

■ 研究紹介

LHC ATLAS Run 2 実験のヒッグス最新結果

東京大学 素粒子物理国際研究センター

増 渕 達 也

tatsuya.masubuchi@cern.ch

名古屋大学 大学院理学研究科

堀 井 泰 之

yhorii@hepl.phys.nagoya-u.ac.jp

2021 年 (令和 3 年) 5 月 6 日

1 はじめに

2012 年にヒッグス粒子が発見されて以来, LHC ATLAS 実験はデータを着実に蓄積している。図 1 で示されているように, 重心系エネルギー 13 TeV で 2015 年から始まった Run 2 実験は, 2018 年に終了するまでに約 147 fb^{-1} のデータを取得した。Run 2 の最大瞬間ルミノシティは $2.1 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ と設計値の 2 倍に到達したことで, 検出器の運転には様々な困難があったが, 物理解析には約 139 fb^{-1} のデータが使用でき, なんと 95% の高効率ですべての主要な検出器が安定動作していた。ルミノシティレベリング¹を用いた安定運転時の平均パイルアップ事象数は最大で 60 を超えたが, 高パイルアップ環境でもトリガーや物理オブジェクト再構成の性能を維持する工夫をいくつも導入し, 物理感度への影響を抑えた。

Run 2 の高統計データを用いて, ヒッグス粒子の性質の精密測定が進んでおり, 特にヒッグス粒子とフェルミオンの相互作用 (湯川結合) や微分断面積の精密測定で, 多くの重要なマイルストーンがあった。本稿では, 以前の高エネルギーニュースで報告された結果 [2] 以降の重要な結果をいくつか紹介する。Run 2 の間に非常に沢山のヒッグス測定・探索の結果が出ているが, すべては紹介しきれないので興味ある方は [3] を見てもらいたい。

2 ヒッグス粒子の生成過程と崩壊

標準模型では, ヒッグス場の対称性が自発的に破れることで, ゲージボソン, フェルミオンが質量を獲得する。LHC では, 複数のヒッグス粒子の生成過程, 崩壊を観測することで, その描像を検証できる。

LHC におけるヒッグス粒子の主な生成過程として, グルーオン融合過程 (ggF), ベクターボソン

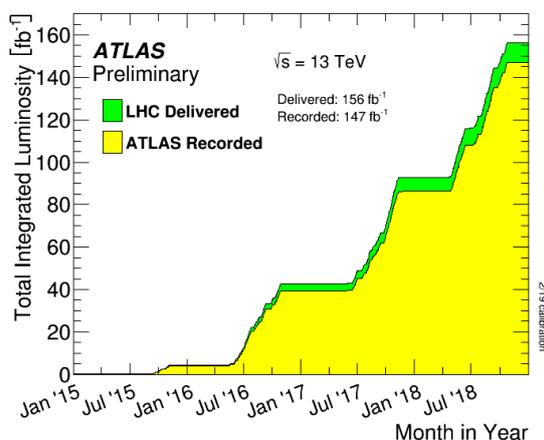


図 1: ATLAS Run 2 実験における積分ルミノシティ。

融合過程 (VBF), ベクターボソンを伴う生成過程 (VH ; WH/ZH), トップクォーク対を伴う生成過程 ($t\bar{t}H$) が挙げられる。それらのファインマン図を, 図 2 に示す。

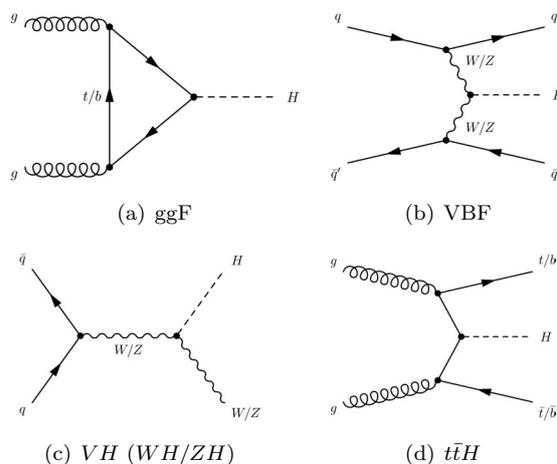


図 2: ヒッグス粒子の生成過程のファインマン図。

標準模型における生成断面積を図 3 に示す。最も断面積が大きいのは ggF 過程であり, ヒッグス粒子はこの過程を用いて発見された。ggF 過程はループを含むた

¹LHC ではルミノシティの増加で検出器のデータ収集に負荷がかかりすぎないように, 衝突時に 2 つの陽子ビームの軸をずらしながら, ルミノシティをコントロールする [1]。

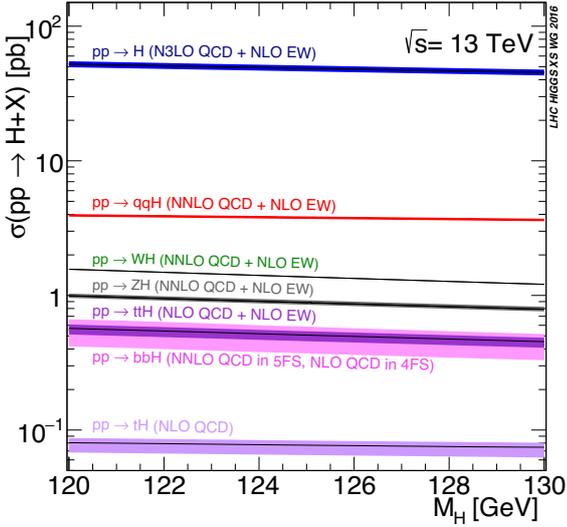


図 3: 標準模型におけるヒッグス粒子生成過程の断面積 [4]。重心系エネルギー 13 TeV の陽子・陽子衝突に対する値を、ヒッグス粒子質量 120–130 GeV の範囲で示す。

め、ヒッグス粒子と他の粒子の結合測定には理論的仮定が入ってしまうが、新粒子がループに寄与する場合に新物理に感度がある可能性がある。VBF 過程, WH/ZH 過程は、ヒッグス粒子と W ボソン, Z ボソンの結合を含む。 $t\bar{t}H$ 過程は、断面積が相対的に小さいが、ヒッグス粒子とトップクォークの結合をツリーレベルで直接観測できる。

標準模型におけるヒッグス粒子の崩壊分岐比を、図 4 に示す。ヒッグス粒子とフェルミオンの結合は、質量が大きなフェルミオンほど大きいですが、トップクォークは重すぎてヒッグス粒子の崩壊では生成されず、 $H \rightarrow b\bar{b}$ 崩壊が最も高い分岐比を持つ。次に崩壊分岐比が大きいのは、 $H \rightarrow WW$ 崩壊であり、片方の W ボソンは仮想粒子として生成される。これらおよび $H \rightarrow \tau\tau$ 崩壊, $H \rightarrow c\bar{c}$ 崩壊, $H \rightarrow ZZ$ 崩壊, $H \rightarrow \mu\mu$ 崩壊などは、それぞれツリーレベルの崩壊であり、崩壊で生成される粒子とヒッグス粒子の結合の抽出に利用できる。一方、 $H \rightarrow gg$ 崩壊, $H \rightarrow \gamma\gamma$ 崩壊, $H \rightarrow Z\gamma$ 崩壊は、ループを介する崩壊である。

