

LHC ATLAS 実験

$H \rightarrow WW^{(*)} \rightarrow \ell\nu\ell\nu$ 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

増 淵 達 也

Tatsuya.Masubuchi@cern.ch

2012 年 (平成 24 年) 8 月 20 日

1 はじめに

2012 年 7 月 4 日, CERN で ATLAS, CMS 両実験グループが, 126 GeV 付近に約 5σ の統計的有意度で新粒子を観測したと報告した。新粒子は 40 年以上も探索されている, 標準模型で唯一未発見のヒッグス粒子と考えると矛盾がない結果だった。しかし, このとき ATLAS 実験の報告に, 筆者の携わった 8 TeV のデータを用いた $H \rightarrow WW$ の結果はまだ含まれていなかった。その約 4 週間後, 7 月末に発表された論文 [1] で, めでたく $H \rightarrow WW$ の結果も発表することが出来た。その背景を, 筆者の主観を交えつつ紹介したいと思う。

2 解析の概要

まず, 解析の概要と 2011 年の結果を簡潔に述べる。前の号にも紹介されているので興味のある読者はそちらも参照していただきたい [2]。ヒッグス粒子が W ボソン対に崩壊して W ボソン対がレプトンに崩壊するチャンネル ($H \rightarrow WW \rightarrow \ell\nu\ell\nu, \ell = e, \mu$) は, 120-200 GeV の質量領域でもっとも発見感度がよいチャンネルの一つである。125 GeV のヒッグス粒子を仮定したとき, WW への崩壊分岐比は低く, 感度が低いと思われがちだが, $WW \rightarrow \ell\nu\ell\nu$ への崩壊分岐比は, 二光子事象 ($H \rightarrow \gamma\gamma$) の約 5 倍, 4 レプトン事象 ($H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\ell$) の約 50 倍もある。重心系エネルギー 8 TeV で積分ルミノシティ 5.8 fb^{-1} とするとグルーオン融合の信号は約 1100 事象, ベクターボソン融合の信号は約 90 事象生成されていることになる。さらに終状態に二つのレプトン, 消失横運動量が観測されるので QCD 由来の背景事象を抑制出来る。

この解析では, 多様な背景事象 (non-resonant WW , W +jets, Z +jets, top, $WZ/ZZ/W\gamma$) が信号領域に残るため, これらの背景事象の評価が重要になる。これら

の背景事象はモンテカルロシミュレーションやデータから評価する方法で見積もる。図 1 は, 二つのレプトンと高い消失横運動量を要求したあとのジェット数分布である。0 ジェット事象は, non resonant WW 背景事象が支配的であり, 1, 2 ジェット事象は, top 背景事象が支配的となる。また, ヒッグス粒子の信号は, 0,1 ジェット事象はグルーオン融合, 2 ジェット事象はベクターボソン融合から生成されたヒッグス粒子の信号が支配的である。背景事象の数と構成比, 信号事象の特徴は, ジェットの数で大きく異なる。このため, ジェット数に応じて解析を最適化している。

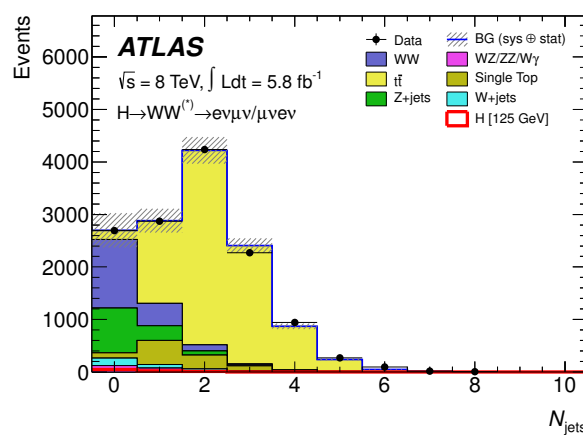


図 1: 二つのレプトンと消失横運動量を要求したあとのジェット数分布。

さらに背景事象を減らすために, ヒッグス粒子の信号に特徴的な運動学的性質を用いる。スピン 0 のヒッグス粒子から崩壊している W ボソン対は, スピン相関を持っている。このため, 二つのレプトンは同方向に観測される特徴を持つ。この特徴により, 信号事象と終状態が同じである non-resonant WW 事象を効率よく抑制することが出来る。また, この背景事象は, 信号領域のサイドバンドから外挿することで比較的精度よく評価できるた

