

LHC ATLAS 実験

$H \rightarrow \gamma\gamma$ 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

山村 大樹

Taiki.Yamamura@cern.ch

2012 年 (平成 24 年) 8 月 20 日

1 はじめに

2012 年 6 月下旬のとある日の朝、筆者は、その週に得られた新しいデータを加え、 $H \rightarrow \gamma\gamma$ の解析の更新を行っていた。二光子の不変質量 ($m_{\gamma\gamma}$) 分布を見ると、126-127 GeV の領域にある背景事象からの超過が肉眼でもわかる。今回はどの程度の超過なのだろうと胸躍らせつつ、プロファイル尤度 (profile likelihood) の計算へと進み、超過の大きさを評価する。 p_0 分布¹を見た筆者は一瞬息を呑んだ。4 σ を超えている…。解析グループとの確認をとってはいなかったが、勝手な確信のもと、一気に感動がこみ上げてきた。「間違いなく信号だ！」

$H \rightarrow \gamma\gamma$ は、低い質量領域 ($110 < m_H < 130$ GeV) のヒッグス粒子探索において、もっとも感度が高いと期待されてきたチャンネルである。2011 年の約 5fb^{-1} のデータを用いた $H \rightarrow \gamma\gamma$ 事象の探索では、ヒッグス質量にして 126.5 GeV の位置に、背景事象からのもっとも大きな超過が観測された [1]。しかし、超過の大きさは 2.8σ であり、必ずしも統計的に有意ではない。 $m_{\gamma\gamma}$ 分布に超過の兆候が見えながら、これが信号なのかをはっきりさせることができない状況は大いにもどかしかった。「今年こそは、結論を出す！」皆がそんな思いを胸に秘め、2012 年の $H \rightarrow \gamma\gamma$ 解析が始まった。そして 6 月、冒頭で述べた大きな超過をついにとらえることに成功したのである。当解析では、2012 年 6 月末までに、2011 年の 7 TeV データの解析の改善を進めたほか、今年新たに取得した 5.9fb^{-1} の 8 TeV データを用いた解析も完了させた。得られた最新の結果を、以下に報告する。

2 2012 年の $H \rightarrow \gamma\gamma$ 解析

2012 年の $H \rightarrow \gamma\gamma$ 解析におけるもっとも重要なテーマは、発見感度を上げたうえで、より確実な信号の発見

を達成することであった。しかしながら、2012 年 4/5/6 月号のレポート [2] などでも報告されているとおり、すでに 2011 年のデータ解析の段階で、二光子事象のカテゴリ化を行うことにより、信号の感度を高める最大限の努力を重ねてきた。これ以上のさらなる感度の向上は、より地道なものとなることはわかっていたが、われわれは、ヒッグス粒子の発見が手の届くところまで来ていることを信じ、解析の改善を続けた。

まず先ほど述べた事象のカテゴリ化についてだが、2011 年の解析では、二光子の質量分解能および背景事象に対する信号の割合 (S/N 比) に応じて、9 つのカテゴリを定義していた [1, 2]。これに加え、今年の解析からは、ベクターボゾン融合 (vector-boson fusion; VBF) 過程による信号事象に特化したカテゴリを新たに導入している (2011 年のデータを用いた解析にも導入)。すなわち 10 カテゴリ ((9+1) カテゴリ) による探索を行うことになり、信号の感度はカテゴリ分けをしない場合と比べ 20-25% 程度の向上が見込まれるに至った。

さらに、2011 年のデータ解析の改善に際しては、光子同定をカットベースから多変量解析 (Multi-Variate Analysis; MVA) に切り替えた。ニューラルネットワークによる、カロリメータ内における電磁シャワーの形状パラメータを用いた MVA を導入することで、信号感度をさらに 5-10% 程度向上させた²。

また、より確かな信号の観測を目指すべく、特に細心の注意を払ったのが、背景事象の関数モデリングである。 $H \rightarrow \gamma\gamma$ 解析では、 $m_{\gamma\gamma}$ 分布を関数フィットすることで、背景事象の寄与を評価する。これまでの解析では、指数関数 (exponential) を使用してきたが [1]、当解析において、もしも関数形が不適切なまま信号の発見が達成された場合、(S+B)-フィットにおいて、信号の大きさが間違っただけで評価されてしまうといった弊害も考えられる。このような関数のミスモデルによる信号探索へのバ

¹ p_0 は、観測された超過が背景事象のゆらぎによって起こりうる確率のこと。詳しくは 4 章を参照。

²なお 2012 年データの解析では、まだカットベースによる同定を行っているが、近々 MVA を導入した解析が行われる予定。

イアスの影響は、積算ミノシティの増大とともに大きくなってしまいうこともあり、今回の解析において、関数モデルの検討を改めて慎重に行うことにした。背景事象について、十分な統計量を有した三種類のモンテカルロジェネレータを用いて、関数形の最適化を進め、実データの分布形との整合性も確認したうえで、最終的には、真の背景事象の形とのずれが十分小さくなるような関数モデルをカテゴリごとに決定した。

