

論文審査の結果の要旨

氏名 宇野 健太

本論文は10章からなる。第1章はイントロダクションであり、素粒子物理の標準模型で残された問題点の説明と、それらを解決する理論的拡張の候補としての超対称性の導入、および超対称性粒子探索の現状についてレビューされている。さらにこれらを踏まえて、本論文で述べられた研究の意義と、機械学習の手法を導入する研究戦略について述べられている。

第2章は、本研究で用いたデータを収集するために使われた実験装置についての説明である。LHC 加速器と、ATLAS 検出器を構成する様々な粒子測定器およびトリガー・データ収集システムについて、簡潔に構成と性能が述べられている。

第3章では、解析に用いたデータセットおよび背景事象、信号事象それぞれの事象をシミュレートするために使用されたモンテカルロシミュレーションのツールについて解説されている。

第4章では、陽子-陽子衝突で生成された粒子の情報を ATLAS 検出器のデータからどのように再構成したかが述べられている。本研究に特に重要なジェットのエネルギー測定については、較正方法と不定性の見積もりについて詳しく説明されている。

第5章は主に事象選択に関する説明である。まず、本解析で最も重要なジェットの質を保証する手順に関して述べている。そして、信号の選択に有用と思われる運動学的変数の候補の説明に続き、本研究の鍵である、多変量解析の手法のひとつ Boosted Decision Tree (BDT) の概念の説明がある。入力変数の数を抑えつつ、広い探索領域にわたって高い感度を持たせられるよう、詳細な感度の見積もりを行った過程が述べられている。どの変数が感度に結びつくかひとつひとつ検証した結果、グルイーノの崩壊過程やグルイーノやニュートラリーノの質量に応じて設定した8つの探索領域のそれぞれに10から12の入力変数を選び出したことが説明されている。

第6章は、標準模型で記述される反応に起因する背景事象の見積もりに関する説明である。背景事象を原因となる反応モードに基づいて5種類に分類し、それぞれに対して詳細な分析を行い、信号領域と運動学的に似通った分布を持つコントロールサンプルを得る方法を開発した。これにより実データを用いてモンテカルロシミュレーションを補正し、信頼度の高い見積もりを行うことに成功している。

第7章では、BDT を用いた解析の妥当性を詳細に評価している。まず、独立なシミュレーション間で訓練データと検証データを作って分布を比較し、過学習が起きていないことを確認した。多変数解析では入力変数の間の相関をも用いるため、各変数の次元分

布だけでなく相関まで含めて理解されている必要がある。そこで、データとシミュレーションの間で入力変数間の相関を比較し、全てよく再現されていることを示した。さらに、出力変数の分布が予想される振る舞いをしていることを確認した。

第 8 章は統計的な解析手法の説明で、**profile likelihood ratio** に基づくいわゆる **CLs** 法による仮説検定の方法を用いたことを述べている。また、系統誤差について原因を列挙し、それぞれの誤差の大きさを見積もった結果がまとめられている。

第 9 章では、最終的に得られた結果とその意義について議論されている。2015 年から 2018 年に収集された、積分ルミノシティ 139fb^{-1} に相当するデータを用いてグルイーノが生成された事象を探索した結果、信号領域に有意な事象数の超過はみられなかった。この結果から、グルイーノの質量で 2.2TeV まで、最も軽いニュートラリーノの質量に対し 1.2TeV までの領域を **95%**信頼度で排除した。これは同様の探索において、現在世界で最も厳しい制限である。また、以前の解析方法と感度を直接比較した結果、本研究で開発した機械学習を用いた解析法を適用することにより、グルイーノや最も軽いニュートラリーノの質量に対する制限を $100\text{-}200\text{GeV}$ 改善できていることが示された。

第 10 章は結論であり、本研究の目的、結果、意義が簡潔にまとめられている。

本研究は、超対称性粒子の探索において、これまでで最も厳しい制限のひとつを得るとともに、機械学習を利用するための手順を確立したものであり、大きな科学的な意義が認められる。なお、本論文に述べられている研究で使用した装置は国際共同研究グループにより運営されているものであるが、本研究の最も本質的な部分である、**Boosted Decision Tree** を用いた事象選択の確立をはじめ、データ解析についてはすべて論文提出者が主体となって行ったものであり、論文提出者の寄与およびオリジナリティが十分であると判断する。

したがって、博士（理学）の学位を授与できると認める。