

博士論文概要

論文題目

Evidence for the Higgs boson in the $\tau^+\tau^-$ final state
and its CP measurement in proton-proton collisions
with the ATLAS detector

申請者

Yuki	SAKURAI
桜井	雄基

物理学及応用物理学専攻 素粒子実験研究

2015年6月

素粒子物理学標準理論は、非常に高い精度で予言能力を持ち、実験事実を説明してきた。標準理論ではゲージ不変性を破らずに粒子に質量を与えるために、ヒッグス機構を導入している。ヒッグス機構では、ヒッグス場(スカラー場)を導入し、自発的対称性の破れによって真空が期待値を持ち、ゲージ場と相互作用することで粒子が質量を獲得する。このヒッグス場を媒介するスカラー粒子が、ヒッグス粒子である。この機構から W/Z ボソンの質量が予言され、実際にその質量値は実験事実と矛盾しない。またヒッグス機構はフェルミオンの質量に対しても、ヒッグス粒子とフェルミオンの結合(湯川結合)を導入することでその質量起源を説明するが、それは実験的に湯川結合定数を測定し、各フェルミオンの質量値との整合性を確認することで実証される。以上の理論的背景から、ヒッグス粒子の実験的発見、及びその性質測定は、標準理論を検証する上で非常に意義のある研究課題である。

現在ヒッグス粒子の直接探索、性質測定が可能な実験は、欧州原子核研究機構によりスイス・ジュネーブ近郊に設置されている Large Hadron Collider (LHC) 加速器を用いた ATLAS、CMS 実験である。2012 年の両実験によるヒッグス粒子の発見に伴い、ヒッグス粒子の性質測定が現代の素粒子物理学における最重要課題の一つとなっている。ボソン対崩壊過程による結合定数、スピン、Charge-Parity(CP)の測定結果は、標準理論からの予言と無矛盾である。これらの実験結果から、W/Z ボソンに対する質量起源は実験的に解明されたと言える。しかしながら、フェルミオン質量起源の解明のためには、ヒッグス粒子とフェルミオンとの湯川結合の観測が必要不可欠である。フェルミオン対崩壊過程において τ 粒子対崩壊過程($H \rightarrow \tau \tau$)は、分岐比が比較的高く、その終状態の事象トポロジーを用いて最も断面積の高い QCD 背景事象を効率よく除去できる有効な探索過程である。そこで本論文の一つの主題は、 τ 粒子対崩壊過程におけるヒッグス粒子の探索である。この探索は 2011 年、2012 年に ATLAS 検出器を用いて取得された LHC での陽子-陽子衝突データを使用しており、そのデータ量は重心系エネルギー 7TeV において 4.5fb^{-1} 、重心系エネルギー 8TeV において 20.3fb^{-1} である。

さらなる重要な課題として、フェルミオン対崩壊過程によるヒッグス粒子の CP 測定が挙げられる。上記の通り、ボソン対崩壊過程での測定結果は、SM から予言される CP 偶と今のところ無矛盾である。フェルミオン対崩壊過程における CP を測定し、ボソン対での結果との整合性を検証することで、ヒッグス粒子の本質的解明が可能である。加えて、フェルミオン対過程で発見されたヒッグス粒子が標準理論を超える理論(BSM)で予言される CP 奇状態を持つヒッグス粒子であった場合、ボソン対には直接崩壊せずフェルミオンのループを介して崩壊することから、フェルミオン対崩壊過程での CP 測定は、より直接的に BSM にアクセスすることが

できる。そこで、本論文の2番目の主題は、 τ 粒子対崩壊過程を用いたヒッグス粒子の CP 測定である。この測定は、8TeV 20.3fb⁻¹ のデータを用いており、上記の探索の解析手法を用いた高感度領域において行った。

第一章では、理論的背景としてヒッグス機構を含めた標準理論の理論体系を記述する。また、実験的背景として LHC におけるヒッグス粒子の生成、崩壊過程に関して $H \rightarrow \tau \tau$ の特徴とともにまとめる。次に、 $H \rightarrow \tau \tau$ における CP 測定に関して、BSM の代表として 2 Higgs Doublet Model を挙げ理論的背景を述べる。また、ヒッグス粒子の CP に感度を持つ変数の中から特に、本論文で使用される $\tau \tau$ 終状態の崩壊面角度 (Acoplanarity angle) に関して説明する。

第二章では、実験装置である LHC 加速器と ATLAS 検出器に関してまとめる。LHC 加速器に関しては、陽子の生成からその加速機構までを詳解する。ATLAS 検出器に関しては、内側から飛跡検出器、電磁カロリメータ、ハドロンカロリメータ、ミューオン検出器を、その構成、及び検出原理についてまとめる。

第三章では、解析における終状態を構成する電子、 μ 粒子、ハドロン崩壊する τ 粒子 (τ_{had})、ジェット、消失横運動量に関して、その再構成法、同定法をそれぞれ述べる。本論文で特に重要な τ レプトンはハドロン崩壊、レプトン崩壊をするため、それに従って τ 粒子の終状態が分類される。

