

LHCからの最新物理結果と Run 3の状況

(- 125 GeVヒッグス測定を中心に -)

2023/08/30 基研研究会2023
廣瀬茂輝 (筑波大)

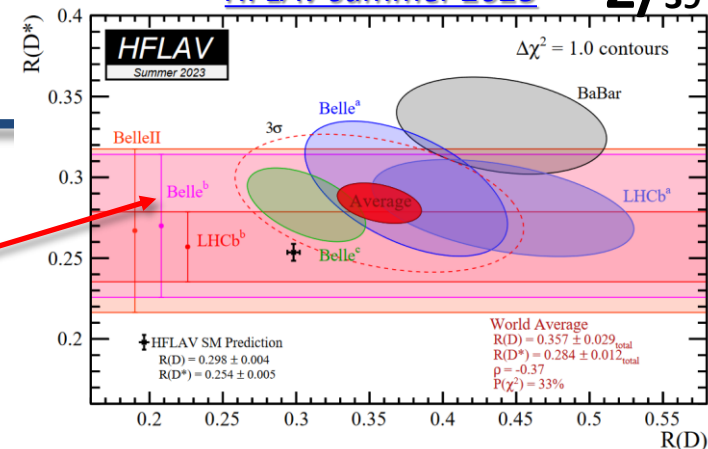
自己紹介



名古屋大学
NAGOYA UNIVERSITY

2011～2017年: Belle (II) @ 名古屋大

- Belleで $R(D^*)$ と $P_\tau(D^*)$ を測って博士論文書いた [PRL 118, 211801 \(2017\)](#)
- D論を書いているときに、「EWスケールに何かあるならまずヒッグスの理解？」



2017～2020年: ATLAS @ フライブルク大

- ヒッグス粒子の物理を始めた... $H \rightarrow \tau\tau$ で第三世代から攻める
- 現行ATLASシリコンストリップ検出器の運転、オフライン解析 [JINST 17 \(2022\) P01013](#)



筑波大学
University of Tsukuba

2020年～: ATLAS @ 筑波大

- 引き続きヒッグスの物理
- 高輝度LHC用シリコン検出器の開発・量産

[ATL-ITK-PROC-2023-001](#)



■ 今日の内容

9:00 - 10:00 廣瀬 茂輝 (筑波大)

LHC からの最新物理結果とRun 3の状況
(ATLAS, CMS)

ヒッグス

とHL-LHCの展望
(ちょっとだけ)

- この半年ぐらい(LHCP、Lepton Photo、EPS-HEPなど)で新結果がたくさん出ています
 - ぜんぶ紹介すると際限ないので、ヒッグスの物理にフォーカスします
- 秋の学会でシンポジウムがありますので、ごちらもぜひ。

📅 18日 RD11会場 18pRD11 13:30~16:50

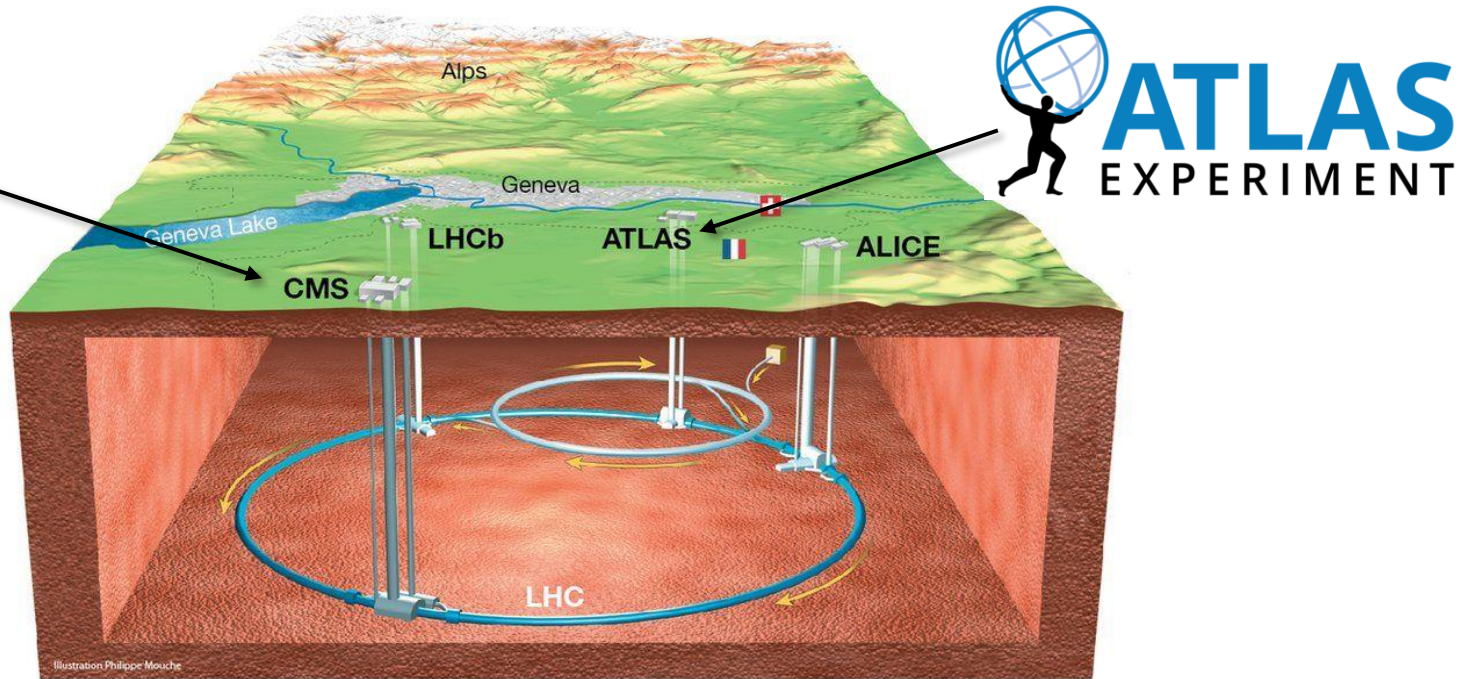
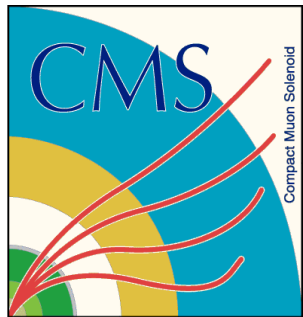
31 Google Calendarに追加

素粒子実験領域, 素粒子論領域, ビーム物理領域

LHCからHL-LHCへ展開するエネルギーフロンティア研究 Researches of the energy frontier expanding from the LHC to the HL-LHC

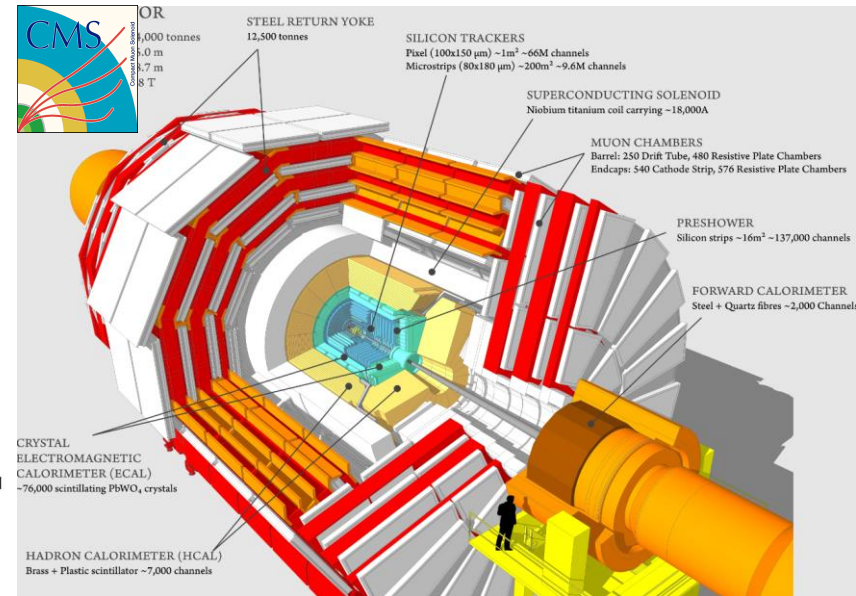
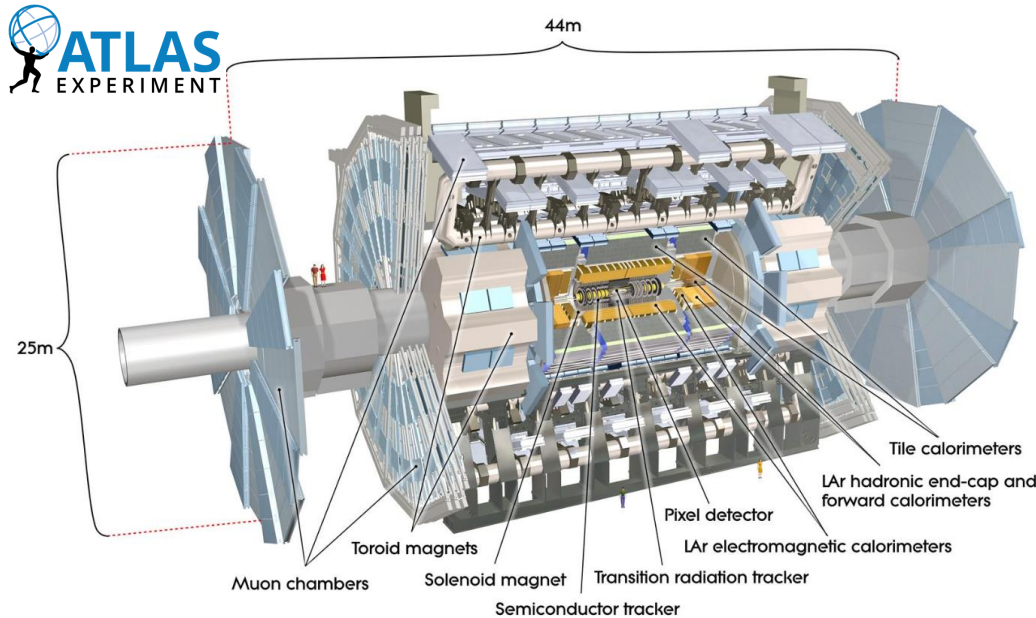
1. 趣旨説明 東工大理 陣内修
2. LHC/ATLAS Run3 : 運転の最前線と挑戦のプロダクションイヤー KEK素核研 青木雅人
3. LHC Run 3と高輝度LHCにおけるヒッグスセクター全容解明への挑戦 筑波大数理 廣瀬茂輝
4. LHCにおける新粒子や新現象探索の最前線 九大RCAPP 音野瑛俊
5. LHC Run 3 と高輝度LHCで探る新物理模型 LBNL 千草颯
6. Application of deep learning in LHC physics ICEPP Ganguly Sanmay
7. エネルギーフロンティア実験を支える超伝導磁石開発の進展~高輝度LHC, そしてその先へ KEK共通 鈴木研人
8. アップグレードは大詰めへ, 高輝度LHCに向けたATLAS検出器 KEK QUP 外川学
9. おわりに KEK素核研 花垣和則

■ LHC加速器



- 世界最大かつ最高エネルギーの陽子陽子衝突型加速器
 - 周長27 km
 - 重心系エネルギー13.6 TeV(設計は14 TeV)
 - 瞬間ルミノシティ $2.06 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ (最高記録)
 - 40 MHzで陽子同士が衝突
- 4つの主要な実験: ATLAS, CMS, LHCb, ALICE

ATLASとCMS



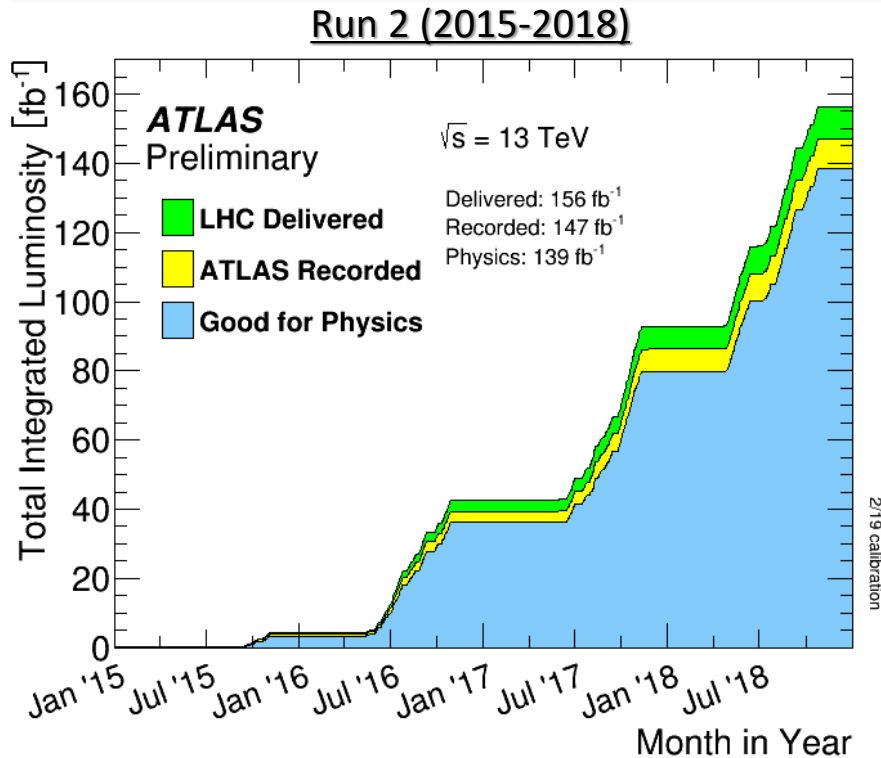
- LHCにある2つの巨大汎用検出器
 - 構造はよく似ているが、細部に異なる特徴がある

	ATLAS	CMS
検出器直径	25 m	15 m
トロイド磁場	4.1 T (peak)	ない
ソレノイド磁場	2 T	3.8 T
電磁カロリメータ	液体Ar + Pb (サンプリング型)	PbWO ₄ (全吸収型)