め、系統誤差は約 10%に抑えられる。

このチャンネルは、終状態に二つのニュートリノがあるために質量の再構成が困難であり、二光子事象や 4 レプトン事象のように鋭いヒッグス粒子の質量ピークが観測できない。そのため、様々な事象選択を課したのち、

$$m_T = \sqrt{(E_T^{\ell\ell} + E_T^{\text{miss}})^2 - |\mathbf{p}_T^{\ell\ell} + \mathbf{E}_T^{\text{miss}}|^2} \quad (1)$$

で定義される横質量分布 m_T をデータにフィットすることによってヒッグス粒子を探索している。 m_T の質量分解能がよくないので、広い質量領域にブロードな超過が観測されるのがこのチャンネルの特徴である。

2011 年の重心系エネルギー 7 TeV, 4.7 fb^{-1} のデータを用いた解析の結果では、133-261 GeV の範囲でヒッグス粒子の存在を棄却した (期待された棄却領域は 127-233 GeV)。また、この結果では、ヒッグス粒子の兆候らしい有意なデータの超過は見られなかった [3]。

3 2012 年の解析と結果

2011 年の結果を 2012 年 3 月の国際会議で発表した興奮冷めやらぬ中、2012 年の物理ランは 4 月から順調に重心系エネルギー 8 TeV でデータを取り始めた。われわれ WW 解析グループも 2011 年の結果が出るや、次のターゲットを ICHEP2012 として、来たるべき 2012 年の“ヒッグスイヤー”に向けて入念に解析のストラテジーを再考し、議論を重ねていた。40 年以上の歳月をかけて様々な実験で探索されてきたヒッグス粒子を、たった 4 ヶ月やそこらの期間で発見まで持っていこうとしているわけだから、当然様々な困難が待ち受けていた。

2011 年の解析結果から、2012 年の解析でもっとも懸念される背景事象は、W+jets や Z+jets になると予想されていた。

2012 年の冬の解析は、2011 年夏の解析結果に基づいて 130-140 GeV の質量領域に最適化されていた。しかし、2011 年の棄却領域をさらに押し下げ、130 GeV 以下のヒッグス粒子を探索する際に、W+jets が特に重要な背景事象になってしまっていた。図 2 にあるように、見積もられた W+jets と 125 GeV のヒッグス粒子の信号の m_T がとても近い形になっている。さらに、一つのジェットがレプトンにフェイクした W+jets 背景事象は、モンテカルロシミュレーションのみを用いた見積もりが困難で、データを用いて見積もっている。フェイクレプトンの不定性から、データを用いても系統誤差は 30-50%と大きくなってしまふ。このような背景事象が信号領域に混入していると発見感度の向上が困難になる。そのため“信号領域における W+jets の寄与を 2011 年と比較して半分に減らすこと”を目標として、2012 年の解析がレプトンセレクションの再最適化から始められた。

