

# LHC ATLAS 実験

## $H \rightarrow b\bar{b}$ チャンネルを用いたヒッグス粒子探索

CPPM, Aix-Marseille Université

永井 義一

nagai@cppm.in2p3.fr

2012 年 (平成 24 年) 12 月 2 日

### 1 はじめに

この夏, ATLAS および CMS 両実験が, 質量 125 GeV 近辺に新粒子を観測した。また, 先日開催された Hadron Collider Physics Symposium 2012 および Higgs Coupling 2012 において, ヒッグス粒子探索の最新結果が報告された。特に, 有意な信号過剰を観測した  $H \rightarrow \gamma\gamma$ ,  $ZZ$ ,  $WW$  過程では, 新粒子のプロパティ測定に関する議論が進みつつある。

現在までのところ, 新粒子はボソン対に崩壊する過程でのみ観測されているが, もし新粒子が標準模型の予言するヒッグス粒子であるならば, フェルミオン対への崩壊過程も存在するはずである。特に質量 125 GeV 付近では  $b$  クォーク対への崩壊分岐比が 57.7% と支配的であると予測され,  $H \rightarrow b\bar{b}$  過程の探索は重要な意味を持つ。

この過程の探索は, 2011 年秋に運転を終了した Tevatron の実験 (CDF, DZero) における全データ解析の結果が公表されており, 質量 120–140 GeV 付近に  $3.0\sigma$  程度の非常に興味深いデータ超過を観測したと報告している [1]。また, ATLAS 実験グループでは,  $W$ ,  $Z$  ボソン (あわせて  $V$  と示す) との随伴生成過程について 2011 年の全データ ( $4.7 \text{ fb}^{-1}$ ) を解析し, 質量 125 GeV における標準模型の予想値で規格化した (生成断面積  $\sigma_{VH}$ )  $\times$  (崩壊分岐比  $BR(H \rightarrow b\bar{b})$ ) の上限値 (以降, 規格化した生成断面積の上限値と示す) は, 95% 信頼度で 4.6 (期待値 4.0) であった [2]。

本稿では, 特に LHC における主な  $H \rightarrow b\bar{b}$  過程探索チャンネルである,  $VH$  過程についての最新結果を報告する。 $VH \rightarrow Vb\bar{b}$  過程の解析には, 様々な困難が訪来しよう。終状態がクォーク対であるため, 非常に大きな生成断面積をもつ multijet 事象が背景事象となる点, ジェットのエネルギー測定精度に起因する質量分解能の悪さ, おもな背景事象であるベクターボソンと複数ジェットの生成過程 ( $V + \text{jets}$ ) に関する理論予測の難しさ, などである。背景事象に比べて生成断面積の小さなヒッグス

粒子からの信号をとらえるためには, いかに背景事象を少なく抑え, かつ, その数の見積りを正確に行えるかがキーポイントである。これらをどのように解決し最終結果を導いているか, 本稿を通してお伝えしたい。

### 2 解析の概要

この解析は, 2011 年の  $4.7 \text{ fb}^{-1}$  に加えて 2012 年の  $13.0 \text{ fb}^{-1}$  のデータを用いて行った。解析は,  $W$  ボソン・ $Z$  ボソンの崩壊過程に応じ, レプトン (電子またはミューオン) の数によって以下の 3 チャンネルに分けて行った。(1) 0 レプトンモード (おもに,  $ZH \rightarrow \nu\nu b\bar{b}$ ), (2) 1 レプトンモード (おもに,  $WH \rightarrow \ell\nu b\bar{b}$ ), (3) 2 レプトンモード ( $ZH \rightarrow \ell\ell b\bar{b}$ ), である。以下に, 2012 年の  $WH/ZH \rightarrow W/Z + b\bar{b}$  過程の解析の流れについてまとめ, 詳細については後ほど説明する。

