

LHC 最新の研究成果 IV

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

中 村 浩 二

Koji.Nakamura@cern.ch

2012 年 (平成 24 年) 5 月 10 日

1 はじめに

今回は, LHC の最新結果を掲載するシリーズの第 4 弾目となる [1, 2, 3]。LHC では, 標準模型の検証や精密測定から, ヒッグス粒子をはじめ超対称性粒子探索やほかの標準模型を超える新粒子探索など, 多岐に渡る物理が研究されている。ご存知の読者も多いかもしれないが, 昨年 12 月にヒッグス粒子探索の最新結果が CERN で報告された。2011 年, LHC の物理結果の中でもっとも世間を賑わせたと言っても過言でない興味深い結果が観測された。

2011 年に取得された約 5 fb^{-1} を使った多くの物理結果が, 2012 年冬の国際会議で報告されている。この紙面上ではとてもすべてを網羅することが出来ないで, 今もっともホットであるヒッグス粒子探索の最新結果を中心に, 筆者の独断と偏見でいくつかのトピックを出来る限り紹介する。

また, ここで紹介できなかつた, たくさんの物理結果は, ATLAS の公式ページで公開されているので興味のある方はそちらも参考にしてもらいたい [4]。

2 2011 年のデータ

2011 年の陽子-陽子衝突実験は 2011 年 3 月 30 日から 10 月 30 日まで行われ, ピークルミノシティは $3.7 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ に到達した。当初の予想を超えた 5.25 fb^{-1} の積分ルミノシティが記録された。ATLAS 検出器も 2011 年を通じて高いデータ取得効率を保つことが出来, 各検出器も 95% 以上という高い稼働率でデータを取得することが出来た。

しかし, 図 1 で示すように 9 月以降ビームの絞りを表すパラメーターである β^* が改善され, 多重衝突の確率が大きく増加した。2011 年後半のランでは平均 11.6 個の多重衝突事象 (パイルアップ) が観測された。この

影響は消失横エネルギーの分解能を大きく低下させる。ATLAS ではこの効果をシミュレートするために 2011 年の陽子-陽子衝突実験が終わると同時にデータを解析し, モンテカルロシミュレーション (MC) に 2011 年の多重衝突事象を導入するというプロジェクトが年末に進行していた。これにより, 2011 年のデータにより近い検出器の状態と多重衝突事象がシミュレートされた MC を使い, データ解析を行うことが出来るようになった。

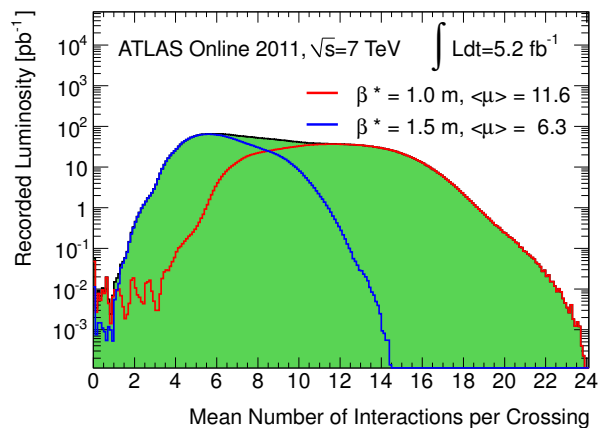


図 1: 2011 年前半のデータと後半のデータで 1 回の衝突に対する平均の反応回数の違い。

3 標準模型の検証

3.1 W/Z ボソン対生成過程の物理

標準模型で予言される生成過程の中で比較的生成断面積が小さい W/Z ボソン対生成過程も 2011 年の高統計のデータで精密測定が行われている。 WW , WZ 過程では WWZ , $WW\gamma$ トリプルゲージカップリングの精密測定から標準模型の検証, または標準模型を超える新物理

も探索されている。ZZ過程では、標準模型で禁止されているZZZ, ZZ γ カップリングから新物理を探すことも鋭意行われている。また、これらの過程は後述のヒッグス粒子探索や新粒子探索の中で重要な背景事象になるので、生成断面積の精密測定も重要なトピックである。2011年の約 5fb^{-1} のデータを使い、 $WW \rightarrow l\nu l\nu$ [5], $ZZ \rightarrow 4l$ [6], $ZZ \rightarrow ll\nu\nu$ [7]チャンネルを用いて生成断面積が測定されており、標準模型で予言された値とよい一致を見ている。図2はそれぞれの生成過程における生成断面積と理論値の比較を表している。これらの過程における異常トリプルゲージカップリングの探索も進められており進展が興味深い。

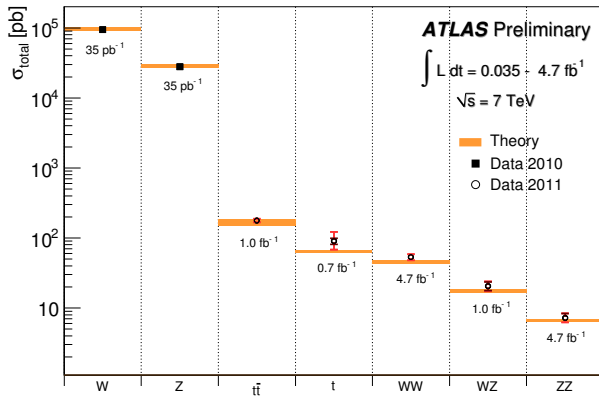


図2: 標準模型で予想される生成断面積と ATLAS 実験で観測された生成断面積の比較。

3.2 トップクォークの物理

LHCはトップクォークファクトリーと言ってもいいほどトップクォークが多く生成される。トップクォーク対生成事象の生成断面積が約 170pb なので2011年に約90万事象がLHCで生成されたことになる。トップクォークの性質は、生成過程から崩壊過程まで多岐にわたり研究され、精密測定が行われている。また、高統計のトップクォーク事象を用いて b ジェット同定効率の較正にも使われはじめている。

図3で示すようにトップクォークの質量測定では、すでに統計誤差が系統誤差よりも小さくなっており、おもな系統誤差であるジェットのエネルギースケールやISR/FSRの不定性を低減出来るかが今後の課題である[8]。トップクォーク対生成事象の生成断面積は終状態のレプトンの数に応じた様々なチャンネルで測定されており、測定誤差は理論で計算されている不定性[9]よりもよい精度で測定されている[10, 11, 12]。LHCが始まってわずか2年でこのような精密測定が可能になっていることは驚きである。また、終状態に τ レプトンを含むモードの解

析も行われている[13]。このモードは荷電ヒッグスの探索にも感度があり、精密測定から標準模型を破るような観測結果も今後期待できる。一つのトップクォークが生成されるようなシングルトップ事象も精力的に性質が調べられている[14]。

