

LHC ATLAS 実験

$H \rightarrow \tau\tau$ を用いたヒッグス粒子の探索

筑波大学数理物質科学研究科

埴 慶太

Keita.Hanawa@cern.ch

2012 年 (平成 24 年) 11 月 29 日

1 はじめに

2012 年 7 月 4 日, ATLAS・CMS 両実験から 5σ の統計的有意度による新ボソンの発見が報告された [1, 2]。はたしてこのボソンが, われわれが探し求めてきたヒッグス粒子であるのか? とりわけ標準模型ヒッグス粒子であるのか?

その謎を解明する上で重要な課題の一つが, ヒッグス粒子とフェルミオンの結合 (湯川結合) の検証である。

標準模型ヒッグス粒子は, すべての素粒子とその質量に比例した強さで結合すると考えられているが, その湯川結合と呼ばれる結合はこれまでに実験的な検証をうけていない。

LHC で観測されているボソンの生成断面積が (おもにトップクォークのループを経由する) グルーオン融合過程のヒッグス粒子の生成断面積と無矛盾なこと, また Tevatron での $H \rightarrow b\bar{b}$ の結果 [3] から, クォークとヒッグス粒子の結合は存在が示唆されている。しかし, レプトンとの結合に関して現在の実験では何もいえない。

そこで本稿では, レプトンとの結合検証において唯一今年度中に兆候を確認できる可能性があるヒッグス粒子が τ 粒子対に崩壊する過程 ($H \rightarrow \tau\tau$) について, 2012 年 9 月までに ATLAS 検出器で取得された重心系エネルギー 7TeV, 4.6fb^{-1} および 8TeV, 13.0fb^{-1} のデータを用いた最新結果を紹介する。

2 $H \rightarrow \tau\tau$ 解析

本過程は, 終状態での τ 粒子のレプトニック崩壊からのレプトン ($\tau_\ell: \tau \rightarrow \ell\nu_\ell\nu_\tau$), ハドロニック崩壊からのハドロン粒子群 ($\tau_h: \tau \rightarrow \text{hadrons} + \nu_\tau$) の数によって, 3 種類の崩壊モードに分けられる ($\tau_\ell\tau_\ell, \tau_\ell\tau_h, \tau_h\tau_h$)。 $\tau_\ell\tau_\ell$ は, 終状態に 2 つの τ_ℓ をもつためハドロンコライダー

で生成過程が支配的な QCD による multijet 過程 (以下 QCD 過程) の背景事象を抑制できるが, 崩壊比が小さい (12%)。一方 $\tau_h\tau_h$ は崩壊比は大きい (42%) が, τ_h が粒子群 (ジェット) として観測されるため QCD 過程との区別が難しい。 $\tau_\ell\tau_h$ は, 崩壊比も大きく (46%), τ_ℓ から QCD 過程も抑制することができるため, もっとも感度のよい解析モードである。

また解析感度向上のためヒッグス粒子の生成過程 (グルーオン融合: ggF, ベクターボソン融合: VBF, およびベクターボソンとの随伴生成: VH) に応じて解析カテゴリーを分ける。ggF 過程は, もっとも生成断面積が大きい過程であるが, ヒッグス粒子からの崩壊粒子のほかに背景事象と分離する手段がないため感度が低い。一方 VBF 過程は, 断面積は小さいが特徴的な信号をもつため (前後方向に運動量の高いジェットが存在するなど), 背景事象を抑えることができる感度の高い過程である [4]。そのため, VBF 過程の解析に特化したカテゴリー (VBF カテゴリー), ggF・VH 過程の中でもヒッグス粒子が大きな横方向運動量を持つため感度が高いカテゴリー (boost カテゴリー), またそれ以外のカテゴリーの 3 種類の解析カテゴリーに分けた。

