

# 論文の内容の要旨

## 論文題目

# Search for Heavy Higgs Bosons Decaying to a Pair of $\tau$ Leptons in Proton-Proton Collisions

at  $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$

(重心系エネルギー 13TeV の陽子陽子衝突における  
タウ粒子対へ崩壊する重いヒッグス粒子の探索)

氏名 森永 真央

## 1 研究の背景と目的

2012年7月ヒッグス粒子と思われる新粒子 ( $m_h = 125 \text{ GeV}$ ) がスイス・ジュネーブの Large Hadron Collider (LHC) において発見された。これにより素粒子標準模型で予言されるすべての素粒子が実験的に確認された。しかし、標準模型では暗黒物質やヒッグス粒子の質量の階層性等の問題を解決出来ず、拡張する必要がある。超対称性はフェルミオンとボソンの交換に対する対称性を考慮した理論であり、暗黒物質の候補となる素粒子や階層性問題を解決できる。MSSM は超対称性のモデルとしてもっとも盛んに研究されており、ヒッグス粒子は電氣的に中性の ( $H, A, h$ ) と電荷をもつ ( $H^\pm$ ) の5つへと拡張される。ベンチマークシナリオである、hMSSM シナリオでは発見されたヒッグス粒子を  $h$ 、他のヒッグス粒子は未発見と考える。hMSSM では  $m_A, \tan \beta$  の2つのパラメータで、 $H, h, A$  の質量やその他の性質を記述できる。これら

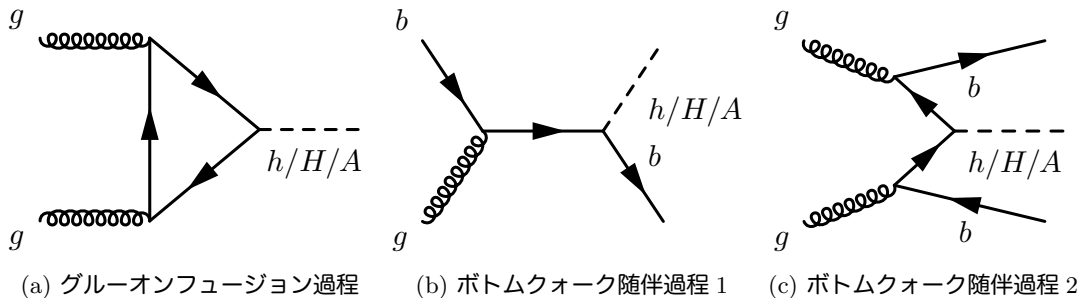


図 1: 信号事象の生成過程のファインマンダイアグラム。

はそれぞれ、 $A$ の質量、アップタイプとダウンタイプフェルミオンへの真空期待値の比である。なかでも、実験的な探索から  $H, A$  は 125 GeV より重いと考えられている。このような重い  $H, A$  の探索では、タウ粒子対へと崩壊する探索モードが最も有力である。ヒッグス粒子の信号事象は、ボトムクォークを伴う過程とグルーオンフュージョン過程の2つが存在する 図 1。ボトムクォーク随伴過程はグルーオンフュージョン過程に比べ生成断面積が大きく、また  $b$ -jet を粒子同定することで探索感度を向上させることができる。タウ