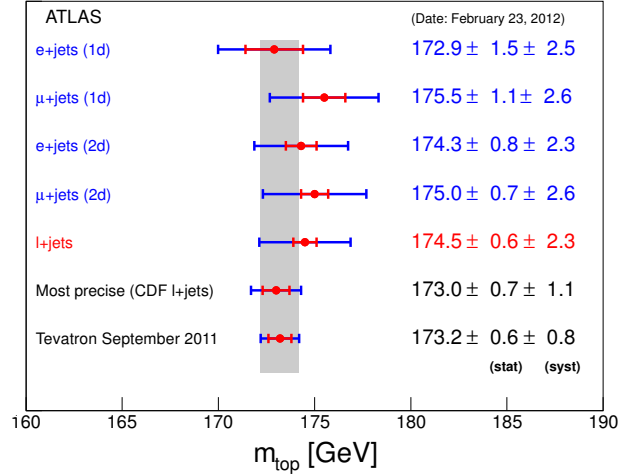


図3: レプトン+ジェット事象を用いたトップクォークの質量測定結果とテバトロンの比較。図の1d,2dは測定手法の違いを表している。

ここではトップクォーク対におけるスピン相関の測定を少し詳しく述べる。トップクォークはその質量が重く、強い相互作用の時間スケールより桁違いに寿命が短いのでハドロン化の前に崩壊する。そのため、生成されたトップクォークのスピン情報は崩壊生成物に直接伝達され、トップクォーク対生成のスピン相関が観測可能である。また、多数の標準模型を超えたシナリオとして重いスカラーボソンを介してトップクォーク対が生成された場合や、トップクォークの崩壊が荷電ヒッグスボソンを介して崩壊した場合に、スピン相関が標準模型とずれる可能性も指摘されている。D0実験では、トップクォーク対生成のスピン相関を 3.1σ の有意度で観測している[15]。

この解析は、トップクォーク対から崩壊した両方の W ボソンがレプトンに崩壊するチャンネルを用いる。生成された荷電レプトン対は相関を持ち、実験室系で二つの荷電レプトンの方位角の差 $\Delta\phi$ でトップクォーク対のスピン相関を観測することが可能である。図4は観測された $\Delta\phi$ 分布を表している。標準模型で予想される $\Delta\phi$ 分布(係数 f^{SM})とスピン相関がないときの分布(係数 $1 - f^{\text{SM}}$)を線形結合で重ね合わせた分布をデータでフィットすることによって $f^{\text{SM}} = 1.30 \pm 0.14(\text{stat})$ を得た。相関度に焼き直すと、 $A_{\text{helicity}} = 0.40 \pm 0.04(\text{stat})_{-0.07}^{+0.08}(\text{syst})$ は標準模型で予言される0.31と無矛盾であり、トップクォーク対生成におけるスピン相関を 5.1σ の有意度で観測出来た[16]。

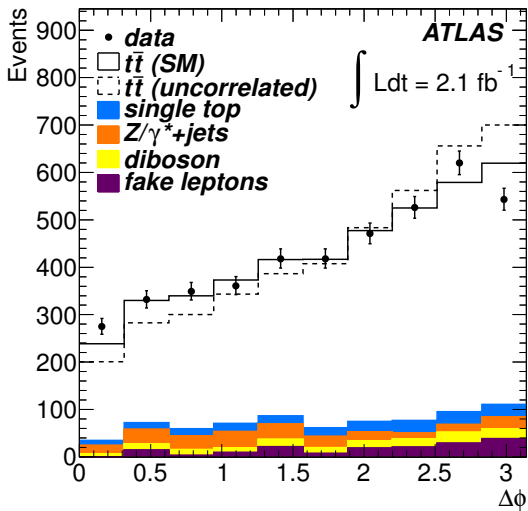


図 4: 再構成された二つの荷電レプトンの $\Delta\phi$ 分布。実線は標準模型で予言される分布を表しており、点線は相関がない場合の分布。

4 ヒッグス粒子探索

ヒッグス粒子発見は、LHC 実験の大きな目的の一つである。その発見は、標準模型の完成とともに電弱対称性の破れの解明や、質量起源の解明に迫る、現代物理学の最重要課題である。2011 年夏の結果で、141 GeV から 476 GeV までのヒッグス粒子の存在を棄却した [17]。ほかの実験の結果も考慮すると、ヒッグス粒子の存在範囲は 114.4 GeV から 141 GeV、もしくは 476 GeV 以上の高い領域に絞られたことになる。夏以降、更なるデータ量と解析の改善を加え、ヒッグス粒子発見感度の改善がなされている。

ここでは 2011 年の約 5 fb^{-1} のデータを使った最新の結果を、低い質量領域 ($m_H < 150 \text{ GeV}$) に焦点を当ててそれぞれのチャンネルの特徴と観測結果を出来る限り詳しく述べる。すべてのチャンネルがここで網羅できないのはご容赦願いたい。

4.1 光子対に崩壊するチャンネル

このチャンネルは、二つの光子を再構成することでヒッグス粒子の鋭い質量ピークが観測可能である。二つの光子の質量分解能がヒッグス粒子探索の鍵となる。質量分解能の向上のためには光子のエネルギー補正とともに、崩壊点を同定し光子の方向を正確に決めることも重要である。ATLAS 検出器は物質質量が多いため、光子の 60% は電磁カロリメータに到達する前にコンバージョンを起こし電子対に崩壊する。このような事象には電子の飛跡の情報を用いてコンバージョンをした点を同定し、その点からビーム軸に外挿することによって光子の方向

を決めている。また、ATLAS では電磁カロリメータが三層あるために、コンバージョンを起こさなかった光子は、電磁カロリメータの奥行き方向の広がりから衝突点の方向に外挿する。このアルゴリズムのため 2011 年のパイルアップでは質量ピークの分解能の低下は見られず安定していた。

図 5 は二つの光子から再構成された普遍質量分布を表している。背景事象は関数フィットで見積もられている。もし、ヒッグス粒子が存在するならばこのスムーズな背景事象の分布の上にヒッグス粒子の質量ピークを観測できる。非常に興味深いことに 126 GeV 付近にデータの超過が見られる。