3 湯川結合の測定

標準模型において、ヒッグス粒子とフェルミオンの湯川結合の大きさは、フェルミオンの質量に比例する。湯川結合の大きさを測定することで、フェルミオンの質量獲得の描像を検証できる。Run 1 のデータを用いた解析で、タウ粒子の湯川結合は 5σ を超える有意度で発見できた [5]。Run 2 では、他のフェルミオンの湯川結合の発見が切望されてきた。

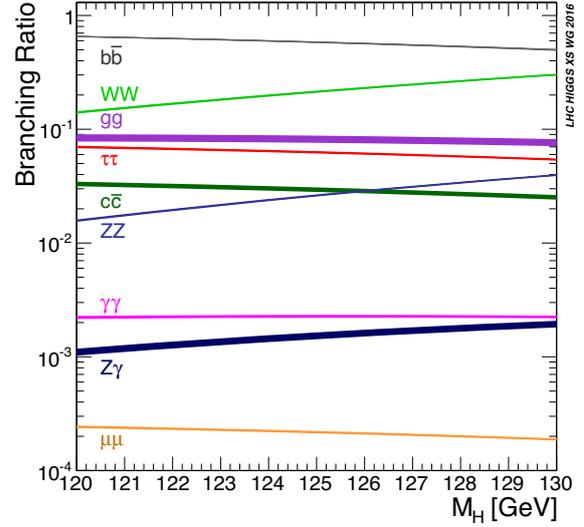


図 4: 標準模型におけるヒッグス粒子の崩壊分岐比 [4]。ヒッグス粒子質量 120–130 GeV の範囲で示す。

3.1 トップクォーク湯川結合の観測

ヒッグス粒子とトップクォークの湯川結合を直接測定するためには、 $t\bar{t}H$ 生成過程を利用する。トップクォークは質量が大きくヒッグス粒子の崩壊では生成されないため、他のフェルミオンの湯川結合の検証とは異なり、ヒッグス粒子の生成過程を用いる必要がある。

$t\bar{t}H$ 生成過程においては、トップクォークの崩壊で生じるレプトンを捉えられるため、多くの研究者が、分岐比が大きな $H \rightarrow b\bar{b}$ 崩壊を用いる解析に期待を込めていた。しかし、 $t\bar{t}$ に付随して b クォークが生成される過程の理論的な不定性が大きく、 $H \rightarrow \gamma\gamma$ 崩壊, $H \rightarrow WW$ 崩壊, $H \rightarrow \tau\tau$ 崩壊に主眼を置いた解析がより高い探索感度を提供した。 $H \rightarrow \gamma\gamma$ 崩壊の解析においては、終状態の粒子の 4 元運動量を機械学習の入力変数にするなどの解析手法の改良により、 36 fb^{-1} のデータを用いた解析から、 80 fb^{-1} を用いた解析までの間に、手法のみで 50% の感度向上を実現した。この改良により、 $H \rightarrow \gamma\gamma$ 崩壊を用いる解析が $t\bar{t}H$ 生成探索の主役に躍り出た。

Run 2 で取得した 80 fb^{-1} のデータを用いた複数の解析を統合することで、有意度 5.8σ が得られ、 $t\bar{t}H$ 生成過程の信号の発見に成功した [6]。図 5 は、 $t\bar{t}H$ 生成過程の探索における $\log_{10}(S/B)$ 分布を示す。 S と B は異なる崩壊に対する解析で使用された最終分離変数の各ビンでの信号数と背景事象数を示し、 $\log_{10}(S/B)$ で事象を並べ替えることで様々な崩壊に対する解析結果を一つのプロットで統合して信号の超過を見ることができる。生成断面積と崩壊分岐比の積の標準模型の値に対する比 (信号強度 μ) は $\mu = 1.32 \pm 0.18 \text{ (stat.)}_{-0.19}^{+0.21} \text{ (syst.)}$ と得られた (図 6)。Run 2 で取得したすべてのデータを用いた解析も進んでおり (図 7) [7, 8, 9]、すべての結果が、

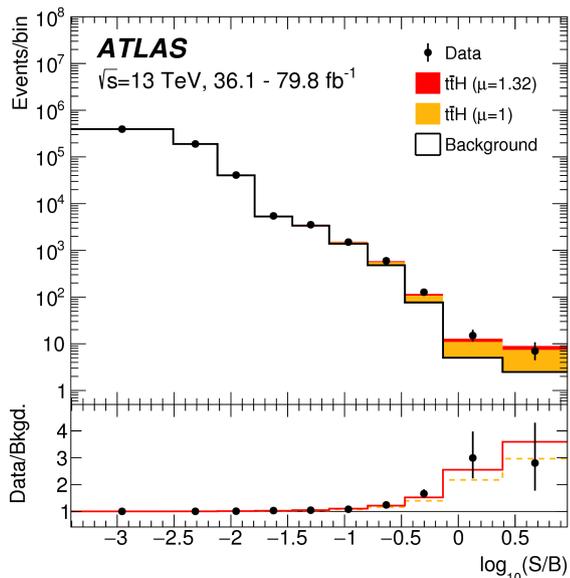


図 5: $t\bar{t}H$ 生成過程の探索における $\log_{10}(S/B)$ 分布。下のパネルはデータと背景事象の比を示している。実線（点線）は、ヒッグス粒子の信号を $\mu = 1.32$ (1.0) に規格化したときに予想される分布である。

標準模型におけるトップクォークの質量獲得の描像を支持している。

3.2 ボトムクォーク湯川結合の観測

おそらく LHC で観測できるヒッグス粒子とダウンタイプクォークの相互作用は、ボトムクォークとの相互作用だけであり、その直接測定は標準模型の検証の上で非常に重要である。また、最大の崩壊分岐比を持つためヒッグスボソンの崩壊幅に制限を与えることができる。前回の紹介では、Run 2 において 2016 年までに取得したデータ約 36 fb^{-1} を用いて得た 3.5σ の兆候を報告 [2] したが、解析の難しさから観測が困難で崩壊分岐比が最大にも関わらず“発見”には至らなかった。すでに系統誤差が支配的になりつつあり、発見に向けてはデータを増やすだけでなく系統誤差の削減も必要であった。

観測される信号はヒッグス粒子から崩壊した二つの b ジェットのため、生成断面積が大きい ggF や VBF 生成過程では強い相互作用由来の背景事象 ($pp \rightarrow b\bar{b}$) が多く、感度を出すのが難しい。そのため、 WH/ZH 生成過程で探索を行うのが王道である。この生成過程では、ベクターボソンのレプトニック崩壊を使うことで、レプトンや消失横運動量トリガーで信号を効率よく取得し、背景事象を大きく削減することが可能である。 WH/ZH 生成過程の終状態のレプトンの数によって解析を 0/1/2 レプトンのカテゴリーに分けて事象選択を最適化し、二つの b タグされたジェットを要求する。背景事象を減らす

