LHC ATLAS実験における ヒッグス対生成過程探索の 現状と最新結果

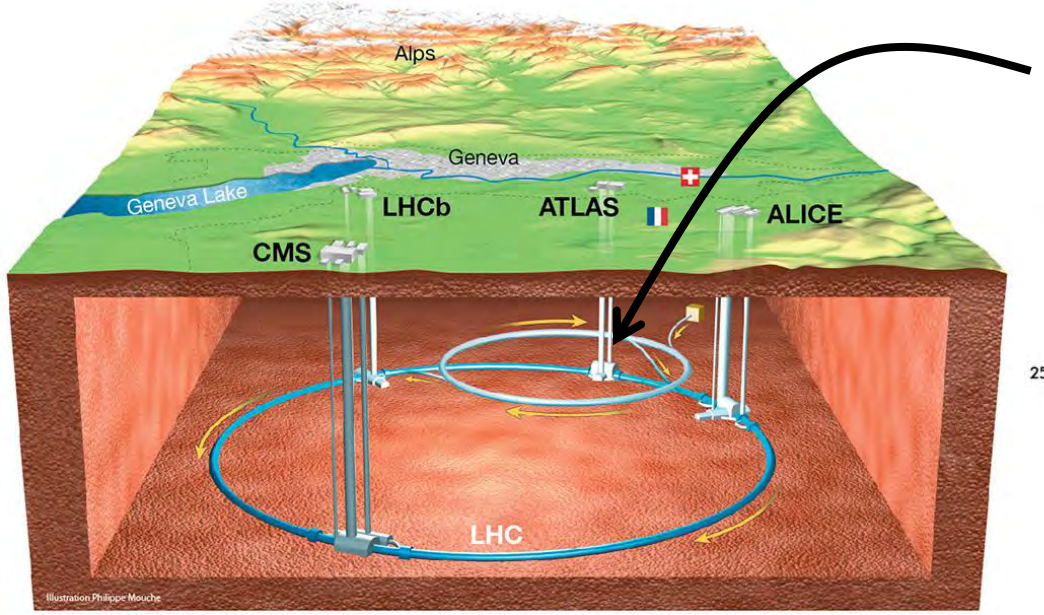
北 彩友海 (素粒子実験研究室)

筑波大学
University of Tsukuba

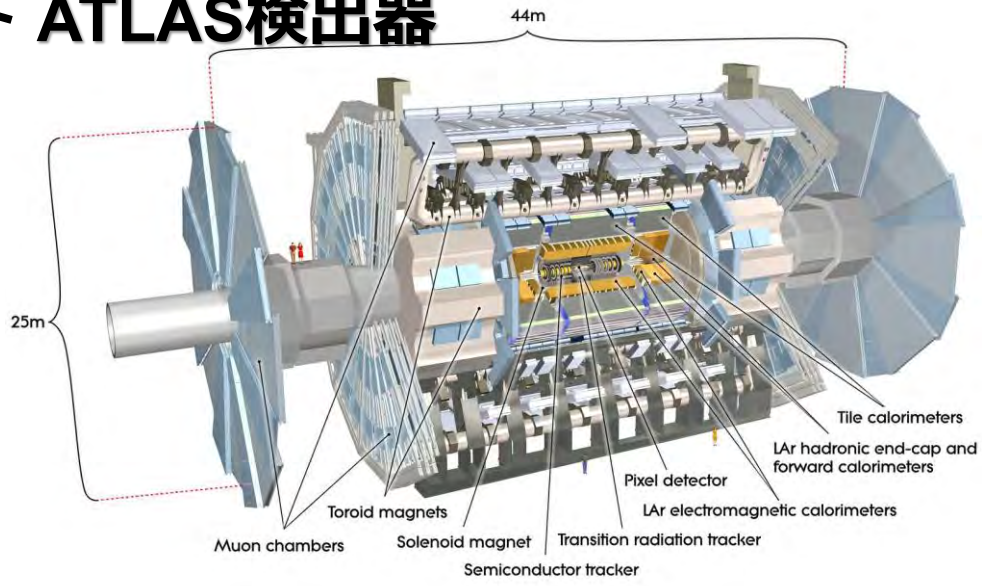
2025/07/08
宇宙史研究センター2025年度第1回構成員会議・成果報告&交流会

ヒッグス粒子とLHC-ATLAS実験

- ヒッグス粒子
  - LHC実験で2012年に発見
  - 質量起源にかかわる標準模型粒子
- ATLAS実験
  - 陽子-陽子衝突型加速器LHCの衝突点のひとつに設置
  - 重心系エネルギー：13 TeV (Run2 : 2015~2018)、13.6 TeV (Run3 : 2022~)