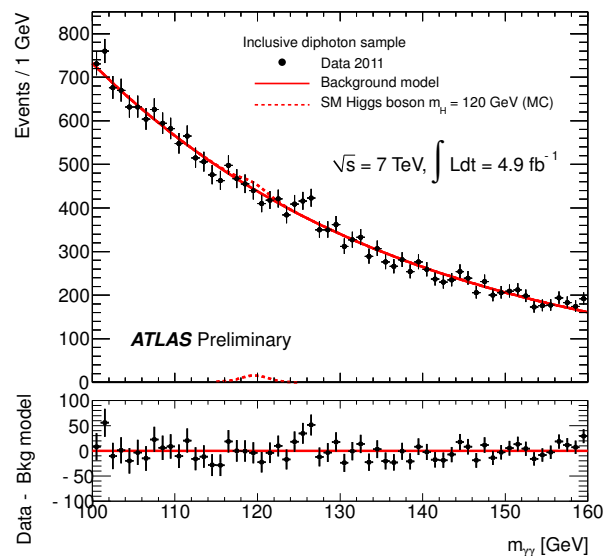


図 5: 二つの光子から再構成された普遍質量分布。

また、コンバージョンを起こしたか否か、そして物質質量の違いから光子が中央領域、前方領域に観測されたかどうかで質量の分解能が違う。もっとも分解能がよい二つの光子がコンバージョンを起こさずに中央領域に飛んだ場合は 1.4 GeV であり、少なくとも一つの光子コンバージョンを前方領域 ($0.75 > |\eta|$) で起こした場合は 2.0 GeV である。この違いと 2 光子の推力軸と直行した軸 (p_{Tt}) の大きさをカテゴリーを 9 つに分類することにより、質量分解能がよい領域と背景事象に対する信号の割合が高い領域を抜き出し、発見感度を向上させた。

図 6 に 95% 信頼度での標準模型に対する上限値を示す。126.5 GeV にもっとも大きな背景事象からの超過が見られ、統計的有意度は 2.8σ であった [18]。まだ兆候といえるほどではないが、とても興味深く更なるデータの蓄積でこの超過が統計のふらつきから来るものなのか、ヒッグス粒子の信号なのか、がはっきりしてくる。2012 年のデータを用いた解析結果が楽しみである。

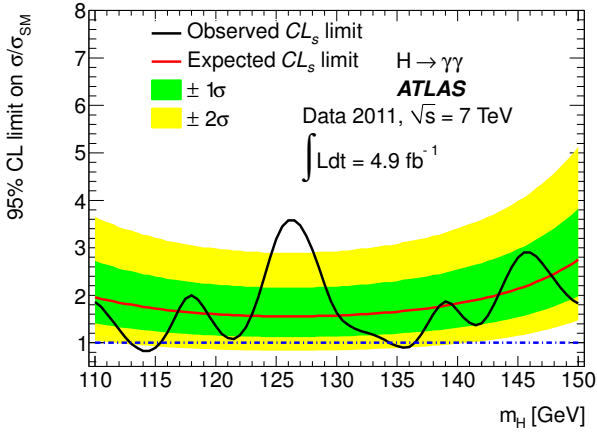


図 6: 95%信頼度で生成断面積に対する上限値を標準模型の生成断面積で規格化したもの。

4.2 Z ボソン対に崩壊するチャンネル

ここでは低い質量領域 ($m_H < 130$ GeV) に感度がある 4 レプトンに崩壊するチャンネルに焦点を当てて紹介する。このモードはいわゆる発見モードの一つであり、4 レプトンから再構成された質量の分解能がよく (低い質量領域で 1-2%), ヒッグス粒子の質量ピークが観測可能である。また、背景事象が非常に少なく、クリーンなチャンネルである。ただし、ヒッグス粒子が Z ボソン対に崩壊し、さらに Z ボソン対が 4 レプトンに崩壊する分岐比は小さく 0.01% ほどである。このチャンネルでは、いかに信号を増やすかが解析の焦点である。特に低い質量領域では、Z ボソン対の少なくとも一つは仮想状態になっているので、崩壊したレプトンの運動量も比較的小さい。この解析では 4 つのうち 2 つのレプトンは $p_T > 20$ GeV を要求し、残り 2 つのレプトンは $p_T > 7$ GeV という低い領域まで下げて信号のロスを抑えている。

4 レプトンの組み合わせのうち、もっとも Z ボソンの質量に近い組み合わせを m_{12} として、Z ボソンの質量ピーク領域 ($|m_Z - m_{12}| < 15$ GeV) にあることを選択する。残りの組を m_{34} とする。低い質量領域のヒッグス粒子探索では仮想 Z ボソンを積極的に選択するために $15 \text{ GeV} < m_{34} < 115 \text{ GeV}$ などとして信号のアクセプタンスを上げている。図 7 は 4 つのレプトンから再構成された普遍質量の分布である。見積もられた背景事象に、予想されるヒッグス粒子の質量分布が重ねてある。興味深い 3 事象が 125 GeV 付近に分布している。

図 8 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。125 GeV に観測された事象の統計的有意度は 2.1σ (1.6%) ではあるが、 $H \rightarrow \gamma\gamma$ の超過が観測された領域と合致しており、また点線で示されるヒッグス粒子が存在したときに期待される p_0 とも無矛盾である [19]。2012 年のデータでも、この領域に有意な事象の超過が観測されるのか非常に興

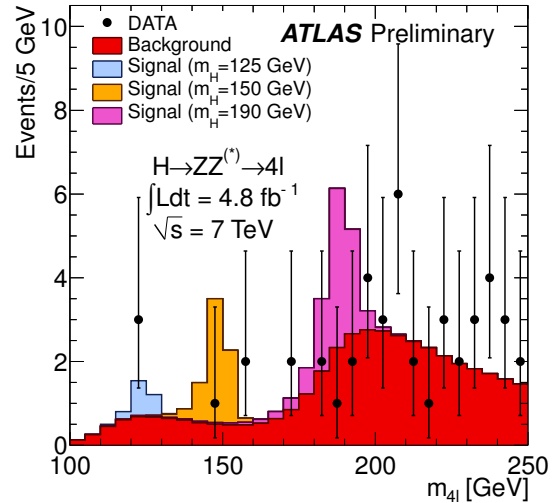


図 7: 4 レプトンから再構成された普遍質量分布。

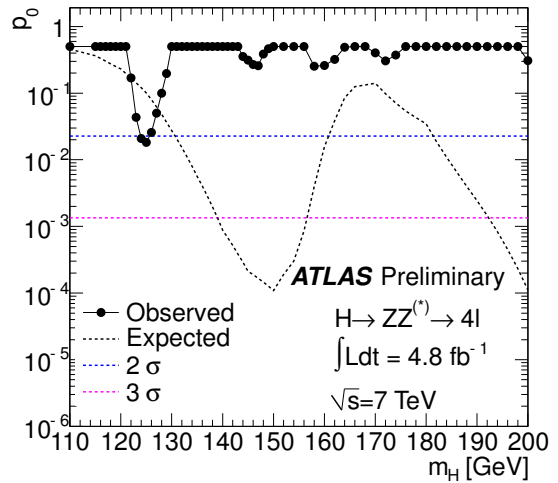


図 8: $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\ell$ チャンネルの p_0 。

味深い。

今後さらに信号のアクセプタンスを増やすため、2 レプトン対から再構成された質量の選択領域を広げる研究、この解析に最適化された同定効率を持つレプトンを用いた解析などが精力的に行われており、2012 年のデータ解析に向けて更なる改善が期待出来る。

