

LHC ATLAS 実験 最新の物理結果

名古屋大学 素粒子宇宙起源研究機構 (KMI)

中浜 優

yu.nakahama@cern.ch

2018 年 (平成 30 年) 5 月 27 日

1 はじめに

LHC ATLAS 実験では重心系エネルギー 13 TeV の陽子陽子衝突データ取得期間 Run-2 が順調に進行中であり、エネルギーフロンティアの物理研究を精力的に遂行中である。2015-2016 年度は 8 TeV (Run-1) → 13 TeV (Run-2) の重心系エネルギー増加による感度増加の恩恵を享受して、数多くの新粒子探索結果を公表した。これらの結果は、以前の高エネルギーニュースでの報告を参照されたい [1, 2]。

取得した高統計データを最大限に活用するために、われわれは物理解析手法や物理オブジェクトの再構成方法をより高感度で高精度なものへと改良している。このような最先端の解析手法は、開発から実際のデータ解析への導入まで時間がかかる。よって、その年のデータ取得が秋に終了したのち、次の春に結果を即公表ということはあまりなくなってきた。現時点では、2015-2016 年度に取得した 36 fb^{-1} データを用いた解析結果が超精密測定以外はほぼ出揃ったところである。

ATLAS 実験がこの 1 年間に公表した物理論文数は 113 本にのぼる¹。本稿で ATLAS 実験の全公式結果 [3] を取り上げるのは難しいので、今回は著者が興味のある「ヒッグス粒子の物理」と「超対称性粒子探索」の中からいくつか紹介する。

2 ヒッグス粒子の物理

2.1 $H \rightarrow b\bar{b}$ 過程の探索

標準理論においてヒッグス機構はボソンとフェルミオンに質量を与える。ヒッグス粒子からベクターボソンへ

の崩壊過程は実験的にクリーンであり、ATLAS 実験では 2012 年のヒッグス粒子発見以降各種精密測定が行われてきた。一方、ヒッグス粒子のフェルミオンへの湯川結合は、標準理論の寄与のみを仮定してループを介した間接測定が行われてきた。ツリーレベルでの直接測定は物理的重要性にもかかわらず、これまで Run-1 でのタウレプトン対への崩壊過程での測定のみ限定されていた。今後、レプトンだけでなくクォークへの結合定数の直接測定が極めて重要である。

標準理論ヒッグス粒子からボトムクォーク対への崩壊過程 ($H \rightarrow b\bar{b}$) では、ヒッグス粒子とボトムクォーク (ダウン型クォーク) の結合を検証できる。また、全崩壊過程の約 60 % を占め支配的であるので、 $H \rightarrow b\bar{b}$ 過程の理解はヒッグス粒子の全崩壊幅への制限のためにも決定的である。以下 36 fb^{-1} データを用いた $H \rightarrow b\bar{b}$ 過程の探索結果 [4] を紹介する。

LHC において $H \rightarrow b\bar{b}$ 過程は大量のマルチジェット背景事象に埋もれてしまうので、包括的な探索は非常に困難である。 $H \rightarrow b\bar{b}$ 崩壊を抽出するためにもっとも感度が高い主要モードは、ヒッグス粒子が W または Z ボソンと随伴生成された過程である。 W または Z ボソンから生成されるレプトンをタグすることによって、トリガー選別やマルチジェット背景事象の大幅削減が初めて可能となる。

本解析開始当時は、 W/Z +複数ジェットや $t\bar{t}$ が主要な背景事象になる過程で初めて、ヒッグス粒子の 3 シグマレベルの証拠を目指していた。 $H \rightarrow WW^*$ や $H \rightarrow \tau\tau$ などの既存のヒッグス粒子の解析と比較して、QCD の系統誤差なども含めて背景事象のコントロールがはるかに難しい。解析では、レプトン数ごとに 0 レプトン、1 レプトン、2 レプトンと事象を分類した。それぞれ $ZH \rightarrow \nu\nu b\bar{b}$, $WH \rightarrow l\nu b\bar{b}$, $ZH \rightarrow ll b\bar{b}$ (l はレプトン) 過程に対応している。それぞれ 45 GeV、20 GeV 以上の運動量を持つボトムクォーク起源のジェット (ボトムジェット)²を