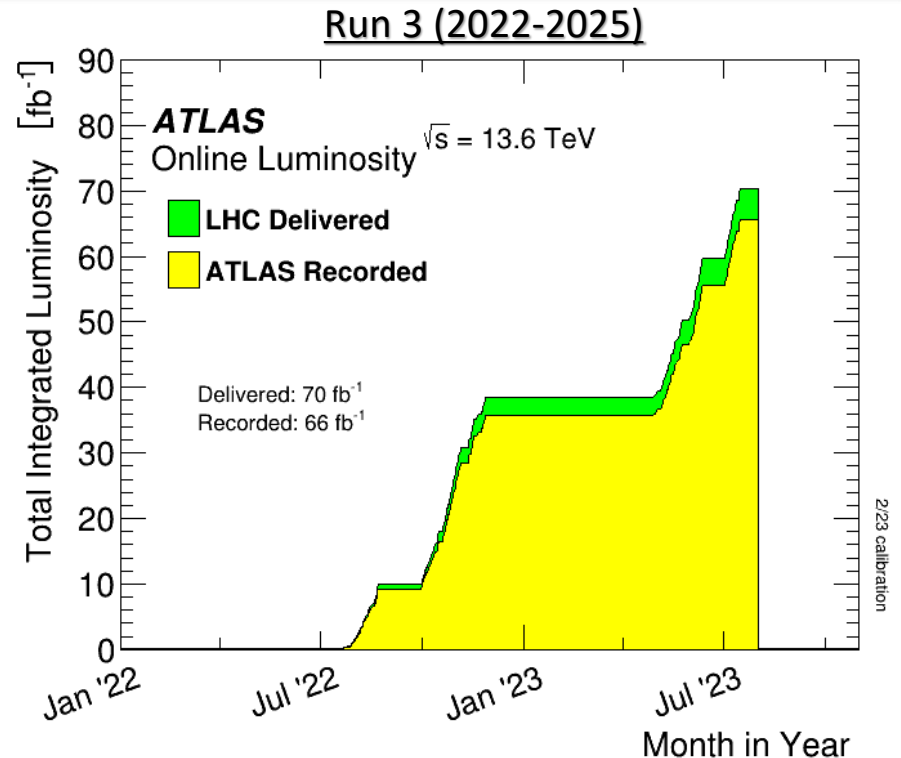
} 高 p_T ではATLASが強い
 → 低 p_T ではCMSが強い
 → エネルギー測定はCMSが強い(が、高 p_T ではコンパラ)

■ データ収集の状況 (ATLAS)

[ATLAS Luminosity Public Plots](#)



$$\sigma_H^{\text{tot}} = 56 \text{ pb @ } 13 \text{ TeV}$$



$$\sigma_H^{\text{tot}} = 60 \text{ pb @ } 13.6 \text{ TeV}$$

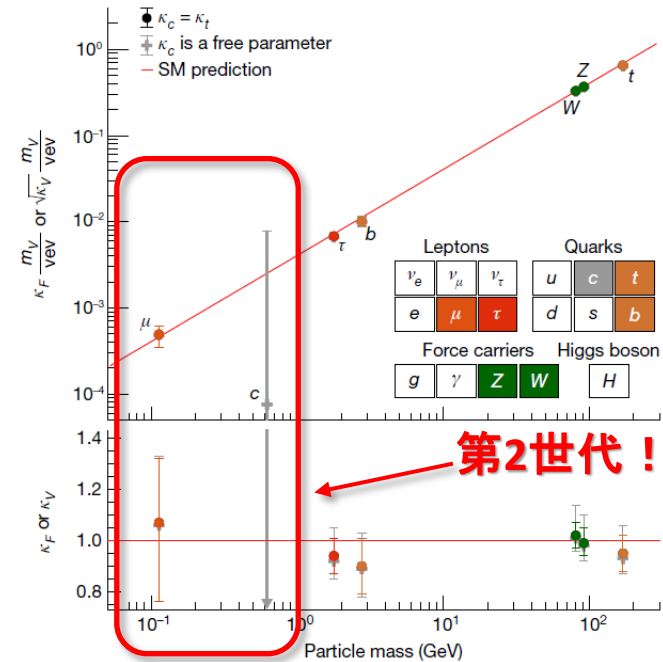
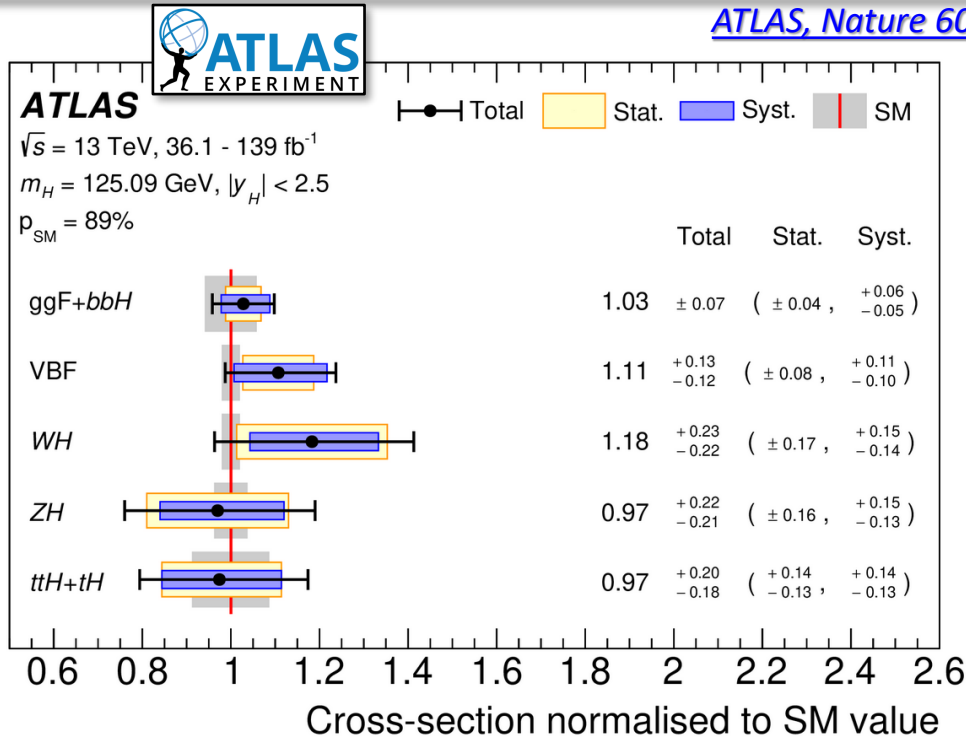
● 順調にデータを蓄積中

- Run 2: 140 fb⁻¹ → ヒッグス粒子780万個分
- Run 3: 66 fb⁻¹ (解析に使えるのは60 fb⁻¹弱) → ヒッグス粒子360万個分

既に、ATLASだけで10⁷ ヒッグス粒子分のデータをもっている！

Run 2までのヒッグス測定の状態

ATLAS, Nature 607, 52 (2022)



- 主要な生成、崩壊過程をすべて観測
 - すべてのチャンネルを含めた信号強度 $\mu = 1.05 \pm 0.06$
 - ウィークボソンや第3世代との結合定数の測定精度は < 10%
 - 第2世代に入り始めている ($H \rightarrow \mu\mu$ はRun 3の重要トピックの1つ)
- CMSも同程度の精度で測定している

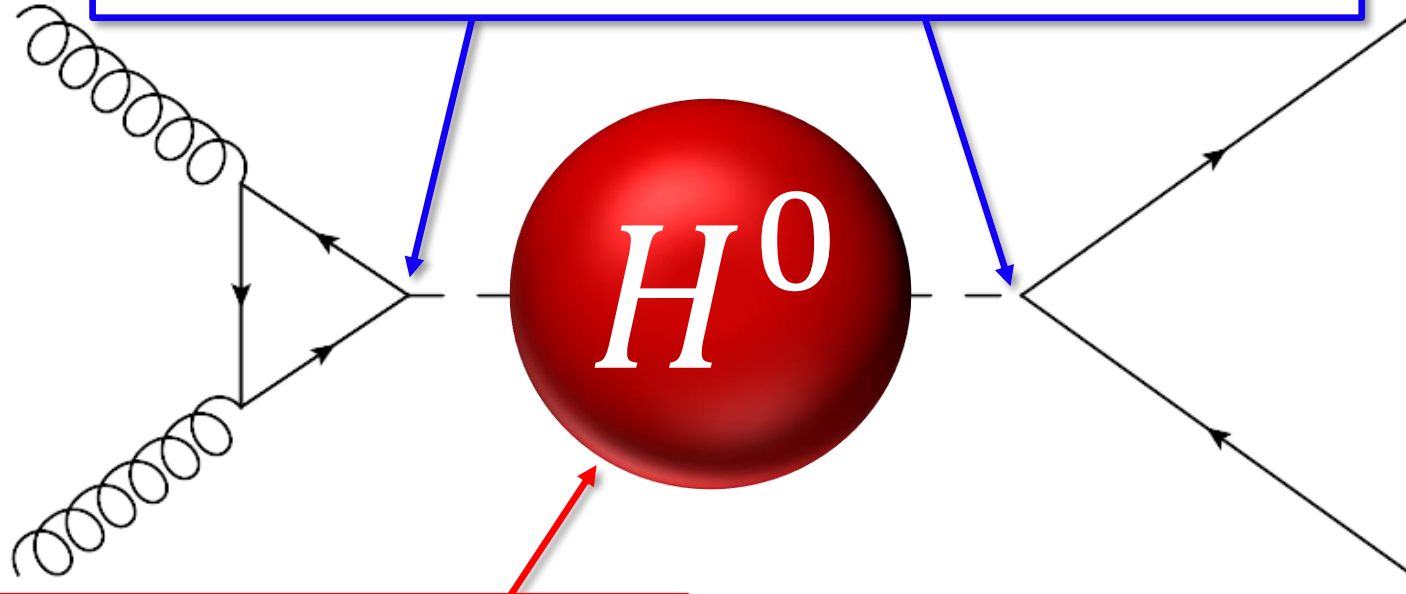


CMS, Nature 607, 60 (2022)

■ ヒッグスの測定: やるべきこと

生成、崩壊過程の精密測定

- 微分断面積測定
 - ブーストしたトポロジー
 - 稀な過程、崩壊
- } まだ見ていないフェーズ
スペースを調べる



ヒッグスの性質を決める

- 質量
- 崩壊幅
- CP状態 ...など

自己結合 λ を測る

- ダイヒッグス過程の発見を目指す
- 単独生成からも測れる

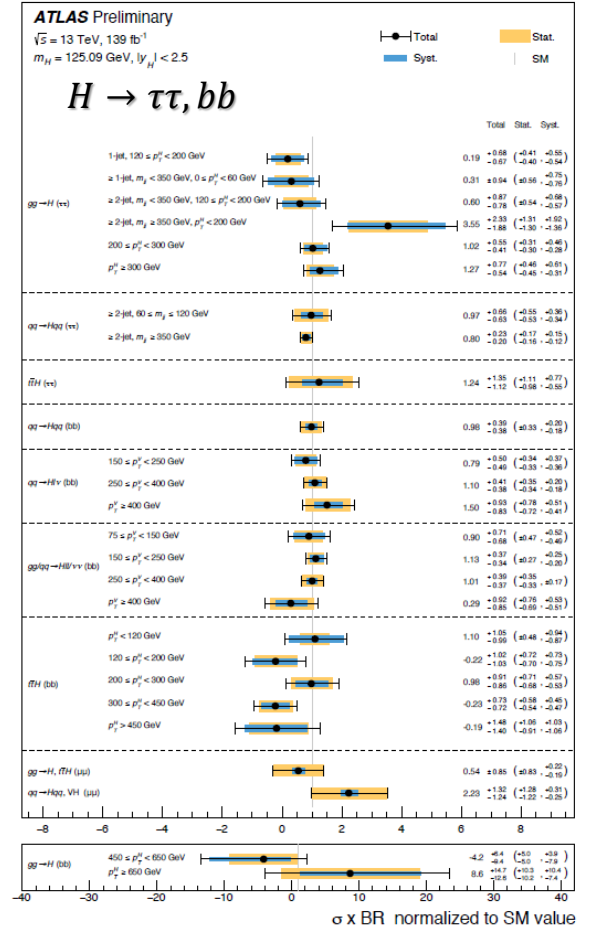
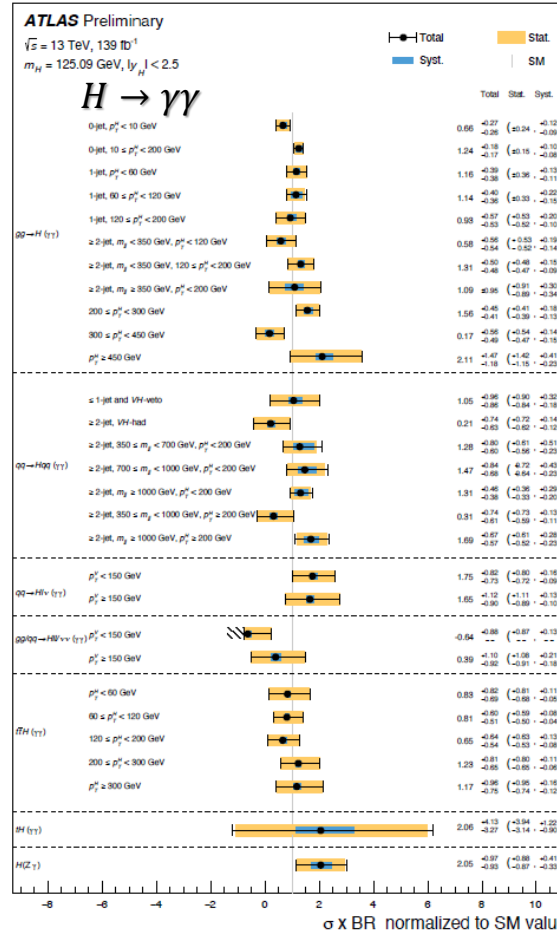
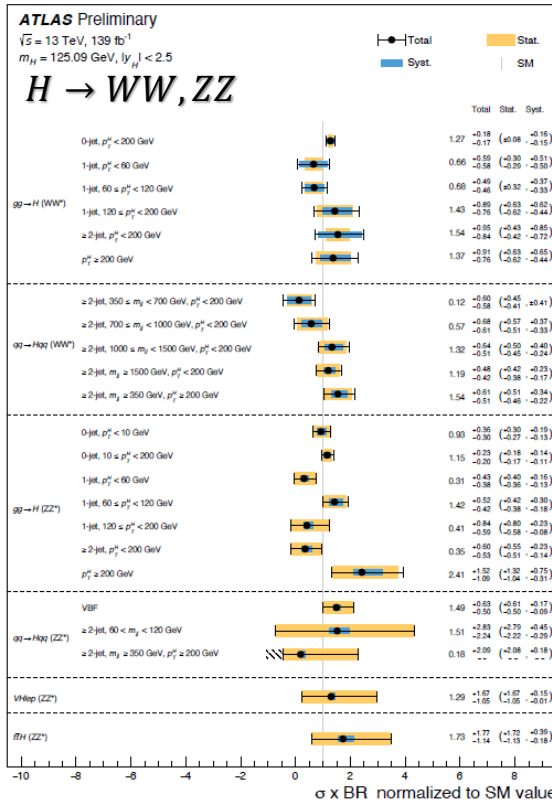
Run 3のデータ収集を進める一方、Run 2データでの大事な結果を出し続けている