4.3 W ボソン対に崩壊するチャンネル

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は、120-200 GeV の質量領域でもっとも発見感度がよい。ヒッグス粒子が 125 GeV に存在するならば、崩壊分岐比は 2.3% あるので、2011 年の約 5 fb^{-1} のルミノシティで約 1700 事象 ($H \rightarrow WW \rightarrow \ell\nu\ell\nu$) がグルーオン融合で生成されている (ベクターボソン融合は約 140 事象) ことになる。

このチャンネルでは、二つのレプトンと高い消失横エネルギーを含む事象を選択する。また、スピン0のヒッグス粒子から崩壊したWボソン対はスピン相関をもち、観測される二つのレプトンは同方向に観測される特徴がある。このため、小さい $\Delta\phi_{\ell\ell}$ と $M_{\ell\ell}$ を選択することで背景事象を減らしている。しかし終状態に二つのニュートリノを含むので質量の再構成が困難であり、2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 $m_T = \sqrt{(E_T^{\ell\ell} + E_T^{\text{miss}})^2 - (p_T^{\ell\ell} + E_T^{\text{miss}})^2}$ で定義される横質量分布 m_T を用いる。 m_T の質量分解能がよくないため背景事象との分離が困難になり、背景事象の見積もりが重要となる。おもな背景事象はWW, W+jets, Z+jets, $t\bar{t}$ 過程であり、それぞれの背景事象の割合は観測されるジェットの数によって異なるので、それによって事象選択を最適化している。

背景事象の理解のためにレプトン、ジェット、そして消失横エネルギーの理解が重要になる。特に2011年後半で増加したパイルアップが消失横エネルギーの分解能を大きく低下させた。これにより、本来高い消失横エネルギーを選ぶことによって抑制出来る、ニュートリノを持たない $Z \rightarrow \ell\ell + \text{jets}$ 事象が、信号領域で重要な背景事象となった。また、一つのジェットがレプトンにフェイクするようなW+jets事象は、モンテカルロシミュレーションでのフェイクレプトンの見積もりが信頼出来ないので、データのコントロール領域を用いて評価をする。ヒッグス粒子の質量が125 GeV付近の探索領域では、レプトンの p_T が比較的低く、W+jets事象の運動学的性質が信号事象と近くなる傾向がある。これによって m_T の分布形が近くなり、系統誤差が大きいW+jets背景事象の寄与が大きいことも発見感度の向上を難しくしている。

図9,10は0ジェット解析と1ジェット解析での m_T 分布である。背景事象の見積もりと観測されたデータには大きな矛盾は見られなかった[20]。

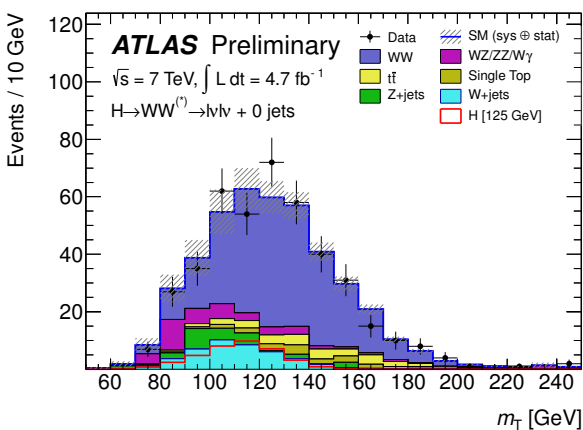


図 9: 0 ジェット解析の m_T 分布。

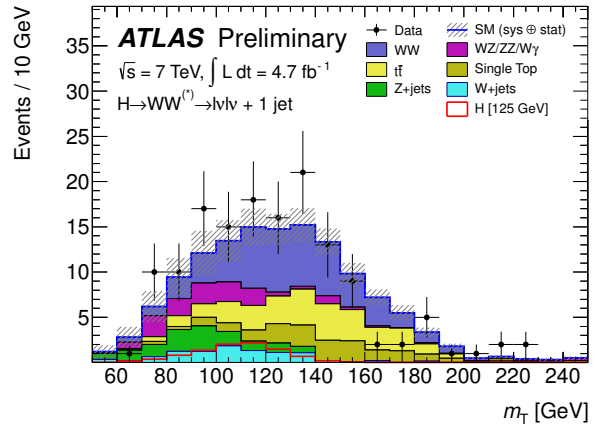


図 10: 1 ジェット解析の m_T 分布。

今後、W+jets, Z+jets 背景事象の系統誤差や絶対量を減らすため、フェイクレプトンやフェイク消失横エネルギーの理解がより重要になってくる。そのため、W+jets 背景事象を抑制するためのレプトン選択の最適化や、Z+jets を抑えるために、パイルアップが多い環境でも比較的安定している粒子の飛跡を使った、消失横運動量を用いて解析の改善を試みている。多変量解析や Matrix Element を用いた解析も進行中であり、2012年の解析ではさらなる発見感度の改善が期待出来る。

4.4 τ レプトン対に崩壊するチャンネル

現在低い質量領域 ($m_H < 130$ GeV) のヒッグス粒子探索が行われているチャンネルの中で、事象選択前の生成数をもっとも多いチャンネルはヒッグス粒子が τ レプトン対に崩壊するチャンネルである。しかし、膨大なQCD過程の背景事象から τ レプトン対を同定すること、Zボソンから崩壊した τ レプトン対から信号を分離することが困難で、これらの効率の改善が解析の鍵を握る。このチャンネルは、 $\gamma\gamma$ に崩壊するチャンネルに比べて感度は劣るが、ヒッグス粒子早期発見に必要なチャンネルである。また、このチャンネルでヒッグス粒子を発見し、生成断面積や崩壊分岐比を測定することで、湯川結合の測定も可能である。ヒッグス粒子の生成過程は、グルーオン融合過程が支配的であるが、ベクターボソン融合(VBF)過程の生成は、前後方に横方向運動量の高いジェットを生成するという特徴により、 $Z \rightarrow \tau\tau$ チャンネルの背景事象を減らすことが可能である。 τ レプトン対に崩壊するチャンネルの探索においてはVBF過程に最適化したカテゴリがもっとも感度が高い。

τ レプトン対の崩壊は、 τ レプトンの崩壊がハドロニック($\tau_h, \tau \rightarrow \text{hadrons} + \nu_\tau$)かレプトニック($\tau_\ell, \tau \rightarrow \ell\nu_\ell\nu_\tau$)かによって3種類に分けられ($\tau_\ell\tau_h, \tau_\ell\tau_\ell, \tau_h\tau_h$)、それぞれ背景事象の種類が違うことから別々に最適化された。最

