

LHC ATLAS 実験

新しいボソンの発見と今後

東京大学素粒子物理国際研究センター

中村 浩二

Koji.Nakamura@cern.ch

2012年(平成24年)8月20日

1 はじめに

国際会議 ICHEP の初日にあわせて、CERN 研究所で行われた記者会見で歴史的な結果が報告された。ATLAS および CMS 実験で矛盾しない新しいボソンの存在が 5σ の統計的有意度で観測された。本稿では、発見にいたるまでの裏側を紹介しつつ、この結果の意味、今後何が必要となるのかについて述べる。

2 発見までの半月間の様子

LHC 実験は6月18日までに 6.6fb^{-1} (内 5.9fb^{-1} を解析に使用) のデータを取得して、約二週間にわたる加速器調整のための運転停止期間に入った。ここまでのデータを7月初めの国際会議 ICHEP で使うことはあらかじめ決定されており、同時にこのデータが2011年に見られた 125GeV 付近の超過の真偽を決定的にするのに十分であることもわかった。ただし、もっとも感度の高い $H \rightarrow \gamma\gamma$, $H \rightarrow ZZ$, および $H \rightarrow WW$ の結果をすべてそろえる必要がある。前ページまでに紹介された3つのチャンネルの様子からも分かるが半月間という短期間でよく理解された結果を出すことは困難を極めた。さて、これらのチャンネルをどのようにコンバインしていったのか、いつ 5σ の確証を得たのかについて紹介する。

コンビネーションは、各チャンネルで作られたインプットをまとめた一つのインプットを作ることから始まる。インプットとは、各チャンネルのデータ、予想信号、予想される背景事象の数および分布、さらに系統誤差を加えた確率密度関数を用いた尤度関数を記述したものである。コンビネーションはもちろん各チャンネルのインプットが揃うまで始められないが、少ない量のデータを用いて6月中旬より始められた。2011年の解析の系統誤差と、2012年の解析の系統誤差に相関があるかどうか必ずしも自明ではないためひとつづつ精査する必要が

あったからだ。さらに、500を越える系統誤差を記述するニューサンスパラメータの収束の様子を一つずつ確認することも結果の信頼性の向上に必要不可欠であった。

6月18日、最初の2011+2012年のコンビネーションインプットを作った。2011年の $4.6\text{--}4.9\text{fb}^{-1}$ (全崩壊過程を含む) に加えて $3.2\text{--}3.4\text{fb}^{-1}$ の2012年データ ($\gamma\gamma, ZZ$) を含めたインプットである。結果は予測、観測ともに 3.5σ 程度の感度であった。このインプットを一週間かけて徹底的に精査し、問題がないことを確認した。6月26日、さらに2012年のデータを増やし、 $\gamma\gamma 5.9\text{fb}^{-1}$, $ZZ 5.3\text{fb}^{-1}$ のデータを含めたインプットを作った。結果、予想感度は 4.5σ 程度であったが観測した感度は 5σ を越えた。世界中の物理学者がいつの日にかと描いてきた夢が現実のものになった瞬間だった。これは実に記者会見の約一週間前のことだった。

もちろんこれですべてが終わったわけではない。インプットを細部までチェックする必要があった。翌日 ZZ の 5.9fb^{-1} の結果を含めたほぼ最終結果が揃い 5.09σ の感度を観測した。発見感度は profile likelihood 法 [1] による検定を行い算出する。これはすべてのパラメータを同時にフィットする方法で一回の検定でもそれなりの時間がかかるが、擬実験で 5σ の確率を検定するには数10万 CPU 時間が必要となる。そこで、尤度分布を χ^2 分布と近似し、解析的に感度を計算する手法 (asymptotic 法) を用いた。しかし、エネルギー補正の系統誤差の扱いは細心の注意を払う必要がある。通常系統誤差はニューサンスパラメータとして分析され、結果の感度を下げる方向に働く。しかしエネルギー補正の系統誤差は必ずしも感度を下げるわけではない。エネルギー補正の不定性は信号の質量分布と強い相関があるため、エネルギー補正の系統誤差を調整することにより、誤って複数のチャンネル間で共通の感度の高い点を見つけてしまうことがある。この効果は asymptotic 法では検証することは難しく、また、前述したように擬実験も技術的に不可能であつ

