

氏名(本籍)	武政健一(岐阜県)			
学位の種類	博士(理学)			
学位記番号	博甲第6004号			
学位授与年月日	平成23年3月23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	数理物質科学研究科			
学位論文題目	Measurement of the Spin Correlation in the Top Quark Pair Production using the Dilepton Events in 1.96-TeV Proton-Antiproton Collisions (1.96TeV 陽子反陽子衝突におけるダイレプトン事象を用いたトップクォーク 対生成事象のスピン偏極度相関の測定)			
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	筑波大学教授	理学博士	石橋延幸	
副査	筑波大学講師	博士(理学)	武内勇司	

論文の内容の要旨

本論文は、物質を構成する素粒子のひとつであるトップ・クォークの対生成におけるスピン相関を測定したものである。トップ・クォークは6種類存在するクォークの中で最も重く、金の原子核と同程度の質量を持つ。1994年に米国フェルミ国立加速器研究所の陽子・反陽子衝突実験CDFにより発見され、以来、その性質が詳細に調べられている。他の重い粒子と同様にトップ・クォークは不安定であり、弱い相互作用によって、より軽い粒子群へと崩壊する。その寿命は相互作用によって決まるが、質量が非常に大きいため、弱い相互作用による崩壊であるにも関わらず、 10^{-24} 秒程度となる。これは、強い相互作用の時間のスケールより一桁短い。よって、トップ・クォークは、他のより軽いクォークの場合とは異なり、トップ・クォークを含むハドロンが生成されるより前に、クォークのまま崩壊することを意味する。このことは、トップ・クォークの性質を研究する上で、重要な意味を持つ。他のより軽いクォークの場合では、上記のハドロン化の際に、クォークの持っていたスピンの情報は失われてしまう。ところが、トップ・クォークの場合には、そのスピン情報が失われることなく崩壊物に伝播され、例えば崩壊時の角分布に反映される。つまり、トップ・クォークは、その生成時のスピンに関する性質を直接に探求する可能性を持つ唯一のクォークである。

本論文の研究は、フェルミ研究所のテバトロン加速器での重心系エネルギー 1.96 TeV の陽子・反陽子衝突におけるトップ・クォークとその反クォークの対生成事象を観測し、クォーク・反クォーク間のスピン相関を測定したものである。クォークは電子と同様にスピン 1/2 を持つ。陽子・反陽子衝突におけるトップ・クォーク対生成の素過程は、クォーク・反クォーク対とグルオン・グルオン対を始状態とするものの二つが可能である。ともに強い相互作用による反応であり、クォーク・グルオン間のベクトル型の結合により、反応の力学が定まる。クォークはスピン 1/2、グルオンはスピン 1 であり、対生成の運動学的な閾値の近くでは、トップ・反トップ対の系全体の角運動量は、上記二つの素過程において、それぞれ $|1, \pm 1\rangle$ および $|0, 0\rangle$ となる。トップと反トップのスピンの向きを考えると、前者は同じ向き、後者は互いに逆向きとなる。テバ

トロン重心系エネルギーでは、陽子内のパートン分布から、前者がおよそ85%を占めると予言される。したがって、トップ・反トップ対のスピンは、全体として正の相関を持つことが期待される。これが観測されれば、トップ・クォーク対生成機構の検証となり、またトップ・クォークの寿命が標準理論で予言される通りに非常に短いことが証明される。

テバトロンの陽子・反陽子衝突で生成されるトップ・クォーク事象は、CDF検出器を用いて記録された衝突データ中に再構成された。データは2001年に開始して昨年9月まで継続されたテバトロンのRun-II実験で得られたものである。本研究では、2009年6月までに収集された積分輝度5.1 pb⁻¹相当のデータを使用した。トップ・クォーク対生成事象の再構成には、トップ・反トップ・クォークがともにボトム・クォークとWボソンに崩壊し、さらにWボソンが2つとも荷電レプトン（電子またはミュー粒子）とニュートリノに崩壊するチャンネル（ダイレプトン・チャンネル）を用いた。このチャンネルは、分岐比は小さいものの、ボトム・クォークを起源とするジェットの見分けを行わなくても信号雑音比が十分に高いという利点がある。上記データ中に334の候補事象が選別された。標準理論の諸過程の期待値は、信号が234事象、種々の背景事象の合計が86事象で、合計323事象（誤差25事象）であり、よく一致している。

トップ・クォークのスピン測定には、トップ・クォークの静止系における崩壊物（荷電レプトンおよびボトム・クォーク）の飛翔方向と量子化軸のなす角度 θ を用いた。量子化軸の取り方にはいくつかの選択肢があるが、本解析では、陽子・反陽子衝突のビーム軸を選んだ。荷電レプトンとボトム・クォークでは、前者のほうが親粒子（トップ・クォーク）のスピンに対する感度が高い。トップ・反トップ対に対して、荷電レプトン対およびボトム・反ボトム対の角度の相関を調べ、相関係数 κ を自由パラメータとしてフィットし定めた。相関係数の物理的な範囲は-1から+1である。測定の精度を考慮し、Feldman-Cousins法を用いて、観測された κ の値から真の κ の値を推定した。結果は

$$\kappa = +0.042^{+0.563}_{-0.562}$$

であり、標準理論の予言値（ $\kappa = 0.8$ 程度）と矛盾しない。誤差の要因はほとんどがデータの統計量によるものである。また、この結果は、同じチャンネルを用いた以前の測定（ほぼ半分のデータ量、ただし量子化軸が異なる）の精度を改善するものである。さらに、トップ・反トップ対からのWボソンのうち一方のみが荷電レプトンに崩壊したチャンネル（レプトン+ジェット・チャンネル）を用いた測定の結果とも矛盾しない。

審査の結果の要旨

トップ・クォークは、物質を構成する素粒子（クォーク・レプトン）の中で飛びぬけて質量が大きく、その発見まで長い年月を要したが、近年においてその性質の詳細な研究が可能となってきた。特に寿命は、質量が大きいために極めて短く、他のクォークとは定性的に異なる振る舞いをすると言われる。クォークは通常は単独で存在することはできず、生成直後にハドロンを作る。トップ・クォークの場合にはハドロンを作る前に崩壊してしまうので、クォークの持っていた情報が崩壊物に伝播される。例えばスピンのように、本解析では、対生成されたトップ・反トップ・クォーク間のスピンの相関を測定した。ハドロンが生成されるとスピンの情報は失われてしまうので、もし相関が観測されれば、間接的にトップ・クォークの寿命が予言通りに短いことを証明することになる。10⁻²⁴秒という時間を直接に計ることは不可能であるので、この方法は極めて有用である。

相関があることを有意に示す結果には到らなかったが、これまでの測定精度を向上することに成功し、また方法が有望であることを示した。さらに、同じ解析手法がトップ・反トップ・クォーク対生成時の前後方非対称度の測定にも応用されており、ここではクォークについて標準理論を超える新しい力学が存在する可

能性が示唆されており、今後の発展が待たれる。

平成 23 年 2 月 14 日、数理物質科学研究科学学位論文審査委員会において審査委員の全員出席のもと、著者に論文について説明を求め、関連事項につき質疑応答を行った。その結果、審査委員全員によって、合格と判定された。

上記の論文審査ならびに最終試験の結果に基づき、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。