

LHC 最新の研究成果 III

KEK 素粒子原子核研究所

津野 総司

tsuno@post.kek.jp

東京大学素粒子物理国際研究センター

金谷 奈央子

nkanaya@icepp.s.u-tokyo.ac.jp

2011年11月11日

1 はじめに

2011年11月執筆現在、LHC 実験開始から数えて80本以上の出版論文、150以上の国際会議用のATLAS論文が出ている。まだ、本格的に実験を開始して一年も経っていないにもかかわらず、である。世界中でLHC実験の結果が報告され、それに触発された現象・理論論文も数多くある。今まさに、LHC実験が高エネルギー物理学を牽引し、標準模型の発見から、40年来の新しい物理現象に出会えるチャンスに大きな期待を感じている。

加速器実験の醍醐味は、国際協力のもと検出器の運転・維持を行うことも然ることながら、 W ボソン、 Z ボソン、トップクォークなど教科書に出てくるような粒子を直接データ解析から見るができることである。やはり、共鳴状態が見えると嬉しいし、物理現象の解釈に自分のアイデアを生かせれば、無上の喜びである。ATLAS実験は、汎用加速器実験であり、多種多様な目的のもと、様々な研究が行われているので、物理ネタに事欠かない。世界中から素粒子物理愛好家が集まって、日々、議論を重ねているのも面白い。適度な緊張感を持って、多角的に物理を楽しめるのも魅力の一つである。

今回が「高エネルギーニュース掲載のシリーズ三度目」[1,2]の成果報告となるが、今回も新鮮な研究成果があることを約束しつつ、限られた紙面の範囲内でできるだけ網羅的にホットな話題を提供したい。

2 LHC 加速器と ATLAS 検出器

2011年3月30日から再開した重心系エネルギー7TeVの陽子-陽子衝突実験は、引き続き行われる鉛-鉛衝突実験、ならびに冬期シャットダウンのため10月30日で今年度のランを終えた。特筆すべきはルミノシティの著しい増加である。ATLAS 検出器中心での周回あたりの衝突パンチ数を194から1331に上げ、かつ加速器の光学パラメータ β^* （衝突点付近における水平方向のビームの圧縮度に相当し、これを小さくするほどルミノシティを高くすることができる）

を9月のテクニカルストップで1.5mから1mへとスクイーズすることに成功し、最終的にピークルミノシティ $3.65 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ を達成した。図1に積算ルミノシティの時間推移を示す。2011年度ATLAS検出器で記録された陽子-陽子衝突実験の全データは 5.25 fb^{-1} 相当に達し、当初予想していた以上の成果をあげることができた。

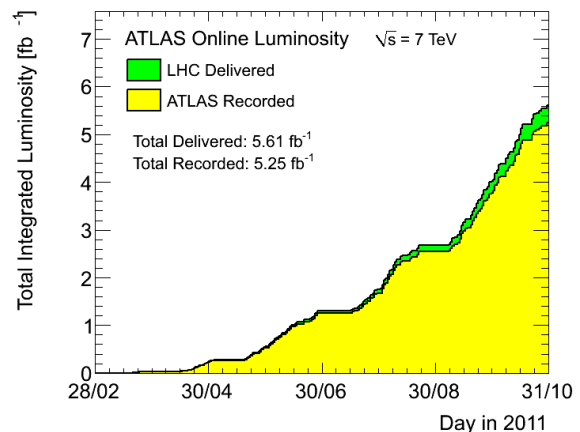


図1 重心系エネルギー7TeV、陽子-陽子衝突ランにおいて2011年にATLAS検出器で記録された全積分ルミノシティ(黄色のヒストグラム)。

ルミノシティの増加に伴い多重相互作用(パイルアップ)も増えた。9月のテクニカルストップ前は1パンチ交差当たりのパイルアップ事象数は約6(ルミノシティ加重平均)であったが、これが後半のランでは倍以上になった。これにより、特に比較的横運動量の低いジェットやレプトンが必要な解析ではそのエネルギー補正、ならびにその不定性を小さくすることが必要不可欠となる。図2に β^* が1mのランで観測された、再構成されたバーテックスを20個伴う Z ボソンが二対のミュオンに崩壊する事象を示す。

ATLAS検出器自体もこの一年を通して96~100%の割合で動作可能な状態であり、LHC加速器同様、安定運転に成功を収めたといえる。あえて問題を一つとり上げるなら、4月末に生じた電磁カロリメータの一部の信号($0 < \eta < 1.4$, $-0.84 < \phi < 0.64$, 二, 三層目)がコントローラボードの不良により読み出し不能になったというアク

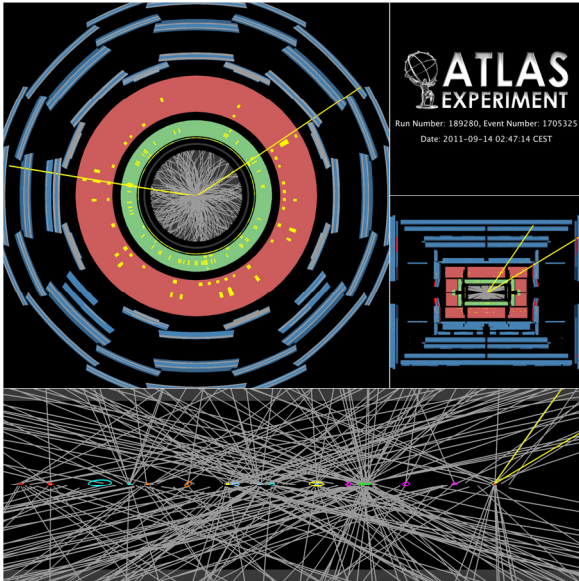


図2 パイルアップのため20の再構成されたバーテックスを伴った、 Z ボソンがミューオン対に崩壊する事象。

シメントであろう。しかしながら、要である二層目の読み出しは7月上旬のテクニカルストップ中に完全に回復することが出来たため、大きな問題には至らなかった。また物理解析では、約 0.8fb^{-1} のデータにおいて検出器に小さな穴(立体角にして約1%)がある状態であったが、トラッキング検出器や前後隣接するカロリメータの情報を用いることで、この影響を最小限にとどめることができた。

3 標準模型の検証

3.1 電弱相互作用の検証

電弱相互作用によって生成される、 W および Z ボソンは、レプトンへ崩壊するモードを利用して、標準模型の精密測定のみならず、様々な検出器の較正にも利用される。また、新粒子の探索においては、標準理論からのバックグラウンドをどこまで理解できるかが探索結果を検証する上での試金石となる。現在、約20(2.4)M イベントの $W(Z)$ 事象候補があり、我々はこれらの粒子の超精密測定によって、微細にわたるデータの検証を可能にする。たとえば、図3に(陽)電子へ崩壊する W ボソンの横運動量分布を示す。