第四章では、主題の一つである τ 粒子対崩壊過程におけるヒッグス粒子の探索結果を述べる。本論文中では、 τ 粒子の崩壊によって定義される1個のレプトンと1個の τ_{had} を終状態に含むチャンネルに焦点を当て、その解析法と結果を述べる。また、他のチャンネルと統合した結果を最終結果としてまとめる。まず、信号事象と背景事象をその終状態の特徴とともに説明する。次に、解析に使用するデータとシミュレーションサンプルに関して述べた後、事象選択とカテゴリ分類に関して記述する。事象選択では1個のレプトンと1個の τ_{had} を終状態で要求する。カテゴリ分類では、終状態において2個の高運動量ジェットが大きなラピディティの差をもち観測される事象を VBF カテゴリに、ヒッグス粒子がブーストされて生成される特徴をもつ事象を Boost カテゴリにそれぞれ分類する。2つのカテゴリにより、生成過程の異なる信号事象は別々に解析され、結果の算出時に統合される。次に背景事象の見積りに関して述べる。特に $H \rightarrow \tau \tau$ 探索の主要背景事象の一つである τ_{had} を誤同定した事象を、実際のデータを使用した見積もり法とともに詳解する。背景事象の除去は、Boosted Decision Tree (BDT) を分類器とした多変量解析によって主に行われる。それに伴い、BDT の原理と入力変数、最適化に関して記述する。その BDT 出力値によって、信号の抽出と結果の算出を行う。次に、事象数の見積りと BDT 出力値に影響を与える解析の系統誤差を、種類別に精査し詳解する。これらの系統誤差を考慮に入れ、BDT 出力値に

対して最尤度法を用いたフィットを、全てのカテゴリー同時に行うことで最終的な信号の抽出を行った。これにより、実測値として 2.4σ (標準理論を過程した場合の期待値として 2.3σ) の信号有意度を結果として得た。また、標準理論の期待値で規格化した信号強度は $\mu = 0.96^{+0.50}_{-0.48}$ である。すべてのチャンネルを統合した結果は、信号有意度として実測値 4.5σ (期待値 3.4σ) であり、信号強度は $\mu = 1.43^{+0.43}_{-0.37}$ である。この結果はヒッグス粒子とフェルミオンの結合の「実験的証拠」であり、信号強度は誤差の範囲内で標準理論と無矛盾である。

第五章では、もう一つの本論文の主題である τ 粒子対崩壊過程におけるヒッグス粒子のCP測定法とその感度の見積もり結果を述べる。データサンプル、背景事象の見積もり、除去法に関しては前章の解析手法に従っており、この章ではCP測定に使用する特有の解析手法に関してのみ記述する。まず、CP奇状態のヒッグス粒子の事象の生成シミュレーション法を説明する。このシミュレーションは、標準理論のヒッグス粒子のサンプルに、ヒッグス粒子のCP状態を変化させる重み付けをすることで行っている。次に、CP感度変数である acoplanarity angle の再構成法に関して述べる。 τ 粒子から崩壊するニュートリノは実験的に検出されないため、再構成にはニュートリノの方向を近似し、かつ τ_{had} の崩壊の種類によって構成の異なる3種類の方法を導入する。 τ_{had} の崩壊の判別は、BDTアルゴリズムによる π^0 粒子の数によって判別が行われ、それによってカテゴリーは細分化される。また高感度領域を定義するため、前章の探索に用いたBDT出力値による事象選別を行った。測定にかかる系統誤差は前章と同一であるが、信号事象数に関する系統誤差は前章の探索結果の値に固定するため考慮から外している。CP状態の精密測定を行うには統計的に困難であったため、CP奇状態の棄却感度を見積もることによって測定の結果とした。Acoplanarity angle に対する最尤法を用いたフィットを、全カテゴリー同時に行うことで、結果としてCP奇状態のヒッグス粒子を56%の信頼度で棄却できるという予想値を算出した。最終章ではこれらの結果を精査した上で、標準理論の検証、及び次実験における $H \rightarrow \tau\tau$ 解析の見通しに関して議論する。

早稲田大学 博士 (理学) 学位申請 研究業績書

氏名 桜井 雄基 印

(2015 年 10 月 現在)