適化された事象選択後、信号領域の背景事象は $Z \rightarrow \tau\tau$ チャンネルが支配的で、信号からの分離には、 τ レプトン対の質量分布や、ジェットの数、VBF 過程特有の前後方のジェットが有効で、これらを用いた場合分けを行った。また、レプトンやハドロニックに崩壊した τ レプトンのフェイクによる背景事象はデータのコントロール領域から見積もった。一つの例として、図 11 に、 $\tau_\ell\tau_h$ の VBF 過程における τ レプトン対の質量分布を示す。いずれのカテゴリにも標準模型の背景事象からの超過が見られなかったため、ヒッグス粒子の生成断面積 (標準模型に規格化) に対する棄却領域を得た。110 GeV-130 GeV の領域で標準模型が予想する生成断面積の 2.7-3.8 倍以上を棄却した [21]。

もっとも感度の高い VBF 過程のカテゴリは、事象選択後に残る信号の数は約 5 事象と少なく、系統誤差と比較して統計誤差の影響がはるかに大きい。一方、更なる厳しい事象選択により信号-背景事象数比を改善することが可能であり、取得されたデータ量に応じた最適化を行なっていく予定である。また、背景事象との分離が困難であるこのチャンネルは、多変量解析による恩恵も大きい。2012 年の解析では大幅な発見感度の改善が期待される。

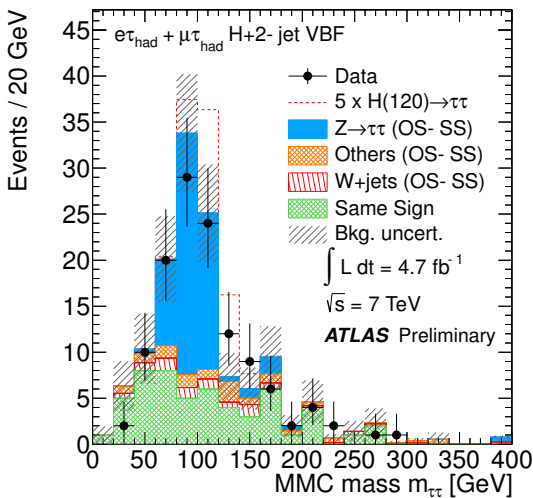


図 11: タウレプトン対の質量分布。

4.5 b クォーク対に崩壊するチャンネル

低い質量領域 ($m_H < 130$ GeV) でヒッグス粒子の崩壊分岐比がもっとも高いのは b クォーク対である。 b クォーク対を含む背景事象を効率的に除くため、探索はベクターボソンとの随伴生成過程で行われる。 τ レプトン対の探索同様、湯川結合の測定に極めて大切なチャンネルである。解析はベクターボソンの種類と崩壊過程から、 $ZH \rightarrow \ell\ell b\bar{b}$, $ZH \rightarrow \nu\nu b\bar{b}$, $WH \rightarrow \ell\nu b\bar{b}$ の 3 種類に分類

されそれぞれ最適化された解析を行った。主要な背景事象はベクターボソンと b クォーク対が生成されるチャンネル (V +jets) で、終状態が信号と同様のためこの背景事象を減らし、正確に見積もることがこのチャンネルの鍵を握る。

信号と随伴生成されたベクターボソンの横方向運動量 (p_T^V) が背景事象と比べて高いという性質を利用して、 p_T^V の大きさに場合分けをし、信号-背景事象比の異なるカテゴリを統合することで発見感度をあげた。また、 V +jets チャンネルの背景事象はデータのコントロール領域を用いて規格化した。図 12 は $WH \rightarrow \ell\nu b\bar{b}$ チャンネルの $p_T^V > 200$ GeV カテゴリに置く b クォーク対の質量分布を示す。観測された事象数は背景事象の予想と誤差の範囲で一致していたため、ヒッグス粒子の生成断面積に対する制限をつけた。110 GeV-130 GeV の領域で標準模型が予想する生成断面積の 2.7-5.3 倍以上を棄却した [22]。

低い p_T^V 領域はジェットのエネルギー測定などの系統誤差が支配的であるため、これらの系統誤差を小さくすることが今後の改善の鍵を握る。また、 b クォークのジェットのエネルギー分解能の向上は b クォーク対の質量分布における背景事象の軽減に役立つため発見感度が改善する可能性がある。

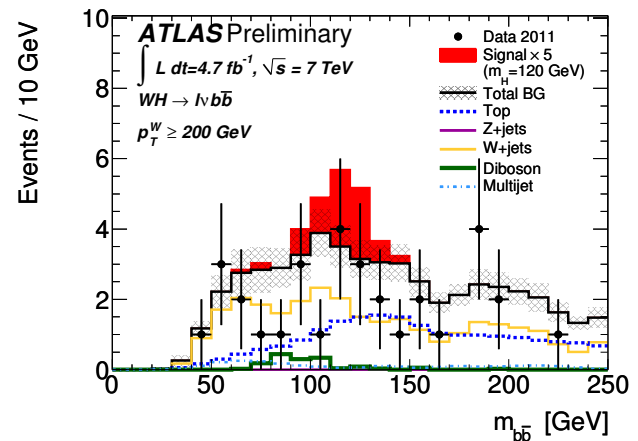


図 12: b クォーク対の質量分布。

4.6 発見の可能性と将来

ヒッグス粒子の存在の有無で、今後の素粒子物理学の進むべき道は大きく変わるかもしれない。しかし、標準模型が予想するヒッグス粒子の発見と言うのは、あくまでもヒッグス機構の検証の第一歩でしかない。自発的対称性の破れが、素粒子質量の起源であることの証明には、結合定数の測定、つまり、各生成崩壊過程を精密に測定し比較することが必要不可欠である。本章では、これまで

紹介した様々なチャンネルでのヒッグス探索を比較しつつ、コンバイン [23] と発見の可能性について述べる。

コンバインに用いた各チャンネルの標準模型ヒッグス粒子に対する制限を図 13 に示した。それぞれ点線が予想制限、実線が観測された制限を示す。(白黒印刷の読者の方のため) 低い質量領域 (125 GeV) は、予想感度が高い順に $H \rightarrow WW \rightarrow l\nu l\nu$, $H \rightarrow \gamma\gamma$, $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$, $H \rightarrow \tau\tau$, $H \rightarrow bb$, の 5 つのチャンネルを用いた。