生成、崩壊の精密測定

Run 2を使った解析結果



- Run 2での主要チャンネルの解析はほぼ完了
 - 単に生成過程や崩壊過程を測るだけでなく、フェーズスペースごとの測定も行っている (simplified template cross section)



これらの実験結果をインプットに、EFTやBSMパラメータを探った

EFTに対する制限

- SMFETの6次元、8次元オペレータを考察

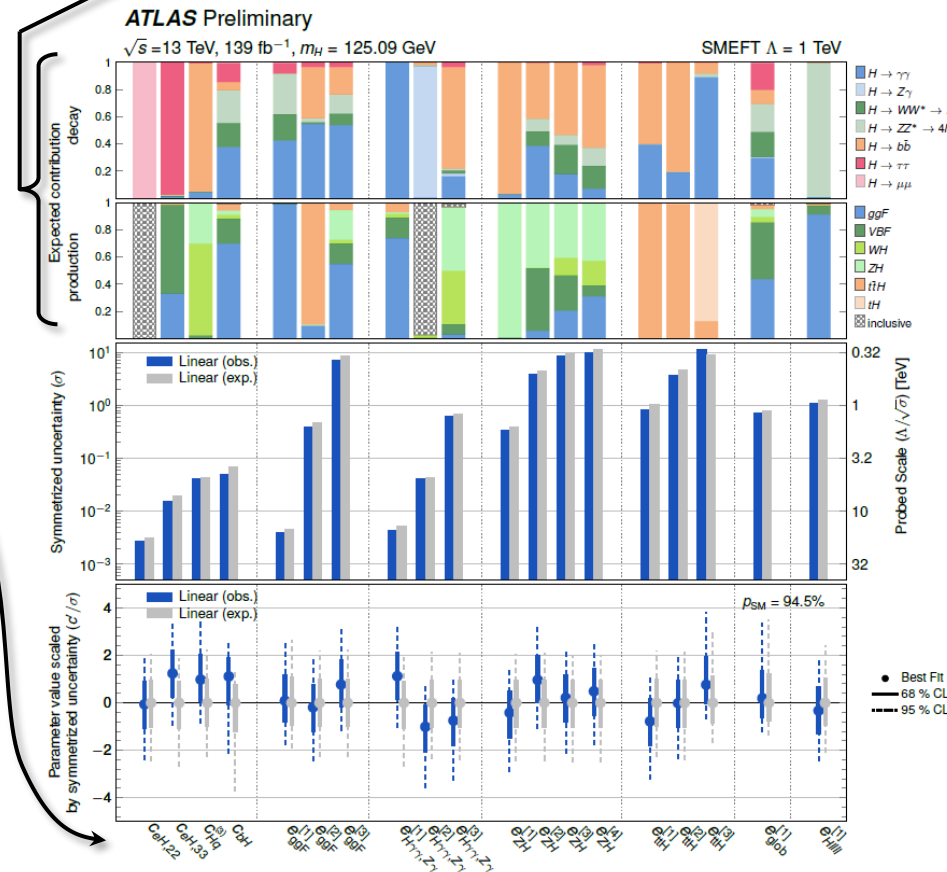
$$\mathcal{L}_{\text{SMEFT}} = \mathcal{L}_{\text{SM}} + \sum_i^{N_{d=6}} \frac{c_i}{\Lambda^2} O_i^{(6)} + \sum_j^{N_{d=8}} \frac{b_j}{\Lambda^4} O_j^{(8)} + \dots,$$

- すべてのWilson係数に対して制限をかけるにはデータが不足するので、基底をとりなおす

- すべてのWilson係数が1と無矛盾

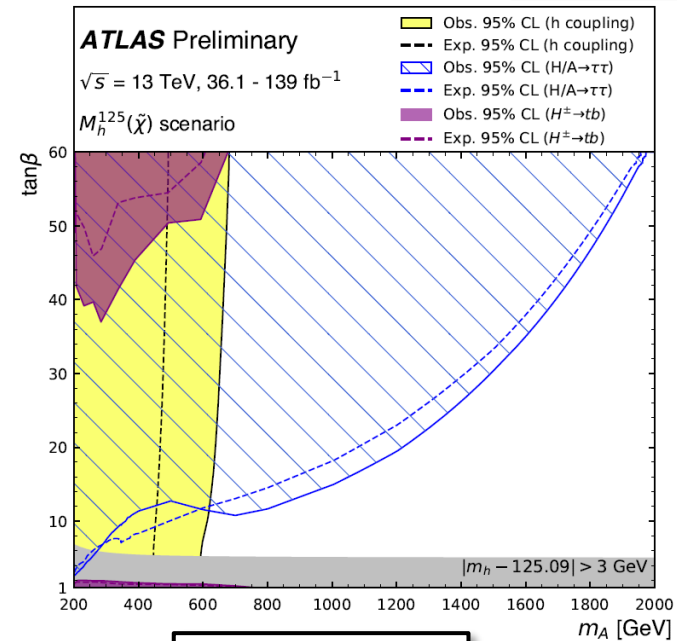
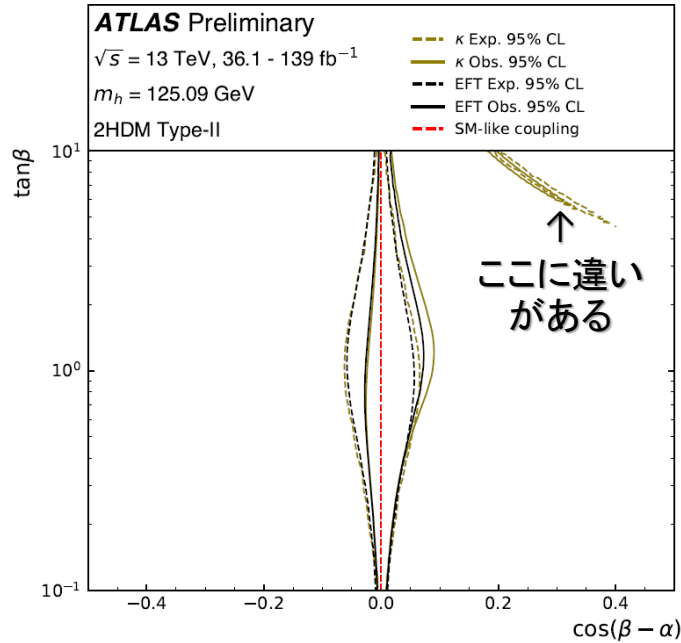
- 有意なずれは見つからなかった

1つのオペレータに色々なチャンネルが寄与している



2HDMとMSSMに対する制限

ATLAS-CONF-2023-052



- 2HDMへの制限 (type-IIの例)

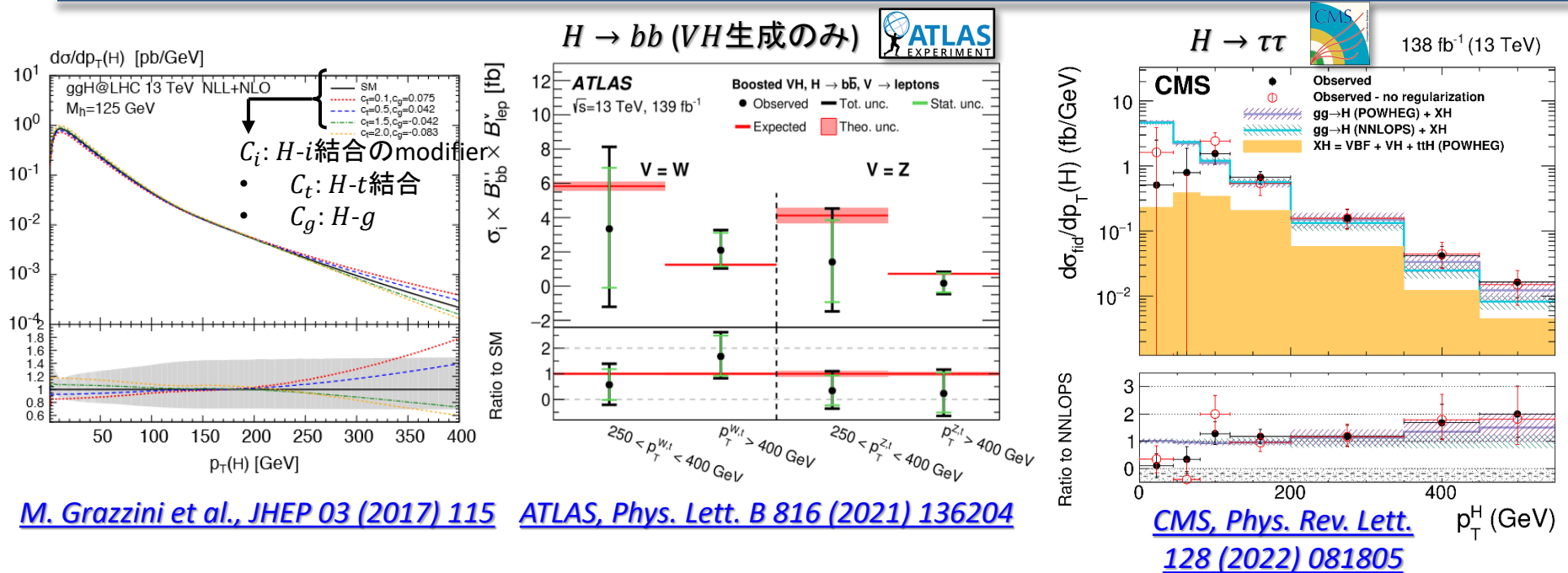
- κ フレームワークとEFT両方で見積もり
- $-0.3 < \cos(\beta - \alpha) < 0.7$ が許されている @ $\tan\beta \sim 1$

結合定数を
 $g \rightarrow K_i g$
と置き換える

- MSSMへの制限 (1つのモデルの例)

- $m_A < 600 \text{ GeV}$ をほぼ $\tan\beta$ に依存せずに棄却

Boosted Higgs bosons



- 高運動量な領域は、ヒッグスと結合するBSMの影響を受けやすい
- 高運動量な領域だと
 - QCD由来のバックグラウンドが比較的マシ
 - (SMと比較したいなら)SMの生成断面積が非常に小さい
 ...なので、崩壊分岐比が大きい $H \rightarrow bb, \tau\tau$ が有利

Boosted $H \rightarrow bb$ の再構成

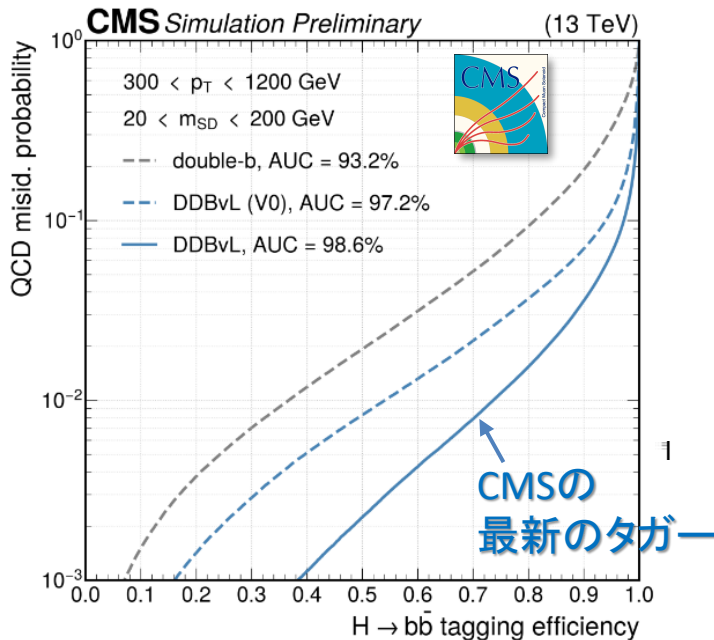
- ヒッグスが高運動量になりすぎると、そこから出てくる崩壊物が1つにまとまってしまう → 1つのジェットとして再構成