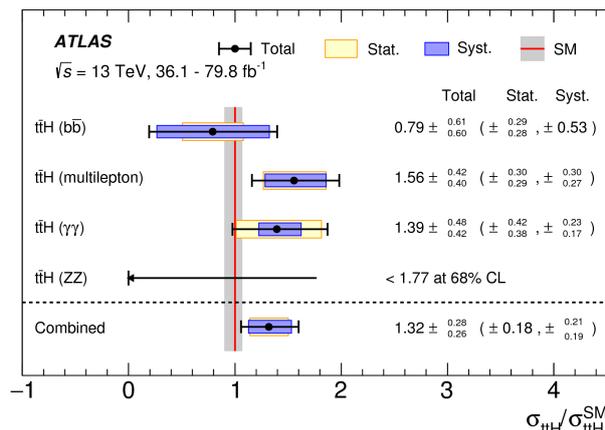


図 6: $t\bar{t}H$ 生成過程の探索における信号強度 ($\mu = \sigma_{ttH}/\sigma_{ttH}^{\text{SM}}$) の測定結果。ヒッグス粒子の崩壊ごとの結果および統合結果を示す。

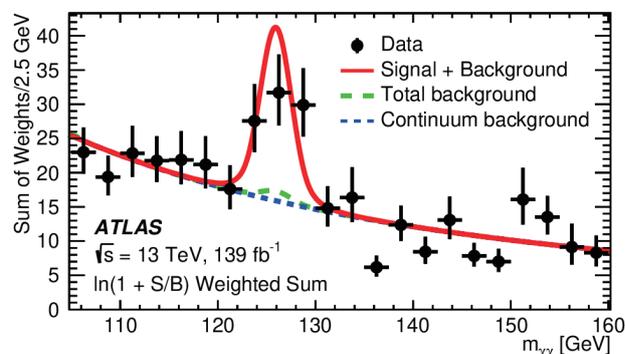


図 7: $t\bar{t}H$, $H \rightarrow \gamma\gamma$ の探索における $\gamma\gamma$ 不変質量のフィット結果。データ（エラーバー付きドット）、フィット結果（実線）を示す。

ためにベクターボソンの横運動量が高い事象を選択し、 $b\bar{b}$ 不変質量分布など信号の特徴量を機械学習に入れることで、更に背景事象の分離能力を改善する。

2017 年までの約 80 fb^{-1} のデータを用いた解析で、 $VH, H \rightarrow b\bar{b}$ の有意度は 4.9σ （標準模型を仮定したときの期待値 5.1σ ）に到達した（図 8）。また、ヒッグス粒子が $b\bar{b}$ 崩壊する他の生成過程の結果も統合すると感度は 5.4σ に到達し、ヒッグス粒子とボトムクォークが結合する新しい相互作用を初めて観測することに成功した。また、観測した信号強度は標準模型と良い一致をしていた [10]。図 9 は $b\bar{b}$ 不変質量分布を示しており、機械学習を用いないシンプルな解析でも、 125 GeV と無矛盾なヒッグス粒子の信号を観測できた。

$H \rightarrow b\bar{b}$ 崩壊事象を 5.4σ で初観測という結果を ICHEP2018 で発表した。そこに至るまでに、実際の現場ではライバル実験である CMS との発見をめぐる様々なやり取り（混乱?）があった。内部情報も少し含まれるが、現場にいた人間の立場から、少しだけ触れさ

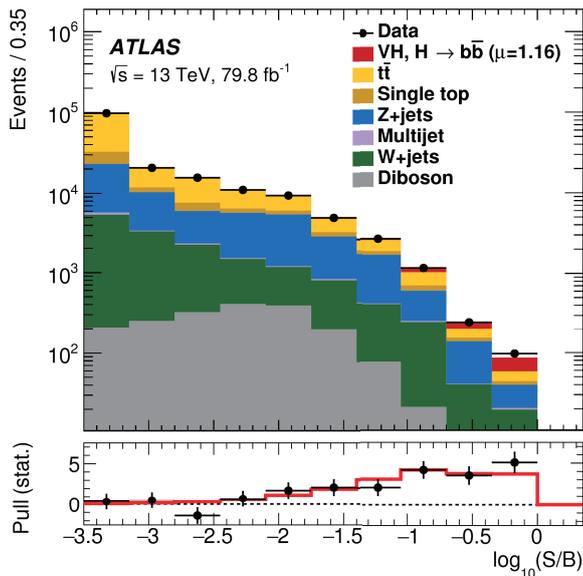


図 8: $VH, H \rightarrow b\bar{b}$ 生成崩壊過程の探索における $\log_{10}(S/B)$ 分布。下のパネルにはデータと予想される背景事象の差から計算される有意度が示されている。実線は、ヒッグス粒子の信号を $\mu = 1.16$ に規格化した分布である。

せていただきたい。

当初、解析チームは 36 fb^{-1} の結果から 80 fb^{-1} で得られる感度を予想し、データを増やすだけでは 5σ に到達しないと見込んでいた。系統誤差を減らすべく様々な解析の改善に取り組んでおり、 5σ を目指して 2018 年秋の国際会議をターゲットにしていた。6 月中旬に日本で開催された ATLAS Overview Week で、現状の予想感度は 5σ に少し届かないが、いくつかの感度改善手法を導入中であり、発見に向けて順調に解析が進んでいると報告した。しかし、その直後 CMS が ICHEP2018 で発見の報告をする可能性があるという噂が舞い込んできた。 $t\bar{t}H$ 生成過程の発見で CMS に先を越されている ATLAS 首脳部は 2 連敗は避けたいと、解析チームに結果を急ぐように打診してきた。しかし、すでに 6 月も下旬に差し掛かっている。7 月 4 日から始まる ICHEP2018 に向けて、ATLAS 内部の承認などの時間も含めるとほぼ不可能な要求であった。そのため ATLAS スポークスパーソンである Karl Jacob は、7 月下旬に共同セミナーで発表するという提案をしたが、CMS はその提案に乗らなかった。その姿勢から CMS は ICHEP2018 に向けて準備が進んでいる可能性があり、ATLAS も準備をせざるを得ない状況になった。時間的に全ての感度改善手法を入れることは不可能だが、 5σ に届かないリスクを取りつつも、出来る限りの改善は導入し ICHEP2018 に向けて暫定結果をまとめる方向に決まった。この時点で ICHEP2018 まで 2 週間を切っていた。その間にもほぼ毎日スポーク