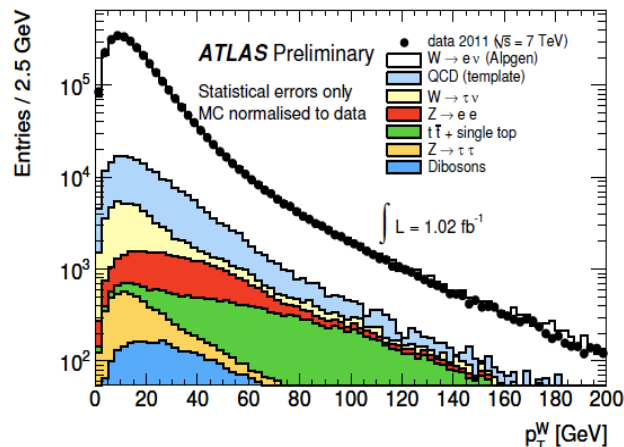


図3 (陽)電子へ崩壊する W ボソンの横運動量分布。

また、加速器の高い衝突エネルギーと高ルミノシティのおかげで、いよいよ $WW/WZ/ZZ$ ボソン対生成も観測[7-10]できるようになって来た。トリプルゲージ相互作用の精密測定が可能になって来たのである。電弱理論の帰結である自発的対称性の破れを精密測定の観点からも検証しようと試みている。さらに、 WW ボソン散乱測定も手の届く範囲であることを言及しておく。表1に測定された W/Z ボソンの生成断面積を示し、図4に理論値との比較を示す。我々は、 W/Z ボソン生成素過程を網羅的に測定し、電弱標準理論のさらなる確立を目指している。

表1 測定された W および Z ボソンの生成断面積。

素過程	生成断面積
$\sigma(W^\pm) \times \text{Br}(W \rightarrow l \nu)$	$10.207 \pm 0.021(\text{stat}) \pm 0.121(\text{syst}) \pm 0.347(\text{lumi}) \text{ nb}$ [6]
$\sigma(Z) \times \text{Br}(Z/\gamma^* \rightarrow l^+ l^-)$	$0.937 \pm 0.006(\text{stat}) \pm 0.009(\text{syst}) \pm 0.032(\text{lumi}) \text{ nb}$ [6]
$\sigma(W^+ W^-)$	$48.2 \pm 4.0(\text{stat}) \pm 6.4(\text{syst}) \pm 1.8(\text{lumi}) \text{ pb}$ [7]
$\sigma(W^\pm Z)$	$21.1^{+3.1}_{-2.8}(\text{stat})^{+1.2}_{-1.2}(\text{syst})^{+0.9}_{-0.8}(\text{lumi}) \text{ pb}$ [8]
$\sigma(ZZ)$	$8.5^{+2.7}_{-2.3}(\text{stat})^{+0.4}_{-0.3}(\text{syst}) \pm 0.3(\text{lumi}) \text{ pb}$ [9]
$\sigma(W \gamma)$	$36.0 \pm 3.6(\text{stat}) \pm 6.2(\text{syst}) \pm 1.2(\text{lumi}) \text{ pb}$ [10]
$\sigma(Z \gamma)$	$6.5 \pm 1.2(\text{stat}) \pm 1.7(\text{syst}) \pm 0.2(\text{lumi}) \text{ pb}$ [10]

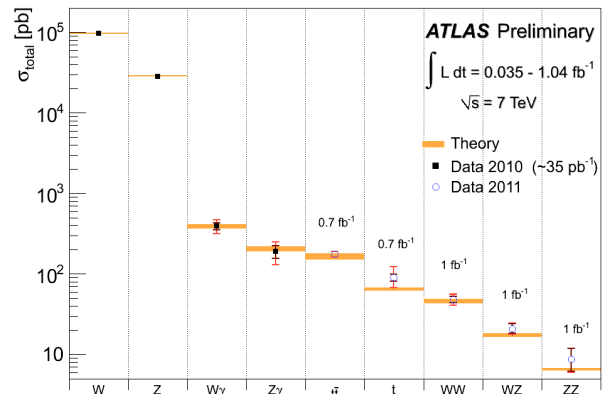


図4 測定値と理論値の比較。図中の数値は、その測定が行われたときの積算ルミノシティを表している。

3.2 トップクォークの物理

第三世代であるトップクォークは、他のクォークに比べて極端にその質量が重く(172.5GeV)、ハドロン化を受けずに崩壊してしまうため、実験的に唯一クォークの性質を直接検証できる粒子である。現在のLHC加速器のルミノシティから換算して、トップクォークは3秒に1回の頻度で生成されている計算になり、期待される候補事象は100,000イベントを超える。膨大な統計量を利用して、質量測定[11]、生成断面積測定[12]のほか、トップクォーク対スピン相関の測定[13]、トップクォーク電荷[14]、トップクォーク対生成非対称度測定[15]、トップクォーク崩壊からの W ボソンのヘリシティ測定[16]など、様々なトップクォークの精密測定が行われている。これらは、直接、クォークの性質を捉

えようとしており、量子色力学の観点から、グルーオンの衣をどこまで剥ぎ取れるか、非常に示唆に富んでいる。事実、トップクォーク質量測定や生成断面積測定においては、実験精度は、すでに統計誤差より系統誤差の方が大きくなっている。しかも、主な系統誤差は測定量に係る誤差ではなく、むしろモデルに因る系統誤差が大きくなっている。ここでは、最近、話題になっているトップクォーク対生成非対称度測定について紙面を割いて紹介したい。

2010年末にTevatron CDF実験グループは、トップクォーク対生成において、トップクォークと反トップクォークの生成方向の偏りを測り、その非対称度は、トップクォーク対質量の高い領域で、最大、 3.4σ もの標準模型からのずれを観測した[17]。これを受けて、今年度のヨーロッパ物理学会(EPS2011)において、Tevatron D0 実験グループも結果[18]を発表した。驚くべきことに、D0 実験も同様に標準模型からのずれを観測した。これで両実験が標準模型からのずれを観測したことになる。LHC 実験でも同様の実験解析が望まれるが、Tevatron 実験に比べて、少々事情が異なる。LHC 実験では、陽子-陽子衝突であるために、ビーム軸に対する衝突パトンの方位性が分からない。しかも、トップクォーク対生成の約80%が、グルーオン-グルーオン衝突であること、さらには、摂動計算の高次補正の項が、最低次の計算と同程度あることから、観測量として一意に非対称度を決定付けるパラメータが定義しづらい。事実、ATLAS とCMS[19]、両実験においては、異なった定義の変数が使われている。ATLAS 実験では、数々の変数の取り扱いの結果、電荷非対称度パラメータ、

$$A_c = \frac{N(\Delta|Y| \geq 0) - N(\Delta|Y| < 0)}{N(\Delta|Y| \geq 0) + N(\Delta|Y| < 0)}$$