各チャンネル毎に信号の特徴および背景事象の種類が異なるため, 事象選択は各チャンネルごとに最適化する。次に,  $H \rightarrow b\bar{b}$  過程の終状態である,  $b$  クォーク起源のジェット (以下  $b$ -ジェット) の同定を行う。以上の事象選択後, 選ばれた  $b$ -ジェットに対し測定エネルギーの較正をおこなう。 $b$ -ジェットエネルギーの測定精度が悪いと再構成したヒッグス粒子の質量分布分解能も悪くなり, 最終結果にも大きく影響するため改善に取り組んだ。また, 背景事象の見積りについては, 各背景事象源の規格化定数を全チャンネルのデータに対して共通とおくことで, 見積りの精度を向上させることに取り組んだ。

#### 2.1 各チャンネル毎の事象選択

##### 2.1.1 0 レプトンモード

イベントの取得には, 消失横運動量 ( $E_T^{\text{miss}}$ ) を要求するトリガーを用いる。トリガー効率  $\epsilon$  は  $E_T^{\text{miss}}$  が 120 GeV (160 GeV 以上) で約 80% (100%) である。加えて解析

段階にて、 $E_T^{\text{miss}}$  が 120 GeV より大きいこと、レプトンがないこと、二つまたは三つのジェットがあることを要求する。最終的な発見感度を向上させるために、ジェット数 (2 ジェットまたは 3 ジェット) と  $E_T^{\text{miss}}$  領域 (120–160 GeV, 160–200 GeV, > 200 GeV) で定義した合計 6 つの信号領域に分割して解析を行う。

0 レプトンモードは終状態が  $E_T^{\text{miss}}$  + ジェットとなり、multijet 事象からの背景事象への寄与が非常に大きい。これらを効率的に減らすため、ジェットと  $E_T^{\text{miss}}$  のなす角の情報などを用いた複数のカットを最適化し、multijet 事象を無視できるほどに抑えた。事象選択後のおもな背景事象は、 $W/Z$  + jets, およびトップクォーク事象である。

### 2.1.2 1 レプトンモード

イベントの取得には、一つのレプトンを要求するトリガーを用いる。トリガー効率運動量 25 GeV 以上をもつ電子 (ミュオン) に対して平均 90% 以上 (バレル部約 70%, エンドキャップ部約 90%) である。加えて解析段階にて、高い運動量を持つレプトンが一つだけ存在すること、および 2 ジェットを要求する。また、 $W$  ボソン横運動量 ( $p_T^W$ ) の領域 (0–50 GeV, 50–100 GeV, 100–150 GeV, 150–200 GeV, > 200 GeV) で定義した合計 5 つの信号領域に分割して解析を行う。

1 レプトンモードでは、1 つのジェットをレプトンと誤認識した multijet 事象の寄与による背景事象が大きいため、レプトンの同定には厳しい条件でのクオリティカットを要求した。また、トップクォーク事象からの寄与を減らすために、 $W$  ボソン起源の横質量

$$m_T = \sqrt{2p_T^l E_T^{\text{miss}} (1 - \cos(\phi^l - \phi^{\text{miss}}))}$$

が 120 GeV 以下であることを要求した。 $m_T$  の下限カット値および  $E_T^{\text{miss}}$  のカット値は、 $p_T^W$  領域毎に最適化を行った。事象選択後のおもな背景事象は  $W$  + jets およびトップクォーク事象である。

### 2.1.3 2 レプトンモード

イベントの取得には、一つまたは二つのレプトンを要求するトリガーを用い、二つのレプトンが同じフレーバーかつ反対符号の電荷であること、および二つのジェットを要求する。1 レプトンモードと同様に、 $Z$  ボソン横運動量  $p_T^Z$  を用いて 5 つの信号領域に分割し解析を行う。

2 レプトンモードでは、レプトンの誤認識による multijet 事象起源の背景事象は比較的寄与が小さく、信号の数を最大化するために、レプトンのクオリティカットは 1 レプトンモードに比べて緩い条件を要求した。ま