ATLAS検出器

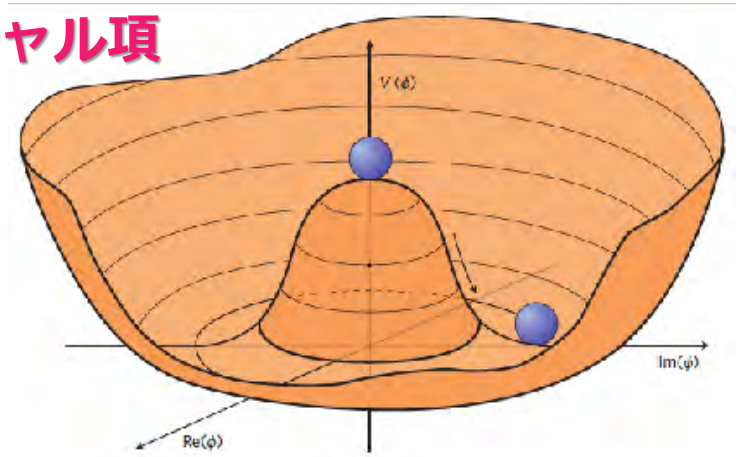


飛跡検出器、
カロリメータ、
ミューオン
検出器などから
なる汎用型
検出器

ヒッグスポテンシャルと三点結合

ヒッグス場がかかわる標準模型のラグランジアン

$$L_{\mathrm{Higgs}} = \underbrace{(D_\mu\phi)^\dagger(D^\mu\phi)}_{\text{運動項}} + \underbrace{\bar{\psi}_{\mathrm{L}}\mathrm{Y}\phi\psi_R}_{\text{湯川相互作用項}} - \underbrace{V(\phi)}_{\text{ポテンシャル項}}$$



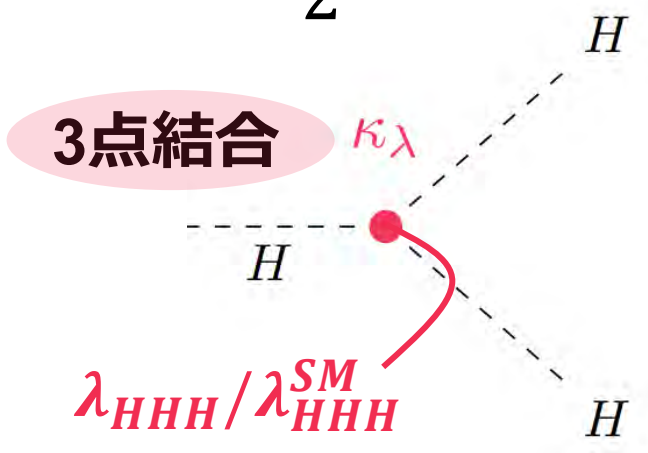
標準模型でのヒッグスポテンシャル

$$V(\phi) = -\mu^2\phi^2 + \lambda\phi^4$$

真空期待値vの周りで展開

$$V(h) = \frac{1}{2}m_H^2h^2 + \boldsymbol{\lambda_{HHH}}vh^3 + \cdots$$

ヒッグスポテンシャルの**形を決定**



- 標準理論では一意に定まる → $\lambda_{HHH}^{SM} = \frac{m_H^2}{2v^2} \approx 0.13$
- 新物理の寄与で$\lambda_{HHH}^{SM} = 0.13$から大きくずれうる

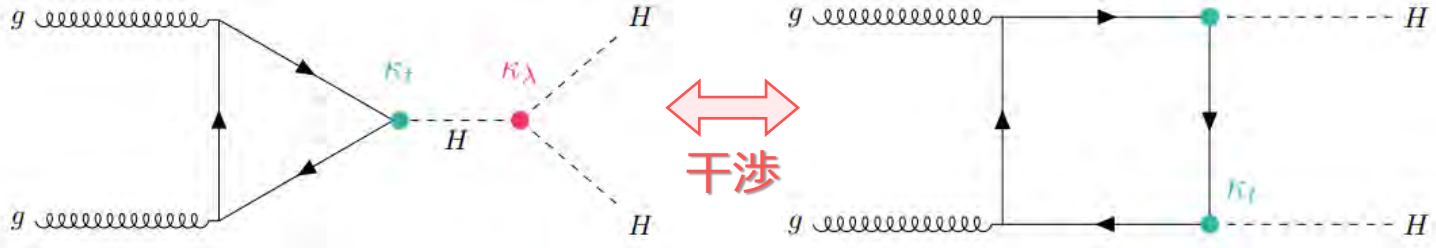
真空の解明のためにはヒッグス3点結合定数λ_{HHH}の測定が重要

ヒッグス3点結合の生成モード

ATLAS実験での主な探索対象

Gluon-gluon fusion (ggF)