を採用した¹。ここで、 $\Delta|Y|$ は、トップクォークと反トップクォークのラピディティの絶対値の差である。実験解析は、トップ-反トップクォーク系の崩壊事象を再構成するために片方のトップクォークがレプトンに、もう片側のトップクォークがハドロン(ジェット)に崩壊するモードを使う。ここで再構成における未知変数は、ニュートリノに因る横消失エネルギーのみになるので、Likelihood フィットにより、最頻値を求める。トップクォークか反トップクォークかの判定はレプトンの電荷を使って求める。ここに測定された $\Delta|Y|$ 分布を図5に示す。得られた電荷非対称度パラメータは、

$$A_c = -0.024 \pm 0.016(\text{stat}) \pm 0.023(\text{syst})$$

であった。標準模型からの予言値は、0.006 であり、結果は誤差の範囲内で予言値と一致した。

¹ CMS 実験グループは、本文ラピディティ表記の代わりに擬ラピディティ、もしくは、シミュレーションで得られたブースト係数を掛け合わせたラピディティ非対称度パラメータを採用している。詳しくは、[19]を参照されたい。

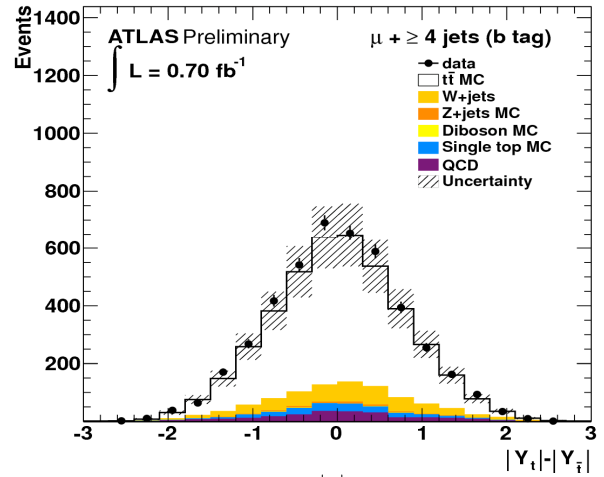


図5 $\Delta|Y|$ 分布。

CMS 実験からも標準模型からの有意なずれは観測されなかった。今回の結果では、電荷非対称度のトップクォーク対質量に因る依存性は示されていない。更なる統計と精度を上げた今後の結果に注目したい。

4 ヒッグス粒子探索

4.1 概要

現代素粒子物理学の希求の課題である自発的対称性の破れの解明を目指して、LHC 実験ではヒッグス粒子の探索が精力的に行われている。

ヒッグス粒子は、主にグルーオン・フュージョン過程とよばれるグルーオン-グルーオン衝突からトップクォークの内線ループを介して生成される。生成断面積は、トップクォーク湯川相互作用に比例し、130 GeV 以下の低い質量領域で約15 ~ 20 pb, 200 GeV 以上の高い領域で約5 pb と期待されている。次に大きな生成素過程は、ウィークボソンを介したベクターボソン・フュージョン過程であり、質量領域によらず0.5 ~ 1 pb の生成断面積を持つ。このベクターボソン・フュージョン過程は、実験解析にユニークなシグナルを残すので、バックグラウンドと区別が付けやすく、発見感度が良い。そのため解析では、しばしばグルーオン・フュージョン過程からのヒッグス粒子発見を基にした解析と、ベクターボソン・フュージョン過程を基にした解析で区別が行われる。両者の区別は、いずれ将来的には、湯川相互作用の測定に役に立つ。

ヒッグス粒子の崩壊様式は、ヒッグス粒子の質量の大きさによって非常に多岐にわたる。130 GeV 以下の質量領域では、ボトムクォーク対への崩壊がもっとも大きく、次にタウレプトン対への崩壊、光子対への崩壊と続く。130 GeV より大きくなると、ゲージボソンへの崩壊様式が表れて、W ボソン対への崩壊、Z ボソン対への崩壊モードが主要になって来る。したがって、実験解析においては、ヒッグス粒子の質量領域に応じて、その崩壊様式と同様に多様なデータ解析が行われる。以下に、主な解析を紹介していく。

4.2 $H \rightarrow \gamma\gamma$ 探索

解析は、二つの光子の不変質量を組むことに終始するので、いかに質量分解能を向上できるか、そして、どこまで偽の信号が混じらない純粋な光子対を得ることができるかが、発見の感度を上げる上で重要な点となる。

質量分解能を向上させるためには、カロリメータのエネルギー補正を改善することはもちろんのこと、光子は軌跡検出器に信号を残さないで、実際の衝突点からカロリメータまでの方角の補正も重要である。特に、高ルミノシティ下での陽子-陽子衝突の多重相互作用が複数ある場合、衝突点がたくさんあり、どこの衝突点から光子対が生成されたのか判定できない。そのため、カロリメータ内でのシャワーの奥行き方向の広がりを利用して、光子の方角を外挿することによって、質量分解能の向上を計っている。同定された光子の純度、および、統計量を上げるためには、検出器内での物質相互作用によって電子-陽電子対を生成した光子も同定することが重要である。ATLAS 検出器のカロリメータ前方の物質量の多さから、およそ 30% の光子は、物質相互作用によって、電子-陽電子対を生成する。結果、得られた質量分解能は、電子-陽電子対生成が伴わない場合 1.4 GeV、伴う場合で 1.6 GeV であった。

光子対の不変質量分布から、ヒッグス粒子の共鳴ピークを探し、標準模型ヒッグス粒子に対する生成断面積の上限値を求める [20]。図 6 に光子対の不変質量分布を示す。破線は、もし 120 GeV に標準模型ヒッグス粒子があったなら、見えるべき分布を示している。ここで、分布は 5 倍の生成断面積で拡大されている。分布は、積算ルミノシティ 1 fb^{-1} で、すでに標準模型ヒッグス粒子生成断面積に上限を加える感度まで迫っていることを示している。

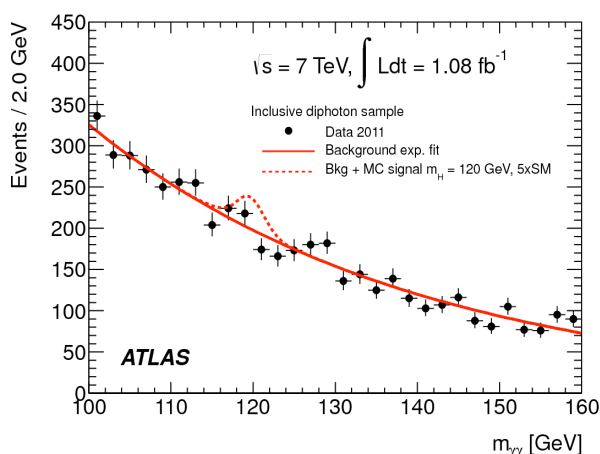


図 6 光子対の不変質量分布。

4.3 $H \rightarrow WW \rightarrow l\nu l\nu$ 探索

ヒッグス粒子の質量が、130 GeV から 200 GeV の範囲にある場合、 W ボソン対への崩壊比がもっとも大きいので、この探索モードがもっとも発見の感度が良い。しかしなが