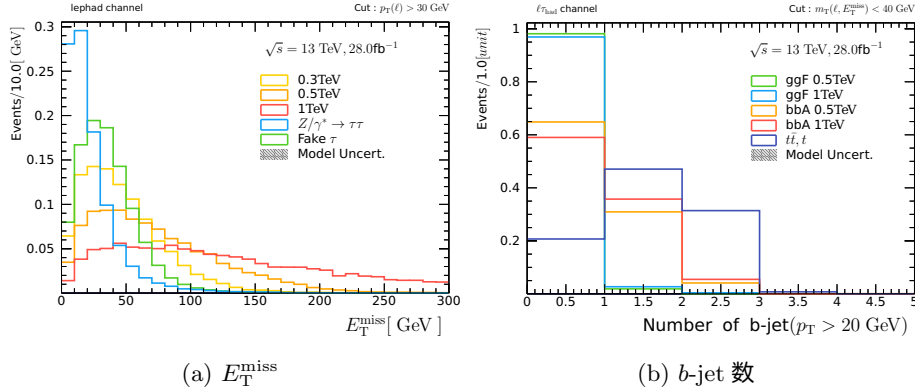


図 2: カテゴリ分けに用いる変数の分布。(a) : 信号と閉経事象の  $E_T^{\text{miss}}$ 、150 GeV 以上では背景事象を抑制できていることがわかる。(b) : 再構成された  $b$ -jet の数の分布、グルーオンフュージョン (ggF) では  $b$ -jet 数は概ね 0 である、ボトムクォーク随伴過程 (bbA) では 1 以上の事象が半数である。

粒子は軽いレプトン (電子またはミュー粒子) と 2 つのニュートリノもしくはハドロン ( $\tau_{\text{had}}$ ) とタウニュートリノにそれぞれ分岐比 35%、64% で崩壊する。そのため  $\tau\tau \rightarrow \ell\tau_{\text{had}} + 3\nu$  ( $\ell = e, \mu$ ) 崩壊チャンネルが最も分岐比が高い。また電子やミュー粒子は検出器内での誤同定確率が低いため、 $\tau\tau \rightarrow \tau_{\text{had}}\tau_{\text{had}} + 2\nu$  崩壊チャンネルに比べて背景事象との分離能力が高い。加えて複数のニュートリノがタウ粒子対の崩壊から偏って生じるため、消失横運動量 ( $E_T^{\text{miss}}$ ) が他のチャンネルと比較して大きくなる 図 2 (b)。これを積極的に用いることで探索感度を改善することができる。加えて  $b$ -jet の情報を用いることで、ボトムクォーク随伴過程に対する感度を向上させることができる。

信号を探索する上で、フェイクタウ事象と呼ばれる背景事象が重要となる。フェイクタウ事象は様々な起源があり、シミュレーションでの見積もりは精度が悪く系統誤差が大きいことが問題であった。本研究ではデータを用いた背景事象の見積もり方法を新しく開発した。

本研究ではタウ粒子対へと崩壊する重いヒッグス粒子の探索を  $\tau\tau \rightarrow \ell\tau_{\text{had}} + 3\nu$  崩壊チャンネルを用いて、新しい物理現象の有無を実験的に確認した。

## 2 研究方法とデータ解析

本研究では、LHC で陽子陽子衝突実験を行う ATLAS 検出器において、2015 年と 2016 年 9 月までに記録された実験データ約  $28 \text{ fb}^{-1}$  を用いて解析を行った。本研究では膨大な背景事象の分布上で実験データの有意な超過を調べるため、背景事象の理解とその分離が重要となる。背景事象を分離するため、事象を 3 つの信号領域にカテゴリ分けし、さらに事象選別を行い残った事象の質量分布を用いて信号を探索する。重いヒッグス粒子はほぼ止まって生成され、2 つのタウ粒子崩壊からの  $E_T^{\text{miss}}$  は相対的に大きくなる。このような大きな  $E_T^{\text{miss}}$  は背景事象にはなく分離能力が高い。そのため、まず大きな  $E_T^{\text{miss}}$  を持ったカテゴリ ( $E_T^{\text{miss}} > 150 \text{ GeV}$ ) を分け、それ以外の事象について  $b$ -jet の有無でカテゴリ分けを行う。

背景事象は、 $Z \rightarrow \tau\tau$  や  $t\bar{t}$  の終状態が信号と同じ事象、もしくはジェット等がレプトンやハドロニックタウと誤同定された事象 (フェイクタウ) の2つに分けることが出来る。ハドロニックタウは検出器内で細いジェットとして再構成され、シャワーの広がり等の情報を用いた粒子同定アルゴリズムを用いて背景事象を抑える。これらのシャワーシミュレーションは難しく、実験データを用いた見積もり方法が有効である。フェイクタウの起源として、QCD multijet、 $W$ +jet、 $t\bar{t}$  が考えられる。 $W$ +jets 事象では  $W \rightarrow \ell\nu$  崩壊からのレプトンとジェットがハドロニックタウと誤同定され観測される、 $t\bar{t}$  事象でも同様に  $t \rightarrow b + W(\rightarrow \ell\nu)$  のレプトンとジェットが誤同定される。QCD multijets ではハドロニックタウに加えてジェットがレプトンに誤同定され観測される。フェイクタウの誤同定確率はジェットの起源 (クォーク由来、グルーオン由来) で異なることが知られており、フェイクタウの3つの起源間での違いを考慮する必要がある。本研究では、以下の式で表される実験データを用いた手法を開発した。

