

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 Higgs Boson Production in
Proton-Antiproton Collisions at $\sqrt{s}=1.96$ TeV

重心系エネルギー 1.96 TeV 陽子・反陽子衝突実験に
おける Higgs 粒子の探索

申請者

日下部 義明

氏名

Yoshiaki Kusakabe

専攻・研究指導
(課程内のみ)

物理学及応用物理学専攻
素粒子実験研究

平成 18 年 12 月

現在の素粒子の標準理論は、物質粒子であるクォーク・レプトンと、力の粒子であるグルーオン・ウィークボソン・光子等の相互作用によって素粒子の諸現象を説明するもので、これまでに、多くの実験的検証を経てきた。標準理論では、力の場は $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ 群の内部対称性をもち、場の Lagrangian の局所ゲージ普遍性から、場の基本方程式が導かれる。しかし、このシナリオでは、ゲージ不変性を保つために、粒子は質量を持つことができない。そこで、ヒッグス場とよばれる基礎スカラー場を導入し、真空は自己相互作用によるヒッグス場が充満した状態であると仮定することで、粒子はヒッグス場との相互作用によって質量を持つことができるとする。理論では、このヒッグス場を量子化したヒッグス粒子 (H) の存在が予言されている。しかしヒッグス粒子は未発見で、その探索、発見ないし有無の検証は、今日の素粒子実験の中心課題となっている。

これまでに高エネルギー衝突型加速器を用いる実験で、ウィークボソン (W, Z)、グルーオン、チャーム (c)、ボトム (b)、トップ (t) クォークなどが発見されてきた。特にトップクォークは 1995 年に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 (重心系エネルギー 1.8 TeV) の実験で CDF (Collider Detector at Fermilab) グループにより発見された。トップクォーク発見後、テバトロンは重心系エネルギーを 1.96 TeV に増強し、ルミノシティ (ビーム強度) を飛躍的に改善して 2002 年春から第 2 期実験を開始し、現在までに積分ルミノシティ約 1 fb^{-1} (1 cm^2 当り 10^{39} 回の衝突) のデータを蓄積した。これはハドロンコライダー実験において史上最高の値である。現在テバトロンではトップクォークの質量の精密測定、その性質の検証、電弱相互作用の精密測定、新物理現象の探索、そして標準理論で予言されながら、未発見のヒッグス粒子の探索などが行われている。申請者は、CDF 実験において、上記のデータを用い、ヒッグス粒子の探索を行い、最新の結果を得た。

本論文の第 1 章では、まず上記に述べたような一般的な導入がなされている。

次に第 2 章では、標準理論の概略と過去のヒッグス粒子探索の結果がまとめられている。ヒッグス粒子の探索には、(1) 直接生成の観測と (2) ヒッグス粒子が仮想状態で関与する過程の実験データとくりこみ理論による質量推定とがある。直接探索では、LEP 2 (ヨーロッパ CERN の実験) から質量の下限值 $114.4 \text{ GeV}/c^2$ (信頼度 95%) が与えられている。一方、間接推定には、最近のトップクォーク (テバトロン) と W ボソンの質量の精密測定が有効で、上限値 $199 \text{ GeV}/c^2$ (信頼度 95%) が得られていて、標準理論が予言するヒッグス粒子の質量範囲は強く制限されている。申請者は、テバトロンにおけるヒッグス粒子の直接観測をめざし、生成率が高くバックグラウンド事象の少ない $q\bar{q} \rightarrow WH \rightarrow l\bar{b}b$ 過程を選び、この過程の利点を詳述している。

第 3 章では CDF 検出器および観測データの取り扱いについて述べている。CDF

測定器については、本研究において特に重要な意味を持つシリコン崩壊点検出器、中央飛跡検出器、ハドロンカロリメーター、電磁カロリメーター、ミューオンチェンバーについて述べている。実験では、クォークは単体としては観測されず、ハドロン粒子群のジェットとして観測される。ニュートリノは物質との相互作用が極めて小さく直接測定が困難であり、カロリメーターの測定エネルギーのアンバランスから、消失横向き運動量の担い手として観測される。**WH** 過程の実験的な信号はレプトン+2 ジェット+横向き消失運動量である。本章では、ジェットと横向き消失運動量の扱いの詳細が論じられている。