ら、崩壊粒子には、検出されないニュートリノが二つ含まれるので、ヒッグス粒子の質量再構成が容易ではない。したがって、実験解析にはデータの力学的分布の理解が不可欠である。

解析は、大体的には二つのレプトンと大きな横消失エネルギーを要求する。ここで、レプトンのフレーバーは、同種・異種の組み合わせがあり、 (ee) , $(\mu\mu)$, $(e\mu)$ の組み合わせを考える。さらに、トップクォークからのバックグラウンドの寄与に応じて、解析は、 $H+0$ ジェットモードと $H+1$ ジェットモードに分けられる。トップクォークは一般的にその崩壊から複数のジェットを生み出すので、ジェットの数を特定することによって大きく寄与が異なってくる。図 7 に基本的なレpton、横消失エネルギーの事象選別後のジェット数の分布を示す。

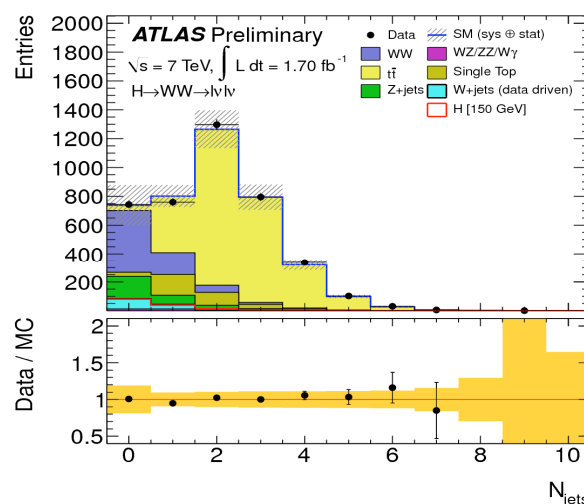


図 7 $H \rightarrow WW \rightarrow l\nu l\nu$ 解析におけるジェットの数。ここで、ジェットは 25 GeV 以上の横運動量が要求されている。

図 7 から、明らかに $H+0$ ジェットモードでは、標準模型からの W ボソン対生成事象が主なバックグラウンドとなり、 $H+1$ ジェットモードではトップクォーク対生成事象が大きなバックグラウンドとなっていることが分かる。個々のバックグラウンドは、データを用いて見積もられる。

表 2 に 1.7 fb^{-1} のときに観測された事象数と期待されるヒッグス粒子シグナルとバックグラウンド数とを示す。ここで、ヒッグス粒子の質量は 150 GeV を仮定している。表から $H+0$ ジェットモードにバックグラウンドの予想値から 2σ を上回るデータ数が観測された [21]。統計的有意性を示したのが、図 8 である。もし、データ数が期待値通りであったなら、140 ~ 180 GeV の質量領域は、 3σ の信頼度で棄却されるが、実際に観測されたデータ数は、それを否定している。これは、154 GeV 以上のヒッグス粒子はすでに棄却されているので、可能性としては、150 GeV 以下の質量領域にヒッグス粒子が存在することを示唆している。更なる統計量を貯めた解析と、他のチャンネルからの検証が待たれる。

表2 1.7 fb⁻¹ のときの観測されたイベント数とシグナル・バックグラウンドの予想値。ヒッグス粒子の質量は150 GeV を仮定している。

	H+0 ジェット	H+1 ジェット
シグナル期待値	34±7	12±3
バックグラウンド	53±9	23±4
データ数	70	23

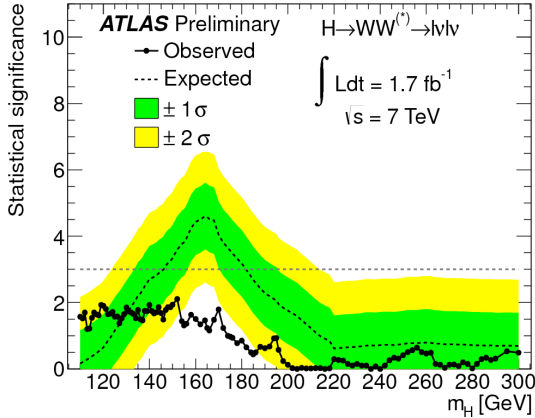


図8 観測されたデータ数の統計的有意性。ここで横軸はヒッグス粒子の質量を表している。

4.4 H → ZZ → llll 探索

この解析モードは、通称、Golden Discovery Channel と呼ばれている。レプトンを4つ要求することによって、ほとんどバックグラウンドが寄与しないこと、かつ、4つのレプトンの不変質量を組むことによって、ヒッグス粒子の質量を精度良く再構成することができるからである。この解析の重要な点は、低い運動量領域までレプトンを同定することと、ヒッグス粒子から崩壊して来たZボソンがoff-shellであっても、正しい組み合わせのレプトン対を見つけて、質量再構成ができるようにすることである。たとえば、二つのレプトン対の不変質量 (m_{12}, m_{34}) の相関図を図9に示す。イベントの多くは、Zボソンの質量領域にあるが、off-resonance の領域にもイベントが見受けられる。レプトン対の組み合わせが正しく選ばれるように事象選別は最適化される。主なバックグラウンドは、標準模型からのZボソン対生成事象である。このバックグラウンドは、シングル

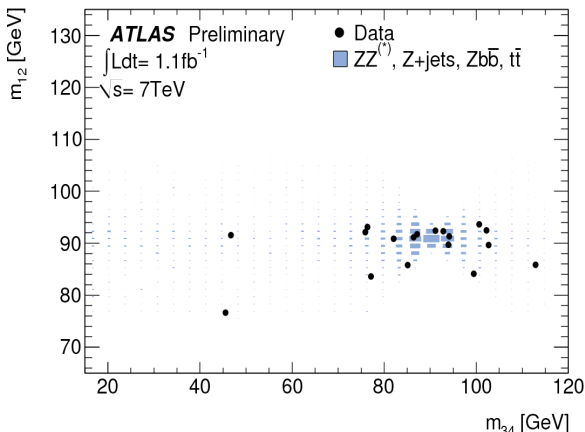


図9 2つのレプトン対の不変質量の相関。

ルZボソンに対する断面積比を利用して見積もられる。この断面積比は、互いに生成素過程が似ているので、比較的QCDによる不定性が小さい。そのため、得られた理論値からの断面積比に、シングルZボソン生成断面積の実測値をかけることによって、その寄与が得られる。