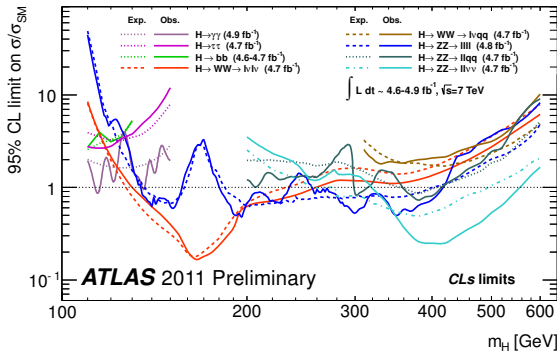


図 13: コンビネーションに用いたチャンネル。

各チャンネルの解析で用いた様々な系統誤差の起源を精査し、その相関を考慮した上で profile likelihood 法 [24] による検定を行い、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えるのかを表した確率 (p_0) を算出した。図 14 は低い質量領域における p_0 の値をヒッグス粒子の質量の関数で示したものである。点線はヒッグス粒子が存在したときの期待される p_0 の分布を示し、実線は観測された p_0 をそれぞれ示す。右側の数字は、その確率が何 σ に相当するのを示したものである。もっとも p_0 が小さかった質量は 126 GeV であり、統計的有意度は 2.6σ であった。この結果は、発見にはいたっていないが、ヒッグス粒子の存在を示唆する重要な結果であるといえる。

さらに興味深いことに 126 GeV で観測された背景事

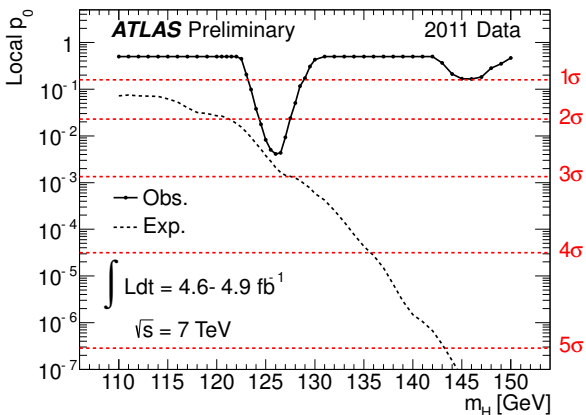


図 14: 予想および観測された p_0 。

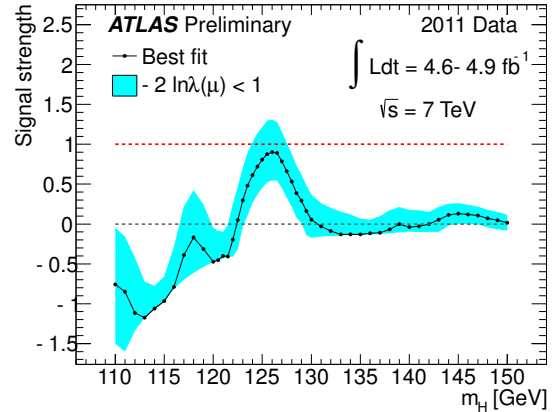


図 15: 各質量点での信号の強さに対するベストフィットの値 (標準模型に規格化)。

象からの超過は、標準模型で期待される断面積で規格化した測定値 (信号の強さ) を考えると極めて標準模型予想に近い。図 15 は、信号の強さをヒッグス粒子質量の関数で示したものである。もちろんこの超過を慎重に議論する必要がある。本章の冒頭に書いたように各チャンネルでの信号の強さは結合定数の測定を示唆する重要な手がかりになる。表 1 に、チャンネルごとの信号の強さを 126 GeV における値として示す。この結果が示すようにすべてのチャンネルでの観測結果は、“信号の強さ=1”と誤差の範囲で矛盾しない。しかし、もっとも感度の高い二つのチャンネル ($H \rightarrow WW \rightarrow l\nu l\nu$ および $H \rightarrow \gamma\gamma$) でその中心値に違いが見られる。今後のデータ解析でこれらの値がどこに収束するのかが非常に大切な要素となる。

表 1: 126 GeV のヒッグス粒子を仮定したときの信号の強さに対するベストフィット (標準模型に規格化)。

チャンネル	信号の強さ
$H \rightarrow WW \rightarrow l\nu l\nu$	0.2 ± 0.6
$H \rightarrow \gamma\gamma$	2.0 ± 0.8
$H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$	$1.2^{+1.2}_{-0.8}$
$H \rightarrow \tau\tau$	0.2 ± 1.8
$H \rightarrow bb$	-0.8 ± 1.9
コンバイン	0.9 ± 0.4

さて、126 GeV 付近以外のヒッグス粒子の可能性はないのだろうか。図 16 に標準模型に規格化したヒッグス粒子の生成断面積に対する制限 (95%信頼度) をヒッグス粒子の質量の関数で示す。点線が予想される制限、実線が観測された制限に対応していて、“制限=1”を下回る質量領域は 95%の信頼度で棄却されたことを示す。126 GeV 付近の制限が予想と比較して高いのは、データの超過に対応し、それ以外の領域では、 $118(\pm 0.5)$ GeV の小さな

領域を除くすべての質量領域を棄却したことになる(棄却領域は, $110.0 \text{ GeV} < m_H < 117.5 \text{ GeV}$, $118.5 \text{ GeV} < m_H < 122.5 \text{ GeV}$, $m_H > 129 \text{ GeV}$)。予想感度が棄却に届いていない 120 GeV 以下の領域については今後のデータで再度確認する必要があるが, ヒッグス粒子が存在する可能性がある領域は極めて狭い領域を残すのみとなった。

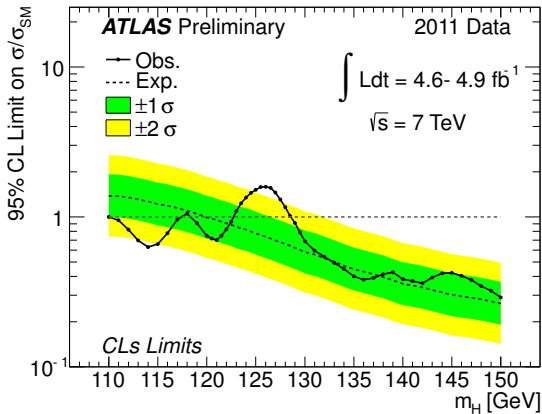


図 16: 標準模型ヒッグス粒子の生成断面積に対する上限(低い質量領域)。

最後に高い質量(特に 200 GeV を越える)領域におけるヒッグス粒子探索について簡単にまとめる。詳細は述べなかったが, 図 13 に示したように高い質量領域では(白黒印刷の読者の方のため) 350 GeV における予想感度が高い順に, $H \rightarrow ZZ \rightarrow ll\nu\nu$ [25], $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$, $H \rightarrow ZZ \rightarrow llqq$ [26], $H \rightarrow WW \rightarrow l\nu\nu$ および $H \rightarrow WW \rightarrow l\nu qq$ [27] の 5 つのチャンネルで探索が行われている。探索された 600 GeV までの領域に感度の高い超過は観測されず, 95%信頼度での生成断面積に対する上限を与えた(図 17)。結果は, 539 GeV (予想値は 555 GeV) 以下の標準模型ヒッグス粒子を棄却した。

