

# LHC ATLAS 実験

## $H \rightarrow ZZ^{(*)} \rightarrow 4\ell$ チャンネルを用いたヒッグス粒子探索

東京大学素粒子物理国際研究センター

田中 純一

Junichi.Tanaka@cern.ch

2012 年 (平成 24 年) 8 月 20 日

### 1 はじめに

通称「Golden channel for the Higgs discovery」と呼ばれてきたこのチャンネルは最後の最後、軽い質量領域でもその名に恥じない結果 [1, 2] を我々にもたらした。125 GeV という質量領域ではこのチャンネルをそのような通称名で呼ぶことはなかったが、質量分解能がよいこととバックグラウンドが少ないという二つの特徴は生成される絶対数が少ないという欠点を十分に補った。

### 2 2012 年の解析に向けて

ヒッグス粒子が4つのレプトンに崩壊するチャンネルで、電子とミュオンを使って探索を行う。 $Z$  ボソンの崩壊を考えると、 $4e$ ,  $2e2\mu$ ,  $4\mu$  の組み合わせがある。崩壊分岐比まで考慮した生成断面積は 125 GeV のヒッグス粒子で 2.2 fb (7 TeV), 2.8 fb (8 TeV) と非常に小さい。主なバックグラウンドはヒッグス粒子を介さない  $ZZ^{(*)}$  プロセスで、軽い質量領域では  $Z + \text{jets}$  ( $Zb\bar{b}$  も含む) と  $t\bar{t}$  プロセスも重要になってくる。

ヒッグス粒子の質量が二つの  $Z$  ボソンの質量 (約 180 GeV) より軽くなると少なくとも一つの  $Z$  ボソンが off-shell の状態になり、そこから崩壊して出てくるレプトンの運動量はより低くなる。したがって、軽い質量のヒッグス粒子を捕らえるためには、可能な限り運動量の低いレプトンを利用する必要がある。

2011 年 12 月の ATLAS と CMS の合同セミナーで、多くの研究者は「125 GeV 付近にヒッグス粒子が存在するのでは？」と思い始めていたと想像するが、実は ATLAS の軽い質量のヒッグス粒子に対する 4レプトン事象の選択効率は CMS と比較して悪かった。このため、2012 年のデータ解析に向け主に次の二つを改善した。一つはレプトンを選択する条件の最適化で、もう一つは電子の再構成と識別アルゴリズムの改善であった。最適化によ

り、2011 年のデータにおける 130 GeV のヒッグス粒子の事象選択効率は  $4\mu$  チャンネルでは約 60% も改善した。また、 $4e$  で約 20%,  $2e2\mu$  で約 25% ほど改善した。電子の再構成と識別については、125 GeV のヒッグス粒子が 4 つの電子に崩壊する事象について事象選択効率を約 30% 向上させた。議論はされたが、電子識別の改善のために 2011 年のデータの再プロセスはできなかった。

### 3 ヒッグス粒子候補の事象選択

今回の解析は 2011 年の  $4.8 \text{ fb}^{-1}$  と 2012 年の  $5.8 \text{ fb}^{-1}$  のデータを用いて行った。一つあるいは二つのレプトンを使ったトリガーでイベントを選択する。電子は横運動量  $p_T > 7 \text{ GeV}$ , ミュオンは  $p_T > 6 \text{ GeV}$  であることを要求し、4 つのレプトンのうち、3 つはより高い  $p_T$  の条件 (20 GeV, 15 GeV, 10 GeV) を課す。さらに、heavy flavour 崩壊からのレプトン、photon conversion からの電子、ジェットを誤って電子と認識する場合などのバックグラウンドを除くために、transverse impact parameter や isolation の条件を要求する。それらが二つの  $Z$  ボソンから崩壊したものであることを保証するため、同じフレーバー (SF), かつ、反対符号の電荷 (OS) であるレプトンペアが二個になることを要求する。

レプトンペアの不変質量に次のような条件を課すことで最終的な候補を絞り込む。 $Z$  ボソンの質量に近いペアの不変質量を  $m_{12}$  として、 $Z$  ボソンの質量ピーク領域  $50 \text{ GeV} < m_{12} < 106 \text{ GeV}$  であることを要求する。残ったペアの不変質量 ( $m_{34}$ ) は、 $Z$  ボソンが off-shell である可能性を考慮してより軽い領域まで条件を広げる。下限値を  $m_{\min}$  として、 $m_{\min} < m_{34} < 115 \text{ GeV}$  で、 $m_{\min} = 17.5 \text{ GeV}$  ( $m_H \leq 120 \text{ GeV}$ ) から  $50 \text{ GeV}$  ( $m_H \geq 190 \text{ GeV}$ ) まで探索するヒッグス粒子の質量に依存して値を変化させる。たとえば、125 GeV の場合、 $m_{\min} = 22.5 \text{ GeV}$  となる。また、非常に軽い質量

の Drell-Yan プロセスや  $J/\psi$  イベントを落とすため、すべての SF+OS レプトンペアの不変質量が 5 GeV 以上であることを要求する。125 GeV の場合の事象選択効率は、たとえば 8 TeV の場合は 36% ( $4\mu$ ), 22% ( $2e2\mu$ ), 20% ( $4e$ ) である。