た。最終的に可能な擬実験のデータを用いて χ^2 分布と指数関数の和を用いた外挿推定により最終結果 5.0σ を算出した。

6月28日、データをあけた WW を含めたコンビネーションの結果で、感度 6.0σ を観測したが ATLAS グループ内部での審査の時間が十分でないことから、この結果は7月末の論文まで公表が延期された。

3 結果

記者会見で発表されたチャンネルに $H \rightarrow WW$ の結果を加えたコンバインの結果について述べる [2]。

質量 126.5 GeV の標準模型ヒッグス粒子仮定において、もっとも大きな兆候が観測された。図1に背景事象の揺らぎでデータを観測する確率 (p_0) を質量の関数で示す。上段は質量が 150 GeV までの狭い領域を示す。 126.5 GeV の p_0 の値は 4.9σ (予想感度), 6.0σ (観測感度) で、新しい粒子の発見というのに十分であった。

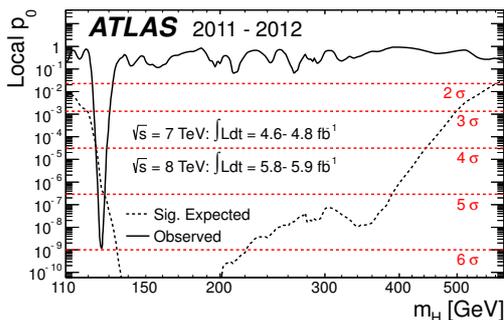
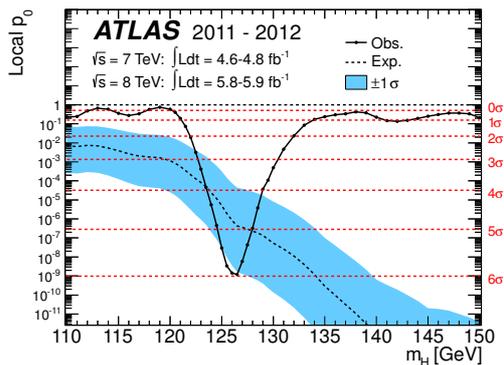


図1: 標準模型予測 (点線) および観測 (実線) された p_0 。上段は $m_H < 150\text{ GeV}$ までの領域, 下段は 600 GeV までの領域を示す。

前述した, エネルギー補正の系統誤差を考慮すると, 5.9σ となるが結論は変わらない。下段に同様の値を広い領域でプロットしたものを示す。現在 ATLAS 実験で探索を行った 110 GeV から 600 GeV のほぼ全領域で 2σ を超える予想感度がある (点線) 状況で, 126.5 GeV が唯一の 2σ を超える兆候である。背景事象で誤ってどこかに

高い超過を観測することを避けるための look elsewhere effect の評価を, 5σ を超える感度に対して適応すべきであるか疑問ではあるが, 110 GeV から $600(150)\text{ GeV}$ の領域のどこかで 5.9σ の超過が観測される確率は $5.1(5.3)\sigma$ であり, 結論はかわらない。

同時に論文に投稿された CMS の論文 [3] も 5.0σ で信号を観測していて, もはや疑う余地はない。

観測された超過を標準模型の生成断面積や崩壊分岐比と比較することで新しい粒子がヒッグス粒子と矛盾しないかどうか検証することができる。図2は, 信号の強さに対するベストフィットの値を質量の関数で示したものである。 126 GeV における信号の強さは, 標準模型ヒッグスの $1.4(\pm 0.3)$ 倍であり, ヒッグス粒子の生成断面積や崩壊分岐比と矛盾しない。