上記の 3 種類の解析カテゴリーと 3 種類の崩壊モードに応じて, 9 つの解析チャンネルに分けて事象選択を行った。その後ヒッグス粒子の質量を再構成し, 背景事象分布の上に出てくる質量共鳴ピークを探した。

本解析の主背景事象は, QCD 過程と Z ボソンが τ 粒子対に崩壊する ($Z \rightarrow \tau\tau$) 過程である。QCD 過程は生成断面積が信号と比べて 10 桁ほど大きく, 背景事象の見積りも難しい。そのため事象選択により QCD 過程を抑えて, τ 粒子対を効率よく同定することが重要である。また $Z \rightarrow \tau\tau$ 過程は信号と同じ終状態であるため, 信号と区別する唯一の方法が質量の違いである。そのため τ 粒子対の質量再構成とその分布の理解が重要になる。

本稿では, 崩壊モード・解析カテゴリーの特徴ゆえに

解析感度が高く、著者自身が力を入れ解析を行った $\tau_\ell\tau_h$ 崩壊モードの VBF カテゴリー、boost カテゴリーを中心に解析内容を説明し、その後全チャンネルを統合した結果について述べていく。

2.1 事象選択と質量再構成

事象中に一つの τ_ℓ あるいは、 τ_ℓ 、 τ_h の両方を要求するトリガーを用いることで事象を選択する。

次に、 τ_ℓ 、 τ_h の要求をし、それらの電荷が異符号であることも要求した。 τ_h は、カロリメーター上の η - ϕ 平面上に拡がりの狭いジェットに似た信号を残す。またそのジェット中に奇数本の荷電粒子が存在する。そこで、この情報を用いて同定を行った。 τ_ℓ の要求には、検出器内で同定された電子または μ 粒子を用いた。

VBF カテゴリーでは前後方に横方向運動量の高いジェットが存在することなど、boost カテゴリーではヒッグス粒子の横方向運動量 (τ 粒子対の運動量情報から再構成) が高いことを要求をした。また 8TeV データと 7TeV データでの背景事象構成比の違いを考慮し、それぞれのデータに対して事象選択を改良し感度を向上させた。8TeV データの解析では、全背景事象中の $t\bar{t}$ 過程の割合が増加したため、 B ハドロン崩壊からのジェット (b -jet) が事象中にないことを要求し、 $t\bar{t}$ 過程を抑制した。

τ 粒子対の質量再構成は、Missing Mass Calculator(MMC) [5] と呼ばれる手法を用いて、事象毎に再構成した。MMC は、 τ 粒子の崩壊で生じたニュートリノの運動量を考える位相空間の範囲内で尤度を最大化するものから算出して質量を再構成できるため、 $Z \rightarrow \tau\tau$ 過程とヒッグス粒子との分離能力がよい。

2.2 背景事象の見積り

主背景事象である $Z \rightarrow \tau\tau$ 過程の見積りには、純度の高い $Z \rightarrow \mu\mu$ 事象のデータ中の μ を検出器シミュレーションの τ に置き換える手法を用いた。ヒッグス粒子の質量共鳴は $Z \rightarrow \tau\tau$ 質量分布のすそに表れるため、質量分布の正確な見積りが必要とされる。特に消失横運動量は質量分布に大きく影響するため、正確に見積もらなくてはならない。図 1 にこの手法によって見積もった消失横運動量の分布を示す。パイルアップ事象 [4] も含め、 τ 以外はすべてデータから見積もられているため、非常によくモデリングされている。

ただし、この手法を用いた事象はデータ量に相当した統計量しかない。そのため、きつい事象選択を行う VBF カテゴリーでは背景事象を見積もるための十分な統計量がない。そこで VBF カテゴリーの解析には、高統計のモンテカルロ (MC) シミュレーションサンプルを

