(続紙 1)

京都大学	博士 (理学)	氏名	三野 裕哉
論文題目	Search for higgsinos with compressed mass spectra using low-momentum mildly-displaced tracks with the ATLAS detector (ATLAS実験における微小変位を持つ低運動量飛跡を用いた縮退した質量階層を持つヒグシーノの探索)		
(論文内容の要旨)			
<p>本論文は、重心系エネルギー13TeVの陽子・陽子衝突を用いて行なった、超対称性理論のnaturalnessに注目した際に要請される電弱スケール質量のヒグシーノの探索について論じている。ヒグシーノ、中でも軽い方の中性ヒグシーノが最軽超対称性粒子 (Lightest SUSY particle/LSP) でダークマター候補である場合を考え、ダークマター直接探索実験の制限を回避する、ウィーノ・ビーノが数TeV以上の質量になるシナリオに着目している。このときヒグシーノは互いに質量が縮退し、荷電ヒグシーノとLSPの質量差は典型的に0.3-1GeVになるが、この領域にはLEP以来感度を持たせることに成功した実験はひとつもない。本論文では、縮退によって荷電ヒグシーノが10ps程度の寿命を持つこと、その結果崩壊で生じた荷電パイオンの飛跡が陽子衝突点を通らず数mmずれた場所に外挿されること (“微小変位”) に注目した新しい解析を構築し、欧州原子核研究機構CERNに設置された大型ハドロン衝突型加速器 (Large Hadron Collider, LHC) における国際共同実験ATLASにて、第2期運転 (2015-2018) で取得された全データ (積分輝度140/fb) を用いて探索を行った結果をまとめている。</p> <p>解析ではまず検出器のトリガー条件のため、高横運動量の始状態放射ジェットと、その反対方向に大きな消失横運動量があることを要求する。これはヒグシーノ信号事象ではジェットに反跳してLSP (観測されない) が高運動量になることに因む。さらに荷電ヒグシーノ由来の長寿命荷電パイオンを想定して、衝突点に対して数mmの変位を持つ低横運動量の飛跡 (2-5GeV) を要求する。縮退した信号の探索では、標準模型過程の膨大な背景事象を落とす手立てがないことが常に感度のボトルネックになっていたが、この微小変位飛跡の要求はS/N比にして3桁ほどの決定的な改善をもたらし、信号とおおよそ同等のレートにまで背景事象を落とすことに成功している。また微小変位飛跡の選択には、周囲に他の荷電粒子がないことを要求するなど非常に熟慮された条件が課されており、これによって信号事象でも典型的に80%以上の確率で荷電ヒグシーノ由来の荷電パイオン飛跡を選び出すことができている。LHC第2期運転では陽子の同時衝突数が平均30以上、毎事象再構成される平均飛跡数が1000を超える環境であることを考えるとこれは驚異的である。</p> <p>最終的に残る背景事象は主に (1) $W \rightarrow \tau \nu$ でτが微小変位飛跡となる事象、および (2) ジェットや衝突陽子残滓から出てくる長寿命ハドロン (K_s^0など) が微小変位飛跡となる事象である。前者は実データのコントロールサンプルを用いて補正したモンテカルロ・シミュレーション、後者は実データサンプルのみで推定を行い、さらに補助的な様々なコントロールサンプルを用いて推定手法の妥当性が検証されている。</p> <p>探索結果は、標準模型の背景事象の予想と無矛盾であり、これにより上述のシナリオに対する制限を導出した。ヒグシーノ質量差0.3-1GeVの領域に対してヒグシーノ質量にして最大で171GeVまで棄却し、LEP以来初となる実験制限の更新を果たした。また他の質量差領域の探索結果と合わせることで、naturalnessに動機付けられる電弱スケール質量を持つヒグシーノに対し網羅的で強い制限をつけることに成功した。</p>			

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

論文は11章から構成されている。1章での一般的な導入ののち、2章では本論文で扱うヒグシーノ探索の現象論的背景と動機を丁寧に論じている。3章ではLHC加速器とATLAS検出器、4章では解析に用いた実験データとシミュレーション、5章では粒子再構成アルゴリズムの詳細な説明を行っている。6章、7章、8章では実際の解析における事象選択、背景事象の調査と推定、系統誤差についての議論をそれぞれ行っている。9章では予想と実測を比較し、両者の統計精度内での一致からヒグシーノに対する制限を導出している。10章では得られた制限の物理的意義について、ダークマター直接実験や電子双極子測定実験など関連する探索結果との比較や、この先のLHC第3期運転・高輝度LHC運転で統計量が増えた際に到達できる感度の予測を交えて行い、11章で結論を簡潔に結んでいる。論理が整理されており非常に明快である。

超対称性理論は標準理論を超える新物理理論でも、大統一を可能とするなど特に魅力的な性質を持つ理論体系である。中でもnaturalnessのように軽い質量領域に新粒子の存在を予言する超対称性理論のシナリオは、実験での検証ができるため重要である。電弱スケールのヒグシーノの探索はLHCでは2016年頃から本格化し、これまでにほとんどのシナリオをカバーしているが、本論文で対象としている質量差0.3-1GeVの領域は、実験的な難易度が極めて高いため感度を持てる探索が存在しなかった。これはヒグシーノの崩壊で狭い質量差から生じる数GeVの低運動量のパイオンを指針に探索を行う必要があるために生じる困難である。本論文の元となった現象論論文 (Fukuda et al. 2020) のヒグシーノ寿命を利用するアイデアはゲームチェンジャーであったが、それでも低運動量の長寿命粒子が背景事象として無数発生するハドロン衝突実験のタフな環境で実現可能かは極めて非自明であった。アイデアを実験に実装し、この極めて難しい最後の手付かずのヒグシーノ質量差領域の探索を完遂した本論文の成果には、大きな学術的インパクトがある。また今回対象にした質量差領域が、原子核反跳を用いたダークマター直接探索実験や電子の電気双極子測定でも感度が持てなかった領域であったことも、この結果の価値を高めている。

また三野氏は本論文で行われたデータ解析の筆頭研究者として、ほぼ全ての局面を主導した。微小変位飛跡というアイデアの原理検証を筆頭に、背景事象の詳細な調査とその削減手法の開発、背景事象の推定、理論への制限の導出とその意義の議論に至る全てにおいて主要な貢献がある。また補遺に記載があるように、三野氏は2029年より始まるLHC高輝度運転におけるATLAS実験ミュオントリガーシステムの読み出し電子回路開発においても主力として活躍するなど、数千人が参加する巨大なコラボレーションにおいても出色的な研究成果を残してきた。

以上をもって本論文は博士(理学)の学位論文として価値あるものと認める。また令和6年5月28日に論文内容とそれに関連した事項について試問を行い、三野氏の質問への的確な回答を通じて、本論文で議論されている研究と当該学術分野への深い理解を確認した。その結果、合格と認めた。

要旨公表可能日： 年 月 日以降