た、レプトンペアの不変質量が  $Z$  ボソン質量の  $\pm 8$  GeV 内であること、 $E_T^{\text{miss}}$  が 60 GeV 以下であることを要求する。事象選択後の主な背景事象は  $Z$  + jets およびトップクォーク事象である。

## 2.2 $b$ -ジェット同定とエネルギーの較正

事象選択後のイベントには、 $b$ -ジェットばかりでなく、背景事象となる  $c$  クォーク起源のジェット (以下、 $c$ -ジェット)、light クォーク ( $u, d, s$  クォーク)/グルーオン起源のジェット (以下、light-ジェット) が多数含まれている。これらの背景事象を落とすために、 $b$ -ジェットの同定を行う。

本解析では、二段階で  $b$ -ジェット同定をおこなうアルゴリズムを用いた。第一段階では、内部飛跡検出器により再構成されたジェット中の荷電粒子飛跡情報を利用し、 $B$ -ハドロンが長寿命であること、 $b$ -ジェット中の荷電粒子飛跡の情報、 $b$ -ジェット中の  $B$ -ハドロンの崩壊過程に関する情報、などの情報から各ジェットの  $b$ -ジェットらしさを見積る。ここでは、三種の  $b$ -ジェット同定を独立に行い、三つの  $b$ -ジェットらしさを見積った。

第二段階では、第一段階で三つの方法それぞれで求められた、三つの  $b$ -ジェットらしさを入力変数とし、多変量解析手法であるニューラルネットワーク法を用いて最終的な  $b$ -ジェット同定をおこなう。このニューラルネットワークは 0 (light-ジェットらしい) から 1 ( $b$ -ジェットらしい) の範囲で出力され、解析毎の必要に応じてカット値を定めて使用する。図 1 に  $b$ -ジェット同定アルゴリズムの性能として、light-ジェットの排除効率 (誤同定効率の逆数) を  $b$ -ジェット同定効率の関数として示す。図中の MV1 がニューラルネットワーク法による  $b$ -ジェット同定アルゴリズムである。本解析では、 $b$ -ジェットの同定効率が 70% となるようにカット値を定め、 $b$ -ジェット同定をおこなった。そのときの  $c$ -ジェット (light-ジェット) の誤同定確率が約 20% (約 0.7%) である。

次に、 $b$ -ジェット同定されたジェットにエネルギー較正を行う。約 20% の  $b$  クォークがミュオンを含む崩壊過程であり、カロリメータによるジェットのエネルギー測定から逃れる。その結果、 $b$ -ジェットのエネルギー測定精度は悪くなり、 $b$ -ジェットペアの不変質量分布 (再構成されたヒッグス粒子の不変質量、 $M_{bb}$ ) の分解能を悪くする。最終結果を  $M_{bb}$  を用いて導くため、 $M_{bb}$  分解能をよくすることで探索感度の向上を目指す。特に本解析では、ミュオンの寄与をカロリメータで測られたジェットのエネルギー測定に補足することで質量分解能を向上させた。結果、ヒッグス粒子の質量分解能を 12% 向上し、較正後の質量分解能は平均 16% である。今後、 $B$  ハドロンのセミレプトニック崩壊に際して現れるニュートリノ