ヒッグス粒子探索は大詰めを迎えたといえる。現在観

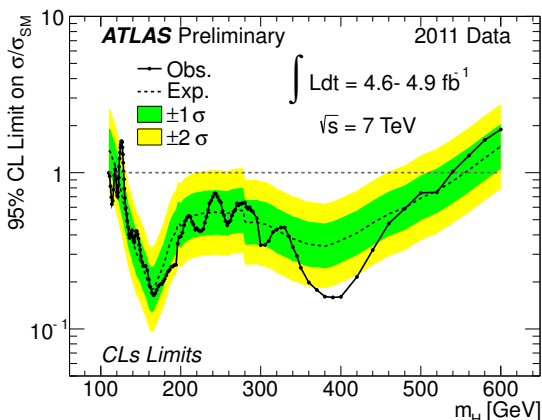


図 17: 標準模型ヒッグス粒子の生成断面積に対する上限 ($110 \text{ GeV} < m_H < 600 \text{ GeV}$)。

測されている標準模型ヒッグスを示唆する超過を確実にものにするというシナリオ, 感度の足りない 114 GeV - 120 GeV の領域に隠されたヒッグス粒子を発見するというシナリオ, もしくはすべての質量領域で標準模型ヒッグス粒子の存在を棄却するというシナリオ, 現段階でどのケースになるか明確には予測はできないが, 今年予定されているデータ(約 20 fb^{-1})で確実に結論づけられる。また, ヒッグス粒子の有意な兆候が見られた際には, 結合定数の測定に関しても重要なヒントが得られる。今年の結果に期待してほしい。

5 標準模型を越える物理の探索

今回はヒッグス粒子探索を中心に紹介してきたが, 標準模型を越える新しい物理の探索に関する結果もアップデートされている。多くの重要な結果が公開されたが, 今回は, 2011 年全データを用いた結果のみを簡単に紹介し, それ以外の結果は次回に託す。

ジェット対やレプトン対に崩壊する細い共鳴状態の探索は, 標準模型を越えた新しい物理現象の探索に有用であり, エネルギーフロンティアのベンチマークとして探索が続けられる。解析はシンプルで, 質量分布のなだらかな背景事象の上にピークとなって観測されることから新粒子の兆候をいち早く観測することが可能である。前回も紹介した([3] 図 16) ジェット対共鳴は約 5 倍の統計に増して解析が行われた [28] が, 有意な超過は見られなかった。レプトン対共鳴は重いゲージボソン (Z'), テクニメソン, Randall-Sundrum グラビトンなどの理論モデルを探索可能である。結果として, 有意な超過は見られず, 理論モデルによるが $1\text{-}2 \text{ TeV}$ の質量を棄却した [29]。

超対称性粒子の探索は, LHC 実験で探索可能な標準模型を越える新しい物理としてもっとも期待されている理論の一つではないだろうか。解析はレプトンの有無でふたつにわけられる(マルチジェット, 1レプトン)。マルチジェット解析 [30, 31] は, ジェットと消失横エネルギーを持つ事象として探索され, もっとも感度の高いチャンネルである。前回, グルイーノ-スクォーク質量面の棄却領域を紹介した([3] 図 12)。統計を 4 倍に増して探索が行われ, 感度の高い超過は見られなかったが, グルイーノおよびスクォークの質量に対して新たに $200\text{-}500 \text{ GeV}$ の領域を棄却した。図 18 に, 4 ジェットと消失横エネルギーを持つ事象の effective mass(消失エネルギーのビーム軸方向のエネルギーを 0 と仮定したもの)の分布を示す。1レプトン解析は, 超対称性粒子の多段崩壊中にレプトンが多く放出される場合感度が高く, またレプトンはジェットに比べて低い運動量まで再構成が可能のため, 質量スペクトラムが縮退している場合の探索にも重要である。結果 [32] は, このチャンネルでも有意な超過は観測され

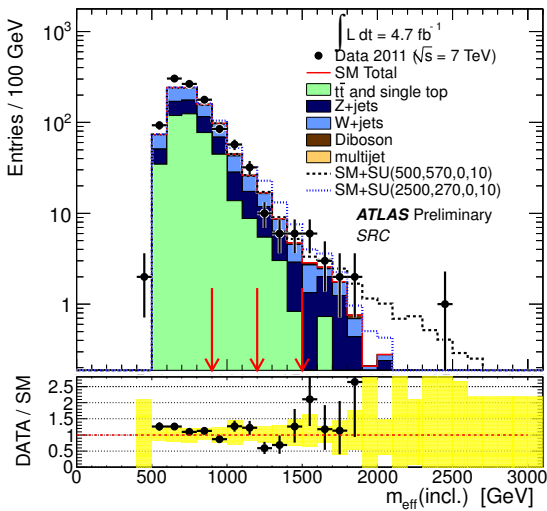


図 18: (上) マルチジェット解析における effective mass 分布。(下) データを予想される全バックグラウンドで割ったもの。

なかった。

本章で紹介してきた標準模型を越える物理の探索は、その棄却領域が既に TeV 領域に達していて、重心系エネルギーと陽子構造関数を考慮すると今後大幅な更新が望めない。LHC のデザインエネルギー (14 TeV) での衝突が待ち遠しいところである。

6 おわりに

今回はヒッグス粒子探索を中心に紹介してきた。質量 126 GeV に興味深い超過が観測され標準模型の予想と矛盾しないという実験結果は歴史的発見の前兆である可能性が高い。さらに LHC 加速器は重心系エネルギーを増強し、8 TeV の衝突実験が今年も順調に始まった。この増強は、7 TeV と比較して、同等の感度を約 3/4 のデータ量で実現可能であると予想されている。5 月中旬現在、積分ルミノシティ 3 fb^{-1} を越え順調に稼働を続けている (図 19)。一方で、ピーク瞬間ルミノシティは $6 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ を越え、平均多重衝突事象数は 2011 年ランの約 2 倍観測されているため、高パイルアップ環境でのデータの理解が必要である。今後の予定では、夏の国際会議までに $5\text{-}10 \text{ fb}^{-1}$ 、2012 年中 (11 月まで) に $15\text{-}20 \text{ fb}^{-1}$ のデータを取得する予定である。

また、今年 12 月より二年間のシャットダウンが予定されていて、検出器および加速器の増強を行う (重心系エネルギーは 13-14 TeV を予定)。この増強によって TeV 領域の新しい物理の探索にも期待が高まる。今年はもちろん、しばらく LHC の結果から目が離せない。

