

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 charginos based on a disappearing track signature  
in pp collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the full Run-2 ATLAS data

重心系エネルギー 13TeV の陽子-陽子衝突における  
ATLAS Run-2 全データを用いた消失飛跡を残す長寿命チャージノの探索

申請者  
(Applicant Name)  
Toshiaki KAJI  
加地 俊瑛

Department of Pure and Applied Physics, Research on Experimental Particle Physics

November, 2022

我々の世界が何から造られていてどのような仕組みで動いているのか、その根幹を解明することは素粒子物理学における課題である。2012年7月4日にヒッグス粒子の発見が報告されたことで、現代素粒子物理学の教科書とも言える標準模型に登場する素粒子は出揃った。しかし、標準模型は重力の正体や暗黒物質の存在などを説明することが出来ないため、不完全であることがわかっている。そのため、標準模型を超える新たな枠組みの構築が必須となるが、次に新しい粒子を発見することが出来ればその枠組みの構築への大きな足掛かりとなる。

標準模型に対してフェルミオンとボソンの対称性 SUSY (Supersymmetry) を導入することで、ヒッグス質量  $125 \text{ GeV}/c^2$  に対し補正項のスケールが大きすぎるという階層性問題を解決することが出来る。また、SUSY 粒子が TeV スケールに存在すれば電弱と強い相互作用が GUT スケールにおいて統一することも示唆されている。さらに LSP (the Lightest SUSY Particle) は暗黒物質の候補となり得るため、SUSY は標準模型の拡張模型として有力視されている。宇宙観測によって測定された暗黒物質の残存密度によると、LSP が純ビーノである可能性は低く、純ウィーノであれば質量約  $3 \text{ TeV}/c^2$ 、純ヒグシーノであれば質量約  $1 \text{ TeV}/c^2$  までにある可能性が高いと予測されている。

LHC (Large Hadron Collider) はスイスジュネーブ郊外にある欧州原子核研究機構 CERN が保有する陽子-陽子衝突型の円形加速器であり、Run-2 (2015-2018) では重心系エネルギー  $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$  での運用が行われた。ATLAS 実験は LHC で行われている主要4実験の内の1つで標準模型の精密測定や新物理の発見を主目的としており、TeV スケールの物理現象を探索することが出来る。ATLAS 実験でもこれまで様々な新粒子探索が行われてきたが、ヒッグス粒子発見以降その他の新粒子は未だ見つかっていない。その原因として考えられるのは、重心系エネルギーやデータ統計量が足りていないか、新粒子が生成されてはいるものの実験的に観測が出来ていないかである。グルイーノやスクォークなどの Strong SUSY 探索は終状態に複数のクォークと LSP を含むため、複数の高エネルギージェットと高い消失横運動量を用いて行うのが一般的であり、最大で質量約  $2 \text{ TeV}/c^2$  程度まで探索が行われている。一方で、ウィーノやヒグシーノなどの EWK (Electroweak) SUSY は Strong SUSY と比べて生成断面積が小さい上に終状態にハードなオブジェクトが無い場合観測が難しく、探索は一般的にレプトンと消失横運動量を用いて行われる。さらに、暗黒物質の正体が純ウィーノもしくは純ヒグシーノの場合は最も軽いチャージーノ  $\tilde{\chi}_1^\pm$  とニュートラリーノ  $\tilde{\chi}_1^0$  の質量は縮退すると予測されており、レプトンを用いた探索も出来ない。質量差  $\Delta m$  はウィーノの場合で約  $160 \text{ MeV}/c^2$ 、ヒグシーノの場合で約  $300 \text{ MeV}/c^2$  と非常に小さいので  $\tilde{\chi}_1^\pm$  は有意な寿命  $\tau_{\tilde{\chi}_1^\pm}$  を持ち、ウィーノの場合で約  $0.2 \text{ ns}$ 、ヒグシーノの場合で約  $0.04 \text{ ns}$  となる。この場合、一部の  $\tilde{\chi}_1^\pm$  は  $\mathcal{O}(1-10 \text{ cm})$  飛び内部飛跡検出器を何層か通過することで短い飛跡を残した後、 $\tilde{\chi}_1^0$  とパイ粒子へと崩壊する。 $\tilde{\chi}_1^0$  は消失横運動量としてのみ観測され、衝突点から離れた生成点

