

博士論文概要

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1.96TeV 陽子・反陽子衝突実験に
おける Higgs 粒子の探索

申請者

氏名

| | |
|----------|----------|
| 日下部 | 義明 |
| Kusakabe | Yoshiaki |

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

2006年 9月

前世紀、量子論・相対論の発達と加速器及び検出器の技術の発達により、人類は素粒子の世界を認識、理解できるようになった。特に物質の最小単位をクォークとレプトンとし、 g (グルーオン)、 W, Z (ウィークボソン)、 γ (光子)のゲージボソンにより粒子間の相互作用が媒介されるという理論は、さまざまな素粒子現象を正確に記述し、今日では素粒子の標準理論と呼ばれている。力を媒介する粒子はLagrangianのゲージ不変性から導かれ、標準理論は $SU(3)\times SU(2)\times U(1)$ 対称性により導かれる。しかし、このゲージ不変性を保つためには粒子は質量項をLagrangianの中に持つことができない。そこで、自発的に対称性を破るHiggs場とよばれる基礎スカラー場を導入することで、粒子はゲージ不変性を破ることなく力学的に質量を持つことができる。素粒子の標準理論ではこのHiggs場を量子化したHiggs粒子の存在を予言している。

加速器、検出器の技術の発達により、素粒子の世界を実験的に検証する手段として、高エネルギー粒子の衝突実験による反応を検出及び解析するというアプローチは一般的なものである。これまでに、 W, Z ボソン、gluon, charm, bottom, topクォークなどが高エネルギー粒子の衝突実験により発見されてきた。特にtop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1.8TeV)のRUN1実験でCDF(Collider Detector at Fermilab)により発見された。Topクォークの発見後、テバトロンは重心系エネルギーを1.96TeVに補強し、ルミノシティを飛躍的に改善し、2002年の春からRUN2実験を行っている。2006年現在稼働中の高エネルギー衝突型加速器として世界で唯一のものであり、現在までに積分ルミノシティ約 1fb^{-1} 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大である。Topクォークの質量の精密測定、その性質の理解、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Higgs粒子の探索などが実験の主な目的である。本研究はCDF実験におけるHiggs粒子の探索を行ったものである。本論文ではまず上記に述べたような一般的な導入を第1章で述べる。

次に第2章では標準理論の概略と他の実験で行われてきた最新のHiggs粒子探索の結果をまとめる。特にLEP2の報告によるとHiggs粒子の質量は $m_H > 114.4\text{GeV}/c^2$ (95%信頼度)であり、標準理論ではHiggs粒子、topクォークと W ボソンの質量は相関をもつため、topクォークと W ボソンの質量によりHiggs粒子の質量には制限がつけられる。現在のtopクォークと W ボソンの質量の精密測定の結果によると、 $m_H < 199\text{GeV}/c^2$ (95%信頼度)の上限値が得られており、Higgs粒子の質量は比較的軽いことが予想されている。テバトロンにおける主なHiggs粒子生成過程は $gg \rightarrow H, q\bar{q}' \rightarrow WH, q\bar{q} \rightarrow ZH$ である。 $gg \rightarrow H$ 過程は膨大なQCDバックグラウンドが存在するため、探索の感度がよくない。 WH と ZH 生成過程は、弱ボソンが存在するため生成断面積は小さくなるが、弱ボソンがレプトン(本研究では e^\pm, μ^\pm)崩壊をする過程ではバックグラウンド事象も大幅に少なくなり、テバトロ

ンにおける最も感度のよい探索過程である。特に $m_H < 135 \text{ GeV}/c^2$ である場合、Higgs 粒子は bottom クォーク対に大きな崩壊分岐比を持つため、レプトン + $b\bar{b}$ + ニュートリノの終状態が感度のよい探索プロセスである。以上の内容により、WH 生成過程における Higgs 粒子探索の動機を説明する。