用いた。データの $Z \rightarrow \mu\mu/ee$ 事象を用いて、MC シミュレーションが正しいかどうかの詳細な確認を行った。

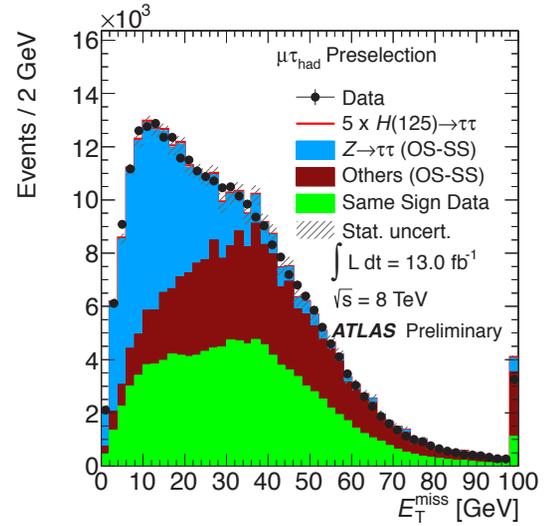


図 1: 背景事象見積り後の消失横運動量分布。

τ_ℓ 、 τ_h の誤同定による背景事象 (QCD, W +jets 過程) は、 τ 粒子対が同電荷である事象 (図 1 の Same Sign) を用いて見積もった。ただし Same Sign 事象を用いる場合、統計量に限りがあるため、VBF カテゴリーでは τ_h がない事象 (図 3 中の Fake τ に相当) から誤同定起源の背景事象を見積もった。

そのほかの背景事象 (図 1 中の Others に相当) は、それぞれのコントロール領域で MC シミュレーションをデータに規格化することにより見積もった。たとえば、 $t\bar{t}$ 過程の規格化には b -jet が存在する事象を用いた。

3 結果と展望

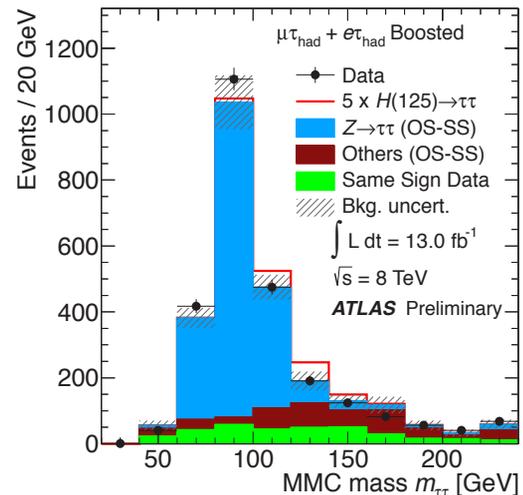


図 2: $\tau_\ell\tau_h$ 崩壊モード boost カテゴリーにおける τ 粒子対の質量分布。

図 2 に $\tau_\ell\tau_h$ 崩壊モードの ggF カテゴリーでの τ 粒子対の質量分布を示した。また図 3 に本解析でもっとも感度の高い $\tau_\ell\tau_h$ 崩壊モードの VBF カテゴリーでの τ 粒子対の質量分布を示す。

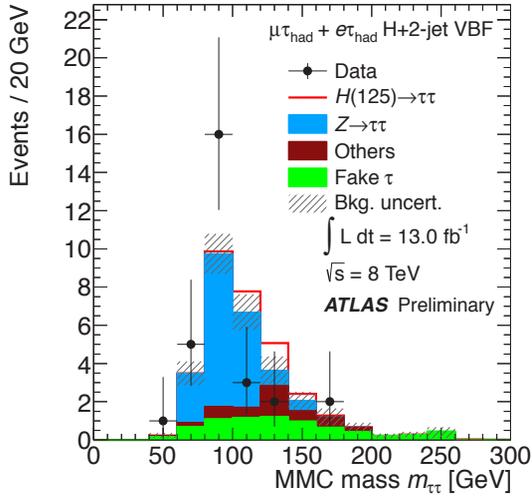


図 3: $\tau_\ell\tau_h$ 崩壊モード VBF カテゴリーにおける τ 粒子対の質量分布。

全 9 種類のチャンネルの質量分布を用いて、系統誤差を考慮した発見感度を算出した。支配的な系統誤差はジェットや τ 粒子のエネルギー測定の変動性である。

図 4 にヒッグス粒子の生成断面積 (標準理論に規格化) に対する棄却領域を示す。125GeV のヒッグス粒子に対して生成断面積の 1.9 倍以上を棄却した。この値は背景事象のみの予測値 (点線) と比べてやや多い。この超過

