

( 続紙 1 )

京都大学	博士 ( 理学 )	氏名	田代 拓也
論文題目	Search for single production of Vector Like Quarks using the LHC pp collision data at $\sqrt{s}=13$ TeV collected with the ATLAS detector		
(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-陽子衝突による新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。この問題を解決するような物理モデルのいくつかで Vector Like Quark (VLQ) と呼ばれる粒子の存在が予言されている。VLQ はカイラリティの左手系と右手系が弱SU(2)の下で同じ表現に属するクォークであり、1 TeV 程度の質量を持つ VLQ を導入することで階層性問題を自然に解決することができると期待されており、これを探索、発見するため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-陽子衝突事象について、2015年から2016年にATLAS 検出器で得られた 36.1/fb の実験データを用いたVLQ探索の結果について報告されている。VLQ の探索は過去の LHC のデータを用いた研究でもいくつか行われたが、それらは VLQ の対生成事象のみを用いた探索であった。田代氏は、質量1 TeV 程度の VLQ では単一生成の生成断面積が対生成の生成断面積よりも大きくなり得ることに着目し、より大きな質量まで感度のある探索を実現するために VLQ 単一生成に特化した解析手法を開発した。</p> <p>VLQ の崩壊チャンネルは複数あるが、そのうち VLQ が Z ボソンとトップクォークに崩壊するチャンネル (<math>T \rightarrow Zt</math>) は、以下のような理由により VLQ 探索に有用であることが示されている。Z が荷電レプトン対 (<math>e+e-</math> または <math>\mu+\mu-</math>) に崩壊する事象を用いることで、パートン散乱のような Z ボソンを含まない背景事象を大きく削減することができる。また、この崩壊で生じるトップクォークは 200 GeV 以上の大きな運動量を持っており、今回新たに導入された boosted top tagger と呼ばれるトップクォークの同定手法により高い効率で同定することができるので、Zボソンとジェットが随伴して生成するような背景事象についても高い削減効率を得ることができるためである。</p> <p>論文では、まず物理的背景とVLQ 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VLQ は発見されなかったが、最終的に VLQ の質量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粒子としてVLQに着目し、これまでには研究が行われてこなかった生成モードの探索について報告している。結果として、この研究により従来よりも高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 Vector Like Quark (VLQ) 探索の最新結果について発表している。素粒子標準模型における大きな問題の1つは、ヒッグス粒子の質量における「不自然さ」、いわゆる階層性問題であるが、もしVLQが存在すれば、ヒッグス質量の輻射補正においてこれが寄与することで、問題を解決できる可能性があるため、この探索は非常に重要である。VLQ探索は過去のLHCにおける研究でも行われてきたが、それらはVLQの対生成事象のみを用いた探索であった。田代氏は、質量1 TeV程度のVLQ単一生成の生成断面積が対生成の生成断面積よりも大きくなり得ることに着目し、より大きな質量まで感度のある探索を実現するためにVLQ単一生成に特化した解析手法を開発した上で、世界で初となる探索を行った。

本論文で田代氏は、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VLQを预言する物理モデルについて詳しく解説している。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、今回田代氏が初めて解析に導入したトップクォーク同定技術(boosted top tagger)は、高い質量の新粒子から崩壊してできたトップクォークを1つのジェットとして再構成することで、非常に効率よく検出できることが示されており、田代氏の先見性や物理に対する深い理解が読み取れる。

田代氏が今回行ったのは、VLQがZボソンとトップクォークに崩壊するチャンネル( $T \rightarrow Zt$ )の物理解析であった。田代氏はさらに、Zが軽いレプトンに崩壊しトップクォークがハドロン崩壊するモードに着目し、これを用いることで高い感度を得られることを示している。また、本解析における背景事象の90%以上がZボソンを含んだ事象であることを示した上で、それを精密に見積もるため、VLQの信号の寄与の少ないコントロール領域を定義し、そこでの測定データとモンテカルロシミュレーションで作成した背景事象の比較を行うことで見積もりの不定性を抑えている。これにより、シミュレーションのみによる予想に比べて約65%不定性を削減できている。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、信号領域での観測データとモンテカルロシミュレーションの比較により、観測データは背景事象のみの仮定と global p値 0.79 で一致し、local significance は最大で  $2.0\sigma$  であった。この結果からVLQ単一生成の生成断面積と  $T \rightarrow Zt$  の崩壊分岐比の積に制限をつけ、また1200 GeV以下の質量のVLQに関して標準模型粒子との混合角に制限をつけている。これは同時に発表されたVLQ対生成を用いた解析による制限である1030 GeVよりも重く、単一生成の解析により従来の手法を用いた解析よりもより重い質量のVLQまで探索領域を広げること成功している。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、田代氏の貢献は非常に大きいと判断した。またこの結果は素粒子物理学の今後の指針にも示唆を与えるものである。

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、平成31年1月15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、田代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： 2019 年 4月 1日以降