3 最終結果に至る経緯

2011年のデータ解析において若干の超過 ($\gamma\gamma$ チャンネルでは 2.8σ) が観測されたという事実は、その後の解析結果にバイアスを与える危険性がある。そこで、このようなバイアスを回避するため、2012年データの解析においては、解析手法が決まるまで、実データの信号領域を一切見ない方針をとることにした。この期間内に、ニューラルネットやVBFカテゴリを含めたうえでの事象選択や背景事象モデルの最適化を完了し、取得データ量が 2fb^{-1} 程度に達した5月末、信号領域の観測を開始した。以降は、探索結果の更新を進めたわけであるが、6月末までの一ヶ月間における $H \rightarrow \gamma\gamma$ 探索は、極めてエキサイティングなものとなる。

この一ヶ月間の経過を少し詳しく書いてみると、まず、信号領域の観測開始直後の探索結果において、127 GeVの質量付近に超過が見られた。この時点での統計的有意度は特筆すべきものではなかったが、超過の大きさが標準模型で期待されるものより若干大きいという、2011年と一致した特徴 [1] も確かめられ、いよいよ信号の確かな兆候が得られるのではという気運が一気に高まった。その後も、データ量が増えるごとに、信号の兆候が少しずつ大きくなっていく。2012年の取得データ量が 4fb^{-1} から 5fb^{-1} 程度になってくると、2011年と2012年のデータを合わせて得られた超過が、いよいよ統計的にも有意な印象になってきた。この時期には、 $H \rightarrow ZZ$ チャンネルと合わせての探索結果の評価も進めており、新粒子発見の緊張感が日に日に高まる。当解析グループでは、7月に行われるICHEP2012に向け、探索結果の妥当性について、より慎重かつ入念な議論を続けた。10カテゴリの解析に伴う系統誤差や背景事象モデリングなど、解析手法の信頼性についての理解も十分に確認したうえで、6月26日、大きな超過の観測を示す当解析の最終結果は、実験グループ内での正式な承認を受けた。

4 最終結果

4.8fb^{-1} の2011年データおよび 5.9fb^{-1} の2012年データを用いた $H \rightarrow \gamma\gamma$ 探索の最新結果 [3, 4] を以下

にまとめる。まず図1は、二光子から再構成された $m_{\gamma\gamma}$ 分布である。関数フィットにて見積もった背景事象の寄与の様子からもわかるとおり、前年同様、126-127 GeV 付近の質量領域にデータの超過が見られた。

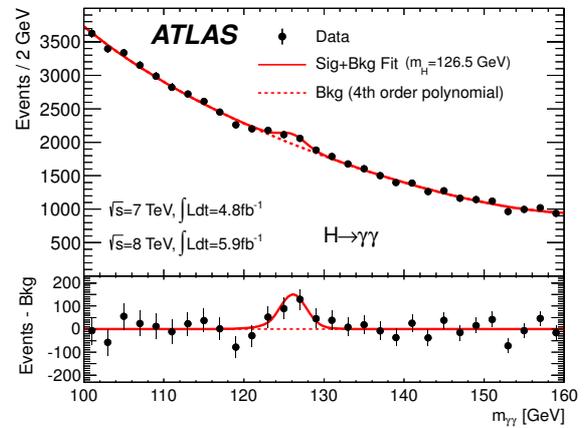


図 1: 二光子から再構成された不変質量 ($m_{\gamma\gamma}$) 分布。

また、観測された超過が背景事象のゆらぎで起こりうる確率を表す p_0 値 (local p_0) を調べたものが図2である。(p_0 の評価結果は、表1にもまとめてある。) これにより、2011年と2012年のデータを合わせた $H \rightarrow \gamma\gamma$ の探索結果においては、ヒッグス質量にして126.5 GeVの位置にもっとも大きな超過があることがわかった。光子のエネルギースケールの不定性を含めたすべての系統誤差を考慮した場合での超過の大きさは 4.5σ である。

なお、プロファイル尤度 (profile likelihood) の計算をもとに得られた p_0 値および超過の評価結果の妥当性の議論として、事象のカテゴリ化を行わない場合、すなわちインクルーシブの場合でのシグナル探索も行ったところ、126.5 GeVの位置に、 3.5σ の超過を得た。この 3.5σ という結果は、図1の質量分布での観測結果と比較しても無矛盾に見える。インクルーシブから10カテゴリにした場合の信号感度の向上は30%程度ということになり、これは期待された値 (20-25%程度の向上) と比べても妥当な結果である。また当然のチェックとして、全カテゴリにおける $m_{\gamma\gamma}$ 分布や p_0 分布も徹底的に調べ上げた。126-127 GeV 付近の質量領域において、各カテゴリで得られる超過については、程度の差こそあれ、その差は誤差の範囲内ではばらついていることも確かめられた。すなわち、当解析の最終結果である 4.5σ の超過は、一部のカテゴリの異常によって得られたわけではないことなども十分理解できている。

それから、当解析の観測で得られた信号の大きさは $\hat{\mu} = 1.9 \pm 0.5$ である ($\hat{\mu}$ は、観測で得られた信号の大きさを、標準理論のヒッグス粒子が存在すると仮定した場合の期待値で規格化したもの)。2011年、2012年の各データを用いた場合でも、 $\hat{\mu}$ はそれぞれ2.0前後であり、