¹ちなみに実験開始からカウントすると計 747 本で、Run-2 データセットを用いた論文に限定でも計 158 本もある。管理や検索機能向上のために、昨秋に論文リストのウェブ表示方法 (とその元データベース) をキーワードベースへと刷新した。各物理グループでの論文リストのページ上で、重心系エネルギーや解析チャンネルや解析技術や公表時期などの各種キーワードを指定すると、フィルター後の論文リストが表示される [3]。

²ボトムジェット同定に用いるアルゴリズムは、Run-2 から導入されたピクセル検出器最内層 IBL [5] からの追加情報によって、大幅に改善された [6]。

2本要求した。特筆すべき解析技術の特徴としては、高運動量の W および Z ボソンを選択すること、ボトムジェット特有の「セミレプトニック崩壊する性質」を考慮した自前のエネルギー運動量較正をすることによりボトムジェット対から組んだ不変質量分解能を改善させたこと、さらに標準理論ヒッグス粒子の質量に対応させたことである。最終的には、それらの情報を入力した多変数解析を利用し、背景事象から信号を識別した。ここでは各背景事象の成分や系統誤差を0レプトン、1レプトン、2レプトンの分類で同時に制限をかけて141パラメーターを14の運動学的領域で決定した。その際、各フィットパラメーターの相関や非相関の取り扱いなどギリギリのコントロールが必要だった。その分ダイボソン背景事象数もデータを使用して標準理論通りに測定できた。以下 Run-1 データを用いた解析結果と統合した結果を示す。図1にデータ事象数の分布を、信号事象期待数 S と背景事象期待数 N と共に示す。ここでの横軸は、全信号領域での最終識別量のヒストグラムのビンを $\log(S/N)$ に変換している。左端のビンがもっとも背景事象らしく、右端のビンがもっとも信号らしい。右端のビンで、データ事象数において「 $H \rightarrow b\bar{b}$ 信号」に起因した超過が「見える」。計算した統計的有意度は3.5シグマとなり、めでたく3シグマ以上の証拠を得た。ヒッグス粒子の測定数を標準理論での期待数で規格化した μ 値は $0.90 \pm 0.18(\text{stat.})^{+0.21}_{-0.19}(\text{syst.})$ であった。

クロスチェックとして、ボトムジェット対から組んだ不変質量を利用して解析した。図2にその不変質量分布を示す。灰色部分(左側のピーク)がダイボソン由来の「 $Z \rightarrow b\bar{b}$ 背景事象」期待数に対応する。データの分布でそのダイボソン以外の背景事象の寄与を差し引いたところ、赤色部分(右側)に「 $H \rightarrow b\bar{b}$ 信号事象」期待数に対応する超過が緩やかなピークとして「見える」。

2.2 $t\bar{t}H$ 過程の探索

湯川結合の大きさはフェルミオンの質量に比例すると期待され、その実験的検証は非常に重要である。トップクォークは標準理論で一番重いフェルミオンであるので、湯川結合の大きさが一番大きい。ヒッグス粒子がトップクォーク対と随伴生成された過程 ($t\bar{t}H$) は図3に示す通りツリーレベルで、生成断面積はトップ湯川結合定数の自乗に比例するので、ヒッグス粒子とトップクォーク(アップ型クォーク)の結合の直接検証に最適である。以下 36 fb^{-1} を用いた $t\bar{t}H$ 過程の探索結果 [7, 8] を紹介する。

LHCにおいて $t\bar{t}H$ 生成過程は、ヒッグス粒子の全生成断面積のうちたった1%である。終状態は、トップクォーク対とヒッグス粒子それぞれの崩壊生成物の組み

