

Graduate School of Advanced Science and Engineering
Waseda University

博士論文審査報告書
Doctoral Dissertation Review Report

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

2026/07

現代の素粒子物理学の標準模型は、これまでの多くの実験結果を高精度で説明し、2012年のヒッグス粒子発見によって予言する粒子は全て確認された。一方で、ヒッグス粒子の質量に関する階層性問題や、宇宙の質量の約4分の1を占める暗黒物質の候補粒子が存在しないことなど、標準模型では説明できない重要な問題が残されている。したがって、標準模型を超える新しい物理の探索は、現代素粒子物理学の中心的課題である。

これらの問題を解決する有力な理論的枠組みの一つが超対称性理論である。超対称性は、標準模型粒子に対応する超対称性パートナーの存在を予言し、階層性問題の自然な解決や暗黒物質候補を与え得る。しかし、LHC実験において超対称性粒子は未だ発見されておらず、特に生成断面積の小さい電弱生成過程や、質量差の小さい縮退スペクトラムには依然として広い未探索領域が残されている。

縮退した電弱ゲージノ・ヒグシーノ領域では、チャージノの崩壊で放出される粒子の運動量が極めて小さく、通常の解析手法では信号を捉えることが難しい。さらに、チャージノが有限の寿命を持つ場合、内部飛跡検出器の途中で崩壊し、外側にヒットを残さない「消失飛跡」として観測される。同様の実験的特徴は、ゲージ媒介型超対称性破れにおいてグラビティーノへ崩壊する長寿命スタウにも現れる。そのため、消失飛跡は質量縮退した超対称性暗黒物質探索に加え、長寿命荷電粒子探索としても重要な実験的特徴である。

本論文は、このような物理的背景のもと、LHC-ATLAS実験のRun 2陽子陽子衝突データを用いて、消失飛跡を特徴とする超対称性粒子を探索した研究をまとめたものである。質量縮退した電弱ゲージノ・ヒグシーノ探索では、崩壊で生じる荷電粒子の寿命が短く、従来の4層ピクセル飛跡では十分に捉えられない領域が存在する。また、高パイルアップ環境では偽ヒットや偽飛跡が増加し、短い飛跡の運動量分解能や背景事象の制御も解析感度を制限する。さらに、終状態に現れる低運動量パイ粒子は再構成が難しく、信号の特徴を十分に活用するためには専用の再構成手法が必要である。

これらの課題に対し、申請者は、3層飛跡、SCTヒットフィルター、ビーム衝突点を拘束条件として用いるVertex Constraint、低運動量パイ粒子の再構成、機械学習を用いた消失飛跡との関連付け、およびデータ駆動型の背景事象推定を組み合わせた新しい解析手法を構築した。これにより、従来解析では感度が限られていた短寿命領域および質量縮退領域に対する探索感度を大きく向上させた。これらの手法の構築と実データ解析への適用は、申請者の主体的な貢献として高く評価できる。本論文は8つの章で構成されており、次の2点が論文の骨子となっている。

- ① 消失飛跡および低運動量荷電粒子の新しい再構成手法の開発
- ② ATLAS 実験 Run 2 データを用いた超対称性暗黒物質および長寿命スタウの探索結果

以下に各章の概要と評価を述べる。

第 1 章では、標準模型の成功と未解決問題を概観した上で、超対称性理論および暗黒物質探索の重要性が述べられている。特に、質量縮退した超対称性粒子の探索において消失飛跡が有効な実験的特徴であることが説明され、本論文全体の動機づけが与えられている。

第 2 章では、本研究の理論的背景が整理されている。標準模型の問題点に対する解として超対称性理論を導入し、電弱ゲージノおよびヒグシーノ暗黒物質の重要性が説明されている。また、LHC における既存探索の制限を踏まえ、未探索領域として残る縮退スペクトラムの重要性を論じている。さらに、消失飛跡を生じる信号過程の理論的特徴に加え、類似した実験的特徴を持つ長寿命スタウの探索についても提案している。

第 3 章では、LHC 加速器および ATLAS 検出器の概要が述べられている。特に、消失飛跡の再構成に重要な内部飛跡検出器について、ピクセル検出器および SCT 検出器の構造と性能が整理されている。

第 4 章では、本解析に用いる Run 2 データ、モンテカルロ・シミュレーション、ならびに標準的な物理オブジェクトの再構成手法がまとめられている。データ品質、信号シミュレーション、電子、ミューオン、ジェット、消失横運動量の定義が整理され、以降の解析の前提が示されている。