- 内部構造を表す $O(100)$ 個の特徴量を使ってトレーニング

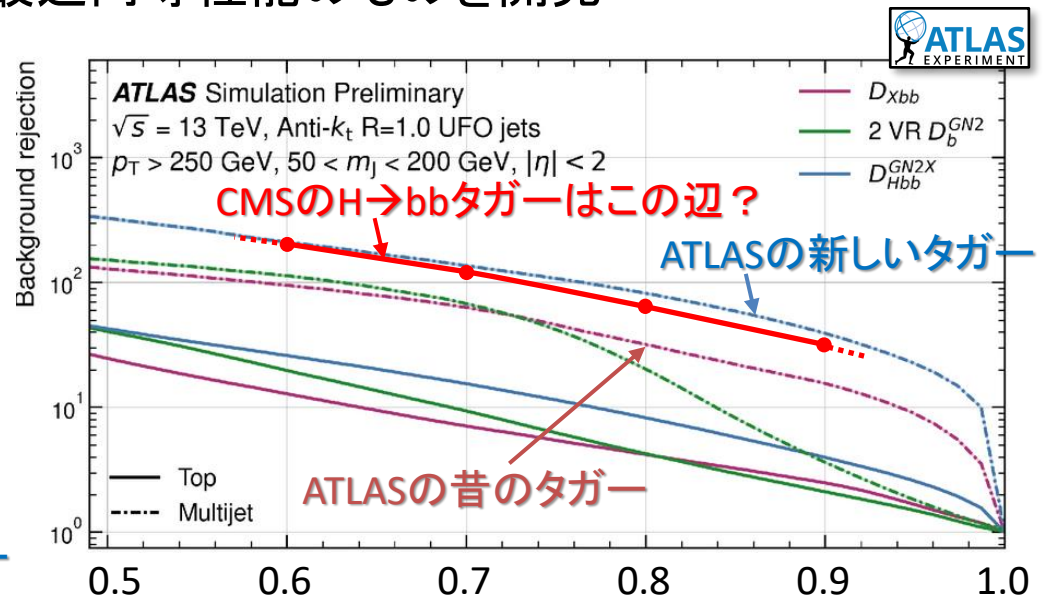


- CMSは、CNNを使った高性能な $H \rightarrow bb$ タガーを開発

- ATLASは負けていたが、最近同等性能のものを開発



[CMS, CMS-DP-2022-041](#)



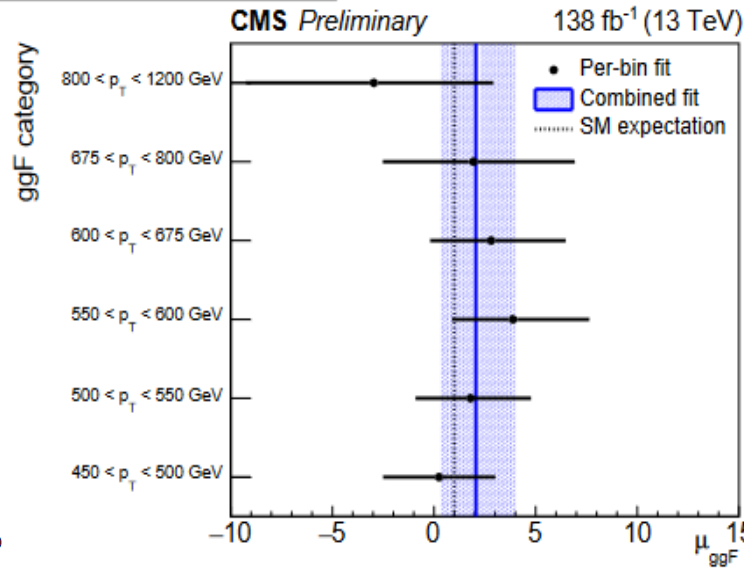
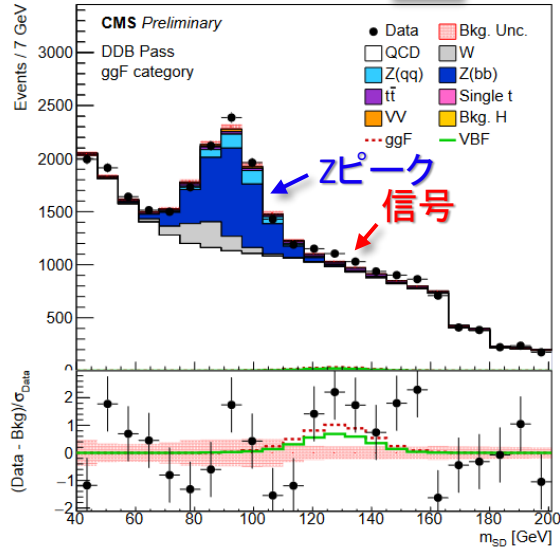
[ATLAS, ATLAS-PHYS-PUB-2023-021](#)

Boosted $H \rightarrow bb$ 解析

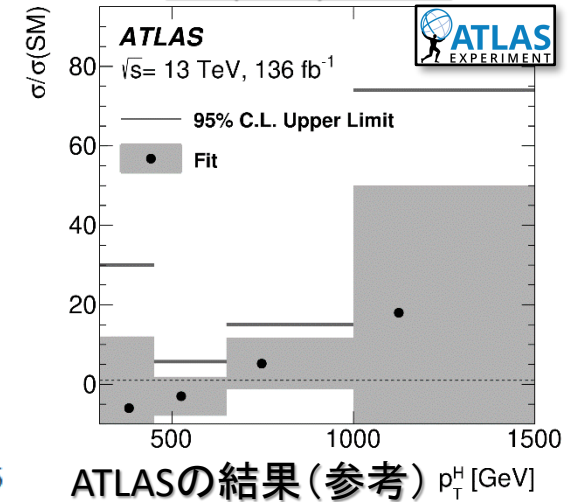


CMS, CMS-PAS-HIG-21-020

fb⁻¹ (13 TeV)



ATLAS, Phys. Rev. D
105 (2022) 092003



- Boosted $H \rightarrow bb$ タガーを用いた $p_T > 450 \text{ GeV}$ の測定

$$\mu_{ggF} = 2.1^{+1.9}_{-1.7} (1.2\sigma) \quad (\text{統計誤差が支配的})$$

- VBF生成をターゲットにした解析もしている
(ggF+VBFでSMから 2.6σ のずれ? ふらつき?)
- 微分断面積測定: $p_T = 1.2 \text{ TeV}$ まで測定
 - ATLASと同程度の結果 (CMSとビン定義が異なるので比較しにくい)

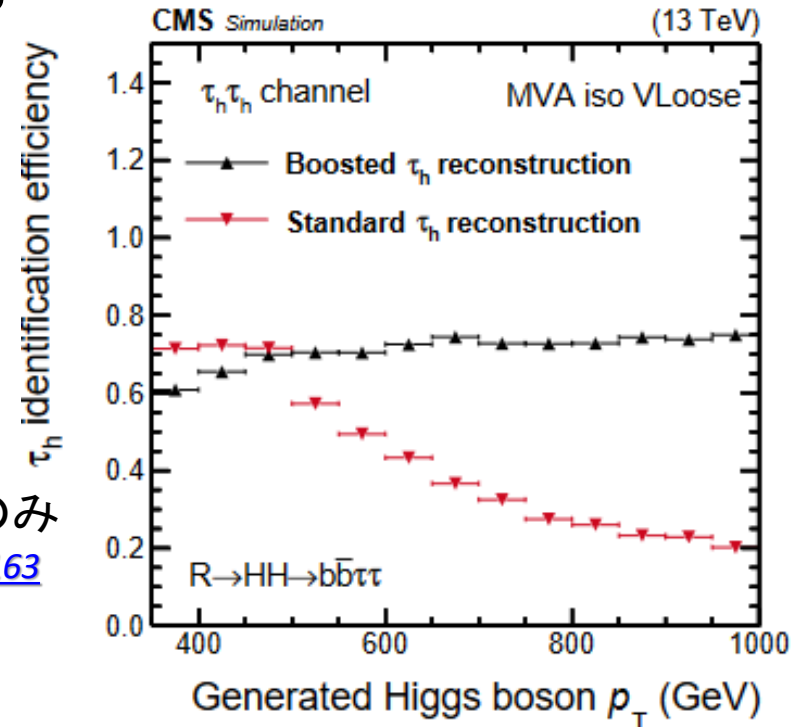


Boosted $H \rightarrow \tau\tau$ の再構成

- $H \rightarrow \tau\tau$ の場合も、 $H \rightarrow bb$ のように1個の大きいジェットとして高運動量ヒッグスを再構成できる



- それぞれのサブジェットに対して、通常のtau ID (もし1本のトラックがレプトンらしければレプトンID) をかける
- $p_T > 500$ GeVで大きな効果
 - 通常のアプローチだと効率が20%までおちる
 - Boosted $H \rightarrow \tau\tau$ 再構成アルゴリズムでは $p_T = 1$ TeVでも80%近い
 - ATLASでも同様のアルゴリズムがある
 - 両方の τ がハドロニック崩壊した場合のみ
[ATLAS, JHEP 11 \(2020\) 163](#)
 - レプトニック崩壊を含む場合のアルゴリズムは別途開発中



[CMS, JINST 13 \(2018\) P10005](#)

Boosted $H \rightarrow \tau\tau$ 解析



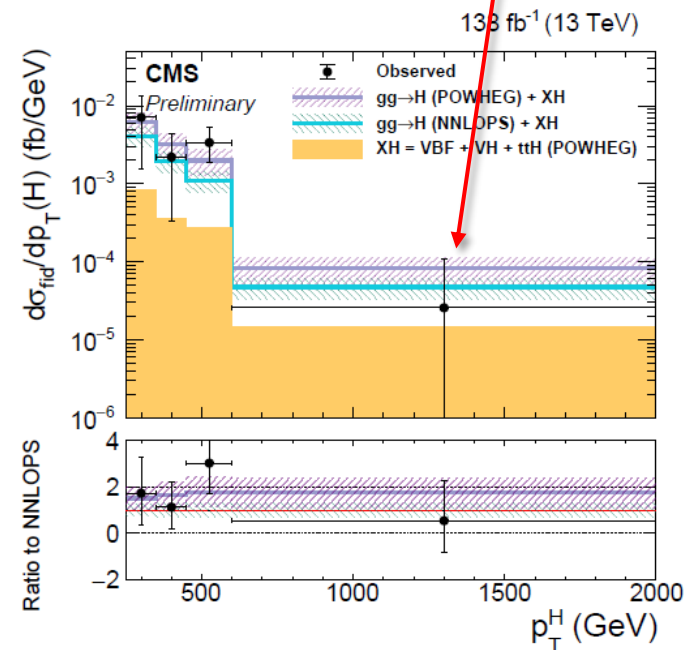
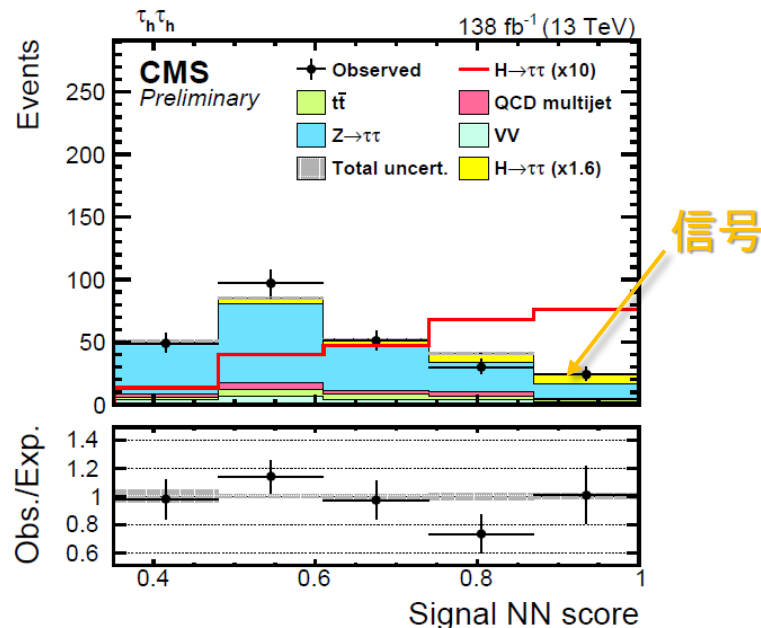
CMS, CMS-PAS-HIG-21-017

- $\tau\tau$ 系をboosted $H \rightarrow \tau\tau$ アルゴリズムで特定
- マルチクラスニューラルネットワークで信号を分類
 - 信号、 $Z \rightarrow \tau\tau$ 、mis ID τ (主にマルチジェット) の3クラス
 - 終状態オブジェクトの p_T や E_T^{miss} など10個の特徴量を利用
- NN分布にフィットして生成断面積を測定

$$\sigma = 1.96^{+0.86}_{-0.69} \text{ fb } (\sigma_{\text{SM}} = 1.20 \pm 0.20 \text{ fb})$$

$p_T > 600 \text{ GeV}$ でも
誤差 $\sim 100\%$ の結果

- 3.5σ の有意度で信号を観測



■ $H \rightarrow Z^* \gamma$ 探索

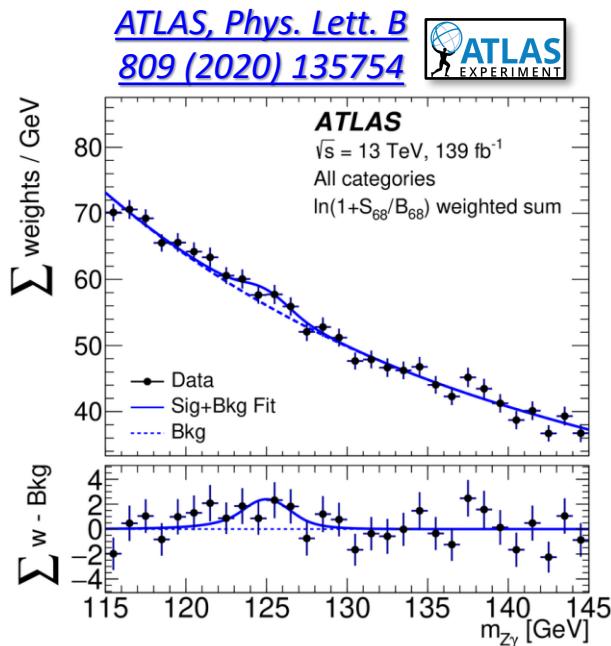
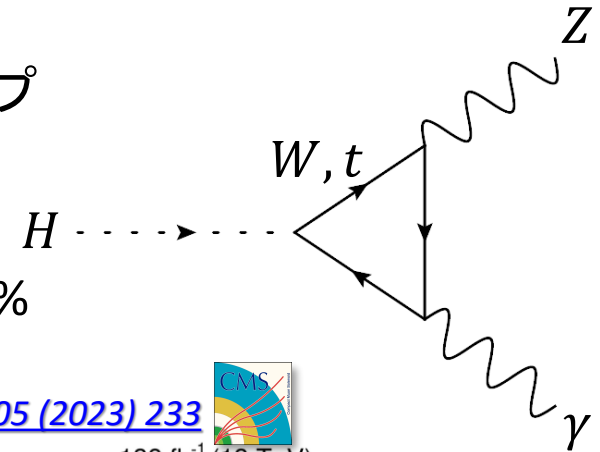
• ループを介して起きる崩壊