$$N_{\text{fake}\tau} = FF \times N_{\text{CR}} \quad (1)$$

$$FF = r_q \times FF_{\text{QCD}} + (1 - r_q) \times FF_{\text{EW}}. \quad (2)$$

この方法はフェイクタウ事象を専用の制御領域 (CR) から外挿係数 ( $FF$ ) を用いて外挿する手法である。またフェイクタウ起源を QCD multijets とその他 (EW) の2つに分けて外挿係数をデータで測定し、QCD の割合係数 ( $r_q$ ) を用いて外挿係数を補正する。過去の当該研究において QCD 事象の割合の測定はシミュレーションを用いて行われてたため、系統誤差が大きいことが問題であった。本研究では、QCD 成分を実験データで見積もる手法を開発し系統誤差を大幅に小さくした。フェイクタウ事象以外の背景事象について、 $Z \rightarrow \tau\tau$ 、 $t\bar{t}$  それぞれの制御領域を設けシミュレーションを実験データで補正した。

### 3 研究結果

$b$ -veto カテゴリにおいて、165616 事象を観測した、背景事象の予測は  $165000 \pm 460$  (stat.)  $\pm 9800$  (syst.) 事象である。同様に  $b$ -tag カテゴリでは 6472 事象を観測し、背景事象は  $670 \pm 64$  (stat.)  $\pm 610$  (syst.) 事象、 $\text{high-}E_{\text{T}}^{\text{miss}}$  カテゴリでは 2084 事象観測し、背景事象は  $2095 \pm 30$  (stat.)  $\pm 140$  (syst.) 事象の予測であった。実験データには背景事象のみの予想と統計、系統誤差の範囲内で無矛盾で、信号事象の有意な超過はな

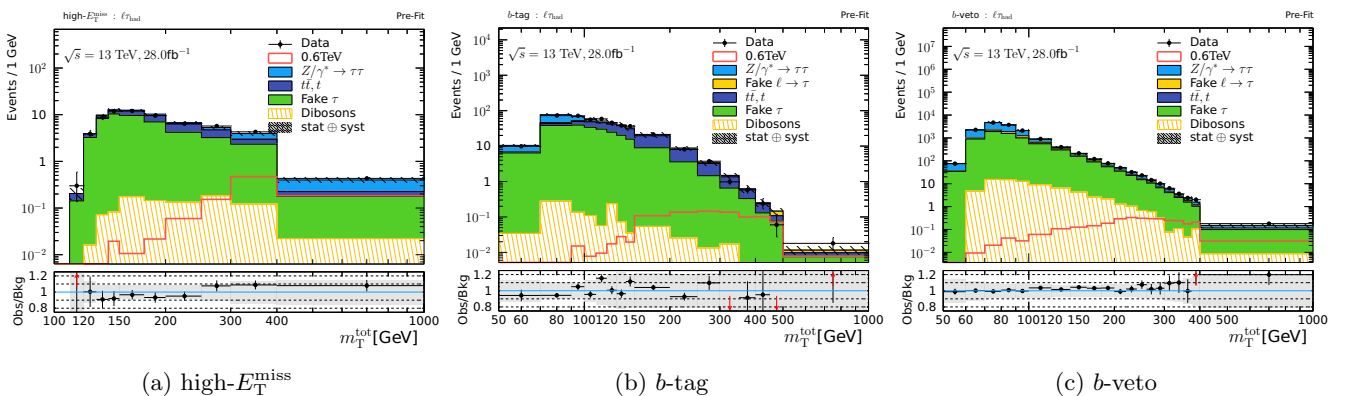


図 3: 信号領域での質量分布。

かった (図 3)。そこで信号事象の生成断面積  $\times$  分岐比の対して CLs 法を用いて制限をつける。図 4 (a)、(b) はそれぞれグルーオンフュージョン、ボトムクォーク随伴過程のみを仮定した重いヒッグス粒子の生成断

