

博士論文審査報告書

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 10 月

現在の素粒子物理学における標準模型は、6つのクォーク (u, d, c, s, t, b) と 6つのレプトン ($e, \nu_e, \mu, \nu_\mu, \tau, \nu_\tau$) と、その粒子間に働く相互作用 (電磁相互作用 (γ)、弱相互作用 (W/Z)、強相互作用 (g)) で記述され、 $U(1)_Y \times SU(2)_L \times SU(3)_C$ のゲージ群で表現されるゲージ理論である。この標準模型は、電弱スケールにおける有効理論であり、これまでの多くの実験結果を高い精度で説明してきた信頼度の高い模型といえる。この枠組みで、とくに重要かつ未だ十分な検証が成されていないのがヒッグス粒子である。電弱対称性の破れ、真空の構造、粒子の質量起源を担うヒッグス機構は、その場の実体としてヒッグス粒子の存在を要請する。2015年現在、このヒッグス粒子を探索し、その性質を直接検証できる実験は、欧州 CERN 研究所における LHC 実験だけである。LHC は陽子・陽子衝突型加速器実験であり、世界最高重心系エネルギーの 7TeV(2011年)、8TeV(2012年)で運転し、Run1 実験を終了、現在重心系エネルギーを 13TeV に増強し、第2期実験 Run2 が始まっている。

申請者はこの LHC 加速器で加速された陽子と陽子を衝突させる点に設置された汎用検出器を用いる ATLAS 実験グループに参加し、主に τ 粒子トリガーの構築や同定法の確立、さらにはヒッグス粒子の τ 粒子対崩壊過程の探索を行ってきた。本論文の主題となるヒッグス粒子が τ 粒子に崩壊する過程の探索・検証は以下の点で重要である。①湯川結合の直接証拠、②レプトンとの直接結合の証拠、③アイソスピンダウンタイプとの直接結合の証拠、④素粒子の世代構造の源・質量起源の検証。一方、この探索の難しさの一つに、ハドロン崩壊する τ 粒子のトリガーや粒子同定が困難であることが挙げられる。ハドロンコライダーで膨大に生成される QCD 起因のジェットが τ 粒子をフェイクするため、そのモデリングや定量的評価、妥当性の検証が重要となる。申請者は物理解析だけでなく、これらの実験的な課題に対しても方法論の確立や検証の点で大きな貢献をしている。

また、標準模型におけるヒッグス粒子は、純粋な CP-even の状態をもつと予言されているが、その本質的な検証は実験観測に委ねられている。標準模型を超える Two Higgs Doublet Model では、5つのヒッグス粒子が存在し、CP-odd 状態の中性ヒッグス粒子も予言されている。したがって、ヒッグス粒子の CP 測定は、標準模型の検証だけでなく、標準模型を超える物理の発見に向けての新しい展開につながる極めて重要な研究課題といえる。ATLAS 実験と CMS 実験においてこれまでに行われた Z/W ボソン対に崩壊する過程を用いた spin-parity の測定結果は、0+以外の可能性を強く棄却しており、標準模型と一致している。一方で、フェルミオンに崩壊する過程での CP 測定は、これまでに全く行われておらず、これが本論文の2番目の主旨となっている。

本論文は、6つの章で構成されており、大きく分けて二つの研究成果が記述されている。一つ目は、ヒッグス粒子の τ 粒子対への崩壊過程の探索、二つ目はこの崩壊過程におけるヒッグス粒子の CP 測定の感度評価である。

以下に各章の概要と学術的意義について述べる。

第 1 章は、本論文に関わる理論的・実験的背景について述べられている。標準模型、とりわけヒッグス機構と湯川結合の記述からはじまり、LHC におけるヒッグス粒子生成・崩壊過程の一般論と実験結果の現状、つぎに本論文の主旨である τ 粒子対への崩壊過程の詳細と、CP 測定の意義と他崩壊過程 (ZZ/WW) の解析現状がまとめられている。第 2 章は、LHC 加速器と ATLAS 検出器について詳解されている。CERN 研究所における一連の加速器群と Run1 データの収集効率やパイラップ効果の記述に加え、ATLAS 実験の各検出器 (飛跡検出器、カロリメータ、 μ 粒子検出器、トリガーシステム) についてもまとめられている。第 3 章は、ヒッグス粒子解析に用いる粒子オブジェクトの再構成方法や再構成効率、Run1 実験での性能について述べられている。本解析は、コライダー実験で観測可能なほぼ全てのオブジェクトを使用するため、それぞれの再構成手法の理解と定量的検証が不可欠である。したがって、飛跡再構成と衝突点同定、電子、 μ 粒子、ハドロン崩壊する τ 粒子、ジェット、消失横エネルギー等、それぞれの再構成法やトリガー同定効率、エネルギースケールの決定等、広範囲にわたって記述されている。