– γ はヒッグスと直接結合できないので、ループが必要($H \rightarrow \gamma\gamma$ と同じ)

– $H \rightarrow \gamma\gamma$ よりも崩壊分岐比は低い

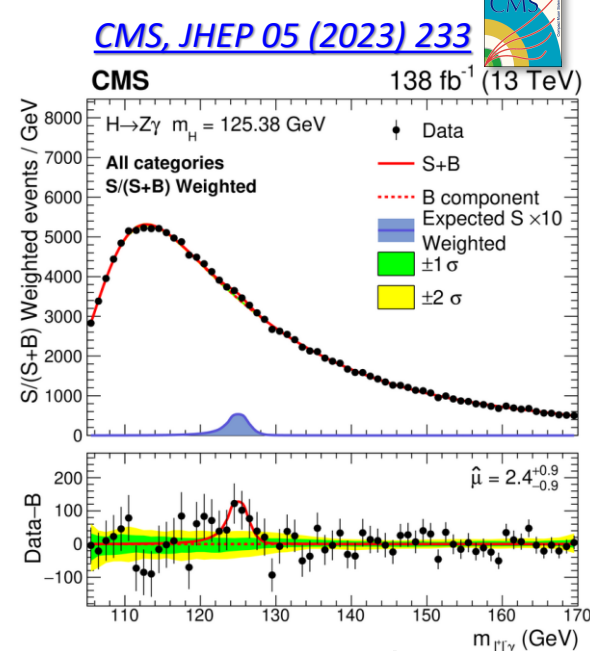
$$\text{BR}(H \rightarrow Z^* \gamma) = 0.15\% \text{ vs } \text{BR}(H \rightarrow \gamma\gamma) = 0.23\%$$

さらに $\text{BR}(Z^* \rightarrow ee, \mu\mu) = 6.7\%$ がかかる



$$\mu = 2.0 \pm 1.0$$

$$(2.2\sigma)$$



$$\mu = 2.4 \pm 0.9$$

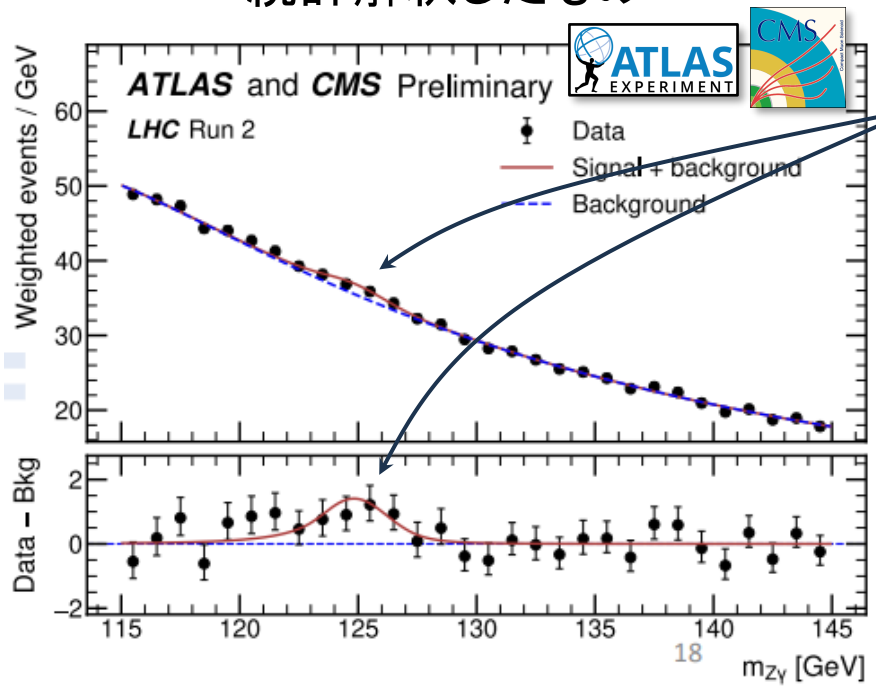
$$(2.7\sigma)$$

どちらもSM予想より多めに測定されている

■ $H \rightarrow Z^* \gamma$ 探索: ATLAS+CMS combination

- ATLASとCMSのRun 2結果のcombinationを取った
 - 再解析ではなく、系統誤差の相関を考慮しつつ両実験の解析結果を統計解釈したもの

[ATLAS and CMS, CMS-PAS-HIG-23-002](#)



ピーク(?)

$$\mu = 2.2 \pm 0.7 (3.4\sigma)$$

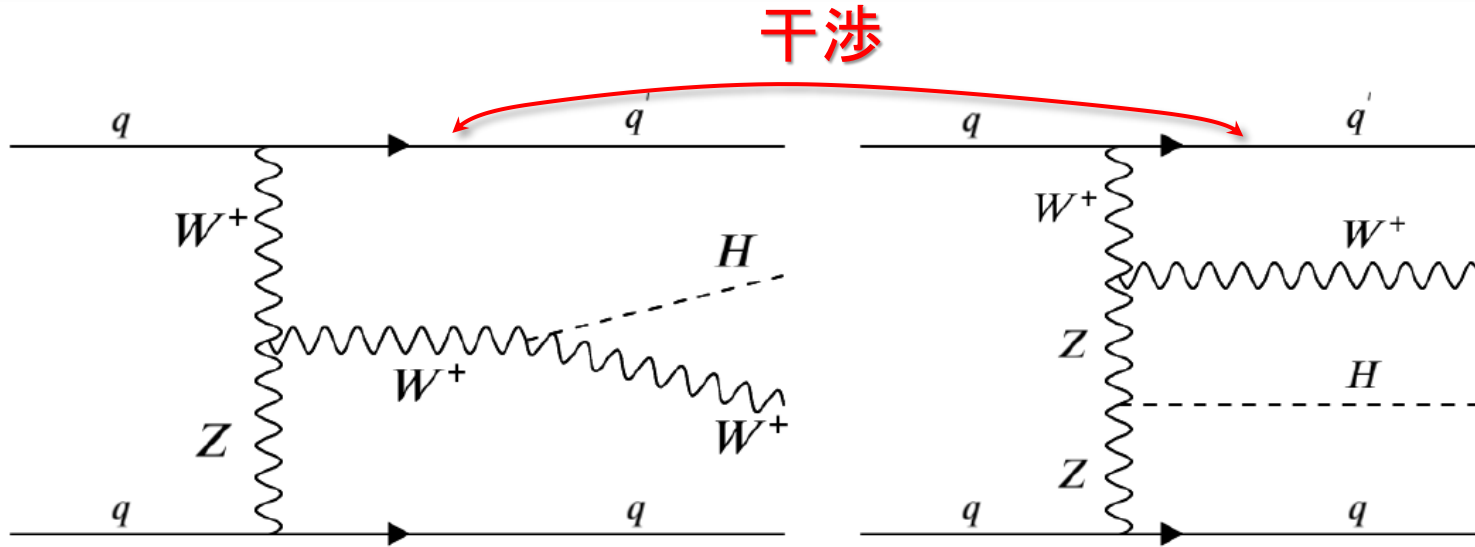
(SMから1.9 σ 超過)

$H \rightarrow Z^* \gamma$ のエビデンスを得た

- $H \rightarrow Z^* \gamma$ のみに現れるBSMは考えにくい
 - BR($H \rightarrow \gamma\gamma$)は既に7%の精度で測定されている(SMと無矛盾)
- Run 3での統計増加が重要なチャンネル

■ VBF WH過程の探索

ATLAS-CONF-2023-057



$$\sigma \propto \kappa_Z^2 |M_Z|^2 + \kappa_W^2 |M_W|^2 - 2\kappa_Z^2 \lambda_{WZ} \text{Re} |M_Z M_W|$$

\uparrow \uparrow
 HとZ or Wとの結合定数
 (SMで規格化 \rightarrow 1ならSM)

$$= \kappa_W / \kappa_Z$$

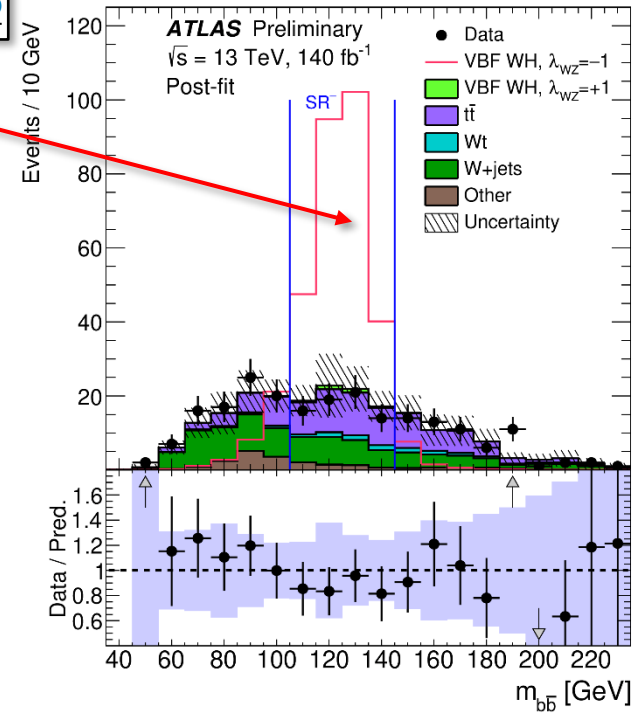
- 2つのダイアグラムの干渉から、 λ_{WZ} の符号を決定可能
 - SMでは負の干渉
 - もし $\lambda_{WZ} < 0$ であれば正の干渉に \rightarrow SMに比べて断面積が激増

VBF WH過程の探索



- $H \rightarrow bb$ を使った解析
 - bb 、 $W \rightarrow \ell\nu$ と2本のVBFジェットがいることを要求
 - 機械学習を使わず、カットベースの解析をしている
 - $\lambda_{WZ} < 0$ と $\lambda_{WZ} > 0$ で期待される信号分布が大きく変わるので、それぞれの仮定の下で信号領域を多少変えている

$\lambda_{WZ} < 0$ の場合(明らかに棄却されている！)



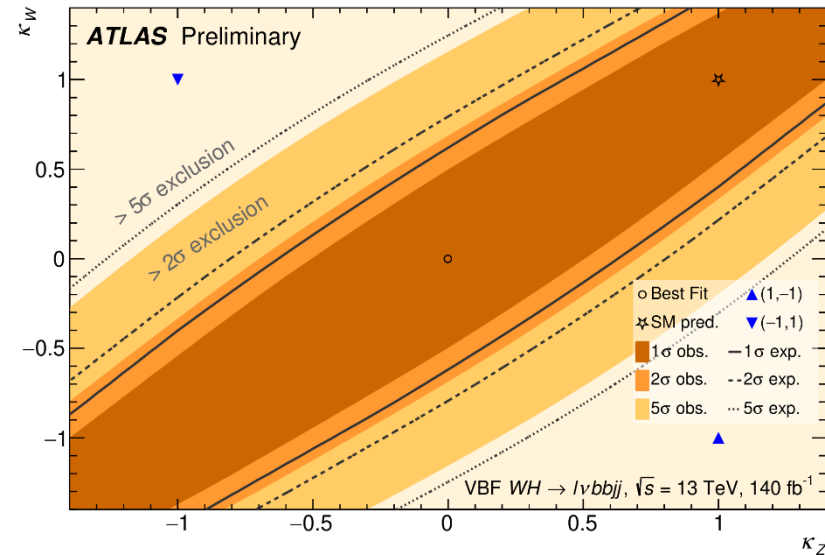
結果

$$\mu = 2.6^{+2.6}_{-2.4} \text{ (stat)} \pm 3.8 \text{ (syst)}$$

$$(\mu < 11.2 \text{ @ } 95\% \text{ C.L.})$$

- 有意な信号は観測されなかった
- $\lambda_{WZ} = -1$ を 8σ で排除

λ_{WZ} の符号を初めて決定



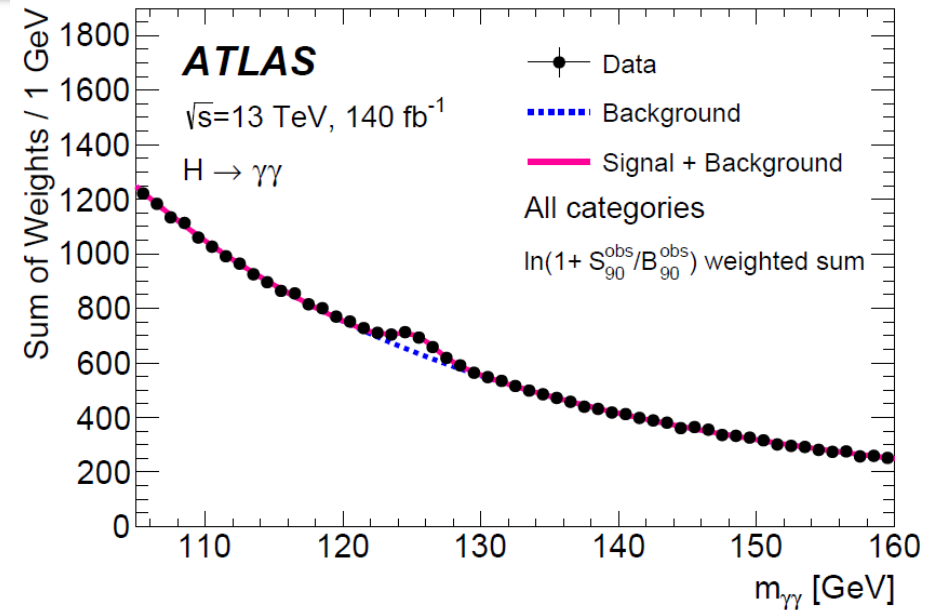
ヒッグス粒子の性質の測定

■ ヒッグス質量測定



[ATLAS, arXiv:2308.07216](https://arxiv.org/abs/2308.07216)

- $H \rightarrow \gamma\gamma$ によるヒッグス質量測定
 - $H \rightarrow Z^*Z \rightarrow 4\ell$ とともに質量測定のゴールデンチャンネル
- Run 2全データによる解析: 前回からの改善
 - γ キャリブレーションが劇的に良くなった
 - γ のエネルギー分解能 & キャリブレーション不定性の違う領域を分けて解析



$$m_H = 125.22 \pm 0.11 \text{ (stat)} \pm 0.09 \text{ (syst)} \text{ GeV} \\ (0.14 \text{ (total)})$$