$\sigma_{ggF}^{SM} = 30.77^{+6\%}_{-23\%}(\text{scale} + m_{\text{top}}) \pm 2.3\%\ (\text{PDF} + \alpha_s)$ fb



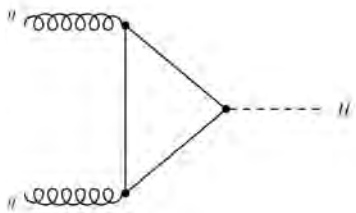
κ_λ に感度あり

4308 個生成

(ATLAS Run 2 140 fb^{-1})

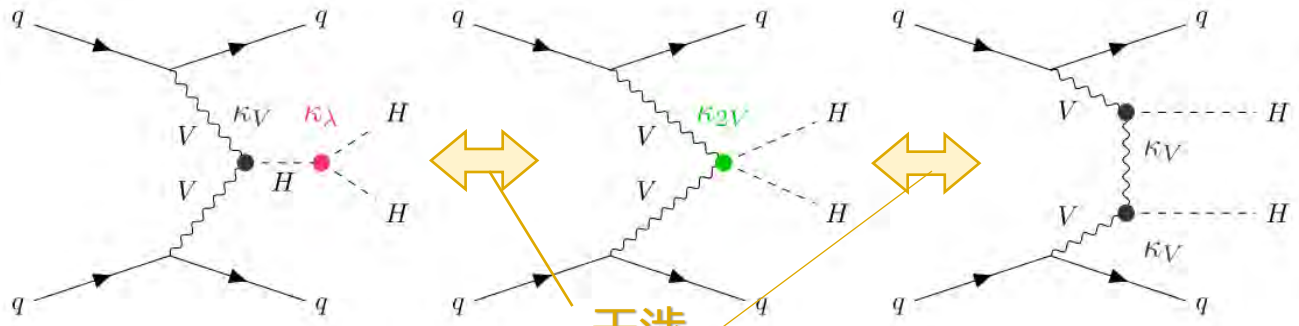
単一ヒッグス生成の1/1000以下

ggFによる単一ヒッグス生成 = **68万**個



Vector boson fusion (VBF)

$\sigma_{VBF}^{SM} = 1.687^{+0.04\%}_{-0.05\%}(\text{scale}) \pm 2.7\%\ (\text{PDF} + \alpha_s)$ fb