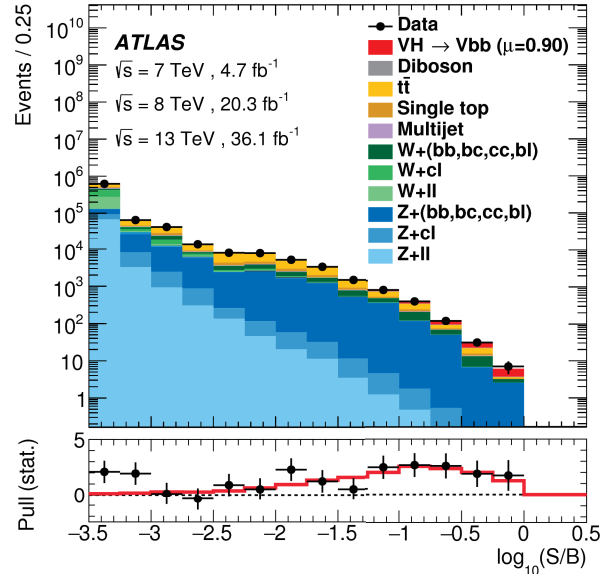


図1: $H \rightarrow b\bar{b}$ 探索の多変数解析でのデータ事象数の分布と信号事象期待数 S および背景事象期待数 N 。

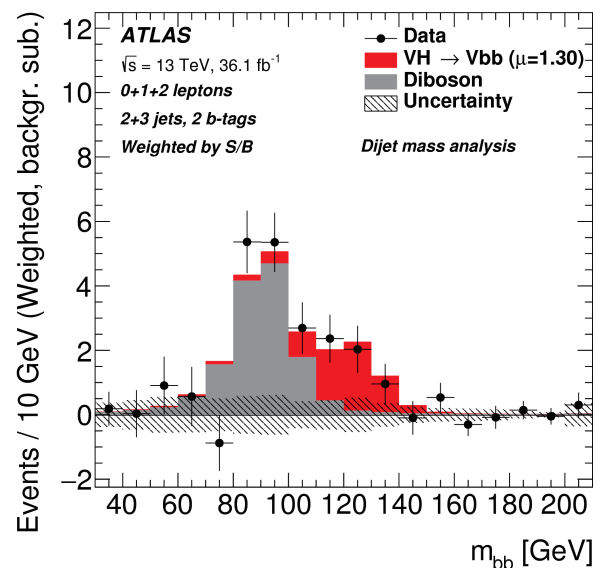


図2: ボトムジェット対から組んだ不変質量の分布。

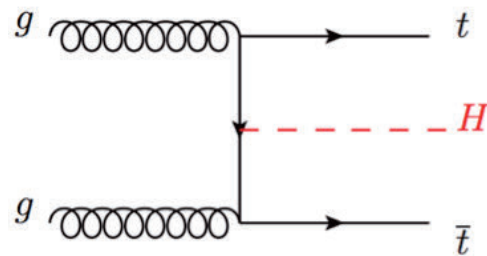


図3: ヒッグス粒子がトップクォーク対と随伴生成された過程 ($t\bar{t}H$) のダイアグラム。赤線(点線)がトップクォークの湯川結合に対応。

合わせに対応するので、ジェットやボトムジェットやレプトンや光子など数多くのオブジェクトを含む。さらに分離困難な主要な背景事象は、トップクォーク対およびボトムジェット対両方を持つ事象 ($t\bar{t}b\bar{b}$) や、トップクォーク対および W ボソンや Z ボソン両方を持つ事象 ($t\bar{t}W$ や $t\bar{t}Z$) である。結果として、非常に複雑な解析である。

解析では、ヒッグス粒子の崩壊過程や終状態によって事象を4種類に分類した; (1) $H \rightarrow b\bar{b}$, (2) マルチレプトン (ヒッグス粒子は $H \rightarrow WW^*$ や $H \rightarrow \tau\tau$ や $H \rightarrow ZZ^* (\rightarrow ll\nu\nu$ または $\rightarrow llqq)$ のいずれかに崩壊), (3) $H \rightarrow \gamma\gamma$, (4) $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$ 。ただし、各分類において、トップクォーク対の崩壊に、電子またはミューオンが (1) (2) では1本または2本, (3) (4) では0本または1本または2本ふくまれるとする。

(1) $H \rightarrow b\bar{b}$ チャンネルは、統計量は一番あるものの、 $t\bar{t}b\bar{b}$ 由来の背景事象の統計量も膨大である。ジェット数やボトムジェット数やそのボトムジェットらしさの関数で9つの信号領域を設定した。解析技術としては、ボトムジェット同定や再構成したヒッグス粒子とトップクォーク対に関連した変数 (たとえば、不変質量や角度相関) を入力した多変数解析を利用した。最終的に全領域を統計的に統合して、多変数解析の出力量を識別量としてデータから信号事象を抽出した。すでに系統誤差が支配的であり、一番大きい寄与はボトムクォークを伴ったトップクォーク対背景事象のモデリングの不定性に由来であった。