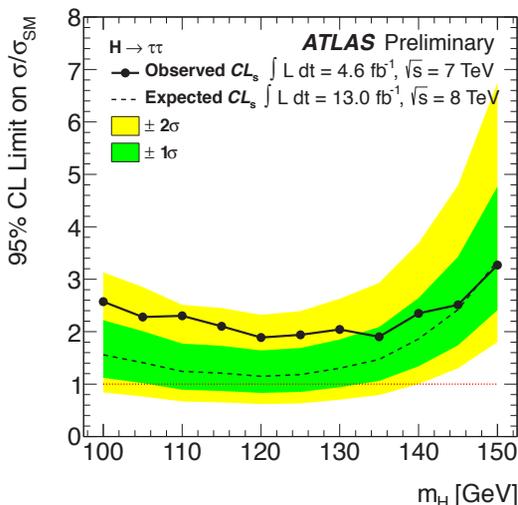


図 4: 標準模型ヒッグス粒子の生成断面積に対する上限 (標準模型に規格化)。

がどの程度背景事象の揺らぎで起こりえるのかを表した確率 (p_0) を図 5 に示す。データは 125GeV の質量領域で 1.1σ であった。また観測されたシグナルの強さを表

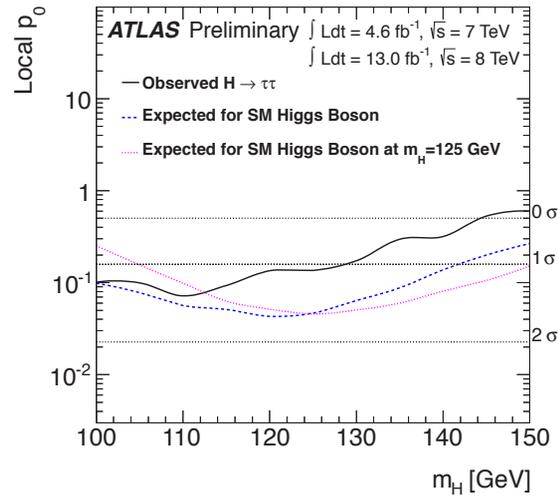


図 5: (実線) 観測された事象がヒッグス粒子がないとして説明できる確率 p_0 , (点線) 各質量点での標準模型ヒッグス粒子がある場合の予想される確率, (破線) 125GeV の標準模型ヒッグス粒子がある場合の予想される確率。

すパラメータ (μ) は 0.7 ± 0.7 であった。本解析により μ の測定精度を、前結果 [1] から減らすことができた。

次に生成過程別の μ の大きさを示す (図 6)。生成過程が ggF 過程だったものと、VBF 過程+VH 過程だったものの比を測定することでフェルミオンとの結合 (前者) およびボソンのとの結合 (後者) の比を測定することが可能である。図 6 は $H \rightarrow \tau\tau$ 生成過程を用いたフェルミオンおよびボソンのとの結合定数の大きさを標準模型に規格化したものを示す。実線は 68%, 点線は 95% の信頼度の等高線を示す。標準模型の予想する結合定数と測定誤差の範囲で無矛盾であった。

