

氏名(本籍)	はなわ 埴	けい 慶	た 太	(茨城県)
学位の種類	博士(理学)			
学位記番号	博甲第6383号			
学位授与年月日	平成25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	数理物質科学研究科			
学位論文題目	Search for the Standard Model Higgs Boson Decaying to Tau Pairs with the ATLAS Detector (ATLAS実験における $H \rightarrow \tau\tau$ 崩壊チャンネルを用いたヒッグス粒子の探索)			
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	理学(理学)	石塚成人	
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、素粒子の標準理論において唯一未確認であるヒッグス粒子の探索を報告したものである。素粒子の標準理論において、物質を構成する基本要素(物質粒子)はクォークおよびレプトンである。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がゲージ粒子であり、電磁相互作用においては光子がその粒子である。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を要求することにより導入された場合、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ボソンは陽子の百倍近くの質量を持つことがわかっており、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ゲージ粒子に質量を持たせること、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、長年の探索にもかかわらず発見されなかった。

2010年から欧州CERN研究所において新たな陽子・陽子衝突型加速器 Large Hadron Collider (LHC) が本格稼働し、重心系エネルギー7~8 TeVでの衝突実験ATLASおよびCMSが開始された。これらの実験データを解析したところ、2012年夏には、ヒッグス粒子と矛盾しない性質を持つ新粒子が発見された。この粒子は質量およそ $125 \text{ GeV}/c^2$ を持つ。この発見は、主にヒッグス粒子が光子対およびZボソン対に崩壊する過程を通してなされた。今後の研究は、この、ヒッグス粒子とみられる粒子の性質を詳細に測定し、それが本当にヒッグス粒子であるのか、また標準理論が予言する性質を持つのかを検証することに移る。検証のひとつとして重要なのは、ヒッグス粒子と物質粒子との結合を直接に観測することである。標準理論においては唯一のヒッグス粒子がゲージ粒子と物質粒子の双方に質量を与えるが、標準理論を超える理論ではしばしば複数のヒッグス粒子が存在し、別々に質量を与える。

本論文では、ヒッグス粒子を、物質粒子のひとつであるタウ粒子に崩壊する様式を用いて探索した。タウ粒子は電子の仲間（レプトン）であり、およそ $1.7 \text{ GeV}/c^2$ の質量を持つ。ヒッグス粒子と任意の粒子 x との結合の強さは、 x の質量に比例する。よって、ヒッグス粒子の崩壊分岐比は、可能な粒子・反粒子対の中で質量が大きいものほど高い。タウ粒子は、ヒッグス粒子の物質粒子対への崩壊の中でボトム・クォークについて分岐比が高い。また、タウ粒子は電子・ミュー粒子への崩壊（レプトニック崩壊）の分岐比が高く、電子・ミュー粒子を含む終状態を用いることにより、信号雑音比を向上させることが可能である。

本論文の研究では、LHC に設置された ATLAS 検出器を用いて 2011 年および 2012 年に収集された陽子・陽子衝突事象を解析し、ヒッグス粒子のタウ粒子対への崩壊を探索した。2011 (2012) 年のデータは衝突の重心系エネルギーが 7 (8) TeV であり、積分輝度は 4.6 fb^{-1} (13.0 fb^{-1}) である。終状態は、タウ粒子対の一方がレプトンに、他方がハドロンに崩壊するチャンネルを用いた。探索の結果、背景事象を上回る有意な超過（信号）は見つからなかったため、生成断面積と分岐比の積に対する上限を決定した。ヒッグス粒子の質量を $125 \text{ GeV}/c^2$ と仮定した場合、実験で決定した上限値は、対応する標準理論の予言値の 2.3 倍であった。同じ統計量を持つデータにより期待される上限の平均値は、同じく標準理論の 2.3 倍である。また、タウ粒子対の他の崩壊チャンネルを用いた解析を組み合わせることにより、上限値は 1.9 倍と決定された。このときの上限期待値の平均は 1.2 倍である。さらに、観測された事象を信号と解釈した場合の有意度は、1.1 標準偏差に対応する。期待される有意度は 1.7 標準偏差である。

審査の結果の要旨

ヒッグス粒子の直接の実験的研究は、世界の素粒子物理学の研究者が長年待ち望んでいたものであり、その重要性は言うまでもない。本論文の研究は、ヒッグス粒子と物質粒子の結合を直接に探るものであり、昨 2012 年に発見されたそれらしき粒子の正体を見極めるうえで非常に重要な研究である。探索の結果は、タウ粒子対に崩壊するヒッグス粒子の発見には到らなかったものの、有意な制限を与えることに成功し、今後の研究の展開を期待させる研究であると言える。近い将来に、データ量の増加、解析方法の最適化により、2013 年初めまでに取得したデータを用いて、探索感度を向上させ、信号の証拠（有意度 3 標準偏差程度）を示すことが期待される。

平成 25 年 2 月 15 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。