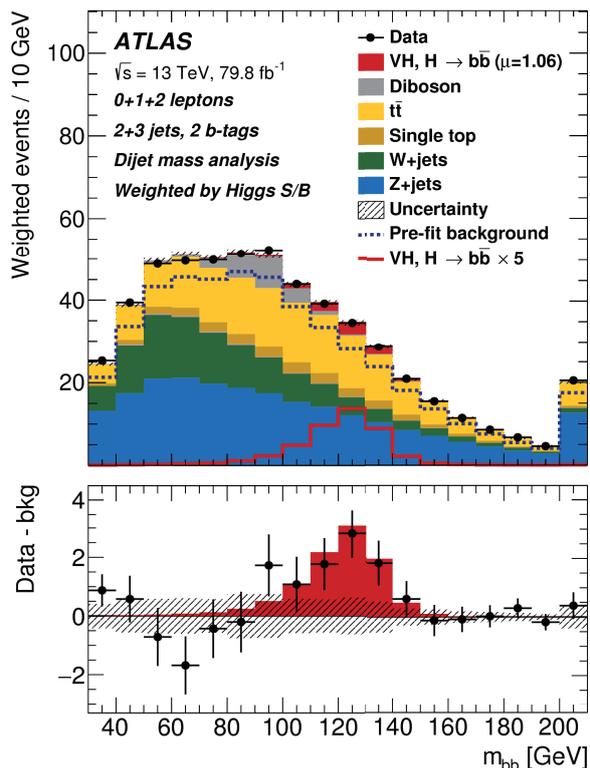


図 9: bb 不変質量分布。下のパネルにはデータから背景事象を差し引いた分布と予想されるヒッグス粒子の信号事象の分布が示されている。

スパーソン、物理グループのコーディネータから決まって 18:00 に招集がかかり、CMS の状況や ATLAS 内での承認の進め方などを議論した。CMS の噂も毎日に二転三転するなか、データをアンブラインドできたのは 7 月 1 日だった。この時点で ICHEP2018 のパラレルセッションには間に合わず、7 月 9 日のプレナリーセッションで結果を初公表することになり、会議中に結果がアップデートされるというドタバタ劇だった。CMS はというと、結局 ICHEP2018 には間に合わなかった。その後、ATLAS/CMS で 8 月 28 日に共同セミナーをして論文を同日に投稿するという方針で合意が得られ、プレスリリースや論文の準備を進めた。投稿した論文は約 1 週間でアクセプトされるというおまけ付きで、 $H \rightarrow b\bar{b}$ 崩壊の初観測の混乱は収束した。

$H \rightarrow b\bar{b}$ 崩壊の発見後、Run 2 全データを用いて統計誤差を減らしつつ、背景事象の系統誤差の削減手法の改良や機械学習への新しい変数の導入により、精度の向上を目指した [11]。観測した信号強度は、 $\mu_{VH}^{bb} = 1.02^{+0.18}_{-0.17}$ と約 17% の精度で標準模型と一致していることを確認した (図 10)。また、観測された有意度は 6.7σ に向上し、 WH, ZH の生成過程に分けた場合も、それぞれ $4.0\sigma, 5.3\sigma$ と有意な信号を Run 2 で観測することに成功した。 $VH, H \rightarrow b\bar{b}$ 信号が有意に観測されたことで、探索から

精密測定の時代表へに入った。あとの章で、微分断面積測定の結果も紹介する。

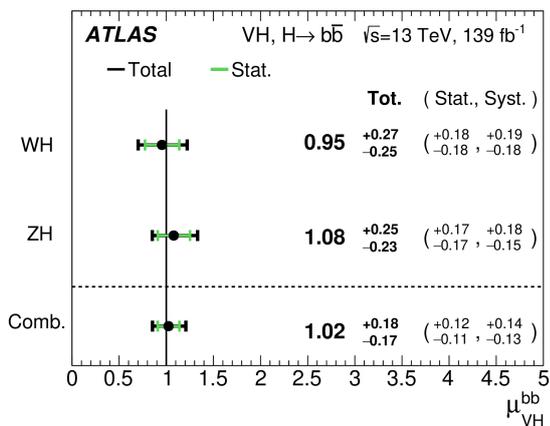


図 10: 観測された信号強度。WH, ZH 信号を 2 パラメータでフィットした結果と, VH(WH + ZH) の 1 パラメータでフィットした結果を示す。

3.3 ミューオン湯川結合の兆候

ATLAS 実験において、最も高い感度でヒッグス粒子との結合を検証できる第二世代フェルミオンは、ミューオンである。第二世代フェルミオンのうち、最も質量が大きくヒッグス粒子との結合が強いと考えられるのはチャームクォークであるが、陽子・陽子衝突を用いる ATLAS 実験では、強い相互作用に由来する膨大な背景事象の影響で、 $H \rightarrow c\bar{c}$ 崩壊の発見は極めて難しい。ミューオンは、質量が小さくヒッグス粒子との結合は相応に弱いと考えられるが、 $H \rightarrow \mu\mu$ 崩壊の探索においては強い相互作用に由来する背景事象は無視できる。

$H \rightarrow \mu\mu$ 崩壊の探索における最大の障壁は、同じ終状態を持つ $Z \rightarrow \mu\mu$ 崩壊である。ヒッグス粒子と Z ボソンの質量には 34 GeV ほどの違いがあり、Z ボソンの自然幅は 2.5 GeV と相対的に小さいが、それらを凌駕する $Z \rightarrow \mu\mu$ 崩壊が発生する。標準模型における $H \rightarrow \mu\mu$ 崩壊の分岐比は 2×10^{-4} と小さいが、Run 2 で取得したデータの中で、1500 事象ほど生成されたと考えられる。終状態が実験的にクリーンで、これだけの信号が生成されていれば観測できそうな気がするが、 $Z \rightarrow \mu\mu$ 崩壊が観測を難しくしているのである。

Run 2 においては、あらゆる解析手法の改良を積み重ねることで、 $Z \rightarrow \mu\mu$ 崩壊との分離を向上させてきた。特に、Run 2 の一部のデータ (36 fb^{-1}) を用いた解析を終えた頃から、解析チームを大幅に強化し、Run 2 のすべてのデータ (139 fb^{-1}) を用いた解析までの間に、解析手法だけで 25% の感度向上を実現した。改良の一例は、終状態で放出される光子のエネルギーを加味することで

$\mu\mu$ 不変質量の分解能を向上させることである (図 11)。低エネルギーの光子をパイルアップに由来する光子と分離する手法の構築が不可欠であった。

ATLAS 実験では、Run 2 のすべてのデータを用いて、有意度 2.0σ 、信号強度 $\mu = 1.2 \pm 0.6$ を得た (図 12) [12]。CMS 実験では、有意度 3.0σ 、信号強度 $\mu = 1.19^{+0.40}_{-0.39}$ (stat.) $^{+0.15}_{-0.14}$ (syst.) を得た (図 13) [13]。ATLAS 実験と CMS 実験の感度の違いは、ソレノイド磁場の違い (2.0 T と 3.8 T) によるミューオンの運動量分解能の違いで説明できる。Run 2 開始当初、 $H \rightarrow \mu\mu$ 崩壊の兆候を得られることは予想していなかったが、解析手法の改良を積み重ね、ここまで到達できたことは、感慨深い。Run 3 において、ATLAS 実験と CMS 実験の結果の統合により、 5σ を超える感度を実現できる可能性があり、信号の発見が目前に迫っている。

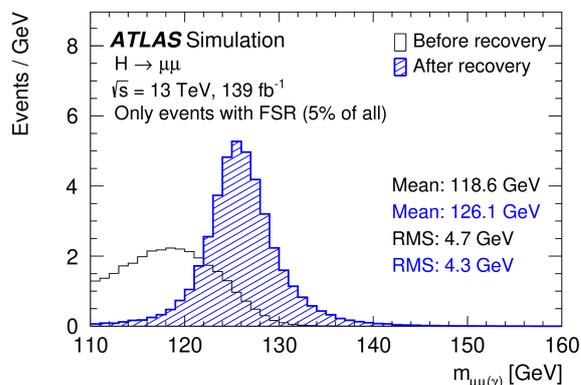


図 11: $H \rightarrow \mu\mu$ 崩壊のシミュレーションにおける $\mu\mu$ 不変質量の分布。終状態の光子を検出できる事象 (全体の 5% ほど) に対して、終状態の光子を用いた補正前 (白抜き)、補正後 (斜線) の分布を示す。