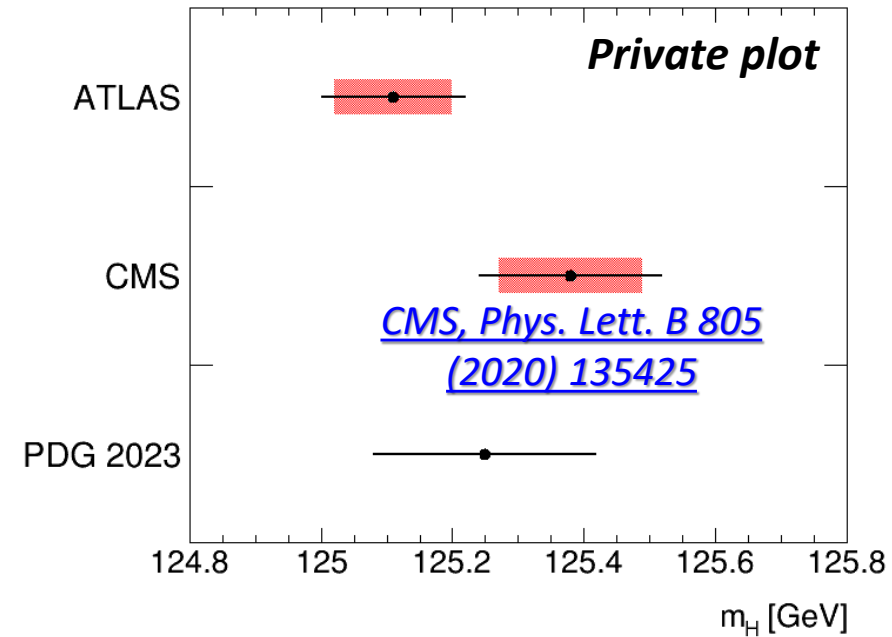
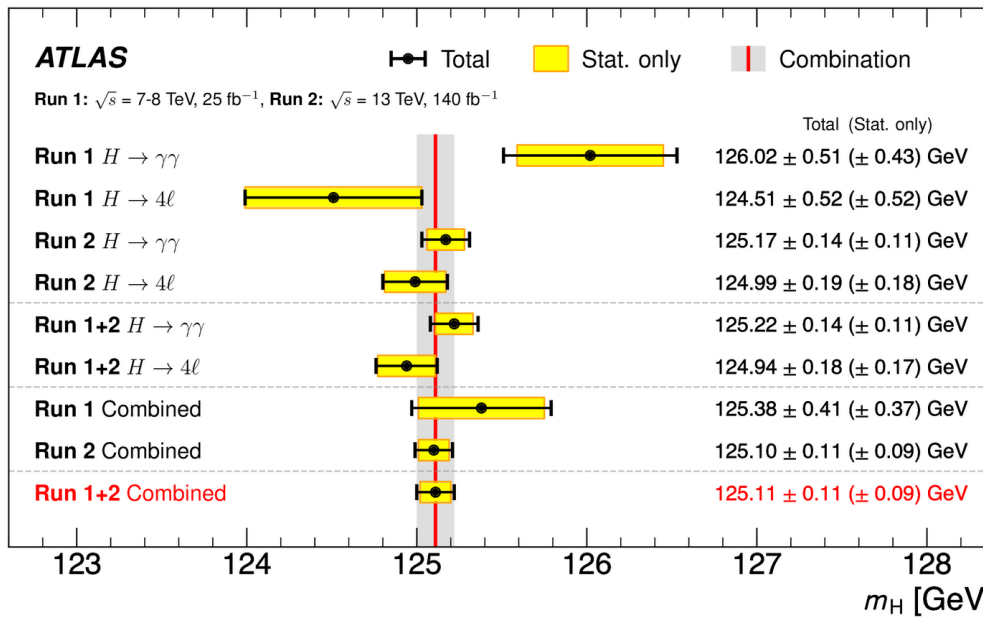
参考: 36.1 fb⁻¹の結果: 124.93 ± 0.21 (stat) ± 0.34 (syst) GeV

- 0.11%の測定を達成！
 - γ キャリブレーション手法の改善で、系統誤差が大幅に減った

■ ヒッグス質量測定



[ATLAS, arXiv:2308.04775](https://arxiv.org/abs/2308.04775)



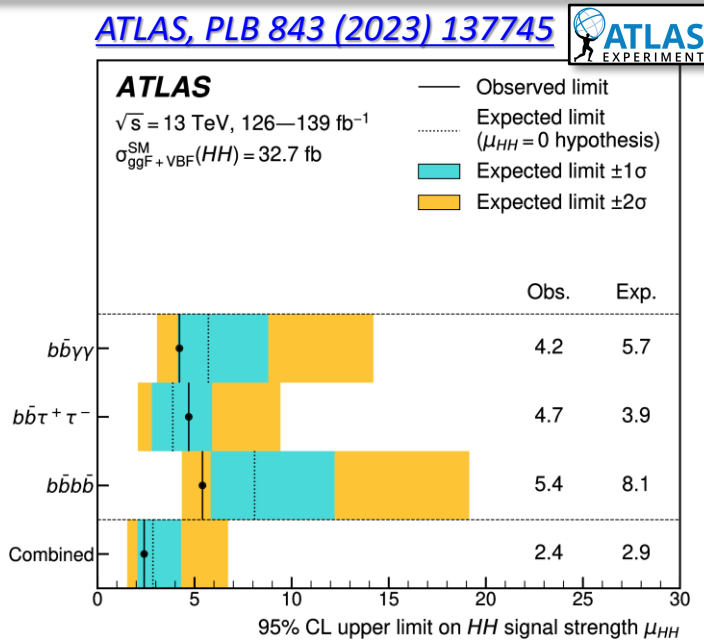
- $H \rightarrow Z^*Z \rightarrow 4\ell$ と合わせた統計解析

$$m_H = 125.11 \pm 0.09 \text{ (stat)} \pm 0.06 \text{ (syst)} \text{ GeV}$$

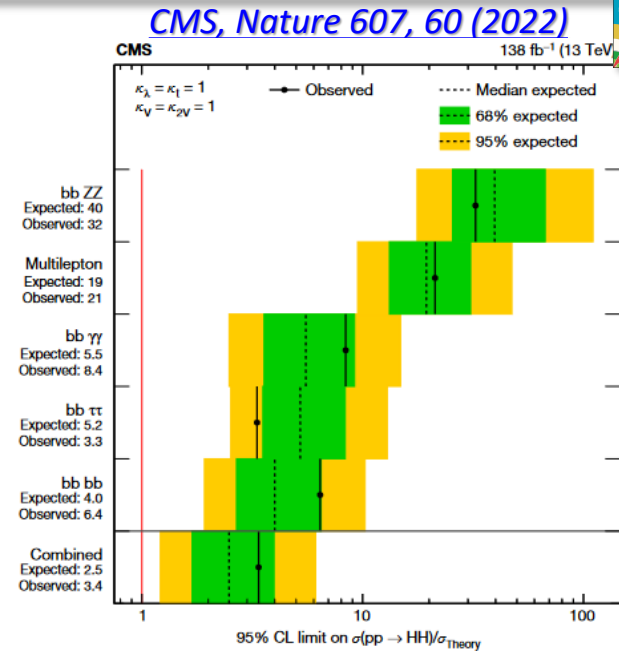
- 相対精度0.09%の精度！
- 系統誤差はほぼ e/γ のキャリブレーションに由来
 - 究極的には(統計が十分にあれば)4 μ が最も精度出るか

ダイヒッグス探索

■ ダイヒッグス探索の状況



$$-0.4 < \kappa_\lambda < 6.3 \text{ at } 95\% \text{ C.L.}$$



$$-1.24 < \kappa_\lambda < 6.49 \text{ at } 95\% \text{ C.L.}$$

- すべてのメインチャンネル($b\bar{b}b\bar{b}$, $b\bar{b}\tau\tau$, $b\bar{b}\gamma\gamma$)の解析が完了
 - 前回の結果(2015+16)と比べて統計量(x3.9)以上の改善
 - $\sigma/\sigma_{\text{SM}} < 10$ から < 2.9 に(期待値で比較、ATLASの場合)
- CMSは $b\bar{b}b\bar{b}$ が一番感度が良い
 - 一般に、 $b\bar{b}b\bar{b}$ は最も系統誤差の抑制が難しいチャンネル

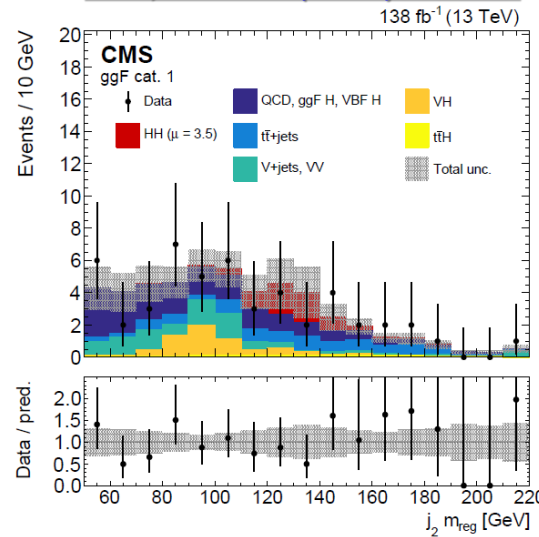
■ $HH \rightarrow bbbb$



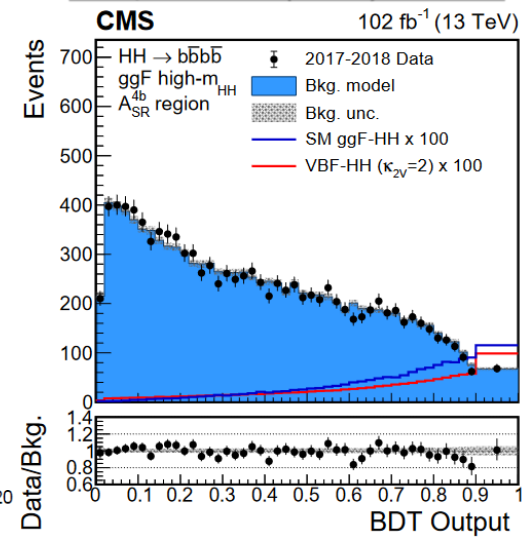
• CMSは、ブーストした $H \rightarrow bb$ を使った解析結果も出した

- GNNベースの $H \rightarrow bb$ タガーを使用
- SM信号は少ないが、バックグラウンドを劇的に抑制 + CMSの $H \rightarrow bb$ タガーの性能の良さから、良い感度が出た

[CMS, PRL 131 \(2023\) 041803](#)



[CMS, PRL 129 \(2022\) 081802](#)



• 結果の比較

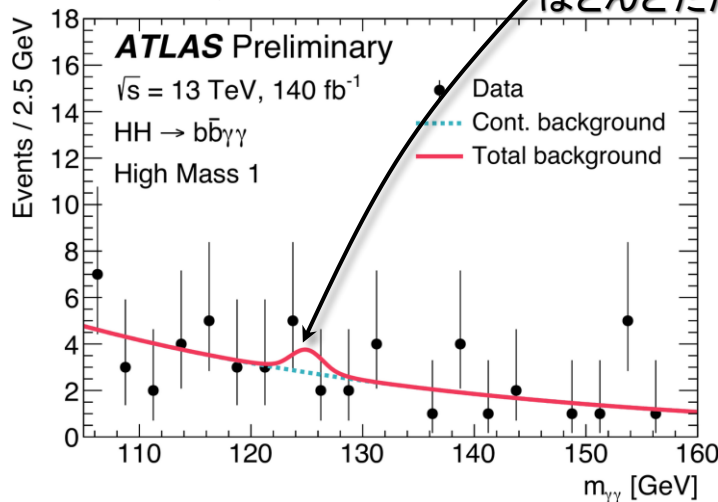
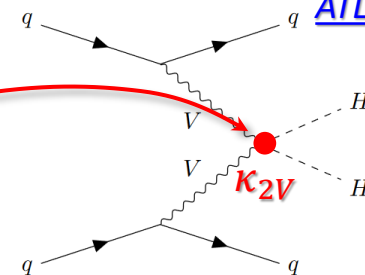
U.L. on σ/σ_{SM}	ATLAS	CMS
Resolved	< 5.4 obs. (8.1 exp.)	< 3.9 obs. (7.8 exp.)
Boosted		< 9.9 obs. (5.1 exp.)
Combined	< 5.4 obs. (8.1 exp.)	< 6.4 obs. (4.0 exp.)