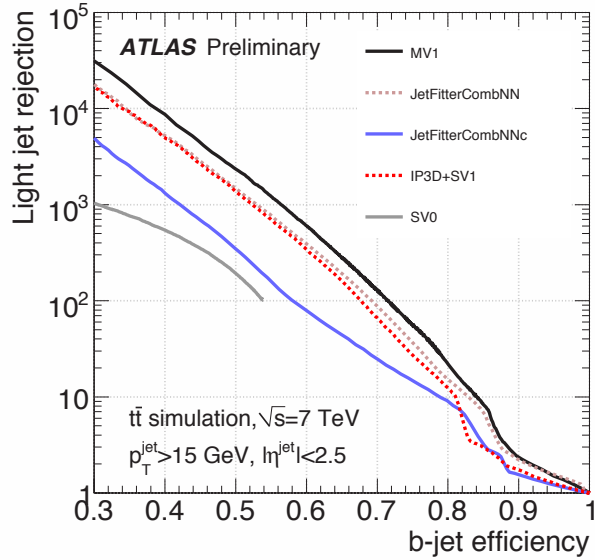


図 1: light-ジェットの排除効率 (誤同定効率の逆数) を  $b$ -ジェット同定効率の関数として示す。本解析では、MV1 を  $b$ -ジェットの同定効率 70% で用いる。

の存在も考慮して、質量分解能をさらに改善する予定である。

### 2.3 背景事象の見積り

本解析で扱う 3 チャンネルには、以下の背景事象が含まれる。multijet, diboson ( $WW$ ,  $WZ$ ,  $ZZ$  対生成), top (トップクォーク対生成および単生成),  $V+b$ -ジェット,  $V+c$ -ジェット,  $V$ +light-ジェットである。各物理プロセスの分布は MC を信頼し、その数をデータより見積ることとした。ただし、multijet 事象はデータのみを用いて、diboson 事象は MC のみを用いて見積った。特に本解析では、それぞれの信号領域に対して背景事象を個別に見積るのではなく、背景事象の混合比が違う各信号領域の情報を下記のように扱うことで、少統計な事象選択後の各背景事象 (特に、高い  $p_T^{W/Z}$  または  $E_T^{\text{miss}}$  の信号領域) の見積り精度向上に取り組んだ。

背景事象の見積りは、 $M_{bb}$  分布を用いて、二段階の最尤法によるフィットを経て行う。第一段階目のフィット (以下、フレーバーフィット) では、 $V+c$ -ジェット,  $V$ +light-ジェットの数を決めることから始める。フレーバーフィットには、全チャンネルの全信号領域 (二つの  $b$ -ジェット同定されたジェットを要求する) に加えて、 $c$ -ジェット, light-ジェット, top 事象が支配的な領域の  $M_{bb}$  分布を用い、multijet 事象と diboson 事象を除く全背景事象の数をフィットにより決定する。ただし、フレーバーフィットにより決定された  $V+b$ -ジェットおよび top 事象の数については、ヒッグス粒子の信号からの寄与およびフィッ

トの系統誤差によるフラツキの可能性を考え、最終的な値とはしない。次に、第二段階目のフィット (以下、信号フィット) として、全信号領域に対し profile likelihood 法 [3] によるフィットを行う。信号フィットにおいては、信号の数、 $V+b$ -ジェットおよび top 事象の数のみを変数として決定し、ほかの背景事象はフレーバーフィットの結果を用いて制限をかけ、誤差範囲でのみ動くことを許す。表 1 に見積られた背景事象の生成断面積に対する補正値を示す。2011 年の解析に比べて、不定性を小さくすることに成功したが、依然として  $V+b/c$ -ジェット過程の不定性が比較的大きいことがわかる。現在、これらの過程の理解をさらに深め、系統誤差を抑えるための研究に取り組んでいる。

表 1: フレーバーフィットにより決定された  $V+c$ -ジェット,  $V$ +light-ジェット背景事象の生成断面積に対する補正値 (表中左列), および信号フィットにより決定された  $V+b$ -ジェット, top 事象の生成断面積に対する補正値 (表中右列)。

	補正値		補正値
$Z+c$	$0.71 \pm 0.23$	$Z+b$	$1.11 \pm 0.15$
$Z$ +light	$0.98 \pm 0.11$	$W+b$	$0.79 \pm 0.20$
$W+c$	$1.04 \pm 0.24$	Top	$1.29 \pm 0.16$
$W$ +light	$1.01 \pm 0.14$		

