

(続紙 1)

京都大学	博士 (理学)	氏名	赤塚 駿一
論文題目	Search for chargino and neutralino production using final states with two soft leptons in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV		
(論文内容の要旨)			
<p>本論文は、世界最高エネルギーでの陽子-陽子衝突による超対称性粒子探索の結果について報告している。</p> <p>2012年にヒッグス粒子が発見され、素粒子標準模型は完成をみたが、現在測定されているヒッグス粒子の質量は、標準模型粒子のループを介した輻射補正に比べて10桁以上小さいことが知られている。これはヒッグス粒子の裸の質量とその輻射補正の値が極めて高い精度で一致しているということを示しており、この不自然な状態は「ヒッグス粒子の質量階層性問題」と呼ばれ、素粒子標準模型における最重要な未解決問題の1つである。また、銀河中に存在することが強く示唆されている暗黒物質について、候補となる素粒子が標準模型には含まれていない、という大きな問題も抱えている。</p> <p>超対称性理論はこれらの標準模型における問題を同時に解決することができる有望な理論であるが、この理論が预言する新しい粒子はいまだ発見されていない。この事実は、超対称性粒子のうち強い相互作用をするものについては質量が大きく、現在の実験では発見できないことを示唆する。このような状況において、現在は弱い相互作用のみを行う超対称性粒子の探索の研究が精力的に進んでいる。</p> <p>本論文では、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) を用いた世界最高エネルギーでの陽子-陽子衝突事象において、2015年から2018年にATLAS検出器で得られた139/fbの実験データを用いた超対称性粒子探索、特に電弱相互作用により質量の縮退したニュートラリーノおよびチャージーノが生成する事象の探索について報告されている。赤塚氏は、これらの粒子の質量差が小さい場合に、暗黒物質の残存量が上手く説明されることに着目し探索を行った。しかし、質量差が小さい場合には粒子の崩壊で生じるレプトンの運動量が低くなるため、検出および再構成効率が低下してしまう。赤塚氏はこれに対して、低い横運動量に特化した新しいレプトン再構成手法を開発し、電子では 4.5 GeV、ミュー粒子では 3 GeV まで閾値を下げることに成功した。</p> <p>論文では、まず物理的背景と超対称性粒子探索の動機について述べたのち、LHC加速器とATLAS検出器について説明している。後半は物理解析についてであり、取得したデータの説明、解析に必要な物理オブジェクトの再構成手法について解説したのちに、解析の方針と背景事象の見積り、系統誤差について詳しく述べられている。残念ながら新粒子の信号は発見されなかったが、最終的に超対称性粒子の質量領域に対する制限を結果として導いている。</p> <p>まとめると、本論文では、標準模型の問題を解決し得る新物理として超対称性粒子のうち弱い相互作用を介して生成する粒子に着目し、特に物理的動機の強い質量差が小さい場合について、レプトンに対する検出効率を改善することで従来よりも広い質量領域まで制限を加えることができた。</p>			

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

本学位申請論文は、LHC-ATLAS実験における質量の縮退した超対称性粒子、ニュートラリーノおよびチャージーノ探索の最新結果について発表している。もし超対称性が存在すれば、ヒッグス質量の輻射補正における階層性問題や、暗黒物質の起源を解決する可能性があるため、この探索は非常に重要である。

本論文で赤塚氏は、標準模型における問題点と研究の物理的意義を明確に説明し、その後、超対称性理論のうち特に標準模型に最小限の粒子を加えて拡張したMinimal Supersymmetric Model(MSSM)について解説している。赤塚氏は、MSSMのパラメータ領域のうち、質量階層性問題を自然に解決する「ヒッグシーノシナリオ」および暗黒物質の残存量をうまく説明する「ウィーノ・ビーノシナリオ」の2つに着目し、詳しく検討している。

そして、LHC加速器とATLAS検出器を紹介し、そこで測定する電子、ミューオン、ジェットなどの物理オブジェクトについて丁寧に説明している。特に、今回赤塚氏が解析に導入した新しい低運動量のレプトン再構成手法により、従来よりも低い横運動量領域において、背景事象に対して高い分離能力を持つということが示されており、赤塚氏の先見性や物理に対する深い理解が読み取れる。

赤塚氏が今回行ったのは、2番目に重いニュートラリーノが最も軽いニュートラリーノに崩壊するとき生じる2つのレプトンを用いて超対称性粒子の生成事象を同定する物理解析であった。赤塚氏はさらに、これらの粒子の質量差が小さい場合に着目し、ここに特化した解析を行うことで物理動機の高い質量領域に対して高い感度を得られることを示している。また、レプトン以外の粒子がレプトンとして再構成されることに由来する背景事象は横運動量が小さくなるほど増加し、さらにシミュレーションで再現することが難しいため、信号の寄与の少ないコントロール領域を複数定義して、データを用いた見積もりを行っている。これらの非常に複雑な物理解析は、物理そのものに加えて統計解析技術に対する深い理解に基づいていることがわかる。

最終的に得られた背景事象の見積もりに対して有意な事象数の超過は見られず、超対称性粒子由来の事象の兆候は発見できなかったが、この結果から、ヒッグシーノシナリオ、およびウィーノ・ビーノシナリオにおける質量領域に対してこれまでで最も厳しい制約を与えた。

赤塚氏はさらに、多変量解析を用いた新たなレプトン再構成の手法を開発し、将来の探索感度の向上に向けた研究を行った。この手法を適用することで、ウィーノ・ビーノシナリオにおいて質量差が10 GeV以上の領域での探索範囲をさらに改善できることを示しており、素粒子物理学の今後の指針にも示唆を与える重要な結果であると言える。

以上のように、ATLAS実験という3000人規模の非常に大きな国際共同研究の成果による本論文の結果に対し、様々な新しい解析手法を確立した点において、赤塚氏の貢献は非常に大きいと判断した。

よって、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2年3月12日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行い、赤塚氏は多くの質問にも的確に解答した。その結果、合格と認めた。

要旨公表可能日： 2020年 6月 1日以降