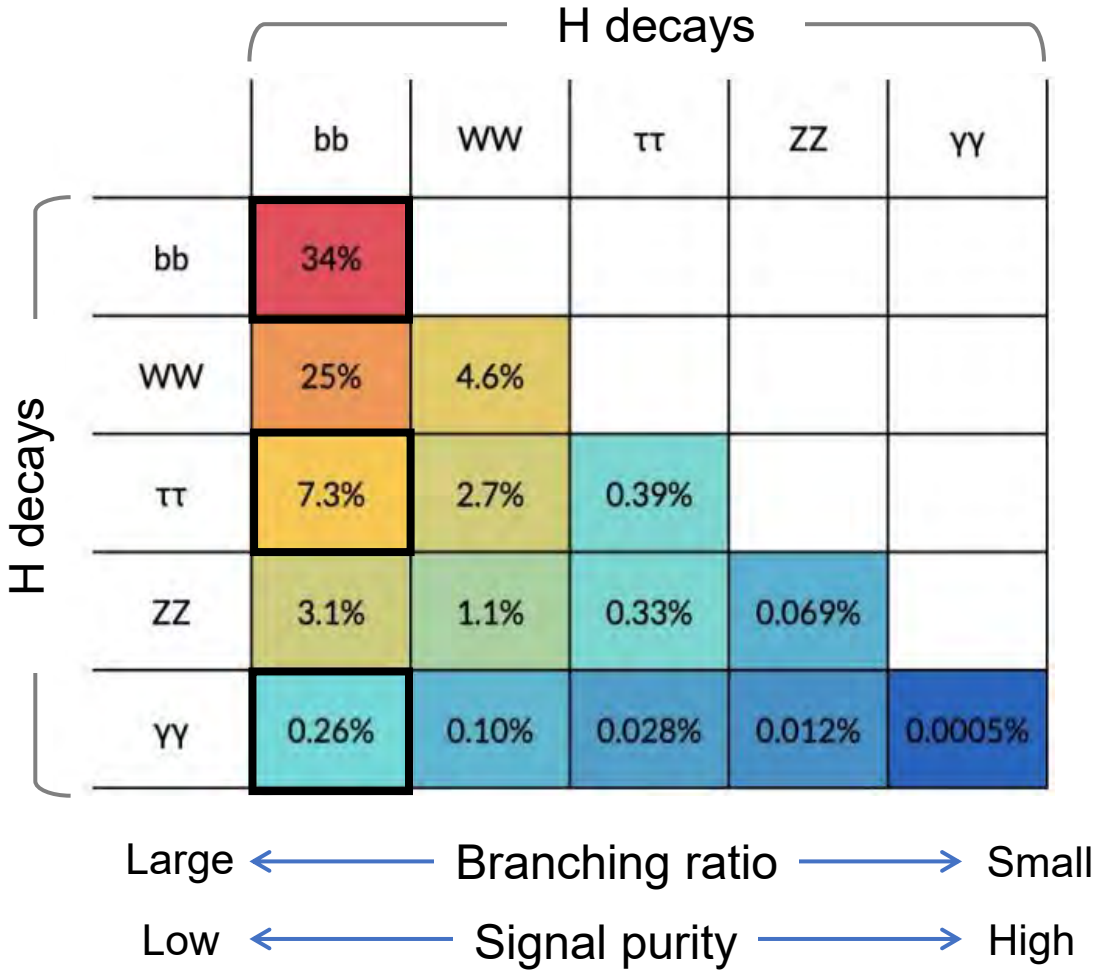


κ_{2V} に感度あり

<u>HH生成は稀事象</u>

崩壊モード

Higgs粒子は各崩壊分岐比で様々な粒子に崩壊



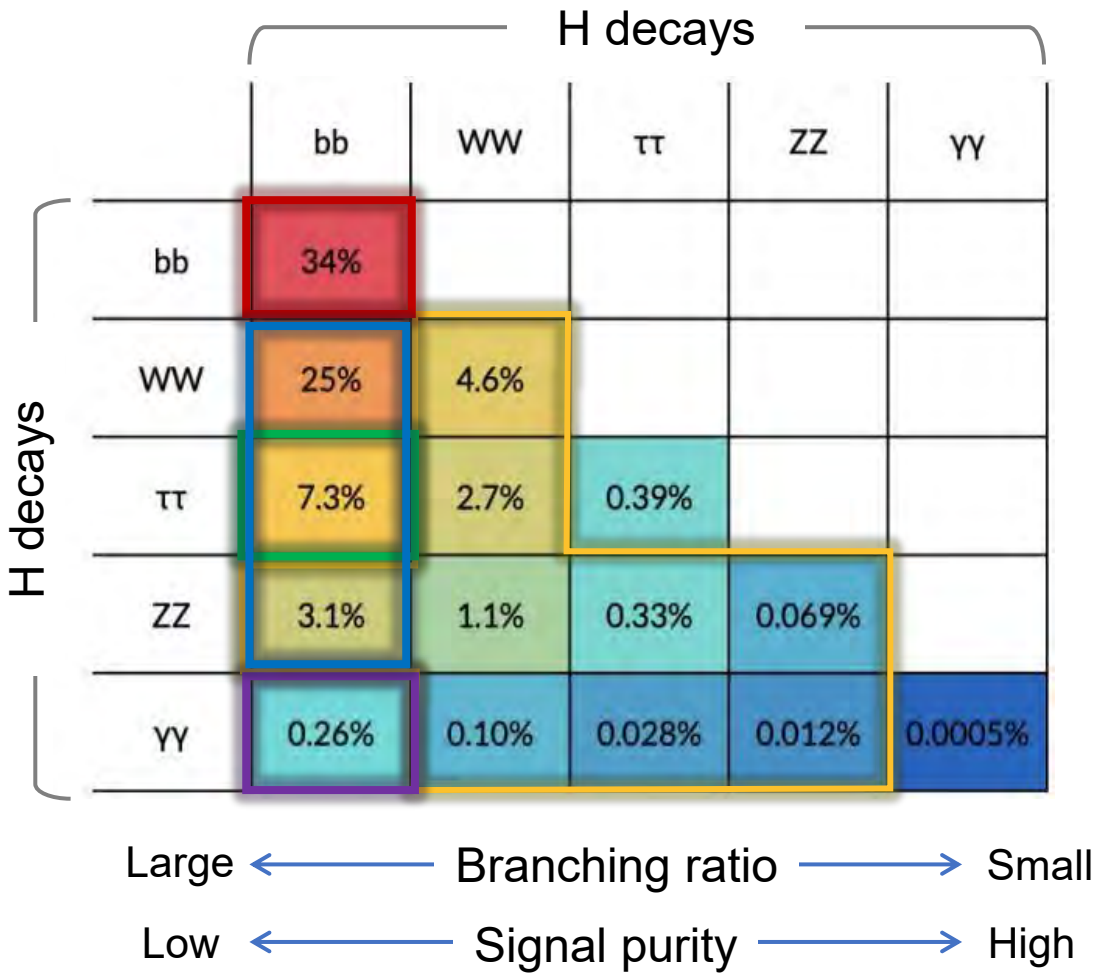
HH生成は稀事象 x 崩壊チャンネルが多様
＝事象探索は挑戦的

基本的な戦略
：$H \to b\bar{b}$で統計を稼ぐ+背景事象の量を考慮

- $HH \to b\bar{b}b\bar{b}$
  崩壊分岐比最大＋背景事象莫大
- $HH \to b\bar{b}\tau\bar{\tau}$
  $b\bar{b}b\bar{b}$終状態と$b\bar{b}\gamma\gamma$終状態のいいとこ取り
- $HH \to b\bar{b}\gamma\gamma$
  崩壊分岐比小、光子の再構成分解能高