## 3 最終結果

### 3.1 $WZ$ , $ZZ$ 対生成過程探索の結果

$H \rightarrow b\bar{b}$  の解析結果を示す前に、 $Z \rightarrow b\bar{b}$  過程を用いたベクターボソン対生成過程 ( $WZ$ ,  $ZZ$ ) の探索結果を簡単に紹介したい。 $WZ$ ,  $ZZ$  対生成過程は三本以上のレプトンに崩壊するモードを用いて、標準模型の予測と無矛盾に存在が確認されている。また、 $VZ$ ,  $Z \rightarrow b\bar{b}$  過程は  $VH$ ,  $H \rightarrow b\bar{b}$  過程と同じ終状態になり、事象選択後の信号数は 4-5 倍程度ヒッグス粒子信号より多い。そのため、これらの過程を探索することは、 $H \rightarrow b\bar{b}$  の探索手法をテストするためのよいプローブとなる。 $WZ$ ,  $ZZ$  生成過程探索の解析は、上記のヒッグス粒子探索の手法と同じ方法を用いて行った。ただし、 $W/Z$  ボソンの横方向運動量  $p_T^{W/Z}$  が  $VH$  過程より低いため、信号領域を  $p_T^{W/Z}$  または  $E_T^{\text{miss}}$  で分割せずに解析を行った。

図 2 は、 $WZ/ZZ$  およびヒッグス粒子からの寄与を残して、先述の方法により見積った背景事象を差し引いた後の  $M_{bb}$  不変質量分布である。質量 80-90 GeV 付近を見ると、標準模型の予測に無矛盾な信号超過が観測されていることがわかる。観測された信号の強さは



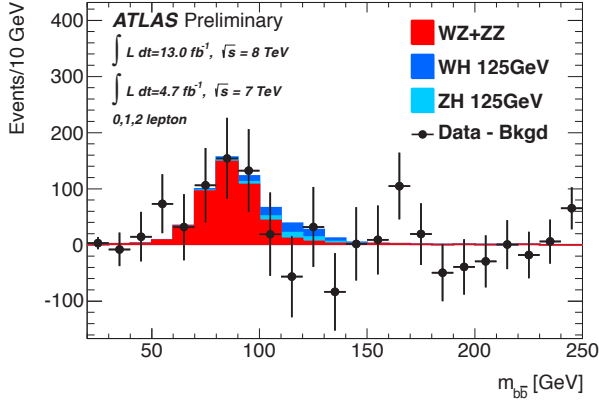


図 2:  $WZ/ZZ$  過程およびヒッグス粒子以外の背景事象を差し引いた後の  $M_{bb}$  不変質量分布。データ点の誤差棒には統計誤差のみを含む。

$\mu = 1.09 \pm 0.20(\text{stat.}) \pm 0.22(\text{syst.})$  であり標準模型の予測とよく一致している。ここで  $\mu$  は、観測で得られた信号の大きさの最尤値を標準模型の理論予測期待値で規格化した値である。また、この信号超過の統計的有意度は  $4.0\sigma$  である。

### 3.2 $H \rightarrow b\bar{b}$ 過程探索の結果

図 3-5 に、2012 年データ  $13.0 \text{ fb}^{-1}$  を用いた信号フィット後の各チャンネルの  $M_{bb}$  不変質量分布の例を示す。全 16 信号領域の解析を行った結果、統計的に有意なデータの超過は観測されなかった。質量 125 GeV での規格化した生成断面積の上限値は 3.4 (期待値は 2.5) であり、2012 年データ単独での観測された信号の強さは、 $\mu = 1.0 \pm 0.9(\text{stat.}) \pm 1.1(\text{syst.})$  である。また、2011 年データ  $4.7 \text{ fb}^{-1}$  と合わせた結果を図 6 に示す。質量 125 GeV での規格化した生成断面積の上限値は 1.8 (期待値は 1.9) であり、観測された信号の強さは、 $\mu = -0.4 \pm 0.7(\text{stat.}) \pm 0.8(\text{syst.})$  であった。また、ヒッグス粒子が 110 GeV に存在する可能性を 95%信頼度で棄却した。