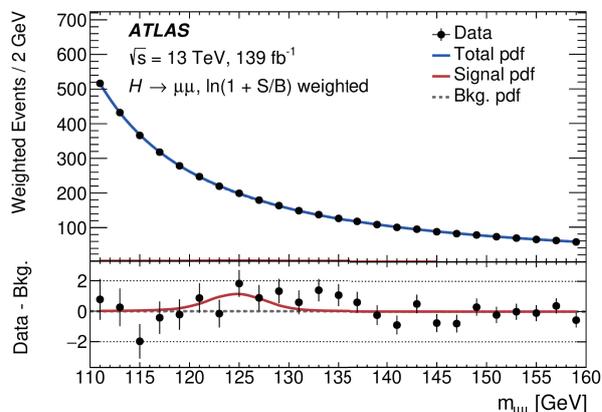


図 12: ATLAS 実験の $H \rightarrow \mu\mu$ 崩壊の探索における $\mu\mu$ 不変質量のフィット結果。データ (エラーバー付きドット)、全成分の和 (実線)、背景事象成分 (点線) を示す。

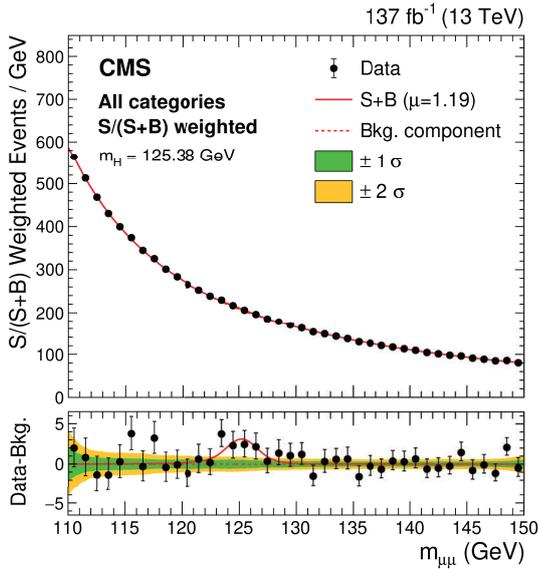


図 13: CMS 実験の $H \rightarrow \mu\mu$ 崩壊の探索における $\mu\mu$ 不変質量のフィット結果。データ (エラーバー付きドット), 全成分の和 (実線), 背景事象成分 (点線) を示す。

4 ヒッグス粒子の性質の精密測定

125 GeV のヒッグス粒子は、性質の精密測定の観点では非常に良い質量を持っており、様々な生成過程と崩壊で信号が観測可能である。主要な生成過程 (ggF, VBF, WH , ZH , ttH) と崩壊 ($\gamma\gamma$, ZZ^* , WW^* , $\tau\tau$, $b\bar{b}$, $\mu\mu$) の組み合わせにより性質を詳細に調べている。ヒッグス粒子の性質を精密に調べるためにはそれぞれの解析の感度を最大化するとともに、様々なチャンネルを統計的に統合することが重要である。

Run 2 全データを使った解析がほぼ出揃いつつあり、現在利用できる結果を統合し信号強度の測定を行った。信号強度は $\mu = 1.06 \pm 0.04(\text{stat.}) \pm 0.03(\text{exp.})^{+0.05}_{-0.04}(\text{sig. th.}) \pm 0.02(\text{bkg. th.})$ と、約 7% の精度で標準模型と良い一致を得ている [14]。図 14 は、測定可能な生成過程と崩壊の組み合わせで、16 パラメータを同時フィットして得た生成断面積と崩壊分岐比の積を標準模型に規格化した測定結果である。現在の測定精度で、よく標準模型を記述していることが確認された。

4.1 ヒッグス粒子と標準模型粒子の結合

ヒッグス粒子とクォーク・レプトン、ゲージボソンの結合定数を標準模型の予想値で規格化したパラメータ κ で表すことにより、様々な生成・崩壊過程に関する相互作用を統一的に扱うことが出来る。図 15 は t , Z , W , b , τ , μ とヒッグス粒子の結合パラメータを $\kappa_{i=t,Z,W,b,\tau,\mu}$ として測定し、結合強度に換算したものをそれぞれの素粒子の質量の関数として表している [14]。この測定で

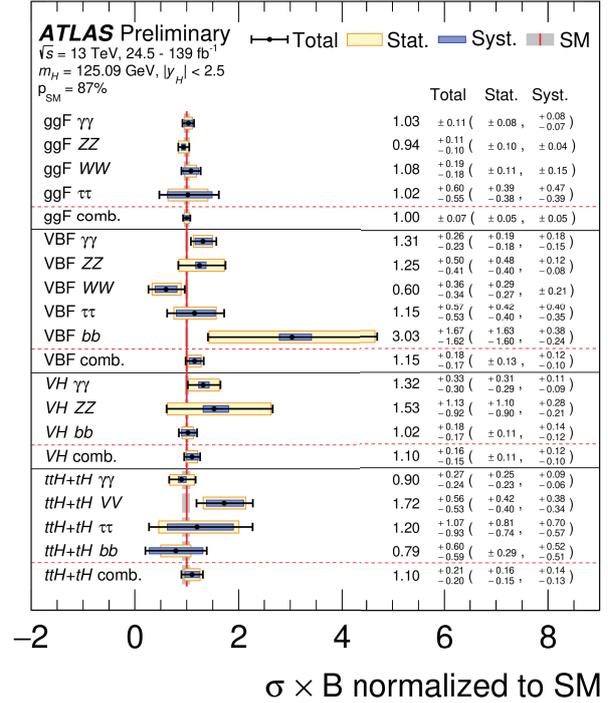


図 14: それぞれの生成過程・崩壊に対して測定された断面積と崩壊分岐比の積を標準模型の予想値で規格化した値。

は、標準模型の粒子のみの存在を仮定し、ggF 生成過程や $H \rightarrow \gamma\gamma$ 崩壊で現れるループの寄与は κ_i の結合として扱っている。 κ_Z , κ_W , κ_t は、10%以下の精度、 κ_b , κ_τ は 15%程度、 κ_μ でも 30%程度の精度で標準模型とよく一致している。トップクォークとミューオンで 3桁も違う結合の強さを湯川結合で表現できるというのは、標準模型の成功を意味しているが、ある意味驚きでもある。

ヒッグス粒子は標準模型で唯一世代間で結合の強さが違う特殊な素粒子であり、この差が素粒子の質量の違い・世代を創っているということも明らかにしたことは、Run 2 のヒッグス物理における大きな成果と言える。

4.2 ヒッグス粒子の微断面積測定

Run 2 の高統計データで、微断面積測定などヒッグス粒子の運動学的性質から新物理を探索する測定が可能になってきている。特に終状態がクリーンな $\gamma\gamma$ や ZZ 崩壊でヒッグス粒子の生成過程 ($pp \rightarrow H + X$) の微断面積が測定されている [15]。図 16 は、ヒッグス粒子の横運動量の微断面積測定結果を示している。ggF が主要な生成過程であり、ループに新粒子が寄与する場合や湯川結合が標準模型からずれる場合、微断面積測定は新物理に高い感度がある。有意なズレは観測されていないが、高運動量領域 ($p_T^H > 200$ GeV) での断面積測定