ヒッグス粒子の不変質量分布の分解能を向上させるため、 $m_H < 190$  GeV の場合は、一番目の  $Z$  ボソンペアに対して  $Z$  ボソンの質量ピークを再現するように二つのレプトンの運動量を再計算する ( $Z$ -mass constraint fit)。それより重いヒッグス粒子を探索する場合は、両方の  $Z$  ボソンに  $Z$ -mass constraint fit を行う。125 GeV の場合の質量分解能は 1.7 GeV ( $4\mu$ ), 2e2 $\mu$ ), 2.2 GeV ( $2\mu2e$ ), 2.3 GeV ( $4e$ ) である。

## 4 バックグラウンドの見積り

残ったイベントを、レプトンのフレーバーを  $m_{12}$  と  $m_{34}$  で区別して4つのカテゴリに分類し、それぞれに対してバックグラウンドを求めた。 $ZZ^{(*)}$  プロセスからのバックグラウンドは理論で計算した断面積を使って Geant 4 を用いたモンテカルロ・シミュレーション (MC) から算出した。その他のバックグラウンドである  $Z$ +jets や  $t\bar{t}$  は MC を利用しながらデータを用いて評価した。シグナルが相対的に少ないと考えられる領域 (コントロール領域) から MC やデータを用いてシグナルが存在する領域、つまり、最後に我々が結果を見る領域 (シグナル領域) へ外挿する方法を用いる。この解析では、二番目の  $Z$  ボソンを構成する二つのレプトンを利用した。そのため、 $ll + \mu\mu$  と  $ll + ee$  の二つの場合を考えて、それぞれ別の方法を用いた。これはミューオンが誤認される理由がほとんど heavy flavour 崩壊からのミューオンであるのに対して、電子の場合は前節で述べた複数の可能性があるからである。以下に具体的方法を述べる。

### 4.1 $ll + \mu\mu$

二番目の  $Z$  ボソンの二つの  $\mu$  の条件を変更することで、 $Z$ +jets や  $t\bar{t}$  が主な構成要素になるコントロール領域を設定する。 $\mu$  に対して isolation の条件を外して、少なくとも一つの  $\mu$  の transverse impact parameter の条件をシグナル領域を選択する場合の条件の逆とする。これにより、heavy flavour 崩壊起源のミューオンが増える。ここで、 $m_{12}$  分布を用いて MC (各プロセスの分布は MC で見積る) がデータに合うように規格化する。同じ規格化係数をシグナル領域に適用することで、シグナル領域でのバックグラウンドを見積る。図 1 の左図はこの手法で見積った  $m_{34}$  分布である。

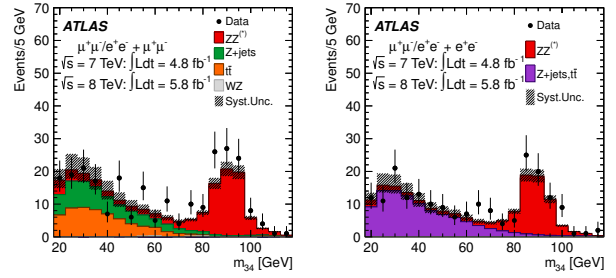


図 1: 二番目の  $Z$  ボソンペアがミューオン (左), あるいは電子 (右) の場合の  $m_{34}$  分布。

### 4.2 $ll + ee$

二番目の  $Z$  ボソンの二つの電子を選択する条件を緩くして選択した事象をコントロール領域とする。この中のすべての事象を  $e$  候補の変数の値によって 9 種類に分類する。さらに、それぞれを MC を用いて誤認の起源によって 16 分割する。それぞれのカテゴリに対してコントロール領域からシグナル領域への効率を MC で算出する (データで inclusive にチェック)。これらを掛け合わせることで最終的なバックグラウンドを見積った。図 1 の右図はこの手法で見積った  $m_{34}$  分布である。

$ll + \mu\mu$  と  $ll + ee$  の見積もりは、ここで紹介した以外にも少なくとも一つの別の手法でもチェックして、相互確認を行った。

これらの手法のためには非常に多くの MC データが必要であるが、短期間で結果を出すため、ATLAS の計算機グリッド資源に対して異例の優先度がヒッグス解析に与えられた。今でもそのために他のすべての解析が進まなくなったといわれることがある。4 レプトン解析用の MC データが揃ったのは 6 月になってからである。

## 5 結果

図 2 は 4 つのレプトンから再構成された  $Z$ -mass constraint fit を行った後の不変質量分布で、上図が 600 GeV までの分布、下図が軽い質量領域の分布である。軽い質量領域を見ると 125 GeV 付近に超過イベントがあることが分かる。本誌の表紙のイベントディスプレイは 4 つのミューオンから再構成されたヒッグス粒子候補の一例である。120 GeV–130 GeV の領域に期待されるバックグラウンド約  $10 (\pm 0.6)$  イベントに対して 13 イベント観測した。200–300 GeV も若干イベント超過が見られるが標準理論のヒッグス粒子では説明できない。