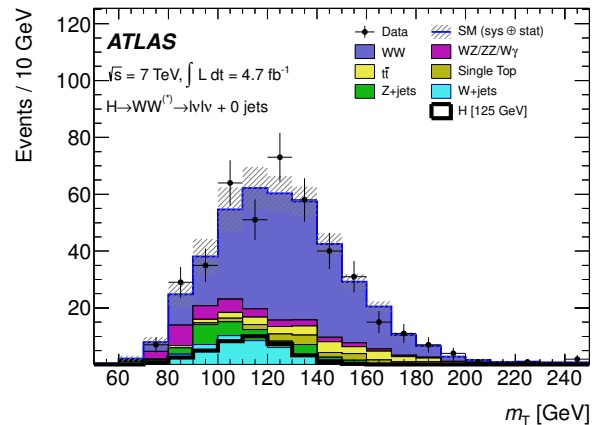


図 2: 2011 年, 7 TeV のデータを用いた解析の m_T 分布。0 ジェット解析の事象のみが図に示されている。

また、2011 年の ATLAS 実験結果から 125 GeV 付近を除いたほとんどの質量領域でヒッグスの存在は棄却され、125 GeV 付近にデータの超過が観測されたのは周知の事実であった [4]。そのため、2012 年のデータで解析の最適化をするにあたって信号領域に人間のバイアスが入るのを避けなければならなかった。よって、われわれはブラインド解析をおこない、解析の最適化が終わり、背景事象や系統誤差の見積もりが決定するまで、信号領域と同じ運動学的性質を有する、 $82.5 \text{ GeV} < m_T < 140 \text{ GeV}$ のデータを見ることを禁じていた。

最適化は観測されたデータを用いておこなう必要があり、最適化に十分なデータ量で解析され始めたのは 5 月初めであった。レプトンセレクションの最適化は、電子やミュオンフェイク率を調整しながら、信号をなるべく落とさないようコントロール領域の解析をもとに慎重におこなわれた。最適化が完了した時、すでに 6 月に入っており、ICHEP2012 までに結果をだすという時間的なプレッシャーが日に日に増して、WW 解析グループを襲っていた。このような状況下でも、最適化により信号事象を 2011 年に比べて 80~90% の同定効率に保ちつつ、W+jets 背景事象を約半分に減らすことに成功した。表 1 で、最適化の結果を 2011 年と比較している。

表 1: 2011 年解析と 2012 年解析で、全背景事象に対する W+jets 事象の割合の比較。

	2011 年の解析 $\sqrt{s}=7 \text{ TeV}$ 4.7 fb^{-1}	2012 年の解析 $\sqrt{s}=8 \text{ TeV}$ 5.8 fb^{-1}
Signal (125 GeV)	17	20
W+jets	21	15
Total background	105	142
N_{W+jets}/N_{total}	20.0%	10.6%

次に問題となる $Z \rightarrow ee/\mu\mu + \text{jets}$ 背景事象の評価も並行しておこなわれていた。この背景事象は終状態にニュートリノを含まないので、高い消失横運動量を要求することで、本来十分に抑制できる。しかし、増加したパイルアップの影響で消失横運動量の分解能が悪くなり、2011年と同様に高い消失横運動量を選択するだけでは $Z + \text{jets}$ を十分に抑制できなくなっていた。2011年よりも2-3倍多い2012年のパイルアップ環境で、この背景事象が2011年より数倍増加すると試算され、 $ee, \mu\mu$ チャンネルの発見感度が大きく低下することがわかった。そのため、ICHEP2012に向けて、解析は $e\mu$ チャンネルに絞ることにした。 $e\mu$ チャンネルは、 $Z \rightarrow ee/\mu\mu$ の背景事象をほぼ無視出来るので、発見感度の低下も抑えられる。

また、2012年から重心系エネルギーが変わったため、今まで長い年月をかけて作られてきたモンテカルロシミュレーション (MC) をたった数ヶ月で作直さなければいけない困難な状況もあった。特に、この解析では、多様な背景事象の評価をMCに頼る部分も大きい。CERNのグリッドコンピューティングをもってしても解析に必要なすべてのMCサンプルが揃ったのは6月に入ってからであった。