第 3 章では、CDF 検出器についての概略をまとめる。主に本研究において重要となる検出器である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、ミュオンチェンバーについて触れる。ここで、一般にクォークは QCD の閉じ込め現象によりクォーク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、消失横向き運動量として観測される。ジェット、横向き消失運動量の詳細についても言及する。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。

第 4 章ではジェットの b クォーク同定法についてまとめる。Higgs 生成過程のジェットは本来 b クォークが主であるため、ジェットを b クォークとして識別することで膨大なバックグラウンド事象を除くことができる。b クォークは生成されるとすぐに B 中間子になる。B 中間子は一般に寿命が長いため、陽子・反陽子の衝突点で生成される B 中間子は衝突点から離れた位置で崩壊する。b クォークのジェットは崩壊点が衝突点から大きくずれるという性質を利用し、このような特徴を持つジェットを b クォークとして同定することができる。崩壊点は、B 中間子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 = displaced SECondary VerTeX b-tagging, 以下 SECVTX）。しかしながら飛跡検出の分解能は有限であるため軽いクォークを誤って b と同定したり、D 中間子も長い寿命を持つため c クォークを b と同定してしまう頻度が高いため、この方法により 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我々の探索過程においては最も大きなバックグラウンドとなる。本研究では、誤って同定された事象を除くために初めてニューラルネットワークを用いた。これにより SECVTX 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、SECVTX b 同定法の純度を飛躍的に改善し、信号探索の感度をおよそ 10% ほど改善した。

第 5 章では、用いるデータセットに関する説明と、膨大なデータの中から信号過程に対して感度のよい事象選択の基準をまとめる。特に電子、ミュオンの実験的な同定法などにも言及する。

第 6 章においては信号過程に対するレプトン + 2 ジェット + 横向き消失運動量のバックグラウンド事象の導出方法の詳細を述べる。本研究では b 同定されたジェットを最低 1 つ以上含む事象を解析するため、b と誤判定されたジェットを含む事

象は大きなバックグラウンドとなる。 $Wb\bar{b}/Wc\bar{c}/Wc$ のWボソンと重いクォーク生成過程、 $WW/WZ/ZZ$ の2つの弱ボソン過程、 $Z\rightarrow\tau^+\tau^-,t\bar{t}$, single top生成過程もバックグラウンドとして考慮する。また、ジェットがレプトンとして誤観測されてしまう事象も考慮する。これらのバックグラウンド構成要素に対して、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と同定された事象に対し見積りを行う。

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をまとめる。 1fb^{-1} のデータに対して、期待されるWH事象についても触れ、信号探索の感度にも言及する。Higgs粒子は非常に崩壊幅の小さいという性質を持つと考えられるため、2ジェット系の不変質量が最もHiggs粒子の性質を強く示すはずである。これらの考察に基づき、申請者はバックグラウンド事象としたときの各観測粒子の運動学的変数を観測データのそれと比較、また2ジェット系の不変質量分布を示し、バックグラウンドの予言と観測データが互いに一致していることを示す。

本研究ではWH生成過程を示唆するような分布が観測データには見られなかったため、第8章ではHiggs粒子の生成断面積に対して上限値を求める。2ジェット系の不変質量分布を尤度法を用いて、WH生成の断面積と $H\rightarrow b\bar{b}$ の分岐比の積に対して95%信頼度の上限値を求める。尤度の計算方法と制限値の上限値の導出に関する詳細にも言及する。また、CDF実験ではWH生成過程以外にも、 $q\bar{q}\rightarrow ZH\rightarrow v\bar{v}b\bar{b}, q\bar{q}\rightarrow ZH\rightarrow l\bar{l}b\bar{b}, gg\rightarrow H\rightarrow W^-W^+\rightarrow l\bar{v}\bar{l}v$ 過程の探索結果もすでに得られている。申請者によるWH生成過程より求めた95%信頼度における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ることでCDF実験として最も強い制限値を与えることができる。更にD0の探索結果を組み合わせることで、TEVATRONにおける制限を求めることができる。本研究ではベイズ統計を用いて各プロセスからの制限値を組み合わせる。95%信頼度の制限値と標準理論の予言するHiggs生成断面積の比を計算し、その結果を示す。Higgs粒子の質量に制限を与える結果は得られなかったが、標準理論の予言値から因子 $4\sim 10(m_H=110\sim 200\text{GeV}/c^2)$ ほどに実験結果が近づいている事を示した。他のHiggs探索の結果を組み合わせることはCDF RUN2実験では初めてであり、2008年まで稼働予定のRUN2実験におけるHiggs探索の最終結果に大きく貢献することになった。最後に実験結果と今後のHiggs粒子探索の展望に言及し、本論文をまとめる。