ATLAS実験でのHH探索現状

5種類の終状態のチャンネルでの解析がdone/ongoing



Run 2 解析 (2015-2018 data) **Published**

Channel	Result
$HH \to b\bar{b}b\bar{b}$	PRD 108 (2023) 052003 (126 fb^{-1}) PLB 858 (2024) 139007
$HH \to b\bar{b}\tau\bar{\tau}$	PRD 110 (2024) 032012
$HH \to b\bar{b}\gamma\gamma$	JHEP 01 (2024) 066
$HH \to Multilepton$	JHEP 08 (2024) 164
$HH \to b\bar{b}ll + E_T^{miss}$	JHEP 02 (2024) 037
Combination (Run 2)	PRL 133 (2024) 101801

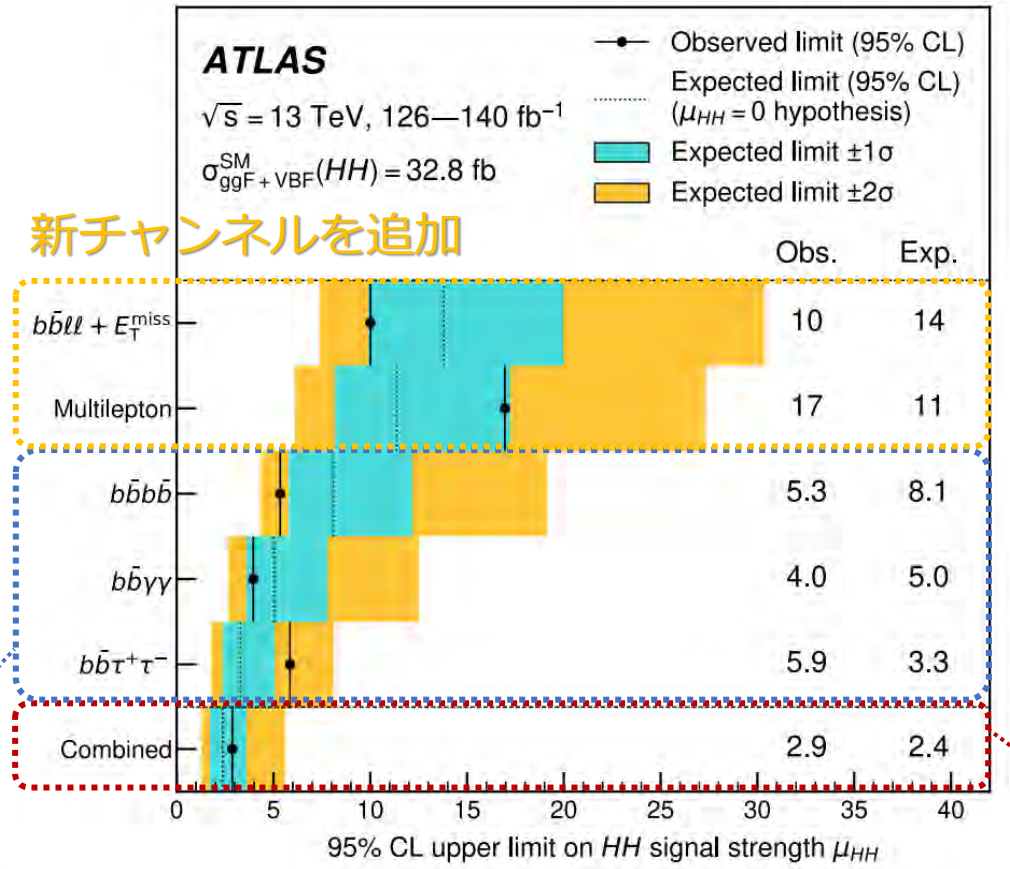
Run 2 + partial Run 3 解析 (2015-2018, 2022～ data)

- 様々なチャンネルがongoing
- $HH \to b\bar{b}\gamma\gamma$チャンネルが結果を公表
  arXiv: 2507.03495 (2022—2024 data)

