Graduate School of Advanced Science and Engineering
Waseda University

博 士 論 文 概 要
Doctoral Dissertation Synopsis

論 文 題 目
Dissertation Title

Search for long lived supersymmetric particles using an improved disappearing track
reconstruction technique with the ATLAS Run 2 data

ATLAS Run-2データを用いた消失飛跡の改良再構成手法による長寿命超対称性
粒子の探索

申 請 者
(Applicant Name)
Daiya AKIYAMA
秋山 大也

Department of Pure and Applied Physics, Research on Applied Radiation Physics

April, 2026

素粒子標準模型（標準模型）は、宇宙を構成する基本粒子と、それらに働く電磁・弱・強相互作用を統一的に記述する理論であり、自然界の観測事実を高精度に説明する。2012年のLHCによる質量 $125\text{ GeV}/c^2$ のヒッグス粒子発見をもって、標準模型が预言する粒子の全ては観測された。しかし同時に、標準模型には多くの未解決問題が残されており、新物理の存在が強く示唆される。

その代表例が階層性問題である。大統一スケールやプランクスケールに比べて電弱スケールが極端に小さい理由は標準模型では説明されない。特に、スカラー粒子であるヒッグスボソンの質量に対する放射補正は、カットオフスケールの二乗に比例するため、これがプランクスケールの場合は、極めて大きな補正を受ける。観測される電弱スケールは、このような巨大な補正が精密に打ち消し合うことで実現しているように見える。この状況は直感に反する不自然性を示しており、新物理による説明が求められている。また、標準模型には宇宙の質量の約25%を占める暗黒物質の候補が存在しない。特に弱相互作用程度の強さを持つ大質量粒子WIMP（Weakly Interacting Massive Particles）は、熱的残存密度が宇宙観測と一致することから最有力候補の一つである。さらに、標準模型の3つのゲージ結合定数は大統一スケールで正確には一点に収束せず、これも標準模型を超える物理の存在を示唆する。

これらの問題への有力な解として超対称性理論がある。超対称性とは、ポアンカレ対称性を拡張し、ボソンとフェルミオンを入れ替える対称性であり、標準模型粒子ごとにスピンが $1/2$ ずれた超対称パートナーの存在を预言する。例えば、トップクォークのパートナーであるスカラートップは、ヒッグス質量の二次発散を打ち消し、階層性問題を自然に解決する。さらに、ビーノ、ウィーノ、ヒグシーノといったゲージボソンやヒッグスボソンの超対称パートナーはWIMP暗黒物質としての有力候補である。また、超対称性がTeVスケールで破れている場合、3つのゲージ結合定数は一点に収束し、大統一理論との整合性もよい。このように、超対称性は標準模型のさまざまな問題を対称性の導入によって説明できる魅力的な拡張である。

超対称性—暗黒物質の探索は、原子核反跳実験、宇宙観測、加速器実験により相補的に進められているが、それぞれの検出感度の限界により広大な未探索領域が残されている。特に加速器実験では、生成断面積の小ささに加え、質量縮退したスペクトラムにより解析が困難である。そこで本研究では、超対称性粒子の超対称性—暗黒物質への崩壊過程において特徴的な「消失飛跡」と、終状態の低運動量粒子の再構成に焦点を当て、新しい飛跡再構成技術の導入によって信号探索感度の向上を目指す。

LHC—ATLAS実験は標準模型の精密測定と新粒子探索を目的とする加速器実験であり、2018年までのRun 2において重心系エネルギー 13 TeV の陽子—陽子衝突事象を 140 fb^{-1} 記録した。ATLAS検出器は内部飛跡