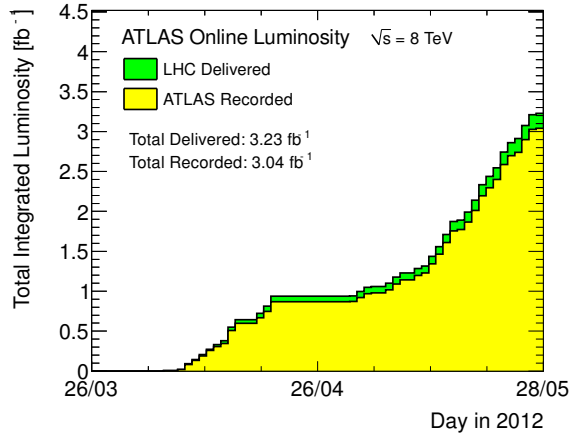


図 19: 2012 年に取得された 8 TeV データの積分ルミノシティ。

参考文献

- [1] 浅井祥二, 「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] 津野総司, 金谷奈央子, 「LHC 最新の研究結果 III」, 高エネルギーニュース **30-3**, 210 (2011).
- [4] <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/AtlasPublic>
- [5] ATLAS Collaboration, “Measurement of the W^+W^- Production Cross Section in Proton-Proton Collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS Detector”, ATLAS-CONF-2012-025.
- [6] ATLAS Collaboration, “Measurement of the total ZZ production cross section in the four-lepton channel with 4.7 fb^{-1} of ATLAS data”, ATLAS-CONF-2012-026.
- [7] ATLAS Collaboration, “Measurement of the ZZ production cross section in the $ll\nu\nu$ channel in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector”, ATLAS-CONF-2012-027.
- [8] ATLAS Collaboration, “Measurement of the top quark mass with the template method in the top antitop \rightarrow lepton + jets channel using ATLAS data”, arXiv:1203.5755 [hep-ex]; CERN-PH-EP-2012-003.
- [9] M. Aliev et al., “HATHOR - HAdronic Top and Heavy quarks crOss section calculatorR” Comput. Phys. Commun.182 (2011) 1034-1046, arXiv:1007.1327 [hep-ph]

- [10] ATLAS Collaboration, “Measurement of the cross section for top-quark pair production in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector using final states with two high-pt leptons”, arXiv:1202.4892 [hep-ex]; CERN-PH-EP-2011-223.
- [11] ATLAS Collaboration, “Measurement of the $t\bar{t}$ production cross-section in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV using kinematic information of lepton+jets events”, ATLAS-CONF-2011-121.
- [12] ATLAS Collaboration, “Measurement of the $t\bar{t}$ production cross section in the all-hadronic channel in ATLAS with $\sqrt{s} = 7$ TeV data”, ATLAS-CONF-2012-031.
- [13] ATLAS Collaboration, “Measurement of the $t\bar{t}$ production cross section in the final state with a hadronically decaying tau lepton and jets using the ATLAS detector”, ATLAS-CONF-2012-032.
- [14] ATLAS Collaboration, “Measurement of the t-channel single top-quark production cross section in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector”, arXiv:1205.3130 [hep-ex]; CERN-PH-EP-2012-082.
- [15] D0 Collaboration, “Evidence for Spin Correlation in $t\bar{t}$ Production”, Phys. Rev. Lett. 108 032004 (2012).
- [16] ATLAS Collaboration, “Observation of spin correlation in $t\bar{t}$ events from pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV using the ATLAS detector”, arXiv:1203.4081 [hep-ex]; CERN-PH-EP-2012-074.
- [17] ATLAS Collaboration, CMS Collaboration, “Combined Standard Model Higgs boson searches with up to 2.3fb^{-1} of pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV at the LHC”, ATLAS-CONF-2011-157.
- [18] The ATLAS Collaboration, “Search for the Standard Model Higgs Boson in the Diphoton Decay Channel with 4.9fb^{-1} of pp Collision Data at $\sqrt{s} = 7$ TeV with ATLAS”, Phys. Rev. Lett.108, 111803 (2012).
- [19] ATLAS Collaboration, “Search for the Standard Model Higgs boson in the decay channel $H \rightarrow ZZ(*) \rightarrow 4\ell$ with 4.8fb^{-1} of pp collision data at with ATLAS”, Physics Letters B 710 (2012).
- [20] ATLAS Collaboration, “Search for the Standard Model Higgs boson in the $H \rightarrow WW \rightarrow \ell\nu\ell\nu$ decay mode with 4.7fb^{-1} of ATLAS data at $\sqrt{s} = 7$ TeV”, ATLAS-CONF-2012-012.
- [21] ATLAS Collaboration, “Search for the Standard Model Higgs boson in the $H \rightarrow \tau\tau$ decay mode with 4.7fb^{-1} of ATLAS data at $\sqrt{s} = 7$ TeV”, ATLAS-CONF-2012-014.
- [22] ATLAS Collaboration, “Search for the Standard Model Higgs boson produced in association with a vector boson and decaying to a b -quark pair using up to 4.7fb^{-1} of pp collision data at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector at the LHC”, ATLAS-CONF-2012-015.
- [23] ATLAS Collaboration, “An update to the combined search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC using up to 4.9fb^{-1} of pp collision data at $\sqrt{s} = 7$ TeV”, ATLAS-CONF-2012-019.
- [24] G. Cowan, K. Cranmer, E. Gross, and O. Vitells, “Asymptotic formulae for likelihood-based tests of new physics” Eur.Phys.J. **C71** (2011) 1554.
- [25] ATLAS Collaboration, “Search for a Standard Model Higgs in the $H \rightarrow ZZ \rightarrow \ell\nu\nu$ decay channel with 4.7fb^{-1} with the ATLAS detector”, ATLAS-CONF-2012-016.
- [26] ATLAS Collaboration, “Search for a Standard Model Higgs in the mass range 200-600 GeV in the channel $H \rightarrow ZZ \rightarrow \ell\ell q\bar{q}$ with the ATLAS detector”, ATLAS-CONF-2012-017.
- [27] ATLAS Collaboration, “Search for the Higgs boson in the $H \rightarrow WW \rightarrow \ell\nu jj$ decay channel using 4.7fb^{-1} of pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector”, ATLAS-CONF-2012-018.
- [28] ATLAS Collaboration, “Search for New Phenomena in Dijet Mass and Angular Distributions using 4.8fb^{-1} of pp Collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV collected by the ATLAS Detector”, ATLAS-CONF-2012-038
- [29] ATLAS Collaboration, “Search for high-mass dilepton resonances with 5fb^{-1} of pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS experiment”, ATLAS-CONF-2012-007

- [30] ATLAS Collaboration, “Search for squarks and gluinos using final states with jets and missing transverse momentum”, ATLAS-CONF-2012-033
- [31] ATLAS Collaboration, “Hunt for new phenomena using large jet multiplicities and missing transverse momentum with ATLAS in $L = 4.7 \text{ fb}^{-1}$ of $\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$ proton-proton collisions”, ATLAS-CONF-2012-037
- [32] ATLAS Collaboration, “Further search for supersymmetry at $\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$ in final states with jets, missing transverse momentum and one isolated lepton”, ATLAS-CONF-2012-041