を持つ低運動量のパイ粒子は再構成されないため、 $\tilde{\chi}_1^\pm$ の飛跡は消失飛跡と呼ばれている。ATLAS実験では通常長い( $\sim 1$  m)飛跡しか再構成されないが、 $\tilde{\chi}_1^\pm$ の消失飛跡を再構成することが出来れば重要なEWK SUSYの縮退領域を探索することが出来る。本論文では、ピクセル検出器4層から成るピクセル飛跡(12 cm)として再構成された消失飛跡を鍵として、 $\sqrt{s} = 13$  TeVにおける $136 \text{ fb}^{-1}$ のATLAS Run-2全データを用いた長寿命 $\tilde{\chi}_1^\pm$ の探索結果についてまとめる。

第1章では本解析の動機と本論文の構成についてまとめる。

第2章では、標準模型の抱える問題点について言及し、そのうちの一つである階層性問題への解決策として有力視されている超対称性SUSYについての導入を行う。また、暗黒物質候補となるLSPの現状の探索結果についてまとめ、ウィーノやヒグシーノがLSPである場合に $\tilde{\chi}_1^\pm$ と $\tilde{\chi}_1^0$ の質量が縮退することで $\tilde{\chi}_1^\pm$ が長寿命となり消失飛跡を残すことを示す。

第3章ではLHCとATLAS検出器についてまとめる。LHCに関しては加速機構及び基本性能についてまとめた後、これまで及び今後の運転計画について紹介する。ATLAS検出器に関しては、運動量測定において重要となる超伝導マグネットシステム、飛跡再構成で軸となる内部飛跡検出器、粒子識別や背景事象分離で用いる電磁・ハドロンカロリメータ及びミュオン検出器それぞれの構造についてまとめる。最後にトリガー及びデータ収集システムについて紹介する。

第4章では物理解析で使用する各オブジェクトの定義についてまとめる。ATLAS実験では通常 $\mathcal{O}(1 \text{ m})$ の長い飛跡のみ再構成されるが、消失飛跡探索のためにヒット数などの条件を緩めて標準飛跡で使われなかったヒットのみを用いて再構成しなおすことでより12 cm程度までの短い飛跡を再構成する手法を開発した。本論文ではピクセル検出器4層で構成される飛跡をピクセル飛跡と呼び、基本性能に関しては次章で詳しくまとめる。

第5章では本研究で使用される特殊なオブジェクトであり、重要な役割を担うピクセル飛跡の基本性能についてまとめる。まず、ピクセル飛跡の再構成率は検出器の状態に依存するがシミュレーションモデルでは現実の検出器状態を完全には再現しないため、Z粒子がミュオン対へ崩壊する事象を用いて差異を補正する。次にシグナルサンプルの $\tilde{\chi}_1^\pm$ に対する飛跡再構成率及び飛跡パラメータの分解能についてまとめる。崩壊半径約122 mm  $\sim$  299 mmの $\tilde{\chi}_1^\pm$ はピクセル飛跡として再構成することが出来る。運動量分解能は飛跡長が短いためあまり良くないが方向分解能は十分である。最後に、標準飛跡からピクセル飛跡の運動量分布を推測するために必要な分解能関数の測定結果についてまとめる。分解能関数を実データで測定するために、標準飛跡をピクセル検出器のみで再構成し直すことで人工的なピクセル飛跡を作り出す再飛跡再構成手法を用いる。分解能関数はZ粒子がミュオン対へ崩壊する事象と電子対へ崩壊する事象を用いて測定し、電子とミュオン粒子の二種類の関数を作成する。シミュレーションサンプルを用いた研究

により、 $\tilde{\chi}_1^\pm$  は電子に近い運動量分解能を、パイ粒子はミュー粒子に近い運動量分解能を示したため、それぞれ近い方の分解能関数を使用する。