ヒッグス粒子のそれぞれの質量に対して 95% 信頼度で標準理論で規格化した生成断面積に対する上限値を求めると、軽い領域については図 3 のようになる。131–162 GeV, 170–460 GeV の領域に対して標準理論のヒッ

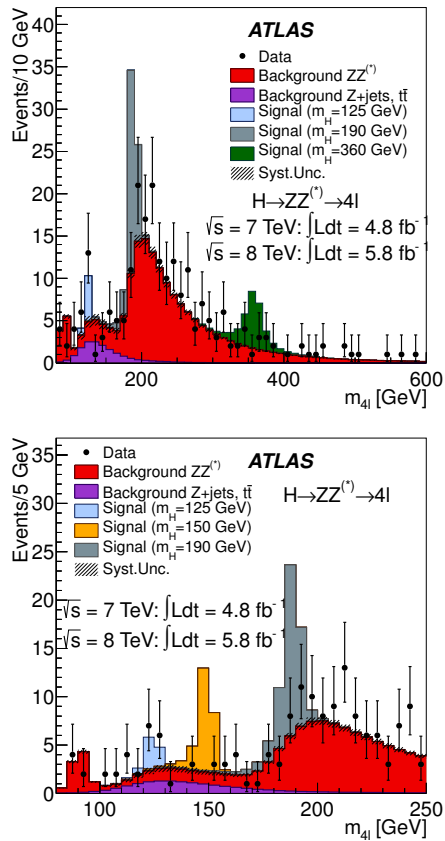


図 2: 4つのレプトンから再構成された不変質量分布: 80–600 GeV (上図), 80–250 GeV (下図)。

グス粒子を棄却し (期待値 124–164 GeV, 176–500 GeV), 125 GeV 付近に超過が再確認できる。

図 4 はヒッグス粒子のそれぞれの質量に対する local  $p_0$  である。7 TeV, 8 TeV と両方合わせた統合結果を表示している。どちらのデータにも 125 GeV 付近にイベント超過が見られ, 統合結果での最小値は 125 GeV で有意度に換算して  $3.6\sigma$  (期待値  $2.7\sigma$ ) である。これは  $H \rightarrow \gamma\gamma$  で観測したイベント超過の質量と一致している。126 GeV での標準理論に対する信号の強さは  $1.4 \pm 0.6$  で, 標準理論のヒッグス粒子と矛盾はない。また, CMS も同じチャンネルで 125 GeV に  $3.2\sigma$  (期待値  $3.8\sigma$ ) の超過 [3] を報告した。

## 6 最後に

8 TeV のデータの信号領域は解析方法が決定するまで触れることができなかった。8 TeV の解析手法を決定したのが 6 月初めであったが, 実はこの時点のデータ量でははっきりとしたイベント超過を見てとれてなかった。4 レプトンの解析責任者に「発見は頼む」(筆者は  $H \rightarrow \gamma\gamma$  の解析責任者) と弱気なことを言われたことが記憶に残るが, データが増えるにしたがって, 「おっ」という感じで 125 GeV 付近にイベントが現れた。

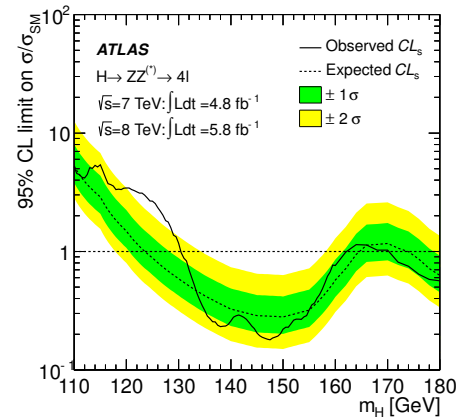


図 3: 95%信頼度で標準理論で規格化した生成断面積に対する上限値。

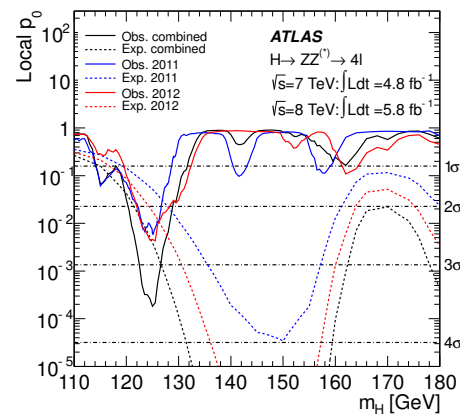


図 4: ヒッグス粒子のそれぞれの質量に対する local  $p_0$ 。実線が観測結果, 破線が標準理論のヒッグス粒子がそれぞれの質量に存在すると仮定した場合の期待値。

$H \rightarrow \gamma\gamma$  チャンネルと合わせて行った質量測定の結果や発見後の研究については, 中村氏に任せることにする。

## 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] ATLAS Collaboration, “Observation of an excess of events in the search for the Standard Model Higgs boson in the  $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$  channel with the ATLAS detector”, ATLAS-CONF-2012-092.
- [3] 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.