(2) マルチレプトンチャンネルは、統計量は少ないものの、同じ終状態を持つ $t\bar{t}W$ や $t\bar{t}Z$ などの背景事象数が少なくクリーンである。一番感度が高い。ジェット2本とボトムジェット1本を要求した上で、電荷が同じレプトン2本やレプトン3本または4本を要求するような7つの信号領域を設定した。ここでも各領域での信号と背景事象の分離を最大にするように多変数解析を利用した。本チャンネルで難しい部分は、1つ目はトップクォーク対背景事象でのボトムクォーク崩壊由来のレプトンを、信号事象での W ボソン由来のレプトンと間違えてしまうことである。このようなフェイクレプトンの寄与は、レプトン同定らしさを利用してデータのみを用いて推定した。2つ目は $t\bar{t}W$ や $t\bar{t}Z$ などの背景事象自体が稀崩壊なので、正確に理解されていないことである。このような理論的な予想の妥当性をデータで検証し、この不定性を最小限にした。図4にデータ事象数の分布を、信号事象期待数 S と背景事象期待数 N と共に示す。ここでの横軸は、全信号領域での最終識別量のヒストグラムのビンを $\log(S/N)$ に変換している。左端のビンがもっとも背景事象らしく、右端のビンがもっとも信号らしい。右端のビンで、データ事象数において背景事象期待数の寄与に対して「 $t\bar{t}H$ 信号」に起因した超過が「見

える」。計算した統計的有意度は4.1シグマであった。

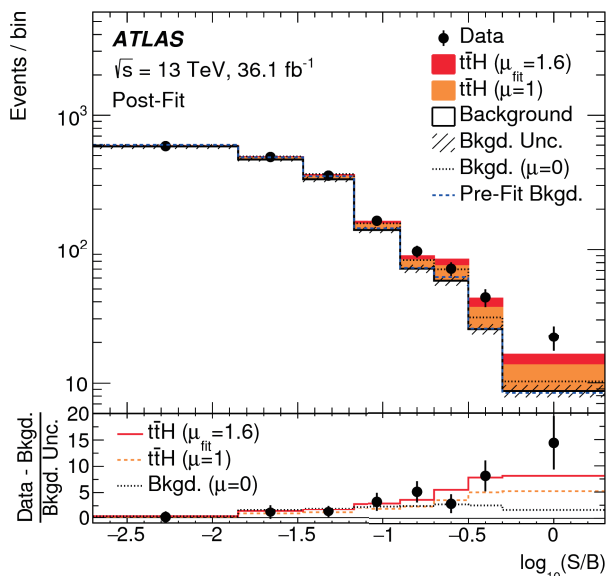


図4: $t\bar{t}H$ 探索のマルチレプトンチャンネルでのデータ事象数の分布と信号事象期待数 S および背景事象期待数 N 。

(3) $H \rightarrow \gamma\gamma$ チャンネルや (4) $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$ レプトンチャンネルは、信号と背景事象数比は非常に高いが予想される信号事象数は極めて小さい。よって、全チャンネルを統計的に統合した最終的な $t\bar{t}H$ 過程探索結果に用いた。なお、(4) は信号領域でのデータにおける観測事象数がゼロだった。

図5に各チャンネルで計算した μ 値のまとめを示す。上から (4) $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$ レプトンチャンネル, (3) $H \rightarrow \gamma\gamma$ チャンネル, (1) $H \rightarrow b\bar{b}$ チャンネル, (2) マルチレプトンチャンネルに対応している。全チャンネルを統計的に統合した μ 値は $1.2 \pm 0.2(\text{stat.})_{-0.2}^{+0.3}(\text{syst.})$, 観測された有意度は4.2シグマ (期待値は3.8シグマ) であった。ちなみに、CMSが今春に公表した結果 [9] は上振れがあり、観測された有意度は5.2シグマ (期待値は4.2シグマ) で、発見は先を越されてしまった。2017年までの全データセットを使うと、ATLAS単独で5シグマ以上の発見ができると期待されている。

2.3 ヒッグス粒子の稀崩壊の探索

$H \rightarrow \mu\mu$, $H \rightarrow c\bar{c}$, $H \rightarrow Z\gamma$ 過程などの稀崩壊の探索結果 [10, 11, 12] も公表された。本稿では詳細は述べないが、いずれも信号由来の統計的に有意な超過は得られなかった。たとえば、第2世代のフェルミオンとの結合に対応する $H \rightarrow \mu\mu$ 過程は、解析自体はシンプルであり近い将来統計量が増えれば発見できるはずで、質量