## 4 今後の展望

本解析では、2011 年の解析結果である規格化した生成断面積の上限値 4.6 (期待値 4.0) に比べて、データ増加分を大きく上回る発見感度の向上に成功した。また、3.1 節に示したように、標準模型の予測通りに  $WZ, ZZ$  対生成過程の観測に成功しており、解析手法がうまく機能していることを確認した。2012 年の LHC ラン終了時点で、解析可能なデータ量は本解析の倍程度である約  $25 \text{ fb}^{-1}$  が見込まれ、2012 年解析の全データ解析結果は、質量 125 GeV での規格化した生成断面積の上限期待値

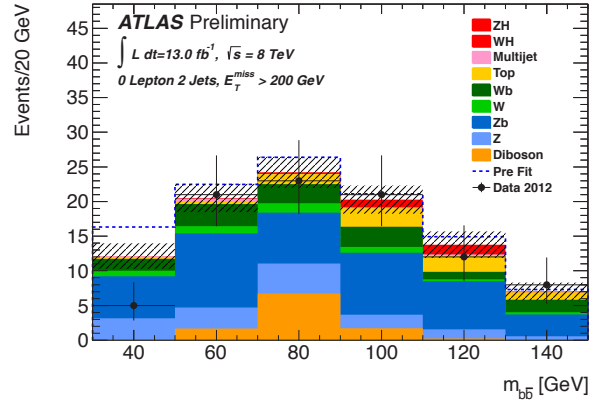


図 3: 0 レプトンモード、2012 年データの  $M_{bb}$  不変質量分布 (図は  $E_T^{\text{miss}} > 200 \text{ GeV}$  の例)。中塗りヒストグラムに profile likelihood 法による信号フィットにより見積られた背景事象を、点線にて信号フィット前の背景事象分布を示す。ヒストグラムの誤差 (黒ハッシュ) には統計誤差・系統誤差を含む。