第 4 章は、本論文の骨子である $H \rightarrow \tau\tau$ 過程の解析の詳細とその結果である。本論文では、主に τ 粒子の崩壊分岐比と発見感度のもっとも高い「レプトン + τ 過程」(レプトン崩壊する τ (e/μ) とハドロン崩壊する τ (τ_h) を含む信号過程) を利用している。また、信号事象と同様な終状態で観測される背景事象のモンテカルロ・シミュレーションのパラメータの詳細等も記述されている。ヒッグス粒子の生成過程の特徴と S/N 比の違いを考慮し、信号カテゴリーを”VBF”と”Boosted”領域に分けて、それぞれで最適化された解析を行っている。また解析の妥当性を示すために、信号領域とは排反な事象選択によって定義される多くのコントロール領域 (Top/Multijet 領域等) での検証結果も記述されている。ヒッグス粒子を探索するためには、背景事象の理解と定量的評価が極めて重要であるため、とくに本論文では Embedding 手法と Fake Rate 手法の詳細が記述されている。前者は、データで観測された $\mu\mu$ 事象を $\tau\tau$ のシミュレーションに置き換えることでジェットの不定性やパイラップの影響からくる誤差を最小化する方法である。後者の Fake Rate はジェットが τ にフェイクする事象をデータから引き出す手法であり、申請者がとくにこだわった本解析に不可欠な要素である。事象トポロジーの依存性やコントロール領域への適用など、様々な角度から方法の妥当性が検証されている。また、第 4.5 節では、ヒッグス粒子探索に最も重要な $\tau\tau$ 質量再構成法 (MMC) の詳細が示されている。これは消失横エネルギーと τ 粒子からの ν の相関を尤度法で対応づけ、親粒子であるヒッグス粒子の質量を高い精度で再構成する方法である。最終的な信号と背景事象の識別は多変量解析 (Boosted Decision Tree) を用いている。入力変数の相関や選択手法、コ

ントロール領域での確認など、非常に精度の高い検証がなされている。第 4.8 節は本解析における系統誤差が全て記述されている。信号とそれぞれの背景事象の規格化に付随する誤差や BDT 出力の分布を変化させる”shape systematics”を精査・分類し、それぞれ詳解している。最後に、全ての系統誤差を考慮して行った実データへのフィット結果がまとめられている。7TeV の 5fb^{-1} データ、8TeV の 20fb^{-1} データを使用した結果、「レプトン+ τ 過程」単独で 2.3σ の超過を観測し、他の 2 つの過程と統合すると 4.5σ の有意度の結果を得ることに成功している。信号強度は統計の範囲内で標準模型と一致している。これは、世界で初めてヒッグス粒子と τ 粒子の結合を証明するものである。

第 5 章は、第 4 章で得た結果を利用して、ヒッグス粒子のさらなる性質検証である CP 測定の感度評価を行っている。 τ 粒子対に崩壊するヒッグス粒子の CP 測定は、 τ 粒子崩壊からの複数の ν や中性 π 粒子が存在するため、実験的に非常に困難である。本論文で採用しているのは崩壊 τ 粒子が作る平面の角度相関を別の観測量によって近似的に測るものである。第 4 章と同じデータセットを使った場合、56% の信頼度で純粋な CP-odd 状態を棄却可能という結果が示されている。将来的に 100fb^{-1} 程度のデータを解析すれば、この手法で CP-even 状態と CP-odd 状態を 95% 信頼度で区別することが可能であることを世界で初めて示した結果である。最後に、本論文は第 6 章で結論付けられている。とくに今回確立した CP 測定法を今後発見される可能性のある標準模型を超えるタイプのヒッグス粒子に適用することで多角的な検証ができることを提案して論文を締めくくっている。

以上を要約すると、本論文は現代の素粒子物理学で極めて重要なヒッグス粒子と τ 粒子の湯川結合を世界で初めて証明したものである。この結果は、ヒッグス粒子とフェルミ粒子、とくにレプトンとの直接結合を示すものであり、学術的価値が極めて高い。また、 μ 粒子対への崩壊過程が同じ強度で観測されていないことを考慮すると、ヒッグス粒子がレプトンユニバーサリティを破り、素粒子の世代形成の源になっていることを示す結果であるといえる。くわえて、この過程における CP 測定法を確立し、今後のヒッグス機構の詳細検証の発展に大きな貢献をしている。国際協力で行われている巨大コライダー実験で中心的な課題を遂行し、優れた業績を残したと判断できる。

以上により、本論文は高い学術的・理学的価値を有しており、博士（理学）の学位論文として相応しいものとして認める。

2015 年 10 月

| | | | |
|---------|----------|-------------|------|
| 審査員（主査） | 早稲田大学准教授 | 博士（理学）早稲田大学 | 寄田浩平 |
| （副査） | 早稲田大学教授 | 工学博士（東京大学） | 鷺尾方一 |
| | 早稲田大学教授 | 博士（理学）広島大学 | 安倍博之 |
| | 東京大学准教授 | 博士（理学）東京大学 | 田中純一 |