第6章はピクセル飛跡として再構成される消失飛跡を用いた  $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$  における  $136 \text{ fb}^{-1}$  の ATLAS Run-2 全データによる長寿命  $\tilde{\chi}_1^\pm$  の探索結果についてまとめる。本研究では電弱ゲージノを介して  $\tilde{\chi}_1^\pm - \tilde{\chi}_1^\mp$  もしくは  $\tilde{\chi}_1^\pm - \tilde{\chi}_1^0$  が直接生成される EWK 生成過程と、グルイーノ対生成の後それぞれのグルイーノが二つのクォークと  $\tilde{\chi}_1^\pm$  もしくは  $\tilde{\chi}_1^0$  へと崩壊する Strong 生成過程を探索の対象としている。EWK 生成過程では消失横運動量でトリガーをかけるために初期状態からの高運動量の放射ジェットが必要となる。どちらの生成過程でも  $\tilde{\chi}_1^0$  が消失横運動量に大きく寄与するため、大きな消失横運動量とジェット、消失飛跡候補を持つことが信号事象の特徴となる。本解析では、ピクセル検出器4層のみで構成されるピクセル飛跡として再構成された消失飛跡のみを探索の対象とした。背景事象の要因としては、ミュー粒子や電子、ハドロンといった粒子が散乱や制動放射によって途中で折れ曲がることで短い飛跡として再構成されてしまったピクセル飛跡や、異なる起源のヒット同士を誤って結んでしまうことで偶然再構成された実在しないフェイク飛跡が考えられる。信号領域における背景事象の運動量分布は、信号事象のトポロジーと同じで  $\tilde{\chi}_1^\pm$  候補のみ通常粒子と置き換えた事象に対し実データで見積もった補正項と分解能関数を適用することで推測する。探索の結果、EWK 生成過程では予想事象数  $3.0 \pm 0.7$  に対し観測事象数 3, Strong 生成過程では  $0.84 \pm 0.33$  に対し 1 と、どちらも信号領域に有意な超過は見られなかった。そのため、本解析の結果を基に 95% の信頼度で信号に対する棄却領域を計算した。EWK 生成過程では約  $\tau_{\tilde{\chi}_1^\pm} = 0.2 \text{ ns}$  のウィーノに対して  $m(\tilde{\chi}_1^\pm) = 660 \text{ GeV}/c^2$ , 約  $\tau_{\tilde{\chi}_1^\pm} = 0.04 \text{ ns}$  のヒグシーノに対して  $m(\tilde{\chi}_1^\pm) = 210 \text{ GeV}/c^2$  まで制限を更新した。Strong 生成過程では  $\tau_{\tilde{\chi}_1^\pm} = 0.2 \text{ ns}$  のウィーノに対して最大で  $m(\tilde{g}) = 2.1 \text{ TeV}/c^2$ ,  $m(\tilde{\chi}_1^\pm) = 1.4 \text{ TeV}/c^2$  まで制限を更新した。

第7章では前章でまとめた  $\tilde{\chi}_1^\pm$  探索の結果について他の探索結果と比較し、議論する。また、今後の消失飛跡探索の物理感度を向上させるためのいくつかの改善案について紹介する。まず、前章で行なった消失飛跡探索では4層飛跡のみ探索に用いたが、より短い飛跡や長い飛跡も用いることで探索領域を広げることが出来る。次に、一次衝突点をヒットとみなして運動量を再計算することで、運動量分解能を改善し、背景事象との分離を良くすることが出来る。その他の背景事象削減方法として、 $\tilde{\chi}_1^\pm$  の娘粒子である低運動量パイ粒子の同定やピクセル検出器におけるエネルギー損失情報の利用なども考えられる。さらに、信号発見後は質量の決定精度が重要となるが、大統計があれば消失飛跡を2本要求することで質量を再構成することが出来る。これらの改善案についてまとめ、今後の探索における予想到達感度及び質量の決定精度について見積もりを行う。