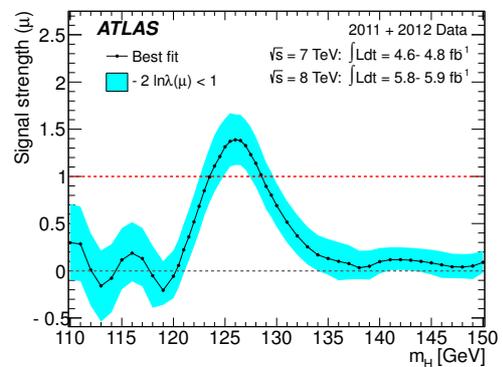


図2: 各質量点での信号の強さに対するベストフィットの値 (標準模型に規格化)。

観測された新しい粒子 (崩壊過程からボソンであることが明らかなので以下 “新しいボソン” と呼ぶ) がヒッグス粒子だと仮定した場合, 標準模型を越える様々な理論はふたつのヒッグス二重項への拡張を予言する。この場合, 3種類の中性ヒッグス粒子と二種類の荷電ヒッグス粒子の存在が予言される。今回の結果で, 二つ目以降のヒッグス粒子の存在は確認されたのだろうか。図3に, 標準模型ヒッグス粒子の生成断面積に対する上限を示す。 126 GeV 付近をのぞくすべての領域で, 標準模型ヒッグスの生成断面積を超えるヒッグス粒子の存在を 95% の信頼度で棄却した。これは直ちに二つ目のヒッグス粒子を否定するものではなく, 生成断面積の低いヒッグス粒子の存在は今後データを増やして検証する必要がある。

4 ヒッグス粒子と呼ぶために

私たちはまだ今回発見された新しいボソンをヒッグス粒子と呼ぶことを許されていない。この粒子の特性を調べて標準模型が予想するヒッグス機構を担う場に生じた

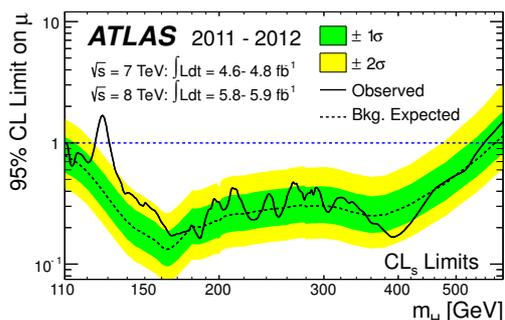


図 3: 標準模型ヒッグス粒子の生成断面積に対する上限。

粒子であることを確認する必要がある。特に、以下の3点が重要である。

- 質量の測定
- スピンの測定
- フェルミオン, ボソンとの結合定数の測定

各チャンネルで、信号の強さと質量の平面で、尤度の大きさを示した図 4 から、質量のベストフィット 126.0 ± 0.4 (統計誤差) ± 0.4 (系統誤差) GeV が得られた。さらに重要なことは、今回観測された3つのチャンネルの超過がすべて矛盾しない質量をもつということだ。これは単一粒子の異なる崩壊過程であることを強く示唆する。

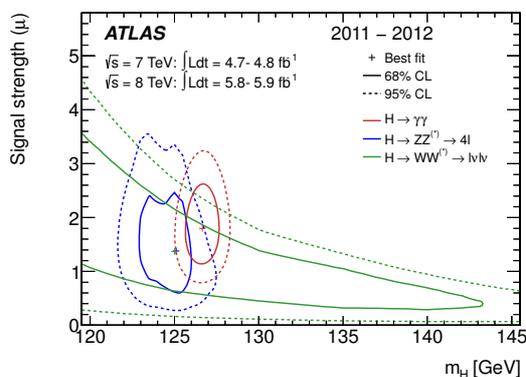


図 4: 質量-信号の強さの二次元平面におけるベストフィットの値 (信号の強さは標準模型に規格化)。

観測された新しいボソンがヒッグス粒子であるとする、新粒子はスカラー粒子である必要がある。 $H \rightarrow \gamma\gamma$ チャンネルで兆候が確認された段階で、スピンは 0 か 2 であることが示されたが、スピン 2 を棄却すること、さらに擬スカラーを棄却することが今後の課題である。

三つ目の結合定数の測定がもっとも重要かつ困難な測定ではないだろうか。今回観測された3つのチャンネルはいずれも生成過程がグルーオン融合過程が支配的である。これらのチャンネルでの観測は、新粒子がフェル

ミオンと結合することを強く示す。同時に WW や ZZ への崩壊からボソンとの結合はすでに観測されている。フェルミオン、ボソンの新粒子との結合定数の大きさをもっとも簡単に測定する方法は同じ崩壊過程の事象を使って生成過程がグルーオン融合+トップクォーク随伴生成だったものと、ベクターボソン融合+ベクターボソン随伴生成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) とボソンとの結合 (後者) の比を測定することが可能である。図 5 は、 $H \rightarrow \gamma\gamma$ の生成過程を用いたフェルミオンおよびボソンの新粒子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。結果は標準模型の予想する結合定数と大きな測定誤差の範囲で無矛盾であった。