- ブーストした $H \rightarrow bb$ を入れることで感度を伸ばせる

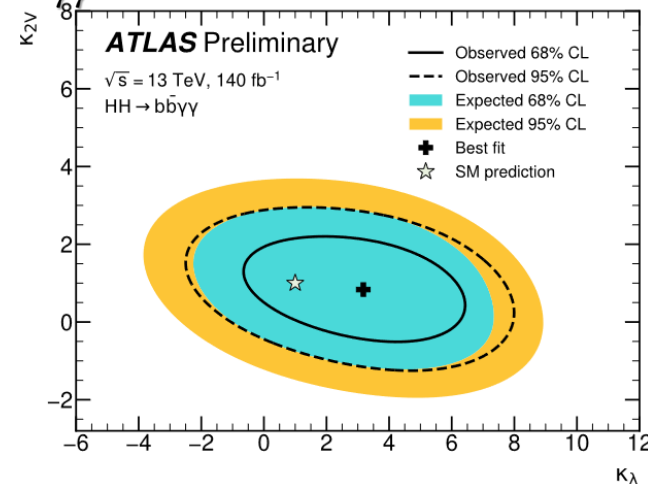
- $b\bar{b}\gamma\gamma$ のRun 2再解析結果をEPSで公表

- カテゴリーの細分化
- VBFジェットタガーを導入 $\rightarrow \kappa_{2V}$ を測る
- EFT interpretation

[ATLAS-CONF-2023-050](#)



ピークに見えるのは
ほとんどただの $H \rightarrow \gamma\gamma$



	前の解析	新しい結果
σ/σ_{SM}	< 4.2	< 4.0
κ_λ	[-1.5, 6.7]	[-1.4, 6.9]
κ_{2V}	-	[-0.5, 2.7]

- 生成断面積の上限値を5%更新 + κ_{2V} に対する制限

- κ_λ への制限が必ずしも改善していないのは、BDTの使い方を変えた影響で κ_λ に対するアクセプタンスが変わったため

Run 3 and beyond



↑
いまここ

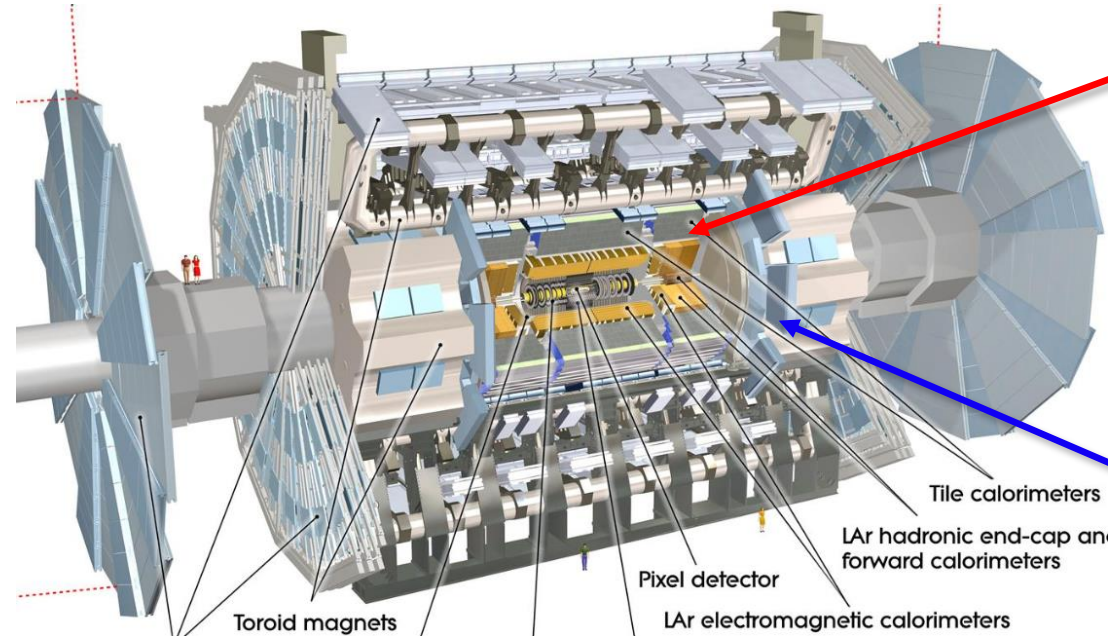
- 昨年7月からLHC Run 3が始まった Target: $\sim 300 \text{ fb}^{-1}$
 - 重心系エネルギー13.6 TeV (Run 2から0.6 TeVだけ上がった)
 - ピークルミノシティ $< 2 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
→ レベリングをして積分lumi.を稼ぐ
- 2029～: HL-LHC Target: $\sim 4000 \text{ fb}^{-1}$
 - 重心系エネルギー14 TeV
 - ピークルミノシティ $7.5 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

実はまだLHC全期間の5%程度しかデータを取っていない

(ハドロンコライダーでは、統計量の増加 = x が大きいパートン同士の衝突事象数の増加)

■ ATLASアップグレード: Phase-1

- Run 2からRun 3の間(2019-2021)に行ったアップグレード



カロリメータ

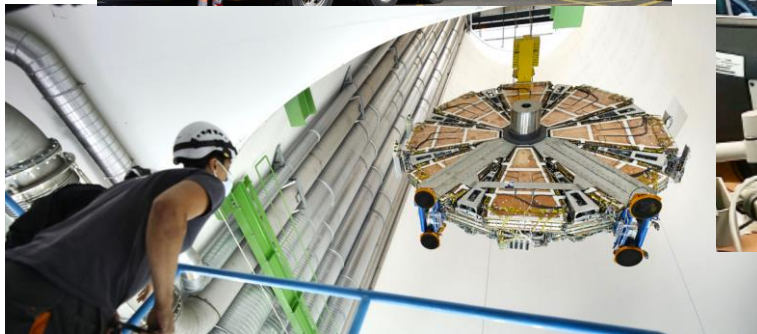
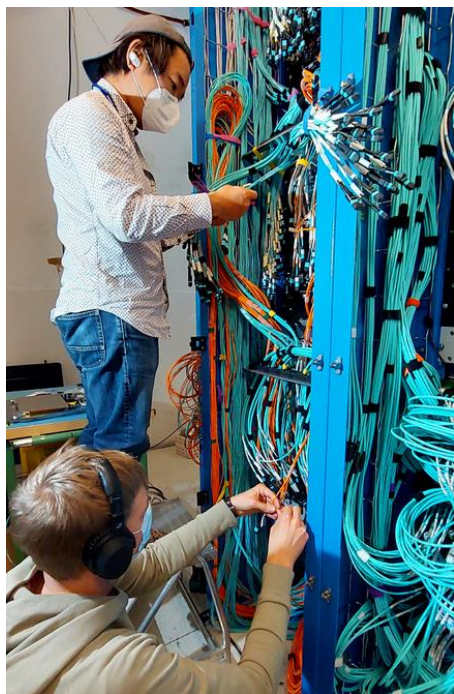
- 新しいL1トリガー回路により、エネルギー分解能を向上
- シャットダウン中に回路を総入れ替えした

ミュオン検出器

- エンドキャップ部内側 (Small Wheel) を刷新、16層でtrackingできるように
- バレル部の「穴」を埋めるように新しいRPCを配置
- 新しい検出器によるL1トリガー回路を実装

- 新しいハードウェアは無事すべてRun 3開始前に実装完了

■ Phase-1アップグレード



Calo: [ATLAS Briefing 25 Jan 2022](#)

NSW: [ATLAS News 4 Nov 2021](#)



- カロリメータ&ミュオントリガーを刷新
- 日本グループ也大活躍
 - カロリメータのボード総取り換え(1524枚！)
 - 新しいミュオントリガーの構築、コミッショニングなど

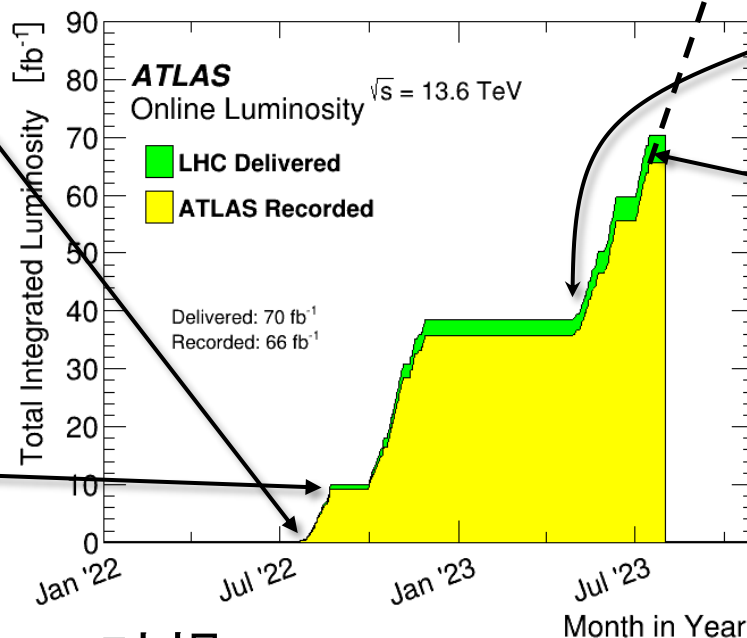
Run 3の状況

- 2022年7月5日にデータ収集を開始



Run 3開始!

LHCの冷却器の問題で
4週間停止



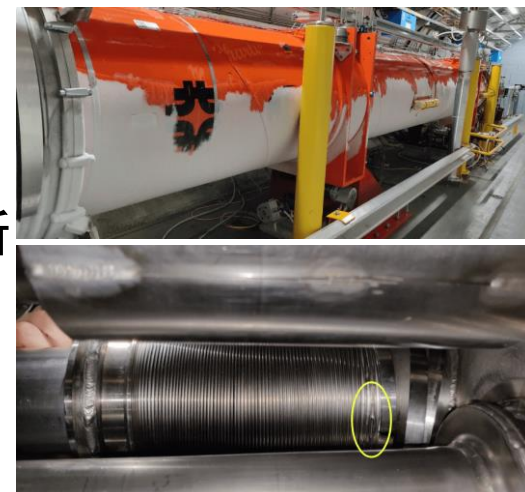
← 本当はこのぐらい行きたかった...

Phase-1アップグレードした
トリガーを本格的に使用開始

7/17のクエンチ時にinner triplet
(3連のQマグネット)で断熱真空
にヘリウムが漏れ出す事故
→ 修理は完了したが、再開に
4週間(9月中旬)

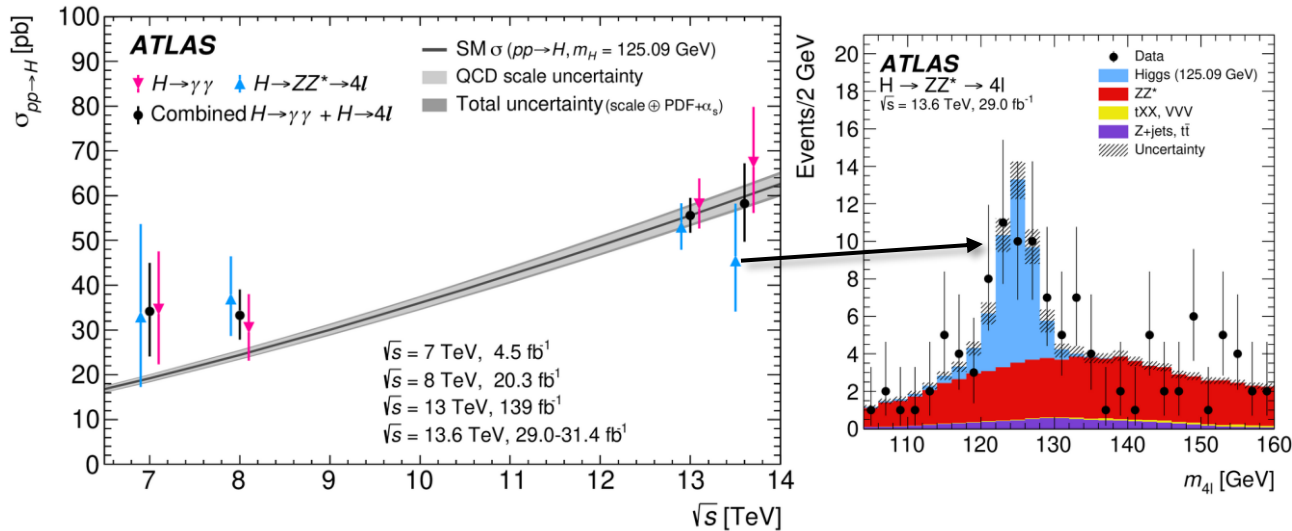
↓
今年のppランは終わり
(10月は重イオンラン)

- LHCのinner triplet破損 詳細は[CERN News 11 Aug 2023](https://cern.ch/cern/news/11-aug-2023)
 - 7/17の電圧変動でクエンチした際、ヘリウムが断熱真空に漏れた(外気には漏出してない)
 - Qマグネット間をつなぐベローズ部に2 mmの破断を発見、修理
 - 現在、低温に戻す作業中(4週間かかる)
→ 合計6週間のロス



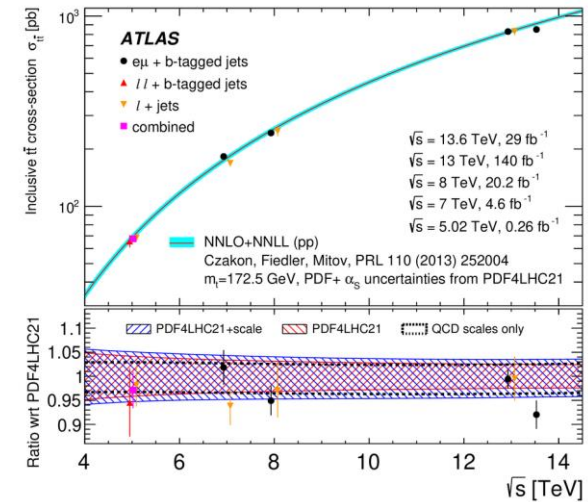
Run 3の結果

ヒッグス @ 13.6 TeV



[ATLAS, arXiv:2306.11379](https://arxiv.org/abs/2306.11379)

トップ @ 13.6 TeV



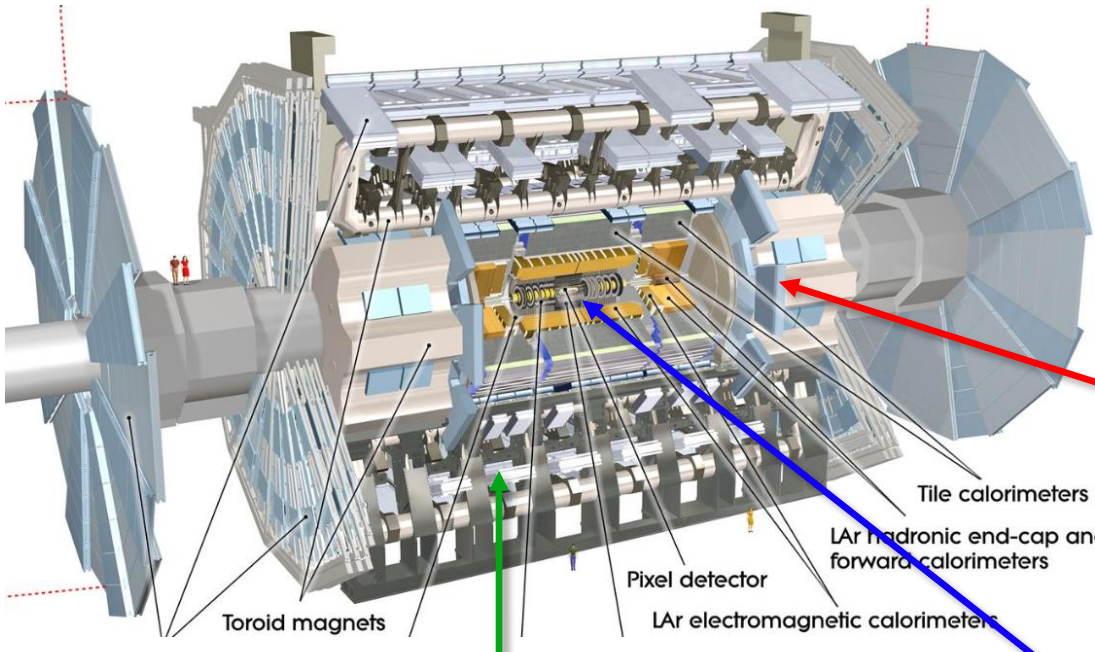
[ATLAS, arXiv:2308.09529](https://arxiv.org/abs/2308.09529)