Run 2 解析のまとめ

PRL 133 (2024) 101801
Updated result in Sep. 2024

信号ゼロ仮定に対しての上限

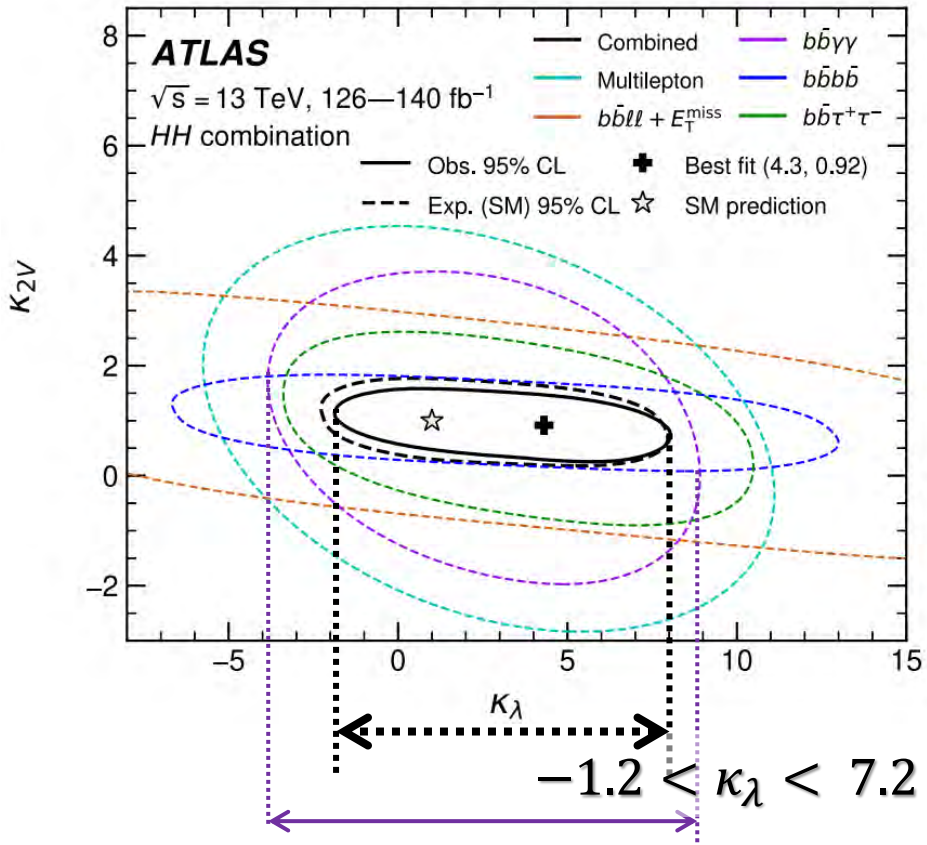


新チャンネルを追加

既存チャンネルの解析update

信号量ゼロ仮定に対して2.9倍の制限

κ_λ, κ_{2V}に対しての制限 (Run 2データ, 2015-2018)



$-1.2 < \kappa_\lambda < 7.2$ (obs.)