第4章ではジェットの**b**クォーク同定法が論じられている。ヒッグス崩壊過程 $H \rightarrow b\bar{b}$ では、ジェットを**b**クォークとして識別することが、膨大なバックグラウンド事象を除く上で鍵となる。**b**クォークはより軽い粒子に比べ寿命が長いため、衝突点から離れた位置で崩壊する。崩壊点は、**b**クォークを成分として含む**B**中間子からの崩壊粒子の飛跡を外挿することで求められる。崩壊点のずれを用いた**b**クォークの同定法は、**SEC**ondary **Ver**TeX (**SECVTX**) **b**-タッキングと呼ばれる。しかし、飛跡検出の精度が有限であることから、軽い**u**、**d**、**s**クォークや、とくに比較的長い寿命を持つ**c**クォークを**b**クォークと同定してしまう頻度が高く、**SECVTX**法により**b**と同定されたジェットのほぼ50%は誤判定によるものである。この誤判定を含む事象がこの論文の探索過程において、最も大きなバックグラウンドとなる。申請者は、誤同定された事象を除くために、**WH**過程の解析に、初めてニューラルネットワークによる**b**同定法を導入した。これにより**SECVTX**法で**b**と同定されたジェットに対して、90%の**b**クォークを残したまま65%の軽いクォーク、50%の**c**クォークを除くことができ、**b**同定の純度を飛躍的に改善し、信号探索の感度をおよそ10%改善した。

第5章では、用いるデータセットに関する詳細な説明と、膨大なデータの中から信号事象に対して感度のよい事象選択の基準がまとめられている。特に信号事象の基準、電子、ミューオンの実験的な同定法などを論じている。

第6章では、前章までの選択基準で排除できないバックグラウンド事象の評価がなされている。主なバックグラウンドは、ヒッグス粒子の関与しない**Wb \bar{b}** 、**Wc \bar{c}** 、**Wc**過程、2弱ボソン過程**WW/WZ/ZZ**、対生成過程**Z $\rightarrow\tau^+\tau^-$** 、**tt \bar{t}** 、単一トップ生成過程等である。また、ジェットがレプトンとして誤同定されてしまう事象も考慮されている。**SECVTX**とニューラルネットワークで1つのジェットが**b**と判定された事象、**SECVTX**で2つ以上のジェットが**b**と同定された事象のなかで、上記のバックグラウンド構成要素にあたるものを見積りが行われている。

第7章では、**WH**生成過程の検出効率、系統誤差の計算方法と結果が要約されている。前章までで論じた信号選別方法の改良にも拘らず、信号候補事象は、大部分がバックグラウンド事象であることから、申請者はバックグラウンド事象に

つき、各観測粒子の運動学的変数と2ジェット系の不変質量分布を示し、観測データのそれと比較して、観測データがバックグラウンドの予言と誤差の範囲で一致していることを確認した。

この研究では観測データにWH生成過程を示唆するような分布が有意に見られなかったため、第8章では解析結果からヒッグス粒子の生成断面積に対する上限値を求めた。2ジェット系の不変質量分布について尤度法を用いて、信号過程の断面積の上限値を信頼度95%で求めた。また、CDF実験ではWH生成過程以外にも、 $q\bar{q}\rightarrow ZH\rightarrow v\bar{v}b\bar{b}$ 、 $q\bar{q}\rightarrow ZH\rightarrow l\bar{l}b\bar{b}$ 、および $gg\rightarrow H\rightarrow W^-W^+\rightarrow l\bar{\nu}l\nu$ 等の過程の探索結果がすでに得られている。申請者は、得られたWH過程の断面積の上限値を他のプロセスからの上限値と組み合わせてCDF実験としてのヒッグス粒子生成断面積の上限値を求めた。更にテバトロンにおけるもうひとつの実験グループ(Dゼロ)の探索結果と組み合わせることで、テバトロンにおける現時点での生成断面積の上限値を求めることができた。

以上を要約すると、本論文執筆者はテバトロン実験の中心課題であるヒッグス粒子の探索を目的として、これに正面から取り組んだ。予想されるヒッグス粒子の生成断面積は、質量とともに減少する。残念ながら現在得られているデータ量では、質量に制限を与える結果は得られなかったものの、申請者は実験結果が標準理論の予言値の4~10倍($m_H=110\sim 200\text{GeV}/c^2$)まで近づいている事を示した。

本論文は将来の解析の基礎となる諸項目を綿密に考察・解析しており、質量起源に関する標準理論の検証の重要な手段を与えるものとして、極めて貴重な成果であると評価される。

本論文は現在の素粒子物理学、特にヒッグス探索の解析手法に大きく貢献をしておりその理学的意義はきわめて大きい。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。

平成18年11月

審査員(主査)	早稲田大学教授	工学博士(東京大学)	鷺尾 方一
(副査)	早稲田大学教授	理学博士(早稲田大学)	大場 一郎
(副査)	早稲田大学助教授	博士(理学)早稲田大学	鷹野 正利
(副査)	早稲田大学特命教授	理学博士(東京大学)	近藤 都登