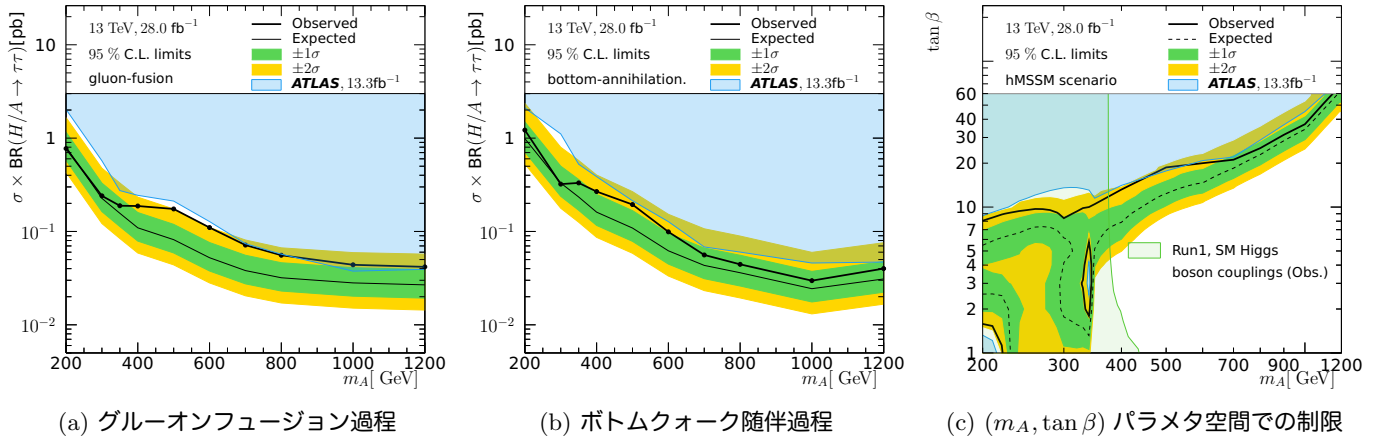


図 4: 生成断面積  $\times$  崩壊分岐比への制限と hMSSM シナリオでの制限。

面積についての 95%信頼度での制限である。図 4 (c) は hMSSM シナリオでのパラメータ空間 ( $m_A, \tan \beta$ ) での制限である。それぞれにはこれまでの当該研究での最も良い制限を青い領域で示している。図 4 (c) の 350 GeV 付近の構造は、 $H/A \rightarrow t\bar{t}$  モードへ開けるため崩壊分岐比が極端に変化するためである。グルーオンフュージョン過程のみの場合、 $m_A = 1$  TeV で 0.043 pb、ボトムクォーク随伴過程の場合、 $m_A = 1$  TeV で 0.029 pb の制限が得られた。hMSSM シナリオにおいて、 $m_A = 1$  TeV では  $\tan \beta > 36.8$  まで棄却した。

## 4 まとめと本研究の意義

本研究では、超対称性等の新しい物理に対して感度のある重いヒッグス粒子を、タウ粒子対に崩壊するモードで探索した。その結果、重いヒッグス粒子の有意な兆候は得られなかった。グルーオンフュージョン生成過程の断面積の上限値として、 $m_A = 1$  TeV で 0.043 pb、ボトムクォーク随伴過程で  $m_A = 1$  TeV で 0.029 pb の制限が得られた。これらは当該研究の結果として最高感度である。本研究では CMS 実験や過去の ATLAS 実験の結果と比較して、新しい背景事象の見積もり方法を開発し系統誤差を大幅に減らすこと、大きな  $E_T^{\text{miss}}$  を持つ事象に注目し 1 TeV を超えるような信号に対して探索感度の改善を達成したことについて重要であると言える。また本研究で開発した手法は他の新物理探索や標準模型の精密測定等への応用が可能であり、本研究の意義は重要であると言える。