$b\bar{b}\gamma\gamma$終状態は特にκ_λに対して感度が高い

Contents

0. Introduction

1. Run 2 解析のまとめ

2. Run 2 + partial Run 3 解析の最新結果: $HH \to b\bar{b}\gamma\gamma$

3. Run 3以降 (HL-LHC) での感度見積もり

Contents

0. Introduction

1. Run 2 解析のまとめ

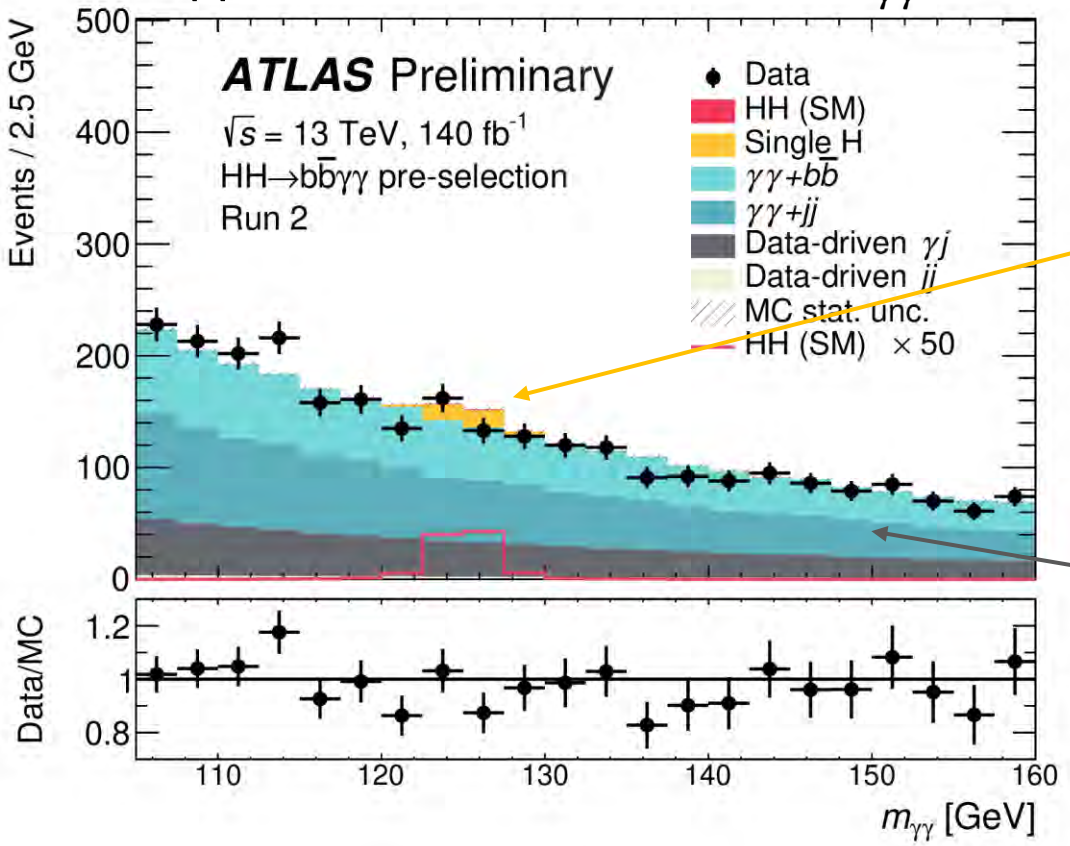
2. **Run 2 + partial Run 3 解析の最新結果: $HH \to b\bar{b}\gamma\gamma$**

3. Run 3以降 (HL-LHC) での感度見積もり

$b\bar{b}\gamma\gamma$終状態について

- 崩壊分岐比: 0.26% (Run 2データで11個)
- 光子対の再構成分解能が高い → 背景事象からの分離が(比較的)容易

$b\bar{b}\gamma\gamma$終状態を要求したときの$m_{\gamma\gamma}$分布



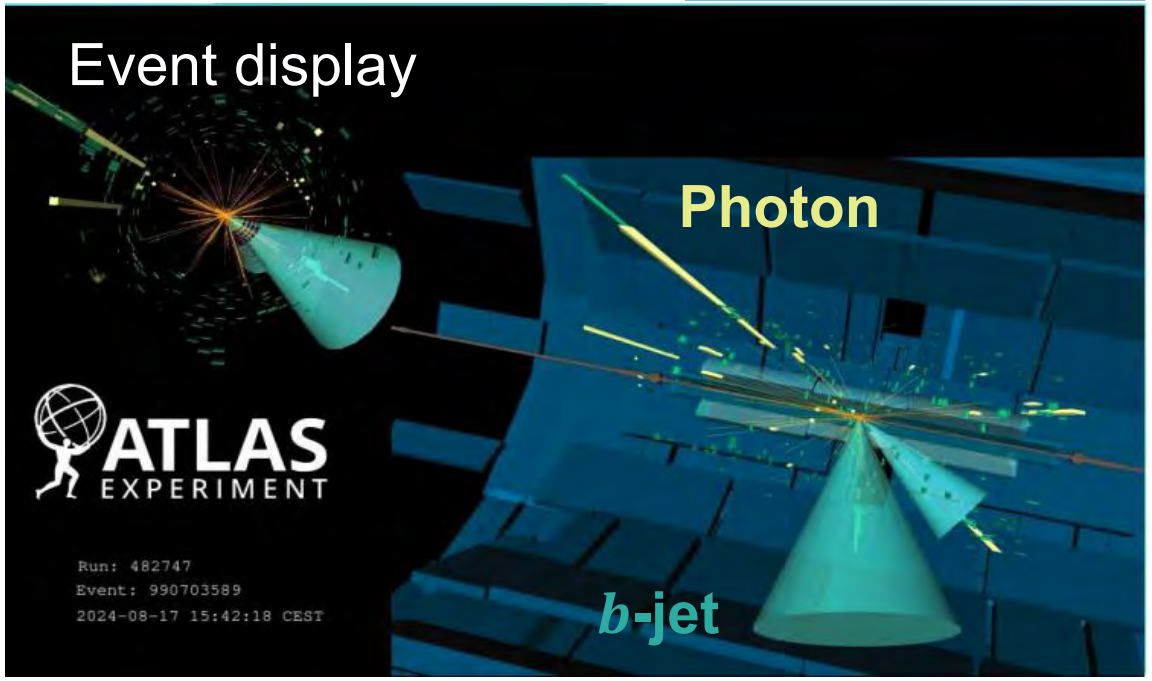
2種類の背景事象

主な背景事象1
光子対に崩壊する単一ヒッグス事象
(**single Higgs**)

