

早稲田大学大学院理工学研究科

# 博士論文審査報告書

## 論文題目

Search for Scalar Top Quark Pair-Production in Scenario  
with Violated R-Parity in  $p\bar{p}$  Collisions at  $\sqrt{s} = 1.96$  TeV

1.96 TeV 陽子・反陽子衝突における R パリティの  
破れを伴うスカラー・トップクォークの探索

申請者

氏名

小川 貴志

専攻・研究指導  
(課程内のみ)

Ogawa

Takashi

物理学及応用物理学専攻 素粒子実験研究

2005 年 3 月

## 論文概要

素粒子とその相互作用を検証する手段として、高エネルギー粒子同士の衝突に伴う反応を検出し、解析するというアプローチは最も一般的なものの一つである。米国フェルミ国立加速器研究所の陽子・反陽子衝突型加速器テバトロンは重心系エネルギー  $1.96 \text{ TeV}$  を提供する。この研究は、テバトロン加速器に設置されたCDF検出器 (Collider Detector at Fermilab) において収集されたデータを用いて、新粒子の探索を行ったものである。

現在素粒子事象を説明する理論として、電磁相互作用と弱い相互作用を統一して記述する電弱理論と、強い相互作用を記述する量子色力学の2つを柱とした標準理論が確立されている。標準理論はこれまでに行われた多くの実験結果を測定精度内で正しく説明するが、一方理論的な不自然さが指摘されており、これを包括する新しいモデルが数多く提唱されている。

そのなかでも、超対称性と呼ばれる新しい対称性を導入したモデルは、統一理論への有力な候補として存在する。超対称性とは、素粒子のスピンの関する対称性で、超対称性理論では、既知のフェルミオン (ボソン) に対応するボソン (フェルミオン) が存在するとする。そして、超対称性を特徴づける量子数として、

$$R_p = (-1)^{3B+L+2S} \quad (B: \text{バリオン数}, L: \text{レプトン数}, S: \text{スピン})$$

によって定義されるRパリティと呼ばれる量子数が導入されている。標準理論における既知の素粒子は  $R_p = +1$  で、スーパーパートナーと呼ばれる超対称粒子は、 $R_p = -1$  であるとする。

超対称粒子の実験的探索は、過去30年以上続けられてきたが、未発見である。その結果、現在では、多くの超対称性粒子は非常に大きい質量を持つと推測されている。しかし、標準理論におけるトップクォークは、現在確認されている素粒子の中で最大の質量を持つが、そのスーパーパートナーであるスカラー・トップクォーク (ストップ) は逆に軽い可能性が指摘されている。これは超対称性理論において、ストップ・クォークの質量行列の非対角成分 (標準理論におけるトップクォークの質量に関係している) が大きくなり、比較的小さい質量固有状態の解を持ちうるからである。さらに、超対称性理論において、Rパリティの保存は、とりわけ崩壊過程において、先験的には要請されないため、この対称性を破るような過程による超対称粒子の探索も近年重要な研究課題となっている。

本研究では、陽子・反陽子衝突によりストップクォークが対生成され、それぞれの粒子がボトムクォークとタウ粒子に崩壊するモードの探索を行った。この崩壊モードはRパリティの非保存が存在すると可能となる。したがって検出される終状態は、ボトムクォークから生ずる2つのボトム・ジェットと2つのタウ粒子を含む。この終状態を検出する為に、2つのタウ粒子がそれ

ぞれレプトン（電子、ミューオン）とハドロン（孤立した飛跡）へと崩壊する事象を効率よく選び、かつ高速で処理するシステム（レプトンと飛跡によるトリガー・システム）がCDFの第二期実験より導入された。申請者は、このシステムの開発・完成に中心的役割をはたした。

このトリガー・システムが有効に機能していることを検証するため、標準理論の枠内でよく理解されているZボソンが2つのタウ粒子に崩壊する事象（ $Z^0 \rightarrow \tau^+ \tau^-$ ）を最初に解析した。本研究では、特にタウ粒子の崩壊から生じた電子とハドロンに崩壊するタウ粒子の特徴である孤立した飛跡を終状態に持つ事象を選び、以下の2点を提示した。

1. タウ粒子の飛跡数分布：ハドロンに崩壊するタウ粒子が1つ、もしくは3つの荷電粒子に崩壊するという特徴が、非常によく再現されている。
2. 同候補事象における電子・タウ粒子・消失横運動量系の不変質量（ $M(e+\tau+E_T)$ ）分布：Zボソン（ $Z^0 \rightarrow \tau^+ \tau^-$ ）による質量ピークが観測できる。

ストップクォークの探索にはCDF検出器が2002年3月から2003年9月までに収集した200 pb<sup>-1</sup>相当（約10兆回の陽子・反陽子衝突）のデータを用い、ストップクォーク対生成の候補としてレプトン（電子・ミューオン）、ハドロンに崩壊したタウ粒子、2つのジェットを持つ事象を選び出した。さらにバックグラウンドを減少させ、シグナルの純度を高める為のトポロジカルな条件を課し、最終的に5事象が残った。標準理論から推定されるバックグラウンドの事象数にストップクォークが存在する場合に期待される事象数を加えた上で、観測された事象数との比較を行った。その結果、観測された事象数は標準理論の予測値から逸脱していないことが確認された。

これにより、ストップクォークがRパリティを破り100%の分岐比でボトムクォークとタウ粒子に崩壊するシナリオにおいて、95%の信頼度で質量下限値134 GeV/c<sup>2</sup>が与えられた。これは同時に、第3世代のスカラー・レプトクォーク（レプトンに直接変換するクォーク）の質量下限値を与える。

本論文の構成は以下の通りである。第1章を序論とし、第2章において超対称性とストップクォークについての理論的背景が述べられている。第3章ではフェルミ研究所の陽子・反陽子衝突型加速器とCDF検出器について概観されている。第4章は、レプトンと飛跡によるトリガー・システムについての記述で、このトリガーの利用が可能であると考えられる様々な物理についての議論がなされている。第5章において同トリガーシステムにより収集されたデータを用いて、Zボソンがタウ粒子へ崩壊する過程を解析し、これによりCDF実験において初めて導入されたこのシステムが有効に機能していることが示されている。第6章では、 $B_{s(d)}^0$ 中間子がミュー粒子へ崩壊する分岐比を測定することを通じて超対称性の間接的探索を解析した結果が論じられている。第7章はストップクォークの解析についての詳述で、収集され

たデータとモンテカルロ法により作成されたデータ、事象選択、系統誤差とその評価、バックグラウンド事象とその導出、質量制限値を求める手法等々を説明されている。第8章は、解析結果の結論である。

### 批評

超対称模型は標準模型の理論的困難をさける模型の中で、最も難のないものとされている。申請者は、R パリティ非保存の仮定のもと、質量が最も軽いと予想される超対称トップクォークを探索した。この探索を有効におこなうための事象選別法（レプトン+タウ・トリガー）を開発完成させ、同粒子の質量下限値を従来のものから押し上げ、有意な結果を得ることに成功した。解析は、きわめて丹念に、かつ適切に行われている。

### 結論

以上により、本論文は素粒子物理学に重要な知見を提供するものであり、早稲田大学の博士(理学)の学位を授与するに値するものであると判断する。

審査員（主査）早稲田大学教授 理学博士（東京大学） 近藤 都登  
早稲田大学教授 理学博士（早稲田大学）中里 弘道  
フェルミ米国立加速器研究所高級研究員・  
早稲田大学客員教授 理学博士（カリフォルニア大学）  
前島 薫