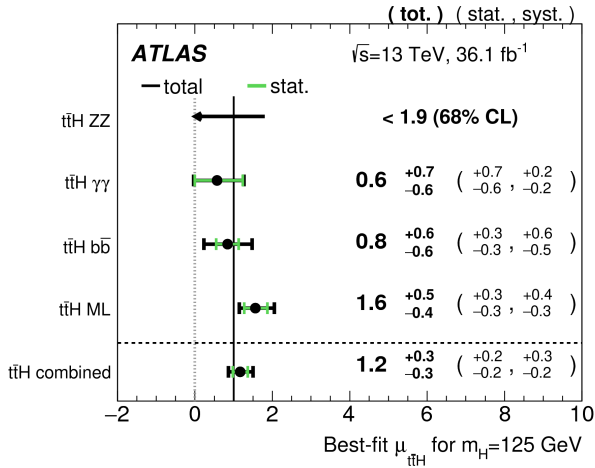


図 5: $t\bar{t}H$ 探索の各チャンネルでの μ 値。

に比例するという湯川結合の直接実証が可能となり今後ますます重要になってくる。

2.4 ヒッグス粒子の性質の精密測定

2012 年の発見に用いられた $H \rightarrow \gamma\gamma$ や $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4$ レプトン過程は、現在ではヒッグス粒子の性質の精密測定に用いられている。ここでは、 $H \rightarrow \gamma\gamma$ を用いた最新結果 [13] を紹介する。

質量を 125.09 GeV と仮定した場合の μ 値の測定結果が 0.99 ± 0.15 となり、中心値は 1 に近づいた。精度は Run-1 の結果と比較して 2 倍改善した。カロリメータのよりよい理解やデータ統計量の増加や深層学習を用いた解析手法の向上によって、各過程での μ 値の精度が向上したおかげである。さらに、ヒッグス粒子の様々な生成過程 (グルーオン融合、ベクターボソン融合、 WZ 随伴、トップクォーク対随伴) や崩壊過程や運動学的領域などの各カテゴリーに対応する断面積「simplified template cross sections (STXS)[14]」を測定した。 μ 値に焼き直したものが図 6 である。各チャンネルや実験間で結果を統合するのに便利である。図 7 は微分断面積の測定結果である。青赤黄色の各領域 (横線ダイヤ型星型の各中心値) で示されている最新の QCD 予測値と大体合っている。これらの結果は、今後期待されるほかの崩壊チャンネル ($H \rightarrow ZZ^*$, $H \rightarrow WW^*$, $H \rightarrow \tau\tau$) での測定結果とともに、グルーオン融合過程の pQCD や高度なモンテカルロシミュレーションの進展への重要なインプットとなる。

3 超対称性粒子の探索

標準理論を超える新しい素粒子現象の中でもっとも期待されている理論の一つが超対称性である。テラス

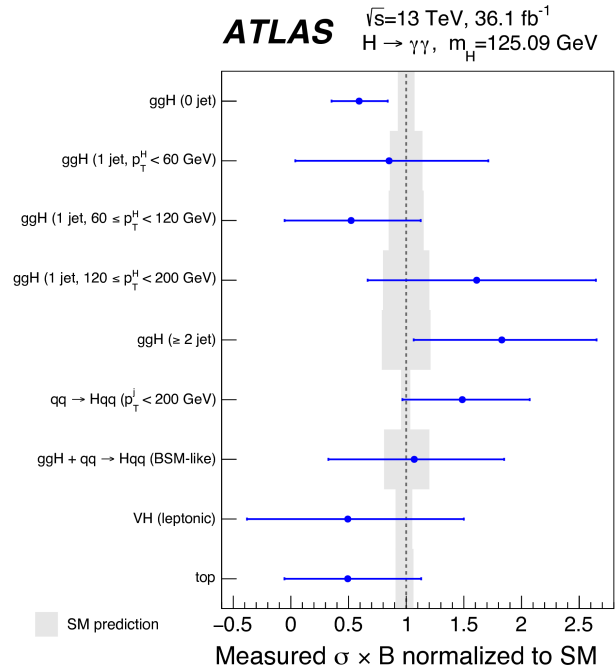


図 6: $H \rightarrow \gamma\gamma$ 過程の各生成過程に対応する断面積「simplified template cross sections (STXS)」を μ 値に焼き直したものの。