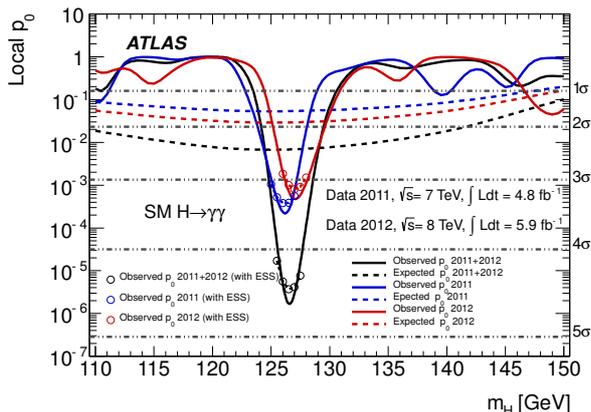


図 2: ヒッグス粒子のそれぞれの質量に対して、観測されたデータがどの程度背景事象のゆらぎで起こりえるのかを表した確率 (local p_0)。実線が観測結果 (丸印は、光子のエネルギー不定性を考慮した場合での結果)。破線が標準理論のヒッグス粒子がそれぞれの質量に存在すると仮定した場合の期待値。

表 1: $H \rightarrow \gamma\gamma$ チャンネルで観測された超過。超過のカッコ内の値は、標準理論で期待されるもの。なおここでは、光子のエネルギースケールの不定性を考慮していない場合の結果を示してある。 m_{\max} は、超過がもっとも大きくなるようなヒッグス粒子の質量。2011 年データでの m_{\max} が 126.0 GeV となっており、1 章で述べた結果 (126.5 GeV) [1] と異なっているが、この違いは、今年行った解析の改善によるもの。

データ	m_{\max}	p_0 値	超過
2011	126.0 GeV	2.8×10^{-4}	$3.5\sigma(1.6\sigma)$
2012	127.0 GeV	3.1×10^{-4}	$3.4\sigma(1.9\sigma)$
2011+2012	126.5 GeV	2.0×10^{-6}	$4.7\sigma(2.4\sigma)$

また CMS 実験においても、 $\hat{\mu} = 1.54 \pm 0.43$ となっている [5]。すなわち、現時点で得られている $H \rightarrow \gamma\gamma$ チャンネルの観測結果は、標準理論と比べ、やや大きな信号が観測されている印象があるが、統計論的観点からいっても、まだ結論をいえる段階にはもちろんない。他の解析チャンネルでの結果も含め、データ量を増やしたうえで今後の議論が興味深い。

その他に注目すべきは、データで得られた信号ピークの位置に関する議論であろう。図 2 や表 1 からわかるように、観測される超過がもっとも大きくなるようなヒッグス粒子の質量 (m_{\max}) は、2011 年と 2012 年のそれぞれのデータで 1 GeV ほどずれている。光子のエネルギースケールの不定性による信号ピーク位置の系統誤差が 0.6% であるため、これは今のところ特筆すべ

き不一致ではない。ただし今後、観測された新粒子の質量を、より精度よく議論するためにも、 $Z \rightarrow \ell\ell\gamma$ 事象 ($\ell = e, \mu$) などを用いて、光子のエネルギースケールの理解をさらに深めることが非常に重要である。

5 最後に

$H \rightarrow \gamma\gamma$ チャンネルを用いたヒッグス粒子の探索では、解析法の改善を地道に続けることで、「早くかつ確かな発見」のための探索手法を築き上げてきた。その結果として、信号の兆候が順調に育ったことはすでに述べたとおりである。いざ大きな超過が得られたことにより、これが確かな結果なのかどうかについて、緊張および重圧が生じたことも事実であるが、80 人を超える当解析グループのメンバーが総力をあげることで、責任ある結論に達することができ、本当によかったと思っている。

なお現在、ヒッグス粒子の研究は、いわゆる「発見後」の段階に入っている。 $\gamma\gamma$ チャンネルにおいても、観測された新粒子の質量および結合定数の解析を進めつつあり、その結果は 7 月末に発表された論文 [4] で詳しく報告されているが、これについては、本誌掲載の「新しいボソンの発見と今後」での議論も参照されたい。

参考文献

- [1] ATLAS Collaboration, “Search for the Standard Model Higgs Boson in the Diphoton Decay Channel with 4.9 fb⁻¹ of pp Collision Data at $\sqrt{s} = 7$ TeV with ATLAS”, Phys. Rev. Lett. **108** (2012) 111803.
- [2] 増淵達也, 中村浩二, 「LHC 最新の研究成果 IV」, 高エネルギーニュース **31-1**, 10 (2012).
- [3] ATLAS Collaboration, “Observation of an excess of events in the search for the Standard Model Higgs boson in the gamma-gamma channel with the ATLAS detector”, ATLAS-CONF-2012-091.
- [4] 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.
- [5] CMS Collaboration, “Evidence for a new state decaying into two photons in the search for the standard model Higgs boson in pp collisions”, CMS-PAS-HIG-12-015.