検出器、カロリメータ、ミューオン検出器から構成される。本研究で対象とするのは、質量が縮退したニュートラリーノ（中性電弱ゲージノと中性ヒグシーノの質量固有状態）へ崩壊するチャージノ（荷電ウィーノ・荷電ヒグシーノの質量固有状態）およびタウスレプトン（タウレプトンの超対称性パートナー、スタウ）である。これらの粒子は崩壊の位相空間が抑制されるため長寿命になり、再構成が困難な低運動量のパイ粒子あるいはタウレプトンを放出するため、消失したように観測される。このような長寿命荷電粒子はピクセル検出器の4ヒットのみで再構成される「消失飛跡」として観測されるが、その寿命は 10^{-2} ns程度であり、半径12 cmに位置するピクセル検出器の4層目を通過する確率は小さく、信号収量を制限していた。また、高パイルアップ環境では、偽ヒットによる誤再構成が背景事象の増大だけでなく、信号飛跡の収量低下も引き起こしていた。

これらの課題に対し、ピクセル検出器の内側3ヒットのみで再構成した、より短い飛跡（3層飛跡）や、外側の検出器における偽ヒットの除去（SCTヒットフィルター）を飛跡再構成段階で導入することで、信号収量を増加させた。また、消失飛跡の外挿とビーム衝突点を拘束条件としたフィット（Vertex Constraint）により、消失飛跡の運動量分解能が向上した。さらに、終状態の1つである低運動量パイ粒子の再構成を導入し、3層飛跡で課題となる膨大なヒットの組み合わせによる偽飛跡背景事象の削減が期待できる。また、同じような特徴を持つ長寿命荷電粒子は、ゲージ媒介型超対称性破れ（GMSB）においても自然に現れ、その場合はグラビティーノ（重力子の超対称性パートナー）に崩壊するスタウに探索感度をもつ。本解析ではGMSBスタウシナリオとしての信号解釈も導入し、幅広いSUSYパラメータ空間を網羅する解析とする。

本論文の構成は以下のとおりである。

第一章では、標準模型の問題点を指摘した上で、消失飛跡解析の現状と意義について述べ、本論文の方向性を提示する。

第二章では、本研究の理論的背景についてまとめる。標準模型の問題に対する解として超対称性を導入する。また、これまでのLHCにおける実験結果による、超対称性理論の代表的なパラメータに対する制限から、最も重要かつ未探索の領域として電弱ゲージノとヒグシーノ暗黒物質探索の重要性について指摘する。その上で、信号生成過程における特徴的信号の理論的背景と、類似する特徴を持つスタウ生成過程についても導入する。そして、分野横断的な暗黒物質探索の現状についてもまとめ、本研究の物理的意義を定義する。

第三章では、LHC—ATLAS実験について述べる。まず、LHCビームコンプレックスとATLAS検出器の構成についてまとめる。特に本研究と関わりの深い、内部飛跡検出器を中心に整理する。

第四章では、使用するLHC Run 2データの取得状況と品質と、使用する

信号事象のモンテカルロシミュレーションの生成における設定をまとめる。その上で、それらデータおよびシミュレーションの事象再構成を、電子、ミューオン、ジェット、消失横運動量の一般的なオブジェクトの定義とともにまとめる。

第五章では、新しく導入した消失飛跡および低運動量パイ粒子の再構成手法と性能についてまとめる。ビーム衝突点から $12 \sim 30 \text{ cm}$ 離れて崩壊した荷電粒子の飛跡（4層飛跡）再構成効率を従来から 20% 向上させるとともに、これまで難しかった $9 \sim 12 \text{ cm}$ 離れて崩壊した荷電粒子飛跡（3層飛跡）の再構成も導入した。さらに、ビーム衝突点を使用したフィットによって消失飛跡の運動量分解能は2倍に向上した。低運動量パイ粒子は、低運動量であることに加え、検出器途中で生成されるという点でも再構成が難しいが、信号事象の特徴を元に再構成手法を構築した。消失飛跡との関連付けは機械学習BDTを用いて行うことで、誤再構成を抑制した。