図 5 破線から分かるように本解析は 125 GeV の標準模型ヒッグス粒子に対して 1.7σ の感度をもっている。そのため、今年中に取得予定の約 2 倍の統計量のデータと解析の改善によつては 3σ の感度まで届く可能性がある。また万が一、標準模型における $H \rightarrow \tau\tau$ 過程がない場合、棄却をすることも可能である。

解析改善のためには、さらなる背景事象との分離が必要であるが、それを実現するため多変量解析を用いて解析感度の向上をはかる予定である。また現在解析を行っていない VH 過程で生成されたベクターボソンがレプトニック崩壊する過程の研究も将来の湯川結合の測定の感度向上において重要であり、今後進めていく予定である。

4 おわりに

エネルギーフロンティア実験を牽引している CERN 研究所に滞在し実験、解析を行っていることは著者自身にとっても非常に貴重な体験となっている。今回われわ

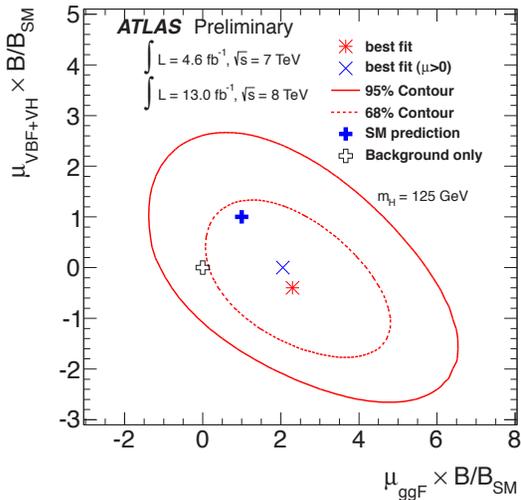


図 6: ggF - VBF 過程の生成断面積平面におけるベストフィット (生成断面積, 崩壊分岐比共に標準模型に規格化)。

これは、HCP2012で解析結果を公表するにあたり、さまざまな知恵を出し合い解析の改善を目指した。これらの改善を基に解析のアウトラインを決めた後、24時間体制でクロスチェックまたデータの詳細な理解を行った。特に、 VBF カテゴリーでの背景事象見積りの妥当性とその系統誤差を徹底的に調べ議論を積み重ねた。ヨーロッパ、アメリカ、オーストラリア、さまざまな国の人々とさまざまな時間帯で行った議論により、もちろん睡眠不足、時差によるストレスなども感じたが、国際共同実験に参加している醍醐味であった。

2012年7月4日の報告以来、われわれは次の段階に進むことができた。湯川結合の観測・測定は、その段階でもっとも重要な、多くの物理学者が待ち望んでいる結果であると考えられる。現在までのところ残念ながら、その問いに答えられる結果は出せていない、しかし今年いっぱいLHCは現在のデータ量の2倍近い統計量を取得する予定である。また本解析においていくつかの改善点が期待されている。

参考文献

- [1] ATLAS Collaboration, “Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC”, Phys. Lett. **B 716** (2012) 1-29.
- [2] CMS Collaboration, “Observation of a new boson at a mass of 125 GeV with the CMS experiment at the LHC”, Phys. Lett. **B 716** (2012) 30-61.

- [3] CDF Collaboration, D0 Collaboration, “Evidence for a particle produced in association with weak bosons and decaying to a bottom-antibottom quark pair in Higgs boson searches at the Tevatron”, Phys. Rev. Lett. 109, 071804 (2012).
- [4] 徳宿克夫, 「LHCとATLASの運転状況とヒッグス粒子探索」, 高エネルギーニュース **31-1**, 10 (2012).
- [5] A. Elagin, P. Murat, A. Pranko, and A. Safonov Nucl. Instrum. Meth. A **654** (2011) 481-489, arXiv:1012.4686 [hep-ex]
- [6] ATLAS Collaboration, “Search for the Standard Model Higgs boson in $H \rightarrow \tau^+\tau^-$ decays in proton-proton collisions with the ATLAS detector”, ATLAS-CONF-2012-160.