6月中旬頃から本当か嘘かもわからないCMSの解析が順調に進んでいるとの噂も流れてきた。そのような状況でも、 WW 解析グループはあくまでICHEP2012に結果を間に合わせるべく、ほぼ不眠不休の戦いを続けていた。結局、解析の最適化が終わり、すべての背景事象と系統誤差が評価され、ATLAS ヒッグスグループでブラインドされたデータをオープンにする許可が出たのは6月27日だった。この時点で、すでに7月4日のセミナーが1週間後に迫っていた。データをオープンにする許可が出るやいなや、われわれ解析グループは、取り除かれていた信号領域のデータを加え信号の超過があるかどうかをチェックする作業に入った。その日の夜にはデータをオープンした結果が作られ、図3を目の当たりにした。なんと、明らかなデータの超過が m_T 分布に見えたのである。これはヒッグス粒子の兆候なのか？ この時点では定量的なことは言えないので、はやる気持ちを抑えつつ様々な分布の確認作業を続けていた。図4は、データから背景事象を差し引いた分布と予想される信号分布を比較したものである。われわれが観測した m_T 分布の超過は、125 GeV のヒッグス粒子で予測される形とよく一致していた。

次の日には、統計計算の暫定的な結果も出され、定量的な議論に入っていた。図5は、 p_0 という観測されたデータがどの程度背景事象の揺らぎで起こり得るのかを表した確率である。質量分解能が悪いため、データの超過は広い領域に分布するという、このチャンネルの特徴も観測された。2011年と2012年を統計的にコンパイン

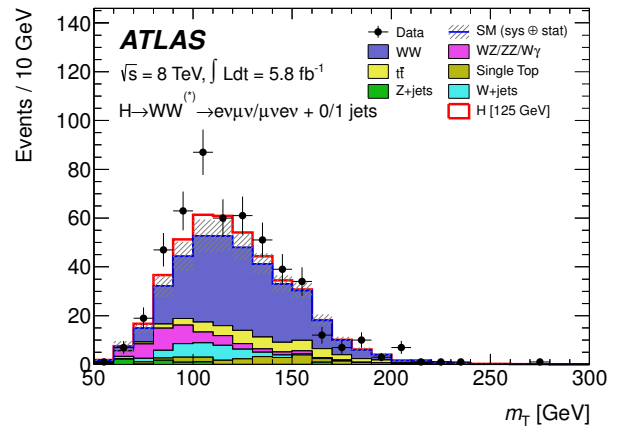


図3: 2012年、8 TeV のデータを用いた解析の m_T 分布。0jet 解析と 1jet 解析の事象が足されている。

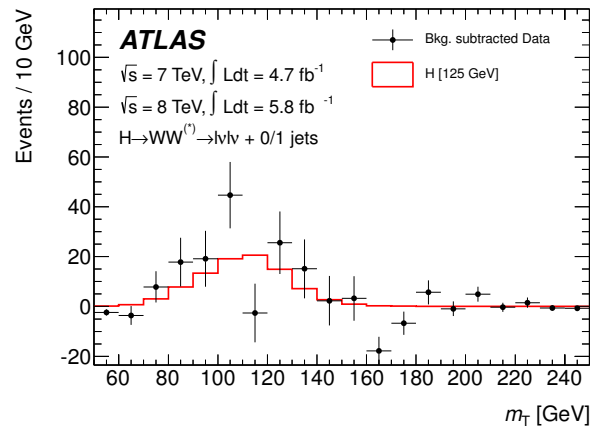


図4: 2011年と2012年の観測されたデータから予測された背景事象を差し引いた m_T 分布を 125 GeV のヒッグス信号と比べたもの。データ点の誤差棒にはデータと背景事象の統計誤差が含まれているが、系統誤差は含まれていない。

した結果から、我々は $H \rightarrow WW \rightarrow l\nu l\nu$ チャンネルで 125 GeV に統計的有意度 2.8σ のデータの超過を観測した (標準模型の期待値は 2.3σ)。また、126 GeV のヒッグス粒子を仮定し、標準模型で期待される値を1としたときの、観測された信号の強さの最尤値を表すパラメータ (1.3 ± 0.5) も標準模型と無矛盾であった。