ヒッグス粒子の全質量領域に渡って、狭い幅の共鳴ピークを探索したが、有意な兆候は見られなかった。したがって、ヒッグス粒子生成断面積に95%信頼度の上限值を付けた[22]。

4.5 標準模型ヒッグス粒子の発見ポテンシャル

現在のATLAS, CMS 両実験からの各解析チャンネルの結果を統計的にまとめ、95%信頼度でのヒッグス粒子生成断面積に対する上限値[23]としてあらわしたものを図10に示す。

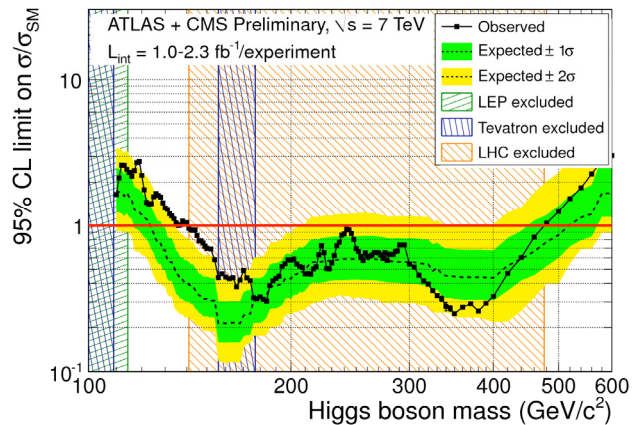


図10 ATLAS・CMS 実験からの標準模型ヒッグス粒子の生成断面積の95%信頼度での上限値。

150 GeV 以下の低い質量領域では、 $H \rightarrow \gamma\gamma$ チャンネルの他に、 $H \rightarrow \tau\tau$ [24]、 $H \rightarrow bb$ [25]、200 GeV 以上の高い質量領域では、 $H \rightarrow ZZ \rightarrow \ell\nu\nu$ [26]、および、 $H \rightarrow ZZ \rightarrow \ell l q q$ [27]解析からの結果も上限値の計算に含まれている。 $H \rightarrow WW \rightarrow \ell\nu\nu$ 、 $H \rightarrow ZZ \rightarrow \ell\ell\ell$ チャンネルは全質量領域に寄与する。ただし、 $H \rightarrow ZZ \rightarrow \ell\nu\nu$ と $H \rightarrow ZZ \rightarrow \ell\nu\nu$ の解析は、イベントの重複を避けるために上限値計算では、200 GeV を境に低い方では $H \rightarrow WW \rightarrow \ell\nu\nu$ の結果を、高い方では $H \rightarrow ZZ \rightarrow \ell\nu\nu$ の結果を採用する。結果、141 GeV から 476 GeV までの質量領域は95%の信頼度で棄却された。LEP 実験からの下限値114.4 GeV [27]を含めれば、ヒッグス粒子は、115 GeV から 140 GeV の間の低い質量領域にあるか、もしくは、480 GeV 以上の高い質量領域に存在することになる。これで、そもそもヒッグス粒子が存在しないという可能性を含めても、いずれにしても、かなり狭い範囲に限定されて来た。現在の蓄積されている 5 fb^{-1} のデータをすべて使えば、ほぼ全領域を網羅できることが期待できる。来年の結果が楽しみである。

5 標準理論を越える物理の探索

5.1 超対称性粒子探索

標準理論を越える新しい物理の発見はLHC実験における最重要課題の一つである。そのなかでも超対称性理論は暗黒物質候補の予言、力の大統一の達成、かつ TeV スケールの超対称性粒子の存在を予言していることから、その発見がもっとも期待されている理論の一つである。LHC 加速器はハドロンコライダーである故、カラー荷をもつスクォークやグルイーノの生成を得意とする。主に LHC で観測される超対称性事象はスクォーク・グルイーノの多段崩壊を通して生じる多数のジェットやレプトン、更にもっとも軽い超対称性粒子ニュートラリーノが検出されないことによって生じる大きな横消失エネルギーで特徴づけられる。よって、超対称性粒子の探索では大きな運動量遷移と横消失エネルギーをもつ事象を選別することになる。レプトンや光子などを伴う崩壊過程に注目した解析[29,30,31]や、電荷やカラー荷をもった長寿命粒子を同定する解析[32,33,34]など、その他にも様々な解析が精力的に行われている。今回は重い質量スケールにもっとも感度がある、レプトンを伴わないマルチジェット解析とスカラーボトム直接生成探索の二つの解析を紹介したい。

5.1.1 マルチジェット解析

スカラーレプトンが高い頻度で超対称性の多段崩壊に現れるなど、レプトンを終状態にもつ事象の割合が増大しない限り、マルチジェット+横消失エネルギー解析[35]がもっとも発見感度の高いチャンネルといえる。目的とするシグナルは、まずジェットと横消失エネルギーの複合トリガー(両者が 130 GeV 以上の事象に対するトリガー効率率は約 98%) で選別される。要求するジェット数(2~4 ジェット)でシグナル領域を区別し、全部で 5 つの力学的領域を包括的に調べる。二本目以降のジェットに対しては比較的低い横運動量(40 GeV 以上)を要求している。最終的に陽子-陽子衝突から直接生成された粒子の質量と良い相関をもつ量、effective mass(横消失エネルギーと選別されたジェットの横運動量のスカラー和)が 1 TeV 以上、さらに横消失エネルギーが 200~300 GeV 以上であること要求することで、1 TeV スケールの超対称性粒子の発見に解析を最適化している。

図 11 にもっとも感度の高い 4 ジェット解析における effective mass 分布を示す。主なバックグラウンドは W/Z ボソンにジェットを随伴する過程とトップクォーク対である。各バックグラウンドの推定にはモンテカルロシミュレーションを用いている。ただし各々のバックグラウンドの規格化は複数のコントロール領域でデータとモンテカルロ事象数を最尤度フィットすることで求められており、またこの推定結果はデータを使った複数の手法でクロスチェックされている。QCD ジェット過程は生成断面積が大きく、また