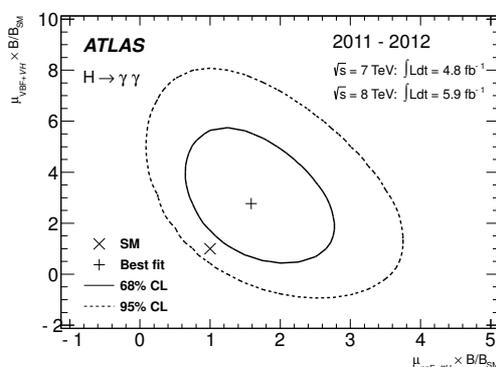


図 5: $H \rightarrow \gamma\gamma$ 過程を用いた ggF - VBF 過程の生成断面積平面におけるベストフィット (生成断面積, 崩壊分岐比共に標準模型に規格化)。

さらにヒッグス粒子がフェルミオンおよびボソンの質量の起源であることを示すには質量の違う粒子との結合定数の比を正確に測る必要がある。結合定数の直接測定は今後本格化するが、現在解析が行われているすべてのチャンネルで生成断面積 \times 崩壊分岐比を比較することで、結合定数の比に対するヒントが得られる。図 6 は、各チャンネルにおける質量 126 GeV を仮定したときの信号の強さの比較を示す。この結果も大きな測定誤差を持つチャンネルはあるが標準模型の予想するヒッグス粒子の結合定数と矛盾しない。ただし、 $H \rightarrow \tau\tau$ チャンネルと $H \rightarrow bb$ チャンネルは、その結合が存在しない場合とも無矛盾であるため、これらのチャンネルでの兆候の観測が必要不可欠である。特に τ レプトン対に崩壊する過程は実質的に唯一レプトンとの結合定数を測定可能なチャンネルであり、兆候の観測は極めて重要である。

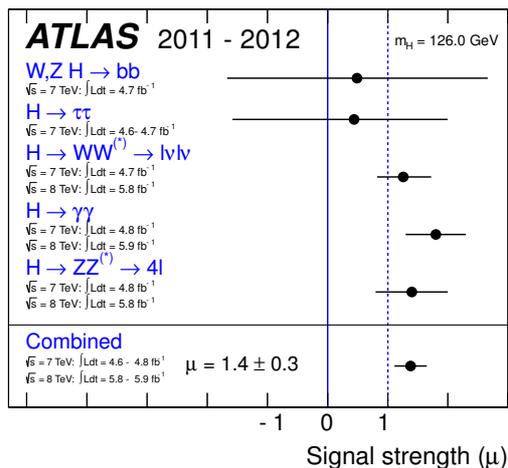


図 6: 各チャンネルにおける 126 GeV のヒッグス粒子を仮定したときのベストフィットから得られた信号の強さ (標準模型に規格化)。

5 おわりに

2012 年 7 月、歴史的な発見がなされた。数十年の間世界中の科学者が探しつづけて来たものをついに発見した。LHC 加速器グループをはじめ、ATLAS および CMS 実験を含め延べ 1 万人近くの貢献のもとになし得た発見であった。この発見はたしかに一つの区切りであるが、決して LHC 実験の目指すゴールではない。14 TeV の陽子陽子加速器は、はるかに大きなスケールの潜在的な観測能力を持つ。前章でも述べたスピンや結合定数の測定から、未知の新粒子の存在の確認まで今後も目をはなせない。筆者を含め多くの ATLAS コラボレータは、この歴史的な発見を受け幾度も祝杯をあげたが、同時に現在も取得し続けているデータに対する議論を一度もとめることはなかった。今後、年末から年度末にかけて更なる興味深い結果を報告する予定である。しばらく LHC 実験の結果を楽しみにしてほしい。

参考文献

- [1] G. Cowan, K. Cranmer, E. Gross, and O. Vitells, “Asymptotic formulae for likelihood-based tests of new physics” Eur.Phys.J. **C71** (2011) 1554.
- [2] 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.
- [3] CMS Collaboration, “Observation of a new boson at a mass of 125 GeV with the CMS exper-