- Run 3での結果も出始めている
 - まずはいろいろな過程の13.6 TeVでの断面積測定から
- 今年末までに約 ~~100 fb⁻¹~~ = ~~Run 2 (140 fb⁻¹)~~ と大体コンパラ
 60 fb⁻¹
 → 来年からが本番！

GNNベースのb-tagやDeepSetを使ったTau IDの開発が進んでいるので、Run 2再解析+Run 3で始めるか...？

■ ATLASアップグレード: Phase-2

- Run 3の後(2026-2028)に行うアップグレード



トリガー・DAQ回路

- 新しいスキームに刷新

High Granularity Timing Detector

- エンドキャップ部に時間分解能を持ったシリコン検出器(LGAD)を導入
- 飛跡のタイミングを $\sigma_t \sim 30$ psで捕え、前方飛跡の衝突点同定精度を上げる

ミュオン検出器

- バレル部の「穴」を埋めるように新しいRPCを配置 → アクセプタンス($|\eta| < 2.7$)を75% → 95%に改善
- ミュオントリガー回路を刷新

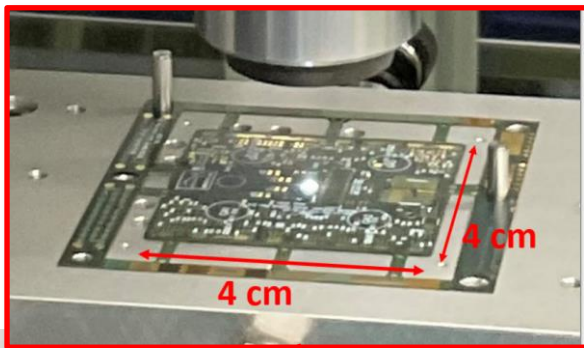
- 各コンポーネントの基礎開発から量産のフェーズに入りつつある

シリコン検出器(ITk)

- シリコン+ガスだったのを、総シリコン製のものに置換
- $|\eta| < 2.5$ から $|\eta| < 4.0$ までアクセプタンスを拡大 → 前方ジェットに飛跡を付随させ、vertexの特定を可能に

HL-LHCに向けて

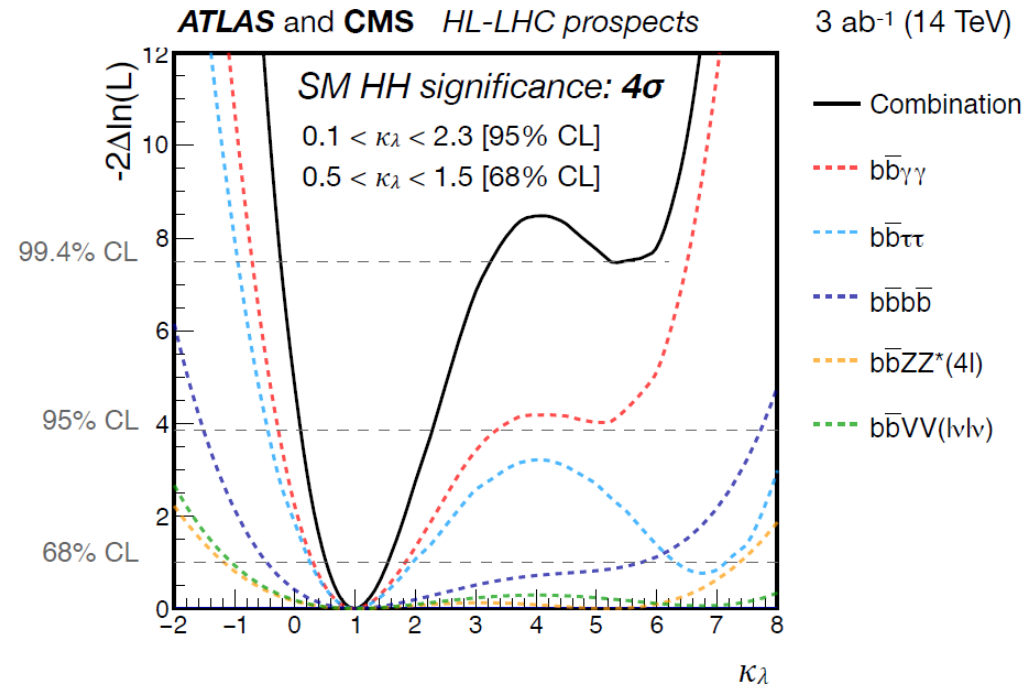
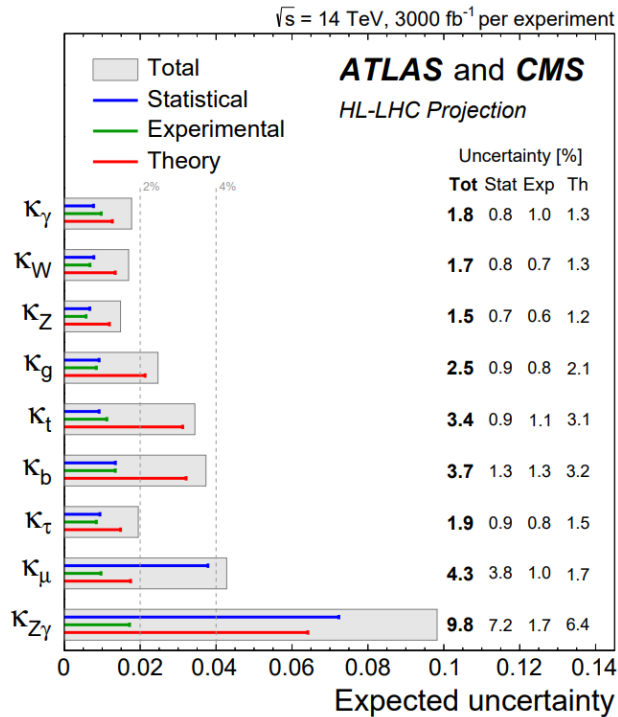
- いよいよ量産の準備が進行中！



↑KEK富士実験棟クリーンルームでの作業
REPIC館山工場のITkピクセルモジュール量産現場→

HL-LHCでのヒッグス結合測定

[CERN Yellow Report \(2018\)](#)



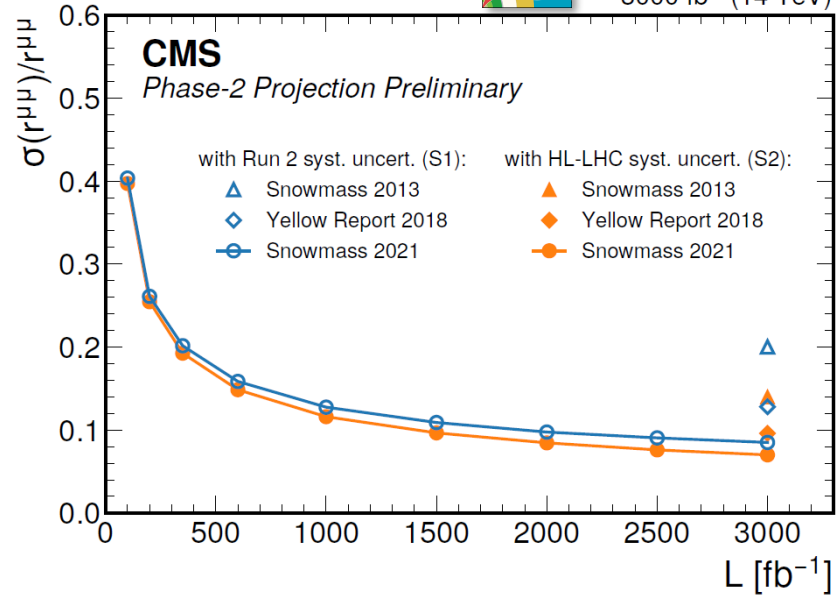
- Run 2の解析結果をもとに、統計・系統誤差をスケールしてHL-LHCでの測定精度を見積もり
 - (多くの場合)フルシミュレーションではない → 新しい検出器の性能を考慮していない
 - 系統誤差の取り扱いには仮定が入っている
 - Snowmass 2022のため、昨年ATLAS、CMSともにアップデートがあった

HL-LHCでの第二世代結合の測定

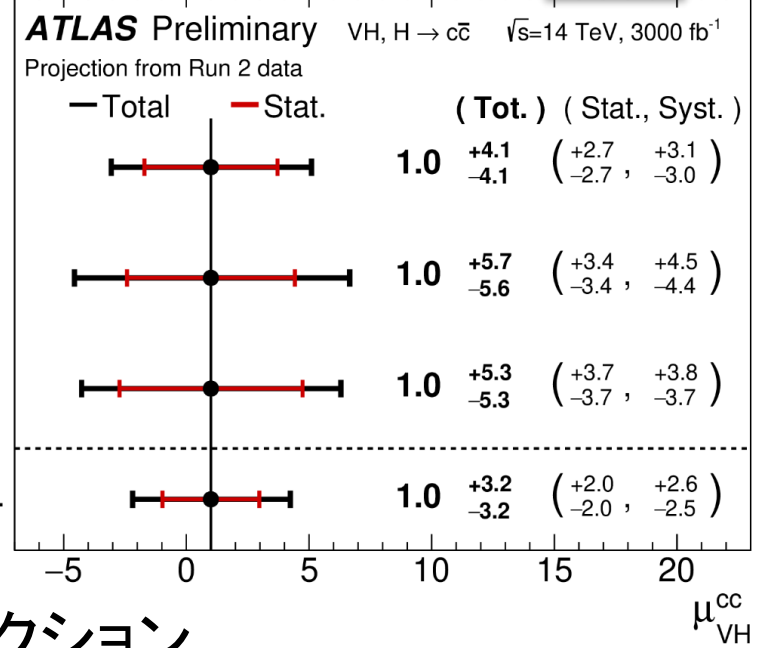
CMS-PAS-FTR-21-006



3000 fb⁻¹ (14 TeV)



ATLAS-PHYS-PUB-2021-039










- CMSにおける $H \rightarrow \mu\mu$ のプロジェクト
 – トラッカーの分解能向上とミュオン検出器のアクセプタンス向上の効果を検討した見積もり
- Hcc 結合の直接探索 (Snowmass 2022で初めて入った)

	ATLAS	CMS
κ_μ	7.7%	3.5% (YR18では5.0%)
$ \kappa_c $	< 3.0	< 3.4

→ ATLASの結果はYR18からアップデートされていない

■ HL-LHCでのself coupling測定

 ATLAS EXPERIMENT	2018 [1]	Latest (2022)
$HH \rightarrow b\bar{b}b\bar{b}$	0.61σ	1.0σ [4]
$HH \rightarrow b\bar{b}\tau\tau$	2.1σ	2.8σ [2]
$HH \rightarrow b\bar{b}\gamma\gamma$	2.0σ	2.2σ [3]
All combined	3.0σ	3.4σ [4]

	2018 [1]	Latest (2022)
$HH \rightarrow b\bar{b}b\bar{b}$	0.95σ	
$HH \rightarrow b\bar{b}\tau\tau$	1.4σ	
$HH \rightarrow b\bar{b}\gamma\gamma$	1.8σ	2.16σ [2]
$HH \rightarrow b\bar{b}WW^*$	0.56σ	
$HH \rightarrow b\bar{b}ZZ^*$	0.37σ	
All combined	2.6σ	

$$0.5 < \kappa_\lambda < 1.6$$

(68% C.L.)

Boosted bbを取り入れればさらに伸びる？

- [1] [ATL-PHYS-PUB-2018-053](#)
- [2] [ATL-PHYS-PUB-2021-044](#)
- [3] [ATL-PHYS-PUB-2022-001](#)
- [4] [ATL-PHYS-PUB-2022-053](#)

$$0.35 < \kappa_\lambda < 1.9$$

(68% C.L.)

- [1] [CMS-FTR-18-019](#)
- [2] [CMS-FTR-21-004](#)

- YR18では、ATLAS+CMSで 4.0σ ($0.52 < \kappa_\lambda < 1.5$)と予想されていた
- その後、Run 2解析で様々な改善があった
 - 最新の見積もりでは、YR18に比べて10%以上の改善(ATLAS)

ATLAS+CMSでHHの観測は、HL-LHCの再重要課題の1つ

■ まとめ

- LHC-ATLAS実験では(CMSも)、これまでに 10^7 ヒッグス粒子に相当するデータを得た
 - Run 2において、主要な生成・崩壊過程をすべて観測
 - 「ヒッグスを精密測定」する時代に
- Run2、Run 3のデータを使った物理結果も続々と公表中
 - LHCP、Lepton Photon、EPSなどの春～夏の国際会議で、ヒッグス関係の新結果がたくさん出た
- 実験の状況
 - Run 3: 加速器のトラブルなどがありつつ、順調にデータ収集中
 - HL-LHC: アップグレードのための検出器や読み出しボードの量産が始まりつつあるところ
 - まずはこれが成功しなきゃHL-LHCで意味のある研究はできない！
(検出器をつくってスイッチを押せばデータがじゃんじゃんでてくるわけではない)

Run 3～HL-LHCで、ヒッグスに対する理解が加速的に進展するはず
(Run 3結果も本格的に出始めるはずですので、ご期待ください)