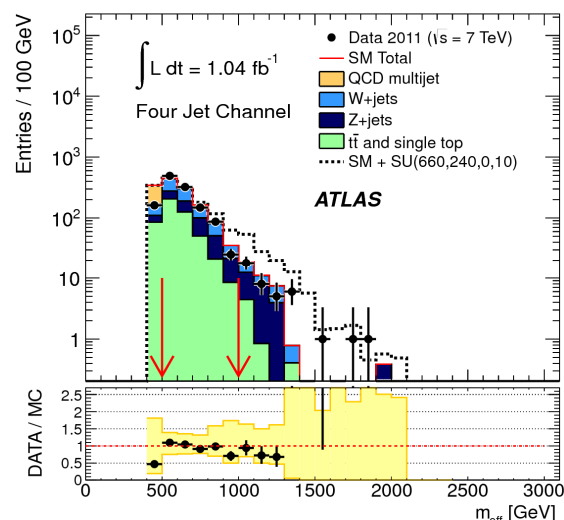


図 11 (上)4ジェット解析における effective mass 分布。黒丸がデータ、赤い実線のヒストグラムがモンテカルロシミュレーションから予想される全バックグラウンドの分布(ただし規格化前)。(下)上記二つの分布比。黄色いバンドは相対的な系統誤差を表す。

ジェットの測定ミス(偽の横消失エネルギーを生じる)によりシグナルと誤認される危険なバックグラウンドである。シグナル領域に残る QCD ジェットバックグラウンドは、ジェットの検出器応答(特にテール部分)をデータで評価し、それを横消失エネルギーに焼き直すことで推定されており、どのシグナル領域でも 10% 以下であることが確認された。

1 fb⁻¹ のデータ解析の結果、effective mass が 1 TeV 以上のシグナル領域では観測事象数が 40 であるのに対し、バックグラウンド事象数は $34 \pm 2.9(\text{stat}) \pm 6.2(\text{sys})$ と、標準理論と無矛盾であった。この実験結果をグルイーノとスクォークの質量平面で解釈した結果を図 12 に示す。図の赤色実線が質量下限値を示し、約 1 TeV の質量スケールをもつ超対称性粒子の存在が 95% 信頼度で棄却されたことになる(この質量下限値は超対称性のモデルによるが、主にスクォーク・グルイーノの生成断面積で決定されるゆえ、比較的モデル

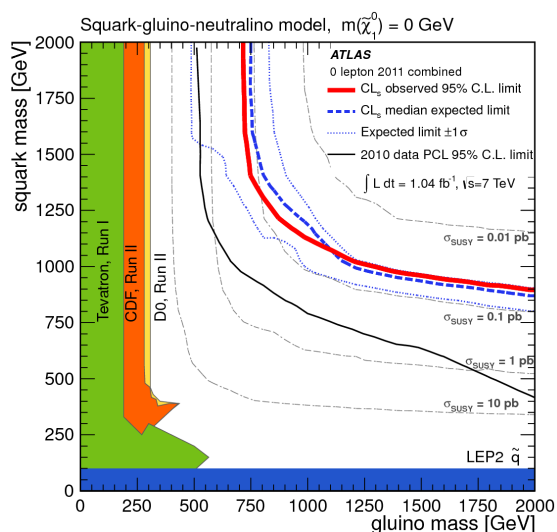


図 12 グルイーノ-スクォーク質量面で 95% 信頼度で棄却された領域(赤色実線の左下側)。

依存性の小さい結果といえる。ただし、質量スペクトラムが縮退したケースでは終状態に現れるジェットがソフトになるため、バックグラウンドとの区別が難しくなり、感度がおちる。よってこの下限値は適用できない。

5.1.2 スカラーボトム直接生成探索

第三世代の超対称性粒子はヒッグス粒子との結合が大きいことから他のスカラークォークに比べて非常に軽くなり、直接生成断面積が非常に大きくなる場合がある。スカラーボトムの直接生成はフレーバーを区別してきていることから、探索できる質量スケールは低くなり、かつ着目している崩壊パターン $\tilde{b} \rightarrow b + \tilde{\chi}_1^0$ は多重度が小さいことからバックグラウンドとの選別が難しくなる。しかしながら第一・二世世代のスカラークォークが数 TeV と非常に重い場合には重要な発見チャンネルとなる。スカラーボトム直接生成探索[36]で期待される信号は二本の b ジェットと大きな横消失エネルギーで特徴づけられる。終状態に二本の b ジェットを要求するので、主なバックグラウンドはトップクォーク対と Z ボソンに $b\bar{b}$ が随伴する過程となる。トリガー(ジェット+横消失エネルギーの複合トリガー)の制限により一本目の b ジェットには横運動量 130 GeV 以上であることを要求し、二本目には 50 GeV 以上を要求、三本目のジェットをもつ事象はベトーする。 b ジェットはニューラルネットワークアルゴリズムによって同定される(b ジェットの同定効率 60% に対し、ライトフレーバー(u, d, s) ジェットを b ジェットと誤認する確率は約 0.3%)。トップクォーク対バックグラウンドを抑制するカットとして $\text{contransverse mass}$ (m_{CT}) という量を用いる。これは以下のような式で定義される。

$$m_{CT}^2 = [E_T(b_1) + E_T(b_2)]^2 - [\vec{p}_T(b_1) - \vec{p}_T(b_2)]^2$$

この分布の上端はスカラーボトムとニュートラリーノの質量差に相関があり、トップクォーク対バックグラウンドの場合は、おおよそ 140 GeV となる($\text{contransverse mass}$ は始状態放射を伴う場合など、スカラーボトム対の横方向ブーストなどに対して不変量ではないため、この解析では系のブーストに対する補正をかけた量を用いている[36])

図 13 に $\text{contransverse mass}$ 分布を示す。シグナル領域 ($m_{CT} > 200$ GeV) で期待されるバックグラウンド数は 8.1 ± 3.5 、これに対し実際に観測された事象数は 10 であっ

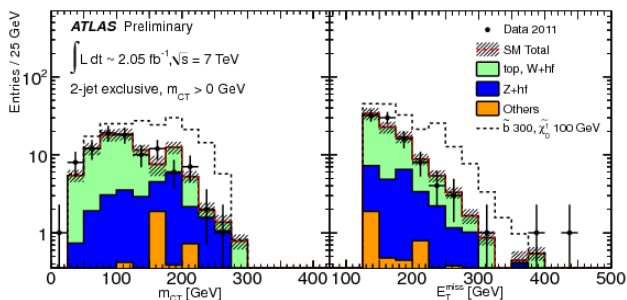


図 13 (左) $\text{contransverse mass}$ (右) 横損失エネルギー分布

た。この実験結果をスカラーボトムとニュートラリーノ質量平面に焼き直した結果が図 14 である。スカラーボトムの質量が小さい、またはニュートラリーノとの質量差が小さいパラメータ領域ではバックグラウンドからの分離が難しくなり、感度が著しく低下する。ニュートラリーノの質量が 60 GeV 以下である場合、質量 405 GeV 以下のスカラーボトムの存在が否定された。