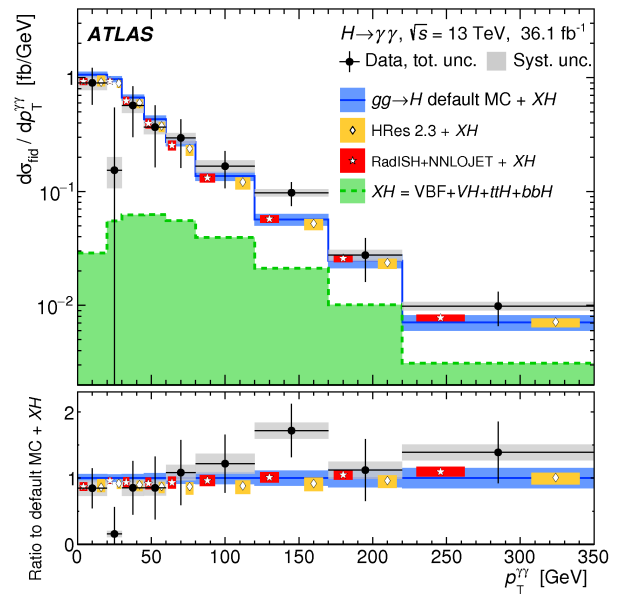


図 7: $H \rightarrow \gamma\gamma$ 過程でのヒッグス粒子の横運動量に対する微分断面積。

ケールに一連の超対称性粒子群が存在すると予想される。LHC 実験では超対称性粒子の探索が盛んに行われてきたが、未だ発見に至っていない。Run-2 では重心系エネルギー 13 TeV や高統計量の恩恵を受けて、重い質量領域での探索感度は大幅に向上した。たとえば、強い相互作用によって生成されるグルーオンに対するパートナー「グレイノ」で最大 2 TeV[15]、第 3 世代のトップクォークに対するパートナー「ストップ」で最大 1 TeV[16] まで棄却している。最近では、物理的重要性にもかかわらず、解析の困難さや生成断面積の小ささゆえにあまり行われてこなかった電弱相互作用で生成された超対称性粒子の探索も精力的に行われている。その例として、最近のヒッグシーノの探索結果 [17] を紹介する。

3.1 ヒッグシーノの探索

ヒッグス粒子の超対称性パートナーである「ヒッグシーノ」が軽いとすると、超対称性理論は標準理論ヒッグス粒子の「軽い」質量を問題なく説明できると期待されている。ヒッグシーノが一番軽い超対称性粒子 LSP の場合チャージノやニュートラリーノの質量が縮退しているシナリオが支持され、終状態に低運動量のオブジェクトが複数存在する。また、LHC Run-2 13 TeV データの統計量を活かせば、これらの軽いヒッグシーノやチャージノやニュートラリーノに対しても発見感度があると期待される。

本解析が探索する信号過程を図 8 に示す。チャージノ 1 とニュートラリーノ 2 が対生成し、それぞれ $W^*(\rightarrow qq)$ や $Z^*(\rightarrow \ell\ell)$ を伴ってニュートラリーノ 1 へと崩壊する。

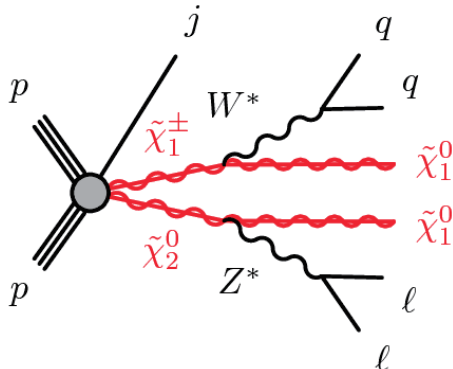


図 8: ソフトな 2 レプトンと消失エネルギー終状態を用いた本解析が探索する信号過程: チャージノ 1 とニュートラリーノ 2 の対生成。質量棄却域の設定では、3 種類の対生成 (チャージノ 1 とニュートラリーノ 2 対だけでなく、チャージノ 1 対やニュートラリーノ 1 とニュートラリーノ 2 対) を考慮した。