研 究 業 績

| 種 類 別 | 題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む） |
|-------|---|
| 論文 | <p>○ “Measurement of the $t\bar{t}$ Production Cross Section in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s}=1.96$ TeV”, FERMILAB-CONF-06-164-E (Accepted by Phys. Rev. Lett., Jul 27 2006), The CDF Collaboration (A. Abulencia et al.)</p> <p>○ “Search for Higgs Bosons Decaying to $b\bar{b}$ and Produced in Association with W bosons in p anti-p Collisions at $\sqrt{s}=1.96$ TeV”, Phys. Rev. Lett. 96, 081803(2006), The CDF Collaboration (A. Abulencia et al.)</p> <p>”Search for a Neutral Higgs Boson Decaying to a W Boson Pair in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s}=1.96$TeV”, FERMILAB-CONF-06-154-E, (Submitted to Phys. Rev. Lett., May 30), The CDF Collaboration (A. Abulencia et al.)</p> <p>”Precision Top Quark Mass Measurement in the Lepton+Jets Topology in p anti-p Collisions at $\sqrt{s}=1.96$TeV”, Phys. Rev. Lett. 96, 022004(2006) , The CDF Collaboration (A. Abulencia et al.)</p> <p>”Search for Charged Higgs Bosons from Top Quark Decays in p anti-p Collisions at $\sqrt{s}=1.96$TeV”, Phys. Rev. Lett. 96, 042003(2006) , The CDF Collaboration (A. Abulencia et al.)</p> <p>○は学位申請者の主な貢献による</p> |

研 究 業 績

| 種 類 別 | 題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む） |
|-------|--|
| 講 演 | <p>“Search for Higgs Boson Production at CDF”, CDF Collaboration Meeting, Elba, Italy, 2006 年 6 月</p> <p>“$t\bar{t}$ Production Cross Section Measurement in Lepton+Jets Events”, CDF Collaboration Meeting, Elba, Italy, 2006 年 6 月</p> <p>“Search for Higgs Boson Production in Association with W Boson at CDF”, Fermilab User’s Meeting Poster Session, Batavia, IL, 2006 年 5 月</p> <p>“Search for Higgs Boson Production in Association with W Boson at CDF”, American Physical Society Meeting, Dallas, Texas, USA, 2006 年 4 月</p> <p>“Search for $WH \rightarrow l\nu b\bar{b}$ with 700pb^{-1} at CDF”, Higgs Workshop, Fermilab, Batavia, IL, USA, 2006 年 1 月</p> <p>“Dynamical Likelihood Method による素過程における粒子の運動学的変数の再構成法”, 日本物理学会, 第 59 回年次大会, 九州大学箱崎キャンパス, 2004 年 3 月</p> <p>“Dynamical Likelihood Method の一般的な定式化”, 日本物理学会, 2003 年秋季大会, 宮崎ワールドコンベンションセンターサミット, 2003 年 9 月</p> <p>“Dynamical Likelihood Method による W+2jet channel に置ける Technicolor 粒子の探索法”, 日本物理学会, 2002 年秋季大会, 立教大学, 2002 年 9 月</p> |
| 著 書 | なし |
| その他 | なし |

研 究 業 績

| 種 類 別 | 題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む） |
|-------|------------------------------------|
| | |