

氏名(本籍)	なかむらこうじ 中村浩二(東京都)
学位の種類	博士(理学)
学位記番号	博甲第4904号
学位授与年月日	平成21年3月25日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
審査研究科	数理解物質科学研究科
学位論文題目	Measurement of the Single Top Quark Production Cross Section in 1.96-TeV Proton-Antiproton Collisions (重心系エネルギー 1.96 TeV の陽子・反陽子衝突におけるトップ・クォーク単一生成断面積の測定)
主査	筑波大学教授 博士(理学) 受川史彦
副査	筑波大学教授 理学博士 金信弘
副査	筑波大学准教授 理学博士 吉江友照
副査	筑波大学講師 理学博士 原和彦

論文の内容の要旨

本論文は、米国フェルミ国立加速器研究所のテバトロン加速器を用いた重心系エネルギー 1.8 TeV の陽子・反陽子衝突におけるトップ・クォーク単一生成過程について、Collider Detector at Fermilab (CDF) 実験により取得された衝突事象を解析し、その生成断面積の測定を報告したものである。トップ・クォークは、基本物質粒子として6種類存在するクォークのうち最も質量が大きいもので、1994年にCDF実験により発見された。陽子・反陽子衝突におけるトップ・クォークの生成は、陽子・反陽子中の軽いクォーク・反クォーク対あるいはグルオン対を始状態として、強い相互作用によりトップ・クォークと反トップ・クォークの対が生成される過程が主なものである。上記の発見もこの過程が観測されたものであり、その後現在に至るまでのトップ・クォークの性質の研究は対生成過程を用いて行われている。一方、トップ・クォークは、別種の過程での生成も可能である。電弱相互作用を媒介するゲージボソンであるWボソンを交換あるいは経由する素過程により、反ボトム・クォークとトップ・クォーク(およびその荷電共役過程)が随伴生成される過程がそれである。終状態にはトップ・クォークあるいは反トップ・クォークの一方のみが存在するため、トップ・クォークの単一生成と呼ぶ。

この単一生成過程は、素過程に電弱相互作用の W - t - b 結合を含むため、生成断面積が小林・益川行列の要素 $|V_{tb}|^2$ に比例する。この要素はトップ・クォークの相対崩壊分岐比の測定などにより決定することが可能であるが、クォークの世代数についての仮定が必要である。単一生成過程を用いれば仮定をすることなく、上記行列要素の直接の測定が可能である。しかしながら、素過程が電弱相互作用であるため、その生成断面積は、対生成のおよそ1/3程度しかない。また、終状態は、トップ・クォークの崩壊で生じるWボソンとボトム・クォーク、および随伴生成された反ボトム・クォーク、の3粒子であり、背景事象として寄与する過程の断面積が大きい。よって、その観測は容易ではなく、その証拠(有意度およそ 3σ) が初めて示されたのは2007年と、つい最近のことである。

本論文では、電弱相互作用の素過程のうち、特にWボソンがtime likeであるs-チャンネル過程に着目し

てトップ・クォーク単一生成の探索を行った。この素過程は、たとえば始状態の u クォークと反 d クォークが消滅して仮想的な W ボソンとなり、トップ・クォークと反ボトム・クォークを随伴生成するものである。終状態は、前述のとおり、 W ボソン、ボトム・クォーク、反ボトム・クォークの3粒子である。もうひとつの素過程 (t -チャンネル過程) では、 W ボソンが空間方向に交換されるが、その際の反ボトム・クォークは一般に横方向運動量が小さく、終状態に観測される確率は低い。よって、実際上は、二つの素過程は別個に測定されるものであり、それぞれの素過程の生成断面積を測定することは、標準理論を超える物理の探索の点からも興味深い。

W ボソンは荷電レプトン (電子あるいはミュー粒子) とニュートリノへの崩壊様式を用いて同定された。実験的に観測される終状態は、高運動量の荷電レプトン、横方向の消失運動量、およびボトム・クォークと反ボトム・クォークを起源とするジェット、から構成される。高運動量の荷電レプトンの同定は比較的容易であり、信号事象取得の際のトリガーとしても用いられる。ボトム・クォーク起源のジェットは、 B ハドロンの寿命がおよそ 1.5 ps と長いことを利用して、その二次崩壊点を同定・再構成することにより、軽いクォークやグルオンを起源とするジェットから分離識別する。背景事象として寄与するのは、 W ボソンとふたつのジェットの随伴生成、トップ・クォーク対生成、などが主なものである。

本論文の解析には、CDF 検出器を用いて 2002 年から 2008 年夏までの期間に取得された積分輝度 2.7 fb^{-1} に相当する陽子・反陽子衝突データを用いた。 W ボソン由来のレプトンの同定には、中央部検出器で観測される電子・ミュー粒子の他に、プラグ部 (前後方部) の電子、およびトリガーされないミュー粒子を加えて用いた。また、ボトム・クォーク同定の効率の向上のため、従来の二次崩壊点同定の方法に加え、ジェット中の各粒子の生成点に対する衝突パラメータの有意度を元にボトム・クォークらしさを判定する方法を開発した。さらに、信号に対する効率を考慮し、第三のジェットを有する事象も含めた。この結果、上記のデータ中に、579 の候補事象を観測した。期待されるトップ・クォーク単一生成 (s -チャンネル) の信号は 26 事象である。背景となるのは、 W ボソンとボトムあるいはチャーム・クォーク対の随伴生成、トップ・クォーク対生成などが主である。これらの候補事象についてトップ・クォーク単一生成を仮定して生成・崩壊過程の再構成を行った。荷電レプトンやジェットの横運動量、ボトム・クォーク対の質量、ボトム・クォークの飛翔方向とレプトンの電荷の相関、また荷電レプトン、消失運動量、ボトム・クォークから成る三体系の質量 (トップ・クォークの質量に相当) などの運動学的変数を利用して尤度を定義し、信号と背景事象の統計的分離を達成した。その結果、 s -チャンネルのトップ・クォーク単一生成について、 $2.38 + 1.04/-0.84 \text{ pb}$ の断面積を得た。標準理論の予言値は、 $0.88 + 0.12/-0.09 \text{ pb}$ である。観測された信号が背景事象の揺らぎで説明される確率は 0.003 であり、正規分布の 2.7 標準偏差に対応する。また、測定された生成断面積から、小林・益川行列の要素 V_{tb} について $|V_{tb}| = 1.43 + 0.38/-0.26 + /-0.11$ および下限値 $|V_{tb}| > 0.53$ (95%CL) を得た。

審査の結果の要旨

トップ・クォークの生成機構・崩壊特性・質量などの測定は、物質の基本粒子の特性を理解するという意味で、また素粒子の標準理論を超える物理の探索の観点からも、意義が高い。本論文の研究では、トップ・クォークの単一生成を s -チャンネル素過程に特化して探索し、その証拠を示すとともに生成断面積を測定した。また、その結果から、小林・益川行列の要素 V_{tb} の大きさに対する直接的な制限を与えることに成功した。その精度は更なる向上が望まれるが、本研究により得られた結果は、近い将来のテバトロン実験および、Large Hadron Collider 実験における測定に期待を抱かせるものであり、博士論文として価値のある研究であるものと判断する。

よって、著者は博士 (理学) の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。