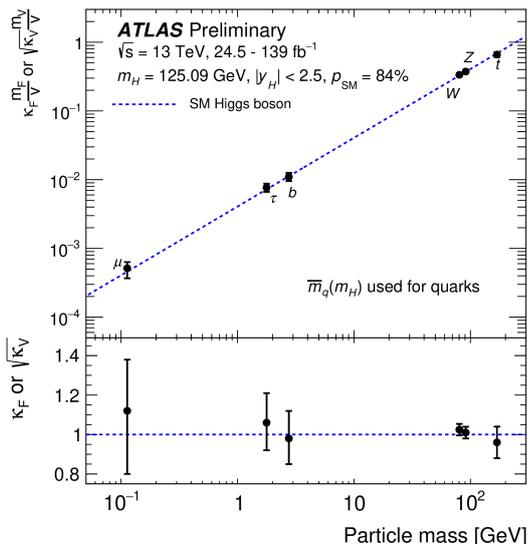


図 15: 結合の強さ（フェルミオンに対しては $\kappa_F m_F/v$ 、ボソンに対しては $\sqrt{\kappa_V} m_V/v$ ）を素粒子の質量の関数として表したものである。点線は標準模型の予想直線を示している。

においても、誤差 15% 程度の精度まで到達している。

また、Simplified Template Cross Section (STXS) [16] として新物理に感度が高い領域を定義し、各領域で断面積を精密測定することで、新物理の兆候を観測しようと試みている。STXS の各領域は、理論的な不定性を抑えつつ、新物理に感度が高いヒッグス粒子の生成過程の運動学的情報で定義されており崩壊には依らない。様々な崩壊を用いて統一的な測定が可能であり、実験的な感度を損ねることなく測定精度を高めることが出来る。図 17 は、 $\gamma\gamma$, ZZ , $b\bar{b}$ 崩壊を用いて測定した STXS カテゴリーの信号強度を表している [17]。有意な標準模型からのズレは観測されていないが、統計誤差が支配的であり、データ量を増やし、他の生成過程や崩壊を解析することで新物理への感度向上が期待できる。また、STXS の測定を基に有効場理論のパラメータ（Wilson 係数）に実験的な制限も与えている。[17] にまとめられているので興味がある読者はそちらを参考にいただきたい。

さらに新物理に感度が高い領域の測定にも取り組んでおり、一つだけ紹介する。より高い横運動量を持つヒッグス粒子の性質を測定するために、崩壊分岐比が高い $H \rightarrow b\bar{b}$ 崩壊事象が重要になる。ヒッグス粒子の質量に対して横運動量が高い場合、ヒッグス粒子の崩壊で生成される b ジェットは近接するため、二つの b ジェットを選択する従来の方法では測定が困難になる。そのため、大半径ジェット ($R = 1.0$) の中に二つの b タグされたサブジェットがいるトポロジーを選ぶことで、背景事象を抑えつつ高運動量ヒッグス粒子の測定が可能である。

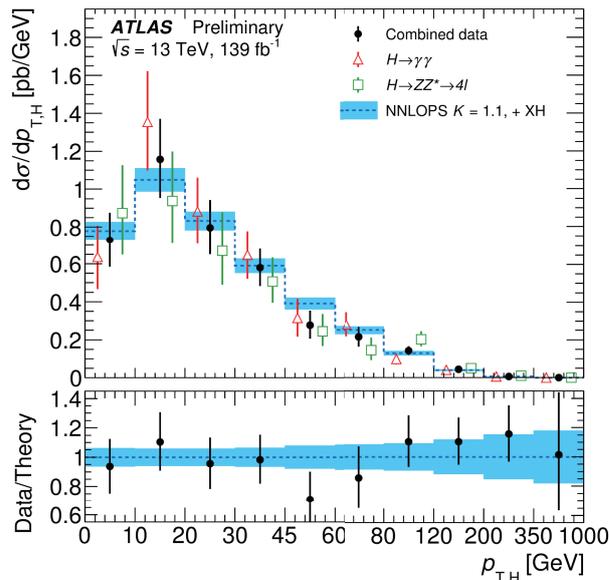


図 16: ヒッグス粒子の横運動量の微分断面積。ヒストグラムは NNLO ggF の予想値を N³LO の予想値にスケールしたものに他のヒッグス粒子生成過程を足し合わせたもの。

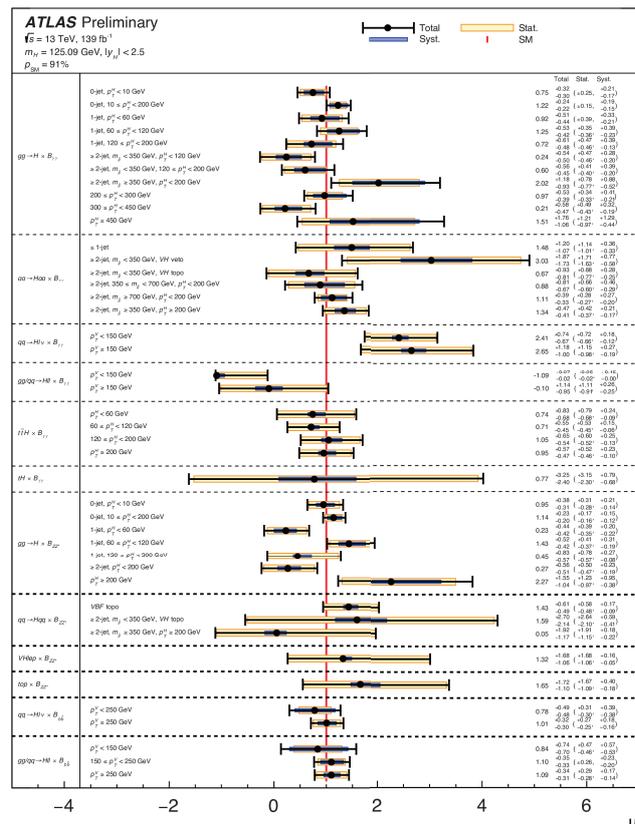


図 17: $H \rightarrow \gamma\gamma$, $H \rightarrow ZZ$, $H \rightarrow b\bar{b}$ 崩壊を用いた解析における、ヒッグス粒子生成過程ごとの STXS カテゴリーで測定された信号強度。標準模型を仮定した際の検定に対する一致度は 91%。

図 18 は、 $p_T^H > 1$ TeV における大半径ジェットの質量分布である。横運動量が 1 TeV 以上の領域で測定された断面積は、 $3.4 \pm 3.9(\text{stat.}) \pm 1.0(\text{syst.}) \pm 0.8(\text{theory})$ fb で誤差はまだ大きいですが、信号の統計誤差が支配的である [18]。