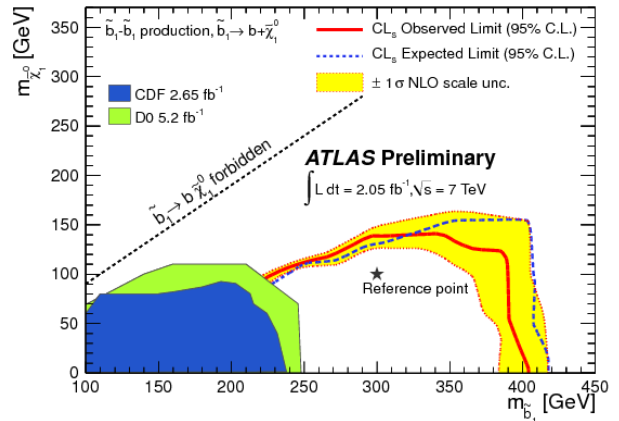


図 14 スカラーボトム(横軸)とニュートラリーノ(縦軸)質量平面上において、95% 信頼度で棄却された領域。

5.2 ジェット対共鳴探索

超対称性理論以外にも LHC で探索可能な質量スケールに新粒子・現象を预言する有望な理論が数多く提唱されている。たとえば excited quark や axigluon などカラー荷を持った粒子が预言されており、これらの未知の重たい粒子は二本のジェットへ崩壊し、なめらかな QCD ジェット事象の不変質量分布の上に狭い共鳴ピークを作る。この解析では、まずシングルジェットトリガー(閾値横運動量 180 GeV)を用いて事象を選別する。

ジェットは anti- k_t アルゴリズム(distance パラメータ 0.6)で再構成し、ジェットのエネルギースケールが良く分かっているラピディティ領域 $|y| < 2.8$ にある 2 つのジェットを使って不変質量を組み、717 GeV 以上の領域を探索する。QCD ジェットのバックグラウンドの不変質量分布をフィットによって求める際、信号の存在がフィットに影響しないよう、ヒストグラムのピン幅は不変質量分解能程度(5 TeV 領域で 4% 程度)にしてある。以下の関数でフィットしてバックグラウンドの不変質量分布を求める。

$$f(x) = p_1(1-x)^{p_2} x^{p_3+p_4 \ln(x)}$$

ここで x は不変質量を重心系エネルギーで規格化したもので、 p_i はフィットパラメータである。バックグラウンドモデリングにおけるフィットの p 値は 0.96 であった。

図 15 にジェット対の不変質量分布とフィットの結果を示す。データとバックグラウンドの予想とは一致しており、最も偏差の大きい不変質量領域(図 15 の青色実線で囲まれ

る領域)でも p 値は 0.82 であった。生成断面積とアクセプタンスの積を新粒子質量の関数で示したものが図 16 である。黒色実線が 1fb^{-1} のデータ解析で得られた上限値, 青色と緑色の波線はそれぞれ excited quark と axigluon モデルで予想される理論値である。このラインが交差する点が質量下限値となり, 3 TeV 以下のそのような新粒子の存在は 95% 信頼度で却下された[37]。

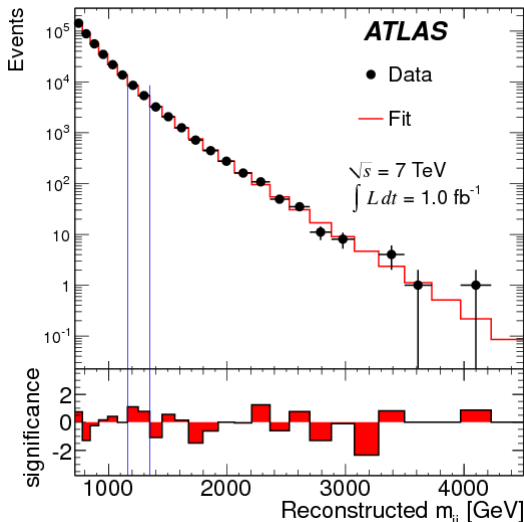


図 15 2 ジェットの不变質量分布。赤い実線が推定された QCD ジェットバックグラウンドの分布, エラーバー付きの黒丸がデータ。下のヒストグラムに両者の偏差を示す。

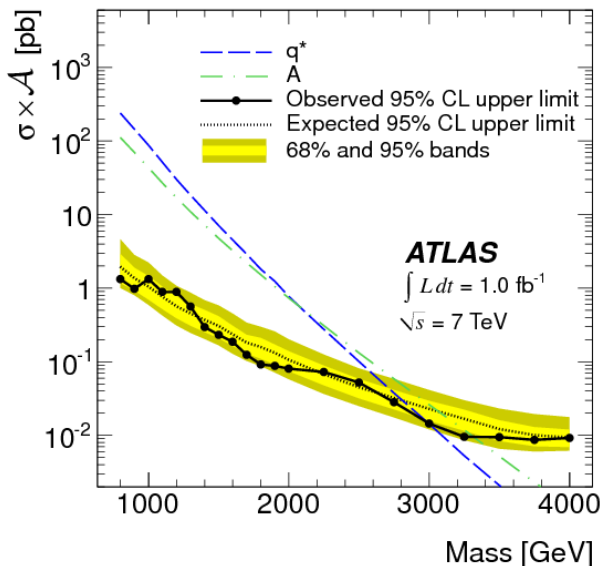


図 16 生成断面積とアクセプタンスの積に対する上限値を新粒子の質量の関数で示す。

5.3 マルチレプトン事象の探索

最後にマルチレプトンチャンネルの解析を紹介する。レプトンを 3 つ以上要求した場合, バックグラウンドは大幅に抑制され, 非常にクリーンな環境下で探索を行うことが出来る。このような解析は, たとえば超対称性粒子の崩壊にスカラーレプトンが現れる事象や, 二重電荷をもつヒッグス粒子の対生成事象などに感度がある。

本解析では横運動量 20 GeV 以上をもつ電子とミュオンのみを用いる(ただしトリガーの要請により少なくとも 1 つのレプトンは閾値 25 GeV を越えている必要がある)。解析を一般化するため, ジェットや横消失エネルギーに対する要求は課していない。同種・異電荷をもつレプトン対が少なくとも 1 つある事象を選択し, かつ Z ボソン起源のバックグラウンドを減らすため不変質量が Z ボソン質量でないこと ($|m_{\ell\ell} - m_Z| > 10\text{GeV}$) を要求する。主なバックグラウンドは終状態に本物のレプトン二つと, 少なくとも一本のジェットを伴い, かつジェットがレプトンとして間違っ同定される事象(主にトップクォーク対や $Z/\gamma^* + \text{ジェット}$) であり, この理解が解析の鍵となる。特にジェットがレプトンと誤認される確率はモンテカルロシミュレーションで再現することが難しいため, 偽レプトン起源のバックグラウンドはデータを用いて評価する。 Z ボソン+ジェットの場場合は, 偽レプトンを伴うコントロールサンプル ($|m_{\ell\ell} - m_Z| < 10\text{GeV}$) を用い, シグナル領域への外層にはモンテカルロシミュレーションの情報を用いる。