解析では、電荷が逆の電子またはミュオン対を選別した。ここではニュートラリーノ 2 とニュートラリーノ 1 間の質量差が小さい場合に注目しているので、電子およびミュオンのそれぞれ 4.5 GeV, 4 GeV という非常に低い運動量まで用いた。解析技術としては、初期制動放射 ISR 由来ジェットの大きな運動量 100 GeV 以上を要求し、反対にブーストした LSP 信号由来の大きな消失エネルギー 200 GeV 以上を要求した。レプトン対で組んだ不変質量は、その運動学的エンドポイントがニュートラリーノ 2 とニュートラリーノ 1 間の質量差に対応するので、最終識別量として用いた。図 9 に信号領域での分布を示す。実線のヒストグラムは全背景事象成分の和で、点線のヒストグラムが信号事象で期待される分布である。データ点において、信号由来の有意な超過は観測されなかった。

結果の解釈として、ヒッグシーノ LSP モデルにおけるチャージノ 1 質量とチャージノ 1 とニュートラリーノ 1 間の質量差への棄却域を図 10 に示す。水色の領域が本解析、黄色の領域が消失飛跡解析 [18] に対応する。本結果が、灰色の領域で示される LEP での探索結果を超えていることがわかる。今後、よりソフトなレプトンや小さい消失エネルギーを持つ事象も用いて、さらに縮退した質量領域に迫る。

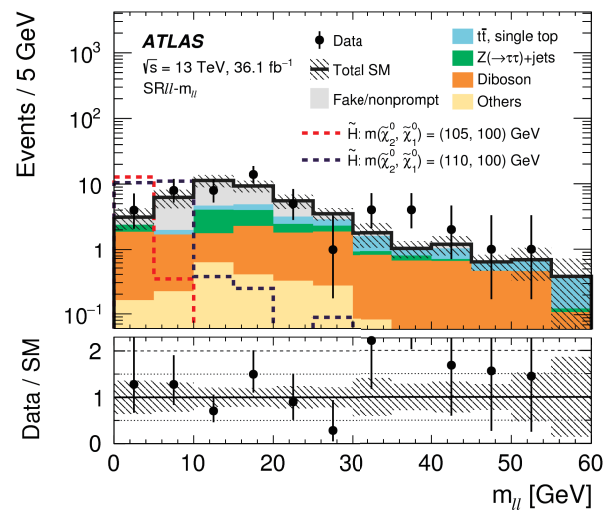


図 9: レプトン対で組んだ不変質量の分布。

4 最後に

2015-2017 年度に取得した 80 fb^{-1} データを用いた解析結果公表に関しては、データセットの増加や解析手法の改善により発見感度に大きな改善が見込める場合や以前の解析で新物理由来の超過の兆候があった場合に限定されている。今年度初夏に公開が予定されている 80 fb^{-1} データを用いた結果については、名古屋大学で 7 月 27

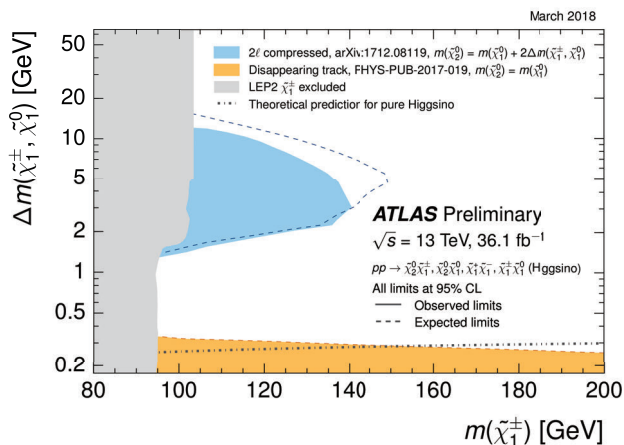


図 10: ヒッグシーノ LSP モデルにおけるチャージノー 1 質量とチャージノー 1 とニュートラリーノ 1 間の質量差への棄却域。

日(金)開催の新テラスケール研究会で詳細な報告と議論が予定されている。さらに、今年度の取得データも含めた Run-2 全データセット (150 fb⁻¹ を予定) を用いた物理解析は、「新粒子の探索」「ヒッグス粒子の性質測定」「標準理論過程の超精密測定」など物理ターゲットごとに戦略的に展開中である。2019 年春以降、数多くの物理結果を準備出来次第段階的に公表する予定である。また、高輝度 LHC における有望チャンネルにおける物理の展望をまとめたイエローレポートが LHC 各実験および理論メンバーによって作成中であり、今年末をめどに公表される予定である。われわれは、LHC ATLAS 実験さらに高輝度 LHC ATLAS 実験において、加速器の性能向上によるデータ量増加や検出器の性能向上による高品質高効率のデータ取得を達成し、そして最良の物理結果を出す。今後 1 年後 5 年後 10 年後以降もエネルギーフロンティアの方面から素粒子物理の発展に継続的に貢献していく所存である。