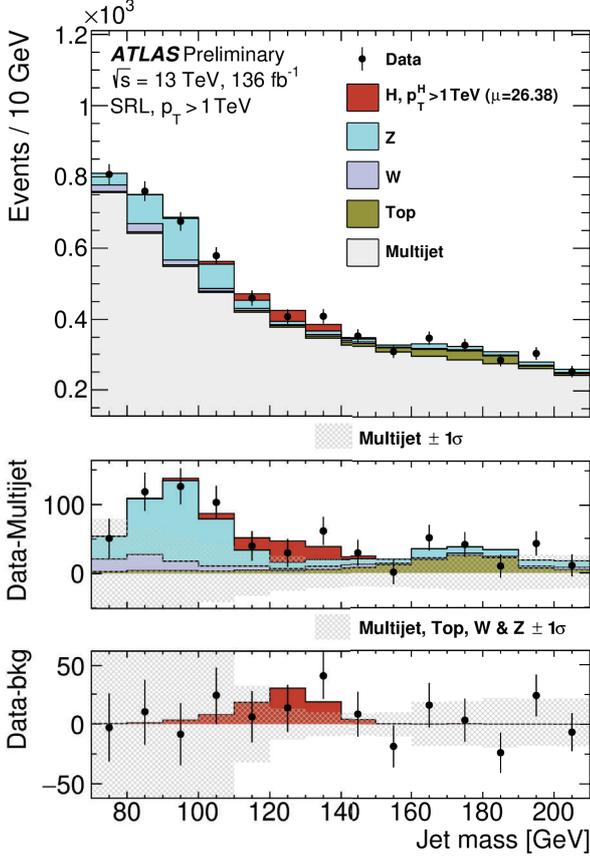


図 18: $H \rightarrow b\bar{b}$ 崩壊を用いた、横運動量が 1 TeV 以上を持つ大半径ジェットの質量分布。

主要な生成・崩壊モードが全て Run 2 で観測されたことで、ヒッグス粒子の精密測定はより新物理に感度が高い位相空間の測定などに進んでいる。そのような領域では統計誤差がまだ支配的であるため、今後更にデータが増えることで、精度の向上が期待できる。ヒッグス粒子の精密測定はこれからが本番である。

5 ヒッグス粒子対生成の探索

ヒッグス粒子の自己結合を測定することができれば、ポテンシャルの形状の情報が得られ、ヒッグス機構の直接的な検証を行える。自己結合の測定は、ヒッグス粒子対生成過程を用いて行う。支配的な過程は、図 19 に示す二つであり、自己結合が存在する過程（左）と存在しない過程（右）が干渉する。標準模型におけるヒッグス粒子対生成過程の断面積は、単一のヒッグス粒子の生成

過程の断面積の 1000 分の 1 以下と小さく、その探索はとて挑戦的である。

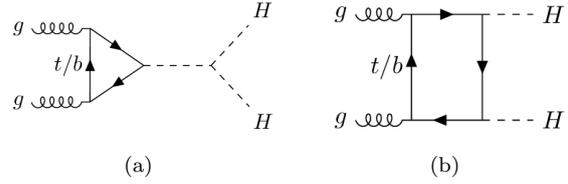


図 19: ヒッグス粒子対生成過程のファイマン図。

Run 2 の $27.5\text{--}36.1$ fb $^{-1}$ のデータを用いて行われたヒッグス粒子対生成過程の探索では、95%信頼度の上限值が、図 20 に示す通りに得られている [19]。統合すると、標準模型の約 10 倍の生成断面積まで棄却される。

2027 年開始予定の高輝度 LHC [20] では、積分ルミノシティ $3000\text{--}4000$ fb $^{-1}$ のデータを取得する。標準模型を仮定したときに、 3.0σ の有意度でヒッグス粒子対生成過程の信号の証拠を得られるという見積もりがある [21]。この見積もりは、自己結合の標準模型に対する比 $\kappa_\lambda = 1.0_{-0.6}^{+0.7}$ に相当する。ただし、これらは 36 fb $^{-1}$ の解析を外挿したもので、その後の手法改良を加味したものではない。すでに、 139 fb $^{-1}$ のデータを用いた解析で感度向上を実現しており [22, 23]、高輝度 LHC では、より高い感度で解析を行える。

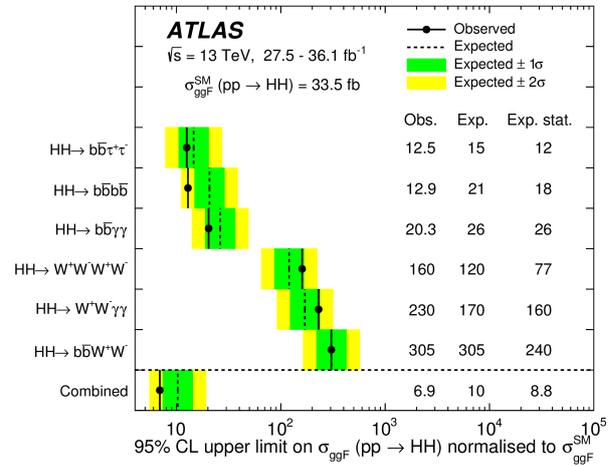


図 20: ヒッグス粒子対生成過程の探索結果のまとめ。

6 標準模型を超えるヒッグス探索

超対称性などの標準模型を超える物理では、Two Higgs Doublet Model (2HDM) に代表されるようなヒッグスセクターの拡張が予言されており、ヒッグス粒子は一つだけではなく、いくつかのヒッグス粒子が存在する可能性がある。“次の”ヒッグス粒子が観測されれば、新物理の方向性を決める大きなマイルストーンになる。ATLAS

実験でも様々な探索が行われており [3], 最新の結果をピックアップして紹介したいと思う。

最小超対称標準模型を拡張した Next-to-Minimal Supersymmetric Standard Model (NMSSM) では、125 GeV より軽いヒッグス粒子の存在も予言されており、LHC 実験で探索が可能である。この解析では、発見された 125 GeV のヒッグス粒子が軽い擬スカラーのヒッグス粒子対に崩壊し、さらにミューオン対とボトムクォーク対に崩壊する終状態 ($H \rightarrow aa \rightarrow bb\mu\mu$) を探索している。一方のヒッグス粒子は、崩壊分岐比が高いボトムクォーク対への崩壊を選択し検出効率を上げる。もう一方のヒッグス粒子は、クリーンなミューオン対を選択することで感度を高めている。 bb 不変質量の分解能は悪いために、 $\mu\mu$ 不変質量と値が近いことを要求し、 b ジェットに補正をかけることで質量分解能を向上させている。主な事象選択として $bb\mu\mu$ 不変質量が $110 \text{ GeV} < m_{\mu\mu bb} < 140 \text{ GeV}$ となることを要求し、さらに低い消失横運動量の選択によりトップクォーク由来の背景事象を削減している。また、 bb 不変質量や角度分布の情報を機械学習に入れ、背景事象との分離性能を向上させている。図 21 は、 $\mu\mu$ 不変質量分布を示している。52 GeV 付近に背景事象からの超過が見られるが、局所的な p 値は 3.3σ であり、Look-elsewhere 効果を入れると p 値は 1.7σ である (図 21) [24]。この超過は信号から来るものなのか、他の崩壊モードで探索を進めており今後の結果に期待してほしい。

7 まとめ

Run 2 における最大の成果は、第三世代フェルミオン (トップクォーク, ボトムクォーク, タウレプトン) とヒッグス粒子の湯川結合の観測である。有意度はいずれも 5σ を超え、標準模型における質量起源の描像が確かめられた。第二世代フェルミオンの一つであるミューオンとの結合も、ATLAS 実験と CMS 実験の結果を統合すると 3σ を超える有意度を得られ、第三世代同様、標準模型における質量起源の描像が示唆されている。