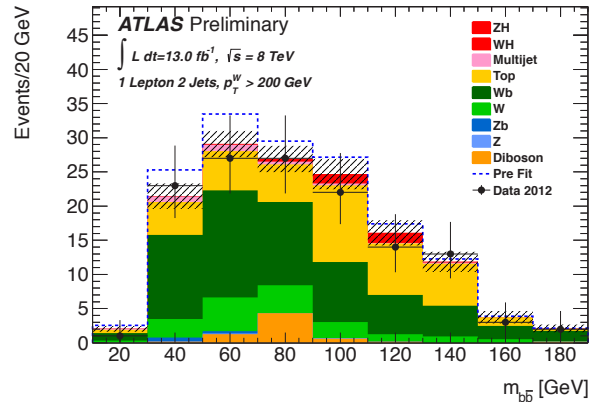


図 4: 1 レプトンモード。2012 年データの  $M_{bb}$  不変質量分布 (図は  $p_T^W > 200 \text{ GeV}$  の例)。

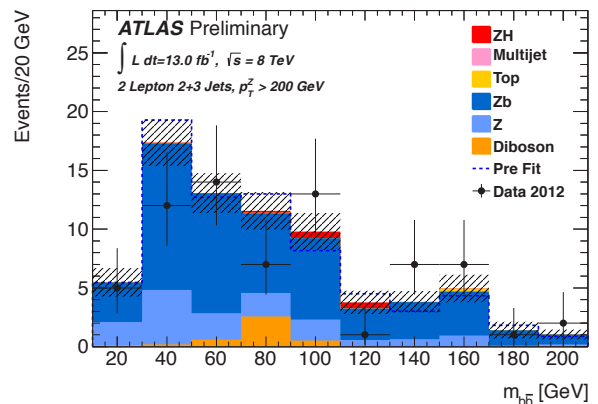


図 5: 2 レプトンモード。2012 年データの  $M_{bb}$  不変質量分布 (図は  $p_T^Z > 200 \text{ GeV}$  の例)。

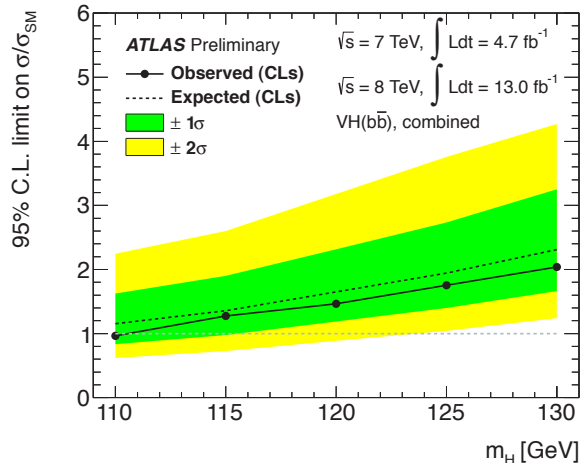


図 6: 各ヒッグス質量に対する規格化した生成断面積の上限値 (95%統計的信頼度)。結果は、全データ・全チャンネルを合わせている。

1.8 程度まで向上する見込みであり、2011 年のデータ解析とあわせて 1.5 に到達することが期待できる。

現在、ATLAS 実験・ $H \rightarrow b\bar{b}$  解析グループでは、さらなる解析の向上を目指して、アイデアを出しあいながら議論を続けている。解析結果の向上に貢献しようと思われるアイデアいくつかを挙げる。

解析手法の改善として、現在のカットベースの解析に代えて多変量解析 (MVA) を導入することに取り組んでいる。種々の先行研究が示しているとおおり、発見感度について大きな向上が期待できる。 $b$ -ジェット同定には既に MVA 手法を導入しているが、まだまだ使える情報は存在するはずで、アルゴリズムに改良の余地がある。また、本文でも少し触れたが、 $M_{bb}$  分解能をさらに向上する努力を続けている。

可能な限り解析領域を広げ信号数を稼ぐ努力も行なっている。高いルミノシティからくる多数の pile-up 事象の影響があるにも関わらず、2012 年の  $E_T^{\text{miss}}$  トリガーは 2011 年の同トリガーに比べて、低いしきい値でデータを取ることに成功しており ([4] にて詳しく議論されている)、トリガーの振る舞いに関する理解を深め、解析領域を最大化する努力を続けている。

また、本稿で報告した  $VH$  過程でのヒッグス粒子探索に加えて、トップクォーク対との随伴生成過程 ( $gg \rightarrow ttH$ ,  $H \rightarrow b\bar{b}$ ) 過程でのヒッグス粒子探索研究も進めている。 $ttH$  チャンネルの 2011 年全データ解析の結果、質量 125 GeV での規格化した生成断面積の上限値は 13.1 (期待値 10.5) となっており [5]、現在は 2012 年全データ解析に向けて準備を進めている。 $VH$  チャンネルと結果を合わせることで、最終到達感度の向上が期待できる。

以上のように、 $H \rightarrow b\bar{b}$  過程でのヒッグス粒子探索の解析は、2011 年、2012 年の全データを使用して、新粒

子が 125 GeV 付近に  $\gamma\gamma$ ,  $ZZ$ ,  $WW$  終状態と同様に存在した場合には発見を、存在しない場合にはその存在の棄却をできるよう準備を進めている。また、現時点では  $H \rightarrow b\bar{b}$  過程の存在を確かめることが最優先事項であるが、もし標準模型ヒッグス粒子もしくはそれに類する新粒子が見つかった場合、フェルミオンとのカップリングの強さがどうなっているのか、などの次の興味もわいてくる。 $H \rightarrow b\bar{b}$  過程の有無、またその後の展開にぜひ期待していただきたいと思う。