また、ATLAS 日本グループは ATLAS 実験における幅広い物理トピックを組織的に網羅しており学生スタッフ一丸となって数多くの物理成果に強く貢献している点と、アジア太平洋地域初の ATLAS コラボレーション会議が 6 月 11 日 - 15 日に早稲田大学にて開催予定 (参加者数は約 300 名) である点も明記して、本研究紹介を締める。

参考文献

- [1] 山中隆志, 高エネルギーニュース 「LHC ATLAS 実験 Run2 の物理結果」, **34-4**, 1 (2016).
- [2] 音野瑛俊, 齋藤智之, 高エネルギーニュース 「LHC ATLAS 実験の最新状況」, **36-1**, 1 (2017).

- [3] <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/AtlasPublic>
- [4] ATLAS Collaboration, “Evidence for the $H \rightarrow b\bar{b}$ decay with the ATLAS detector”, *JHEP* **12** 024 (2017).
- [5] 生出秀行, 田窪洋介, 高エネルギーニュース 「新 ATLAS ピクセル最内層 IBL の建設」, **33-2**, 61 (2014).
- [6] ATLAS Collaboration, “Optimisation of the ATLAS b-tagging performance for the 2016 LHC Run”, *ATL-PHYS-PUB* 2016-012 (2016).
- [7] ATLAS Collaboration, “Evidence for the associated production of the Higgs boson and a top quark pair with the ATLAS detector”, *Phys. Rev. D* **97**, 072003 (2018).
- [8] ATLAS Collaboration, “Search for the standard model Higgs boson produced in association with top quarks and decaying into a $b\bar{b}$ pair in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector”, *Phys. Rev. D* **97**, 072016 (2018).
- [9] CMS Collaboration, “Observation of $t\bar{t}H$ production”, arXiv:1804.02610 (2018), accepted by *Phys. Rev. Lett.*
- [10] ATLAS Collaboration, “Search for the Dimuon Decay of the Higgs Boson in pp Collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS Detector”, *Phys. Rev. Lett.* **119**, 051802 (2018).
- [11] ATLAS Collaboration, “Search for the Decay of the Higgs Boson to Charm Quarks with the ATLAS Experiment”, *Phys. Rev. Lett.* **120**, 211802 (2018).
- [12] ATLAS Collaboration, “Searches for the $Z\gamma$ decay mode of the Higgs boson and for new high-mass resonances in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector”, *JHEP* **10** 112 (2017).
- [13] ATLAS Collaboration, “Measurements of Higgs boson properties in the diphoton decay channel with 36 fb⁻¹ of pp collision data at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector”, arXiv: 1802.04146 (2018).
- [14] LHC Higgs Cross Section Working Group (D. de Florian *et al.*), “Handbook of LHC Higgs Cross Sections: 4. Deciphering the Nature of the Higgs Sector”, arXiv: 1610.07922 (2016).

- [15] ATLAS Collaboration, “ Search for squarks and gluinos in final states with jets and missing transverse momentum using 36 fb^{-1} of $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$ pp collision data with the ATLAS detector ”, arXiv:1712.02332 (2017), accepted by Phys. Rev. D.
- [16] ATLAS Collaboration, “ Search for top-squark pair production in final states with one lepton, jets, and missing transverse momentum using 36 fb^{-1} of $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$ pp collision data with the ATLAS detector ”, arXiv:1711.11520 (2017).
- [17] ATLAS Collaboration, “ Search for electroweak production of supersymmetric states in scenarios with compressed mass spectra at $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$ with the ATLAS detector ”, Phys. Rev. D **97**, 052010 (2018).
- [18] ATLAS Collaboration, “ Search for direct pair production of higgsinos by reinterpretation of the disappearing track analysis with 36.1 fb^{-1} of $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$ data collected with the ATLAS experiment ”, ATL-PHYS-PUB-2017-019 (2018).