ヒッグス粒子のデータの蓄積は、微分断面積の測定による新物理の間接探索を可能にした。また、標準模型を超えるヒッグス粒子の直接探索においてもパラメータ領域を拡大している。ヒッグス粒子の自己結合の測定によるヒッグスポテンシャルの検証も、当初は 2027 年開始予定の高輝度 LHC でも困難な課題であると考えられていたが、数々の改良により、高輝度 LHC で有意な結果を得られる可能性がある。今後、LHC, 高輝度 LHC, 計画されている ILC, FCC などの将来実験において、ヒッグス粒子の包括的な研究を行うことで、標準模型を超える物理への足がかりが得られ、素粒子物理学の新しい地平

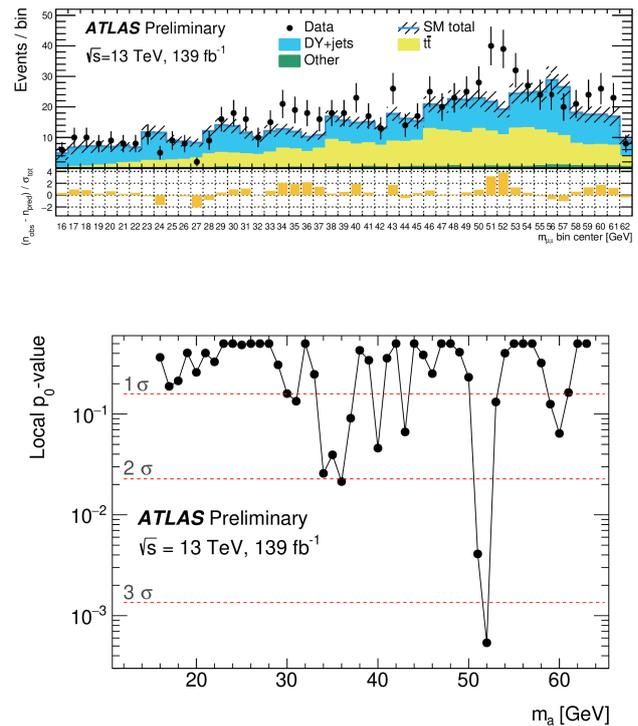


図 21: 信号領域の $\mu\mu$ 不変質量分布 (上図, 上パネル)。下のパネルは、各ビンでの観測されたデータから背景事象の予想値で引いたものを背景事象の誤差で割った値 (上図, 下パネル)。観測されたミューオン対の不変質量における局所的な p 値 (下図)。

を開くことができると期待する。

参考文献

- [1] 青木雅人, 高エネルギーニュース「LHC ATLAS 実験の最新状況」, **37-1**, 30 (2018).
- [2] 中浜優, 高エネルギーニュース「LHC ATLAS 実験 最新の物理結果」, **37-1**, 37 (2018).
- [3] <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/AtlasPublic>
- [4] LHC Higgs Cross Section Working Group, “Handbook of LHC Higgs Cross Sections: 4. Deciphering the Nature of the Higgs Sector”, CERN-2017-002-M (2016). arXiv:1610.07922 [hep-ph]
- [5] ATLAS and CMS Collaborations, “Measurements of the Higgs boson production and decay rates and constraints on its couplings from a combined ATLAS and CMS analysis of the LHC pp collision data at $\sqrt{s} = 7$ and 8 TeV”, J. High Energ. Phys. **2016**, 45 (2016).

- [6] ATLAS Collaboration, “Observation of Higgs boson production in association with a top quark pair at the LHC with the ATLAS detector”, *Phys. Lett. B* **784**, 173 (2018).
- [7] ATLAS Collaboration, “ CP Properties of Higgs Boson Interactions with Top Quarks in the $t\bar{t}H$ and tH Processes Using $H \rightarrow \gamma\gamma$ with the ATLAS Detector”, *Phys. Rev. Lett.* **125**, 061802 (2020).
- [8] ATLAS Collaboration, “Measurement of the properties of Higgs boson production at $\sqrt{s} = 13$ TeV in the $H \rightarrow \gamma\gamma$ channel using 139 fb^{-1} of pp collision data with the ATLAS experiment”, ATLAS-CONF-2020-026 (2020).
- [9] ATLAS Collaboration, “Measurement of the Higgs boson decaying to b -quarks produced in association with a top-quark pair in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector”, ATLAS-CONF-2020-058 (2020).
- [10] ATLAS Collaboration, “Observation of $H \rightarrow b\bar{b}$ decays and VH production with the ATLAS”, *Phys. Lett. B* **786**, 59 (2018).
- [11] ATLAS Collaboration, “Measurements of WH and ZH production in the $H \rightarrow b\bar{b}$ decay channel in pp collisions at 13 TeV with the ATLAS detector”, *Eur. Phys. J. C* **81**, 178 (2021).
- [12] ATLAS Collaboration, “A search for the dimuon decay of the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector”, *Phys. Lett. B* **812**, 135980 (2021).
- [13] CMS Collaboration, “Evidence for Higgs boson decay to a pair of muons”, *J. High Energ. Phys.* **2021**, 148 (2021).
- [14] ATLAS Collaboration, “A combination of measurements of Higgs boson production and decay using up to 139 fb^{-1} of proton-proton collision data at $\sqrt{s} = 13$ TeV collected with the ATLAS experiment”, ATLAS-CONF-2020-027 (2020).
- [15] ATLAS Collaboration, “Combined measurement of the total and differential cross sections in the $H \rightarrow \gamma\gamma$ and the $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\ell$ decay channels at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector”, ATLAS-CONF-2019-032 (2019).
- [16] LHC Higgs Cross Section Working Group, “Handbook of LHC Higgs Cross Sections: 4. Deciphering the Nature of the Higgs Sector”, arXiv:1610.07922 [hep-ph], CERN-2017-00.
- [17] ATLAS Collaboration, “Interpretations of the combined measurement of Higgs boson production and decay”, ATLAS-CONF-2020-053 (2020).
- [18] ATLAS Collaboration, “Measurements of Higgs Bosons Decaying to Bottom Quarks from Vector Boson Fusion Production with the ATLAS Experiment at $\sqrt{s} = 13$ TeV”, arXiv:2011.08280 [hep-ex], CERN-EP-2020-195.
- [19] ATLAS Collaboration, “Combination of searches for Higgs boson pairs in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector”, *Phys. Lett. B* **800**, 135103 (2020).
- [20] 中村浩二, 堀井泰之, 高エネルギーニューズ「高輝度 LHC に向けた ATLAS 検出器アップグレード」, **37-2**, 101 (2018).
- [21] ATLAS Collaboration, “Measurement prospects of the pair production and self-coupling of the Higgs boson with the ATLAS experiment at the HL-LHC”, ATLAS-PHYS-PUB-2018-053 (2018).
- [22] ATLAS Collaboration, “Search for Higgs boson pair production in the two bottom quarks plus two photons final state in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector”, ATLAS-CONF-2021-016 (2021).
- [23] ATLAS Collaboration, “Search for non-resonant Higgs boson pair production in the $b\bar{b}l\bar{l}\nu\nu$ final state with the ATLAS detector in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV”, *Phys. Lett. B* **801**, 135145 (2020).
- [24] ATLAS Collaboration, “Search for Higgs boson decays into two spin-0 particles in the $b\bar{b}\mu\mu$ final state with the ATLAS detector in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV”, ATLAS-CONF-2021-009 (2021).