

氏名(本籍)	なが い よし かず 永 井 義 一 (大阪府)		
学位の種類	博 士 (理 学)		
学位記番号	博 甲 第 5262 号		
学位授与年月日	平成 22 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	Search for the Standard Model Higgs Boson in the $WH \rightarrow 1 \nu b \bar{b}$ Channel 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 $WH \rightarrow 1\nu b\bar{b}$ 過程のヒッグス粒子探索)		
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	博士(理学)	江 角 晋 一
副 査	筑波大学講師	博士(理学)	武 内 勇 司
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、素粒子物理学の標準理論において不可欠かつ唯一実験的に発見されていない粒子、ヒッグス粒子、を重心系エネルギー 1.96 TeV の陽子・反陽子衝突において探索した結果を報告したものである。実験は米国フェルミ国立加速器研究所のテバトロン加速器およびCDF検出器を用いて行った。標準理論において、物質の基本構成要素はクォークおよびレプトンであるが、これらの物質粒子間の相互作用はゲージ対称性を要求することにより自動的に導入される。相互作用を媒介するのはゲージ場であり、それに対応してゲージ粒子が存在する。たとえば、電磁相互作用は量子電気力学により記述されるが、ここでは光子がそのゲージ粒子である。他の基本相互作用、弱い相互作用と強い相互作用もまたゲージ対称性から導かれ、それぞれ W、Z ボソンとグルオンが相互作用を媒介するゲージ粒子である。相互作用がゲージ対称性から生じる場合、ゲージ粒子の質量は厳密に零でなくてはならない。光子の場合にはこれは実験的に成り立っている。ところが弱い相互作用を媒介する W ボソンと Z ボソンは陽子のおよそ百倍近くの質量を持つことが実験的にわかっており、ゲージ原理と矛盾する。これを解決する方法、つまりゲージ対称性をあからさまに破ることなく(自発的に破ることにより)ゲージ粒子に質量を持たせること、として標準理論に導入されたのがヒッグス機構である。これによれば、真空中にはヒッグス場が充満しており、このヒッグス場との相互作用によりゲージ粒子を含むすべての素粒子が質量を獲得する。場の量子論の考えによれば、ヒッグス場に対応した粒子が存在するはずで、それがヒッグス粒子である。これは、素粒子の標準理論を完結させるために必要な粒子であるが、これまでのところ実験的には確認されておらず、過去の実験のより、その質量に対する下限 $114 \text{ GeV}/c^2$ が得られている。また、トップ・クォークや W ボソンの質量の精密測定から、量子力学的輻射補正の効果を通して、ヒッグス粒子の質量について間接的な情報が得られており、 $100 \text{ GeV}/c^2$ 程度の比較的軽い質量が示唆されている。

本論文の研究では、CDF 実験において得られた陽子・反陽子衝突事象を解析し、ヒッグス粒子をその比

較的軽い質量領域に特化した手法により探索した。この質量領域では、ヒッグス粒子は主にボトム・クォーク対に崩壊する。信号事象の背景事象に対する比を上げるため、ヒッグス粒子の単一生成でなく、W ボソンとの随伴生成の過程を用いた。W ボソンは荷電レプトン・ニュートリノ対への崩壊を用いた。よって、終状態に観測されるのは、高運動量のレプトン（電子あるいはミュー粒子）、ニュートリノによる消失運動量、およびボトム・クォーク起源のジェット対から成る。この終状態はヒッグス粒子生成以外の過程でも起こり（背景事象）、それらの生成断面積は信号と比べて大きい。したがって、物理解析では、信号感度の向上および背景事象の抑制が鍵となる。ボトム・クォーク起源のジェットの同定のためにこれまでに開発された2つの同定法に加えて人工ニューラル・ネットワークを用いた方法を採用し、検出効率を向上させた。また、ヒッグス粒子の質量再構成の分解能を向上させるため、ジェットのエネルギー測定に、人工ニューラル・ネットワークを用いた補正法を適用した。さらに、背景事象と信号事象の識別のため、ベイズ法ニューラル・ネットワークを用いた。これらにより、探索能力は全体で約15%向上した。また、データ量も増加した。

2009年3月までに収集された 4.3 fb^{-1} 相当のCDF実験のデータを用いた探索は、背景事象から期待されるものと矛盾せず、ヒッグス粒子生成の明確な証拠は見られなかった。したがって、ヒッグス粒子のW ボソンとの随伴生成の断面積に上限を設定した。質量範囲 $115 \text{ GeV}/c^2$ から $150 \text{ GeV}/c^2$ において、生成断面積の上限値は 0.72 pb から 0.46 pb である。これは、標準理論の予言値の5.3倍から38倍である。期待される感度(上限値)は4.0倍から34倍であり、統計的揺らぎと矛盾しない。

審 査 の 結 果 の 要 旨

対称性の自発的破れは、2008年のノーベル物理学賞を受賞した南部陽一郎博士によって素粒子物理学に導入された概念であり、今日では物理学において広く用いられている。素粒子の標準理論は、実験的事実を記述するに際し、きわめて高い成功を収めているが、電弱相互作用におけるゲージ対称性の破れとヒッグス機構については、未だ直接的な実験的検証がなされていない。これを行うことは、標準理論を完結させるうえで、またそれを超える新たな物理を探るという観点からも、非常に重要であり、現行および近い将来に本格稼動する高エネルギー素粒子実験の最重要課題となっている。

本研究は、現行の米国フェルミ研究所でのCDF実験にて取得されたデータを用いたヒッグス粒子探索を報告したものである。発見には至らなかったものの、これまでの探索と比較して感度が上昇し、特に間接測定によって示唆される軽い質量領域において、有用な制限を与えている。

フェルミ研究所ではCDF実験に加えてD0実験が同時にデータを取得中で、ヒッグス粒子に関しても同様の解析を行っている。低質量領域では本論文に述べられている方法が最も感度が高いが、他にもさまざまな終状態を用いて探索が行われている。2つの実験の結果を総合すると、感度はほぼ2倍となり、質量 $115 \text{ GeV}/c^2$ において上限値（標準理論に対する比）は期待値1.78に対して実測値2.70を得た。また、質量範囲 $163 \text{ GeV}/c^2$ から $166 \text{ GeV}/c^2$ においては比1を下回っており、その領域での標準理論ヒッグス粒子は棄却された。今後、これまでの2倍程度のデータ量と、解析方法の向上により、棄却領域の拡大あるいは存在の証拠を示すことが期待される。

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。