観測された事象数は 31, 推定されたバックグラウンド数は $25.9 \pm 3.8(\text{stat}) \pm 4.3(\text{sys})$ と標準理論と無矛盾であった[38]。また図 17 に示されているように, 横消失エネルギー分布も標準理論の予想と一致しており (p 値 = 0.38), CMS 実験で報告された大きな横消失エネルギーをもつマルチレプトン事象の超過[39]は見られなかった。今後ルミノシティの増加に伴い感度が上がってくるチャンネルであり, 注目されている解析の一つである。

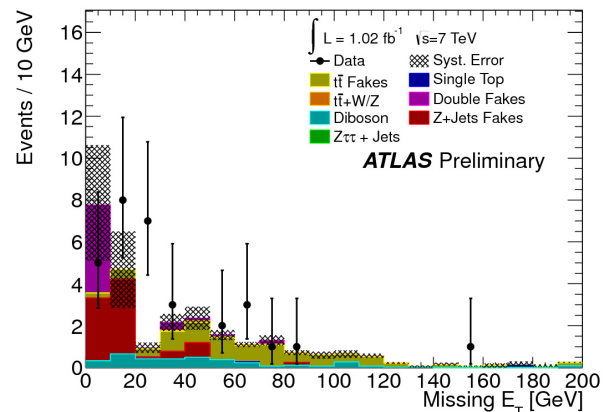


図 17 信号領域におけるデータと推定されたバックグラウンドの横消失エネルギー分布。

6 おわりに

今回は夏の国際会議と, それ以降に報告された約 1fb^{-1} のデータを用いた解析結果の中, 筆者が特に面白いと思うものについてまとめさせて頂いた。データ量 1fb^{-1} というのは質量 130 ~ 200 GeV のヒッグス粒子や 1 TeV スケールの超対称性粒子に感度があるということから, 発見ないしはその徴候が見られることを期待していた人も多かったと思う。

上記二テーマに限らず様々な探索・精密測定が行われたが、残念ながら標準理論の予想値からの有意なずれは未だ観測されていない。これまでに ATLAS 実験で探索された新粒子の質量スケールは、超対称性粒子は約1TeV、重い W/Z ボソンは2TeV、強い重力相互作用などをする粒子は3~4TeV程度までとなっている。2011年度の実験が終わった今現在、全データのキャリブレーション並びにデータ解析が精力的に行われている。2012年冬の国際会議での結果を期待していただきたい。

参考文献

- [1] 浅井祥仁「LHC (ATLAS・CMS) 最新結果 I」, 高エネルギーニュース 29-3, 142 (2010).
- [2] 戸本誠, 花垣和則「LHC 最新の研究結果 II」, 高エネルギーニュース 30-1, 116 (2011).
- [3] The ATLAS Collaboration, arXiv:1108.6308 [hep-ex]; CERN-PH-EP-2011-134.
- [4] The ATLAS Collaboration, arXiv:1107.2381 [hep-ex]; CERN-PH-EP-2011-095.
- [5] The ATLAS Collaboration, Phys. Lett. B **701** (2011) 31-49; arXiv:1103.2929 [hep-ex]; CERN-PH-EP-2011-036.
- [6] The ATLAS Collaboration, arXiv:1109.5141 [hep-ex]; CERN-PH-EP-2011-143.
- [7] The ATLAS Collaboration, ATLAS-CONF-2011-110.
- [8] The ATLAS Collaboration, ATLAS-CONF-2011-099.
- [9] The ATLAS Collaboration, arXiv:1110.5016 [hep-ex]; CERN-PH-EP-2011-166.
- [10] The ATLAS Collaboration, arXiv:1106.1592 [hep-ex].
- [11] The ATLAS Collaboration, ATLAS-CONF-2011-120.
- [12] The ATLAS Collaboration, arXiv:1108.3699 [hep-ex]; CERN-PH-EP-2011-103.
- [13] The ATLAS Collaboration, ATLAS-CONF-2011-117.
- [14] The ATLAS Collaboration, ATLAS-CONF-2011-141.
- [15] The ATLAS Collaboration, ATLAS-CONF-2011-106.
- [16] The ATLAS Collaboration, ATLAS-CONF-2011-122.
- [17] The CDF Collaboration, Phys. Rev. D **83** (2011) 112003; arXiv:1101.0034 [hep-ex].
- [18] The D0 Collaboration, arXiv:1110.2062 [hep-ex]; FERMILAB-CONF-11-537-PPD.
- [19] The CMS collaboration, CMS-PAS-TOP-11-014.
- [20] The ATLAS Collaboration, arXiv:1108.5895 [hep-ex]; CERN-PH-EP-2011-129.
- [21] The ATLAS Collaboration, ATLAS-CONF-2011-134.
- [22] The ATLAS Collaboration, arXiv:1109.5945 [hep-ex]; CERN-PH-EP-2011-144.
- [23] The ATLAS and CMS Collaboration, ATLAS-CONF-2011-157.
- [24] The ATLAS Collaboration, ATLAS-CONF-2011-132.
- [25] The ATLAS Collaboration, ATLAS-CONF-2011-103.
- [26] The ATLAS Collaboration, arXiv:1109.3357 [hep-ex]; CERN-PH-EP-2011-142.
- [27] The ATLAS Collaboration, arXiv:1108.5064 [hep-ex]; CERN-PH-EP-2011-136.
- [28] LEP Working Group for Higgs boson searches, Phys. Lett. B **565** (2003) 65-75.
- [29] The ATLAS Collaboration, arXiv:1109.6606 [hep-ex], CERN-PH-EP-2011-153.
- [30] The ATLAS Collaboration, arXiv: 1110.6189 [hep-ex], CERN-PH-EP-2011-165.
- [31] The ATLAS Collaboration, arXiv:1111.4116 [hep-ex], CERN-PH-EP-2011-160.
- [32] The ATLAS Collaboration, Phys. Lett. B **703** (2011) 428.
- [33] The ATLAS Collaboration, Phys. Lett. B **701** (2011) 1.
- [34] The ATLAS Collaboration, arXiv:1109.2242 [hep-ex], CERN-PH-EP-2011-131.
- [35] The ATLAS Collaboration, arXiv:1109.6572 [hep-ex], CERN-PH-EP-2011-145.
- [36] The ATLAS Collaboration, Under preparation
- [37] The ATLAS Collaboration, arXiv:1108.6311 [hep-ex], CERN-PH-EP-2011-127.
- [38] The ATLAS Collaboration, ATLAS-CONF-2011-158
- [39] The CMS Collaboration, PAS-EXO-11-045.