第8章は総括とし、本論文の主旨である消失飛跡探索の結果と今後の展望についてまとめる。

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

Full Name 加地 俊瑛

seal or signature

Date Submitted(yyyy/mm/dd): 2022/11/2

種類別 (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)
○Paper	T.Kaji, et al., “Search for long-lived charginos based on a disappearing-track signature using 136 fb <sup>-1</sup> of pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector”, Eur. Phys. J. C 82 (2022) 606
○Paper	T.Kaji, et al., “Searching for long-lived particles beyond the Standard Model at the Large Hadron Collider”, J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 47 090501 (2020)
○Paper	T.Kaji, S.Asai, S.Chigusa, T.Moroi, M.Saito, R.Sawada, J.Tanaka, K.Terashi, K.Uno, “Studying gaugino masses in supersymmetric model at future 100 TeV pp collider”, JHEP 05 (2019) 179
○Paper	T.Kaji, et al., [ATLAS Collaboration], “Search for long-lived charginos based on a disappearing-track signature in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector”, JHEP 06 (2018) 022
Paper	T.Kaji, et al., [ATLAS Collaboration], “The ATLAS Fast TracKer system”, JINST 16 (2021) P07006
Lecture	加地俊瑛, 秋山大也, 浅井祥仁, 齊藤真彦, 澤田龍, 森永真央, 山口尚輝, 寄田浩平, “LHC-ATLAS実験Run2全データによる消失飛跡を用いた長寿命チャージノ探索結果”, 日本物理学会2021年秋季大会, 2021年9月17日
Lecture	加地俊瑛, 浅井祥仁, 齊藤真彦, 澤田龍, 森永真央, 山口尚輝, 寄田浩平, “LHC-ATLAS実験Run2全データによる消失飛跡を用いた長寿命チャージノ探索”, 日本物理学会2020年秋季大会, 2020年9月14日
Lecture	Toshiaki Kaji, “ATLAS disappearing track”, LLP workshop 2019, The University of Tokyo, 22 November 2019
Lecture	加地俊瑛, 浅井祥仁, 内田健太, 齊藤真彦, 澤田龍, 鶴田亮, 森永真央, 寄田浩平, “LHC-ATLAS実験Run2における消失飛跡を用いたグルイノ対生成による長寿命チャージノ探索”, 日本物理学会2019年秋季大会, 2019年9月19日
Lecture	加地俊瑛, 浅井祥仁, 内田健太, 齊藤真彦, 澤田龍, 鶴田亮, 寄田浩平, “LHC-ATLAS実験Run2における消失飛跡検出による長寿命荷電ゲージノ探索の感度評価”, 日本物理学会第74回年次大会, 2019年3月14日
Lecture	Toshiaki Kaji, “Status and plan of the search for disappearing tracks in short lifetime region at the LHC-ATLAS experiment in Run2”, LLP workshop 2018, Tokyo Institute of Technology, 18 September 2018
Lecture	加地俊瑛, 浅井祥仁, 内田健太, 齊藤真彦, 澤田龍, 寄田浩平, “LHC-ATLAS実験Run2における消失飛跡探索のための短飛跡再構成の性能評価”, 日本物理学会2018年秋季大会, 2018年9月16日
Lecture	加地俊瑛, 浅井祥二, 内田健太, 小坂井千紘, 齊藤真彦, 澤田龍, 寄田浩平, “LHC-ATLAS実験Run2における大きなdE/dxを持つ短い消失飛跡探索のための背景事象研究”, 日本物理学会2017年秋季大会, 2017年9月12日
Lecture	Toshiaki Kaji for the ATLAS Collaboration, “Search for winos using a disappearing track signature in ATLAS”, 52nd Recontres de Moriond EW 2017, 21 March 2017

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

Full Name 加地 俊瑛

seal or signature

Date Submitted(yyyy/mm/dd): 2022/11/2

種類別 (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	加地俊瑛, 浅井祥二, 小坂井千紘, 齊藤真彦, 澤田龍, 山中隆志, 寄田浩平, “LHC-ATLAS 実験 Run2 における大きな $dE/dx$ を持つ短い消失飛跡検出による長寿命荷電ゲージノ探索”, 日本物理学会第72回年次大会, 2017年3月18日
Lecture	加地俊瑛, 小坂井千紘, 齊藤真彦, 山本真平, 寄田浩平, “LHC-ATLAS 実験 Run2 における長寿命荷電ゲージノ探索に向けた消失飛跡再構成法の性能評価”, 日本物理学会第71回年次大会, 2016年3月19日
Publication	T.Kaji, et al., [ATLAS Collaboration], “Search for long-lived charginos based on a disappearing-track signature using 136 fb <sup>-1</sup> of pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector”, ATLAS-CONF-2021-015 (2021)
Publication	T.Kaji, et al., [ATLAS Collaboration], “Performance of tracking and vertexing techniques for a disappearing track plus soft track signature with the ATLAS detector”, ATL-PHYS-PUB-2019-011 (2019)
Publication	T.Kaji, et al., [ATLAS Collaboration], “Search for direct pair production of higgsinos by the reinterpretation of the disappearing track analysis with 36.1 fb <sup>-1</sup> of $\sqrt{s} = 13$ TeV data collected with the ATLAS experiment”, ATL-PHYS-PUB-2017-019 (2017)