## 5 おわりに

今回の解析では、ここに書ききれないほどたくさんの課題に、 $H \rightarrow b\bar{b}$  解析グループの総力を挙げて取り組み、結果解析結果を良くすることに成功した。50 人を超える共同研究者と共に、「いよいよ信号が見えるか!？」というエキサイティングな時期に研究に参加していることを、筆者は非常に嬉しく思う。同時に、2012 年全データ解析に向けて準備を進め、 $H \rightarrow b\bar{b}$  が存在するならば本文中に示した  $WZ/ZZ$  のようなきれいなピークが見られるよう、存在しないのならば有意に棄却できる感度を有する解析へと発展させていく。

最後に、ATLAS 日本グループの活動がどのように本解析を支えているか紹介させていただき、本稿を終えたいと思う。 $H \rightarrow b\bar{b}$  過程の解析における重要なテクニックである  $b$  ジェット同定は、高精度な荷電粒子飛跡の検出ができて初めて可能になる。ATLAS 日本グループは、シリコン内部飛跡検出器 (SCT) の開発・建設プロジェクトの主軸として関わっており [6]、実験が始まった今、SCT は安定して高い性能を発揮し続けている。また、本解析の事象トリガーに用いたミュオントリガーシステムの構築にも日本グループの貢献が大きく [7, 8, 9, 10]、安定して高いトリガー効率を供給し続けている。余談ではあるが、2006 年に行われた SCT の宇宙線を用いたコミッションングに、当時修士課程の学生だった筆者も参加する機会を得ることができた。まだ地上のクリーンルーム内にあった SCT で取得した宇宙線コミッションングのデータを解析し、たった一本の宇宙線飛跡が再構成できたことに大喜びしたのをふと思い出した。その SCT が今は地下の ATLAS 実験場にあつて、無限とも思える数の荷電粒子飛跡情報を、 $b$  ジェット同定などのために供給している。性能・設計通りとはいえ、筆者には驚くべきことに感じられる。今後は、これらの検出器のポテンシャルを十分に活用して、さらなる解析の向上に取り組む。

## 参考文献

- [1] CDF and D0 Collaborations, “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).
- [2] ATLAS Collaboration, “Search for the Standard Model Higgs boson produced in association with a vector boson and decaying to a  $b$ -quark pair with the ATLAS detector,” *Phys. Lett. B* **718**, 369-390 (2012).
- [3] G. Cowan, K. Cranmer, E. Gross, and O. Vitells, “Asymptotic formulae for likelihood-based tests of new physics,” *Eur. Phys. J.* **C71** 1554 (2011).
- [4] 木内健司, 永井義一, 金信弘, 受川史彦, 原和彦, 「LHC-ATLAS 実験における  $ZH \rightarrow \nu\nu b\bar{b}$  過程を用いたヒッグス粒子探索」, 日本物理学会秋季大会 (2012).
- [5] ATLAS Collaboration, “Search for the Standard Model Higgs boson produced in association with top quarks in proton-proton collisions at  $\sqrt{s}=7$  TeV using the ATLAS detector”, ATLAS-CONF-2012-135 (2012).
- [6] 高力孝, 「アトラスシリコン検出器の建設」, 高エネルギーニュース, **26-4** (2008).
- [7] 田中秀治「アトラス実験ミューオントリガーチェンバーの開発」, 高エネルギーニュース, **25-2** (2006).
- [8] 佐々木修, 池野正弘「アトラスミューオントリガーシステムのためのエレクトロニクス開発と建設」, 高エネルギーニュース, **26-3** (2008).
- [9] 石野雅也, 「ATLAS ミューオントリガーシステムの組み上げと立ち上げ」, 高エネルギーニュース, **26-4** (2008).
- [10] 杉本拓也, 戸本誠, 「ATLAS ミューオントリガーシステムのコミッショニングと統合試運転」, 高エネルギーニュース, **27-2** (2008).