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 査読あり	<u>Y. Sakurai</u> et. al., CDF Collaboration, “Search for a low mass Standard Model Higgs boson in the Tau+Tau- decay channel at CDF, “, Phys. Rev. Lett. 108, 181804 (2012)
論文 査読あり	T. Aaltonen, <u>Y. Sakurai</u> et al., CDF Collaboration, “Combination of searches for the Higgs boson using the full CDF data set”, Phys. Rev. D88 (2013) 052013
○論文 査読あり	<u>Y. Sakurai</u> et. al., ATLAS Collaboration, “Evidence for the Higgs-boson Yukawa coupling to tau leptons with the ATLAS detector”, JHEP 04 (2015) 117
○論文 査読あり	<u>Y. Sakurai</u> et. al., ATLAS Collaboration, “Identification and energy calibration of hadronically decaying tau leptons with the ATLAS experiment in pp collisions at $\sqrt{s}=8$ TeV”, Eur. Phys. J. C75 (2015) 7. 303
論文 査読あり	<u>Y. Sakurai</u> , ATLAS Collaboration, “Search for the Standard Model Higgs Boson in the H to tau-tau to lepton-hadron and hadron-hadron Decay Modes with the ATLAS Detector”, Nuclear Physics B - Proceedings Supplements, The Twelfth International Workshop on Tau-Lepton Physics (TAU2012), Pages 226-227 (2014)
論文 査読なし	Y. Sakurai et. al., CDF Collaboration, “Search for the Standard Model Higgs boson in $\tau^+\tau^- + \text{jets}$ final state with 8.3fb ⁻¹ of CDF data”, CDF Note 10625 (2011)
論文 査読なし	Y. Sakurai et. al., ATLAS Collaboration, “Evidence for Higgs Boson Decays to the $\tau^+\tau^-$ Final State with the ATLAS Detector”, ATLAS-CONF-2013-108 (2013)
論文 査読なし	Y. Sakurai et. al., ATLAS Collaboration, “Identification of Hadronic Decays of Tau Leptons in 2012 Data with the ATLAS Detector”, ATLAS-CONF-2013-066 (2013)
講演 国際会議	Yuki Sakurai, “Standard Model Higgs Searches at Tevatron/CDF experiment”, Lake Louise Winter Institute 2012, カナダ, 2012年2月
講演 国際会議	Yuki Sakurai, “Search for the Higgs boson in fermionic channels using the ATLAS detector”, Phenomenology 2014 Symposium, ピッツバーグ, 2014年5月
講演 国際会議	Yuki Sakurai, “Search for the Standard Model Higgs Boson in the H to $\tau^+\tau^-$ to lepton-hadron and hadron-hadron Decay Modes with the ATLAS Detector”, TAU2012, 名古屋, 2012年9月
講演 国際会議	Yuki Sakurai, “The ATLAS Tau Trigger Performance during LHC Run1 and Prospects for Run2”, Large Hadron Collider Physics (LHCP) 2014, ニューヨーク, 2014年6月

早稲田大学 博士（理学） 学位申請 研究業績書

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 学会	桜井雄基、寄田浩平，“CDF 実験におけるトップクォーク対生成事象を用いた b jet energy の測定法の研究”，日本物理学会 2010 年 第 65 回 年次大会，岡山大学，2010 年 2 月 21 日
講演 学会	桜井雄基、舩越雄二郎、蛭名幸二、寄田浩平，“Tevatron/CDF 実験における $\tau^+ \tau^- + 2\text{jets}$ 事象を用いたヒッグス粒子の探索”，日本物理学会 2011 年 第 66 回 年次大会，新潟大学，2011 年 3 月 28 日
講演 学会	桜井雄基、舩越雄二郎、蛭名幸二、寄田浩平，“Tevatron/CDF 実験における $\tau^+ \tau^- + \text{jets}$ 事象を用いたヒッグス粒子探索”，日本物理学会 2011 年 秋季大会，弘前大学，2011 年 9 月 17 日
講演 学会	桜井雄基、津野総司、寄田浩平，“ATLAS 実験における実データを用いたタウ粒子トリガーの性能評価”，日本物理学会 2012 年 秋季大会，京都産業大学，2012 年 9 月 11 日
講演 学会	桜井雄基、埴慶太、中村浩二、寄田浩平，“LHC-ATLAS 実験における $H \rightarrow \tau \tau \rightarrow \text{lepton-hadron}$ 崩壊チャンネル探索のための背景事象の研究”，日本物理学会 2013 年 第 68 回年次大会，広島大学，2013 年 3 月 29 日
講演 学会	桜井雄基、埴慶太、中村浩二、寄田浩平，“LHC-ATLAS 実験における $H \rightarrow \tau \tau \rightarrow \text{lepton-hadron}$ 崩壊チャンネルを用いたヒッグス粒子の探索”，日本物理学会 2013 年 秋季大会，高知大学，2013 年 9 月 21 日
講演 学会	桜井雄基、埴慶太、中村浩二、寄田浩平，“LHC-ATLAS 実験における $H \rightarrow \text{tautau} \rightarrow \text{lepton-hadron}$ 崩壊チャンネルを用いたヒッグス粒子の探索”，日本物理学会 2014 年 第 69 年次大会，東海大学，2014 年 3 月 27 日
講演 学会	桜井雄基、新田龍海、寄田浩平，“LHC-ATLAS 実験における $H \rightarrow \tau \tau$ 崩壊過程を用いたヒッグス粒子の CP 測定”，日本物理学会 2015 年 第 70 年次大会，早稲田大学，2015 年 3 月 27 日

早稲田大学 博士（理学） 学位申請 研究業績書

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）