第六章では、主題である新しい飛跡再構成による消失飛跡解析についてまとめる。まず、信号事象と背景事象の特徴について説明した上で、操作領域／検証領域ならびに信号領域の定義を行う。そして、最も困難な部分である、データ駆動方式による背景事象推定手法を説明するとともに、系統誤差を含めた、背景事象推定の妥当性について述べる。操作領域と信号領域における横運動量分布の、最尤推定法による同時フィットで計算した信号探索感度は、ウィーノとヒグシーノの生成断面積に対し、同一データを用いた前回解析比でそれぞれ2倍の感度を示した。スタウにおいては、これまで探索が難しかった 1 ns の寿命領域において、従来の 3.8 倍の感度を示した。最終的に4つの信号領域において、合計25事象を観測し、最も信号感度のある4層飛跡と高消失横運動量をもつ信号領域において 1.9 シグマの超過を観測した。信号純度の高い2領域で観測した5事象に着目し、信号事象らしいかどうか十分な検討をした結果、背景事象と判断し、ウィーノ（ヒグシーノ）の質量に対して、 $660(225) \text{ GeV}/c^2$ の 95% 信頼区間に基づく棄却領域の上限を設定した。 1 ns の寿命を持つスタウ（GMSBスタウ）の質量に対しては $320(300) \text{ GeV}/c^2$ の 95% 信頼区間に基づく棄却領域の上限を設定した。これらは加速器生成による超対称性—暗黒物質探索として最も強い制限であり、より高質量領域の探索を強く動機づける結果である。

第七章では、本解析での改善された手法をもとに、LHC Run 3データ解析における将来感度の見積もりを行う。また、内部飛跡検出器の経年劣化と放射線損傷を考慮し、現在取得中の実験データが消失飛跡解析にどの程度適した品質を有しているのか検討し、将来解析の堅牢性向上につなげる。

最終章では、第七章で議論した将来展望を踏まえた上で、本研究が超対称性—暗黒物質のモデルに与える物理的インパクトと、確立した新規解析技術について総括する。

List of research achievements for application of Doctor of Science, Waseda University