6月29日にはATLAS全体に、この解析結果を披露する機会が与えられた。なんと、発表が終わると会場に自然と拍手が起こっていた。ATLAS 内部のミーティングにも関わらず、である。筆者も ATLAS 内部のミーティングで拍手が起こったのを経験したのは初めてで、感慨深いものがあつた。しかし、この時点で7月4日のセミナーとICHEP2012まで数日に迫っており、ATLAS 実験グループの審査と承認にかかる時間と、解析の細部を詰める作業を考えると、7月4日のセミナーとICHEP2012で $H \rightarrow WW$ チャンネルの結果を発表することは許可

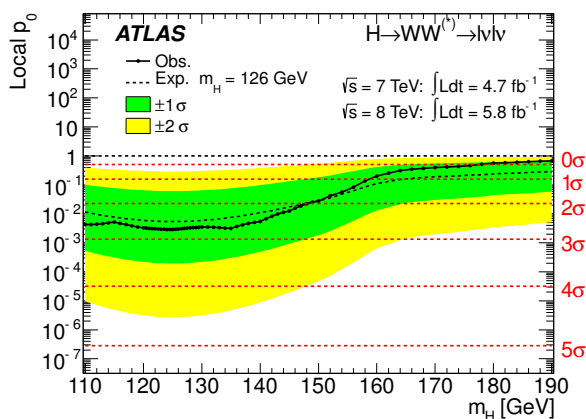


図 5: 2011 年と 2012 年の解析を統計的にコンバインした p_0 。実線は観測された p_0 、点線は 126 GeV のヒッグス粒子が存在したときに予想される p_0 。

されなかったため、われわれの目標は、その後の“発見”論文にこの結果をいれるということに切り替えられた。

この論文にまとめられているほかのチャンネルとのコンバインの結果は、「新しいボソンの発見と今後」で中村氏が詳しく議論するのでそちらを参照していただきたい。

4 今後の展望

この記事が書かれた 8 月 20 日の時点で 10fb^{-1} を超えるデータが重心系エネルギー 8 TeV で取得されており、2012 年、約 20fb^{-1} のデータが取得される見込みである。論文に結果を入れる事が出来なかったが、 $Z \rightarrow ee/\mu\mu + \text{jets}$ 背景事象を高パイルアップ環境で効率よく抑制するための研究は続けられており、 $ee, \mu\mu$ チャンネルの結果を入れて解析を改善し、 WW チャンネル単独で 5σ 程度の発見感度が見込まれる。今後は、ベクターボソン融合の信号にも感度が出てくると期待され、フェルミオンやボソンと、この新粒子の結合定数の測定が可能になってくる。また、この新粒子がスピン 2 の可能性も完全に排除されたわけではなく、観測されたレプトンの角度分布を用いたスピンの測定など、性質を測定する時代に入る。この新粒子がヒッグス粒子と無矛盾なのか標準模型で説明できない性質が観測されるのか、今後の進展にぜひ期待していただきたい。

5 最後に

ATLAS 実験グループの総力が実った結果であることは言うまでもないが、総勢 60 名程の $H \rightarrow WW$ 解析グループのチームワークと努力がなければこの難局は乗り切れなかっただろう。

筆者がこのヒッグス“らしき”新粒子の発見に携われたことに感謝するとともに、検出器に携わった人々や、ヒッグスグループの無茶な要求にも迅速に対応してくれた MC プロダクションチーム、また解析グループのメンバーにもこの場を借りて感謝したい。

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] 増淵達也, 中村浩二, 「LHC 最新の研究結果 IV」, 高エネルギーニュース **31-1**, 10 (2012).
- [3] ATLAS Collaboration, “Search for the Standard Model Higgs boson in the $H \rightarrow WW^* \rightarrow l\nu l\nu$ decay mode with 4.7fb^{-1} of ATLAS data at $\sqrt{s} = 7\text{TeV}$ ”, Phys. Lett. **B 716** (2012) 62-81.
- [4] ATLAS Collaboration “Combined search for the Standard Model Higgs boson in pp collisions at $\sqrt{s} = 7\text{TeV}$ with the ATLAS detector”, Phys. Rev. **D86** (2012) 032003.