第 5 章では、本論文の主要な技術的成果である消失飛跡および低運動量パイ粒子の再構成手法とその性能評価が述べられている。従来の 4 層飛跡再構成に対して、SCT ヒットフィルター等の改善により再構成効率を向上させるとともに、ピクセル検出器の内側 3 層のみを用いた 3 層飛跡を導入することで、より短寿命の荷電粒子に対する感度を得ている。また、Vertex Constraint を用いた運動量再構成により消失飛跡の運動量分解能を改善している。さらに、低運動量パイ粒子の再構成および機械学習 BDT を用いた消失飛跡との関連付けにより、ヒグシーノ信号に特有の情報を解析に取り込んでいる。

第 6 章では、本論文の主題である消失飛跡を用いた超対称性粒子探索の詳細が述べられている。信号事象と背景事象の特徴を整理した上で、事象選択、制御領域、検証領域、信号領域の定義が行われている。本解析では、検出器物質との相互作用や偽飛跡など、シミュレーションのみで高精度に評価することが難しい背景事象が重要となる。そのため、申請者はデータ駆動型の背景事象推定手法を構築し、制御領域と信号領域における横方向運動量分布を同時に扱う最尤フィットにより、背景事象を系統誤差とともに評価している。最終的に、4 つの信号領域における観測事象数と背景事象予測を比較し、ウィーノ、ヒグシーノ、およびスタウに対する 95% 信頼水準の棄却領域を設定している。

本研究の結果、ウィーノおよびヒグシーノ生成断面積に対する探索感度は、同一データを用いた前回解析と比べてそれぞれ約 2 倍に向上した。既存解析では十

分に探索されていなかった領域に感度を持つことが示された。最終的に 4 つの信号領域において合計 25 事象が観測され、最も感度の高い 4 層飛跡かつ高消失横運動量の信号領域において 1.9σ の超過が観測された。これより、ウィーノ質量では 660 GeV、ヒグシーノ質量では 225 GeV までの領域を棄却し、スタウについては寿命 1 ns の場合に CMSSM (制約付き最小超対称性標準模型) で質量 300 GeV まで、GMSB (ゲージ媒介超対称性破れ) では 320 GeV までの領域を棄却している。

第 7 章では、得られた結果の解釈と今後の展望が述べられている。信号領域で観測された事象について、低運動量粒子の性質、消失飛跡の運動量再構成、検出器物質との関係などを調べ、信号事象らしさを検討している。また、同一データを用いた前回解析との比較、新しく導入した解析技術が信号収量および背景事象に与える影響、既存の ATLAS および CMS 実験の結果との比較が議論されている。最後に、偽飛跡背景事象が今後の感度を制限する主要因であることを踏まえ、Run 3 相当のデータ量を用いた将来感度の見積もりが述べられている。

最終章では、本研究で得られた結果とその物理的意義が総括されている。消失飛跡および低運動量パイ粒子再構成により、質量縮退した超対称性一暗黒物質探索の感度を向上させたことがまとめられている。本研究は、超対称性理論において未探索領域として重要であった縮退スペクトラムと短寿命領域に新たな実験的感度を与えたものである。

以上を要約すると、本論文は、階層性問題および暗黒物質問題という素粒子物理学の根本的課題を背景として、LHC-ATLAS 実験のデータを用いて長寿命超対称性粒子を探索した研究である。申請者は、消失飛跡解析における主要な課題であった短寿命信号への感度不足、偽飛跡背景事象、運動量分解能、低運動量終状態粒子の再構成に対し、新しい再構成手法とデータ駆動型背景推定を導入することで探索感度を向上させた。これにより、ウィーノ・ヒグシーノ暗黒物質および長寿命スタウに対して、従来解析を上回る感度で制限を与えた。

結果そのものの物理的意義に加え、低信号収量や偽飛跡背景事象などの実験的課題に対して解析手法を構築し、実データ解析、背景推定、統計解釈、将来展望まで一貫してまとめた点は評価できる。以上により、本論文は博士（理学）の授与にふさわしいものとして認める。

2026 年 6 月

審査委員

(主査) 早稲田大学教授 博士（理学）東京大学 片岡 淳

(副査) 早稲田大学教授 博士（理学）広島大学 安倍 博之

東京大学教授 博士（理学）早稲田大学 寄田 浩平