Full Name : 秋山 大也

seal or signature



Date Submitted(yyyy/mm/dd): 2026/04/02

種別 (By Type)	題名、発表・発行掲載誌名、発表・発行年月、連名者（申請者含む） (theme, journal name, date & year of publication, name of authors inc. yourself)
☐ Academic paper	D. Akiyama, et al., [ATLAS Collaboration], "Search for long-lived charged particles using large specific ionisation loss and time of flight in 140 fb ⁻¹ of pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector", <i>JHEP</i> 07 (2025)140
☐ Academic paper	D. Akiyama, et al., [ATLAS Collaboration], "Performance of the reconstruction of large impact parameter tracks in the inner detector of ATLAS", <i>Eur. Phys. J. C</i> 83 (2023) 1081
☐ Academic paper	D. Akiyama, et al., [ATLAS Collaboration], "Search for long-lived charginos and τ -sleptons using final states with a disappearing track in pp collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV with the ATLAS detector", Submitted to JHEP, arXiv:2603.08315, (in application)
Lecture	D. Akiyama, "ATLAS Inner Detector Operational experience at the Large Hadron Collider at CERN", VERTEX2025, PoS (VERTEX2025) 004 (2025)
Lecture	Daiya Akiyama, Koichiro Kanke, Kohei Yorita, "Track reconstruction at collider experiments using quantum-inspired simulated annealing", Connecting The Dots 2025, 2025/11/10, University of Tokyo
Lecture	Daiya Akiyama, [ATLAS Collaboration], "Searches for supersymmetric particles with the ATLAS detector", 44th International Symposium on Physics in Collision, 2025/10/21, Zewail City of Science and Technology
Lecture	Daiya Akiyama, Kaji Toshiaki, Ryu Sawada, Masahiro Morinaga, Kohei Yorita, "Final results of the disappearing-track search with the ATLAS detector using LHC Run 2 data", The Physical Society of Japan 2026 Spring Meeting, 2025/03/25, Online
Lecture	Daiya Akiyama, Kaji Toshiaki, Ryu Sawada, Masahiro Morinaga, Kohei Yorita, "Disappearing track search in the Run2 data re-analysis using novel track reconstruction techniques at the LHC-ATLAS experiment", The Physical Society of Japan 2025 Annual Meeting, 2025/09/18, Hiroshima University
Lecture	Daiya Akiyama, [ATLAS Collaboration], "ATLAS Inner Detector Operational experience at the Large Hadron Collider at CERN", 33rd International Workshop on Vertex Detectors, 2025/08/25, University of Tennessee, Knoxville
Lecture	Daiya Akiyama, Izuo Tsubasa, Hidetoshi Otono, Sayuka Kita, Takahiko Kondo, Shigeki Hirose, Kohei Yorita, ATLAS SCT Collaboration, "Operation status of the ATLAS silicon strip detector in LHC Run 3", The Physical Society of Japan 2025 Spring Meeting, 2025/03/18, Online
Lecture	Daiya Akiyama, "Current Energy-Frontier collider: LHC/ATLAS Run 3 data taking", Workshop for Tera-Scale Physics and Beyond, 2024/12/18, KEK
Lecture	Daiya Akiyama, Shoji Asai, Toshiaki Kaji, Ryu Sawada, Masahiro Morinaga, Kohei Yorita, "Improvement in disappearing track search sensitivity with the Run2 data re-analysis at the LHC-ATLAS experiment", The Physical Society of Japan 2024 Spring Meeting, 2024/03/21, Online
Lecture	Daiya Akiyama, Bruce Gallop, Per Johansson, Hidetoshi Otono, Kondo Takahiko, Koichi Nagai, Shigeki Hirose, Kohei Yorita, "Performance improvement of the ATLAS silicon strip detector using gain and noise measurements", The Physical Society of Japan 2023 Spring Meeting, 2023/03/23, Online
Lecture	Daiya Akiyama, Shoji Asai, Kaji Toshiaki, Saito Masahiko, Ryu Sawada, Masahiro Morinaga, Naoki Yamaguchi, Kohei Yorita, "Study of background sources for disappearing track search at the LHC-ATLAS experiment", The Physical Society of Japan 2023 Annual Meeting, 2022/03/15, Online
Lecture	Daiya Akiyama, LHC-ATLAS 実験における消失飛跡探索の感度向上に向けた新しい解析手法の開発, 26th ICEPP symposium, 2022/02/20, Nagano

List of research achievements for application of Doctor of Science, Waseda University

Full Name : 秋山 大也

seal or signature



Date Submitted(yyyy/mm/dd): 2026/04/02

種別 (By Type)	題名、発表・発行掲載誌名、発表・発行年月、連名者（申請者含む） (theme, journal name, date & year of publication, name of authors inc. yourself)
Lecture	Daiya Akiyama, Shoji Asai, Kaji Toshiaki, Masahiko Saito, Ryu Sawada, Masahiro Morinaga, Naoki Yamaguchi, Kohei Yorita, Improvement of disappearance track search sensitivity by new track reconstruction at the LHC-ATLAS experiment, The Physical Society of Japan 2021 Autumn Meeting, 2021/09/17, Online
Lecture	Daiya Akiyama, Shoji Asai, Toshiaki Kaji, Masahiko Saito, Ryu Sawada, Takashi Mitani, Masahiro Morinaga, Naoki, Yamaguchi, Kohei Yorita, Establishment of background estimation for disappearing track analysis with vertex association method at the LHC-ATLAS experiment, The Physical Society of Japan 2021 Annual Meeting, 2021/03/12, Online
Other (Poster)	Daiya Akiyama, Hiroki Ito, "Performance of the ATLAS Silicon Strip Detector with improved calibrations", 156th LHCC Poster Session, 2023/11/27, CERN