主な背景事象2
偶発的に生じた光子とQCD過程で
生成されたジェット(**$\gamma\gamma$+jets**)

データ取得と物理オブジェクトの再構成

- トリガー：Di-photon trigger, $p_T^{\gamma 1} > 35$ GeV && $p_T^{\gamma 2} > 25$ GeV
- 物理オブジェクト　ATLAS-CONF-2025-005



光子(photon)

- Tight ID in $|\eta| < 1.37, 1.52 < |\eta| < 2.37$
- $|topoEtCone20/p_T| < 0.065$ && $|topoCone20/p_T| < 0.05$

ジェット

ParticleFlow アルゴリズムによってジェットを同定

- B-tagging: Transformer “GN2”
- VBF jets selection: m_{jj}が最大の組み合わせ

Lepton (mu, electron)

- $|\eta| < 1.37, 1.52 < |\eta| < 2.37$ for e, < 2.5 for mu
- $p_T > 10$ GeV
- Medium ID
- Loose isolation

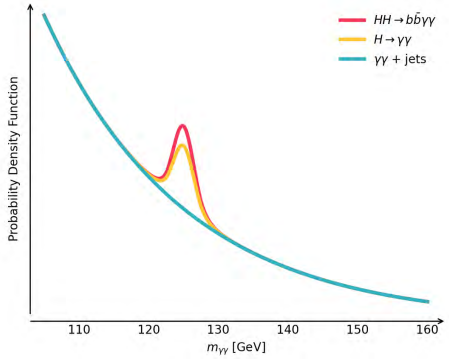
本解析の戦略と前回からの改善

取得データ

事象選別

BDTによる信号・背景事象の分離
fit領域の設定

$m_{\gamma\gamma}$分布を信号＋背景事象でfit



Run 3 data (2022-2024)の追加

NEW

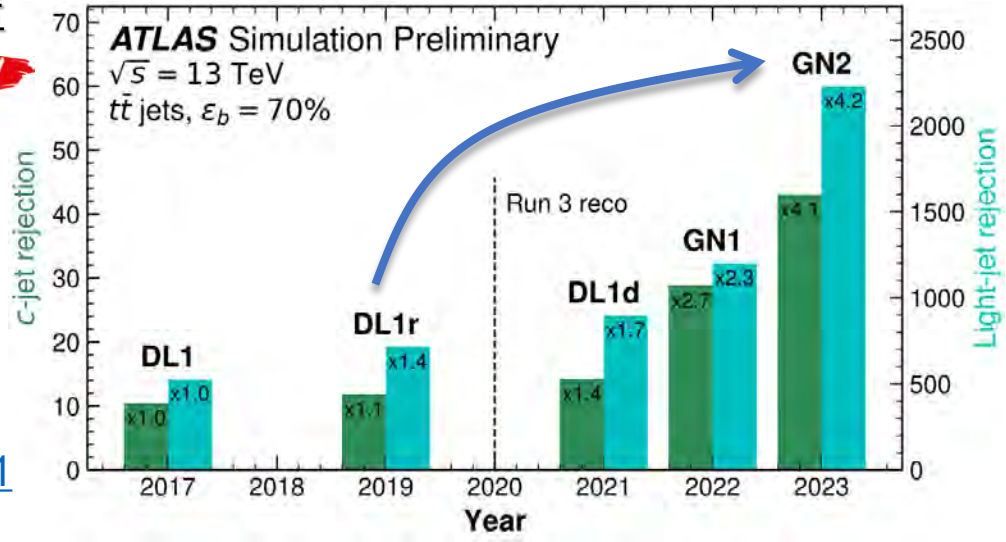
	Run 2	Run 3
ggF(VBF) cross section	30.77 (1.68) fb	**34.13 (1.87) fb**
Data	140 fb^{-1}	**168 fb^{-1}**
Expected number of ggF (VBF) → $b\bar{b}\gamma\gamma$ signals	11.2 (0.61)	12.4 (0.68)

b-ジェットタグの改善

NEW

- DL1r → GN2 (based on a neural network)
- Light-jet rejectionが約3倍

ATLAS-FTAG-2023-01



本解析の戦略と前回からの改善

取得データ

↓

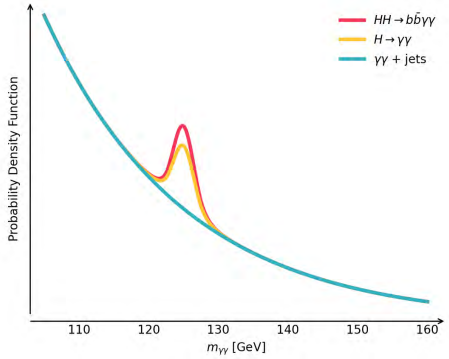
事象選別

↓

BDTによる信号・背景事象の分離
fit領域の設定

↓

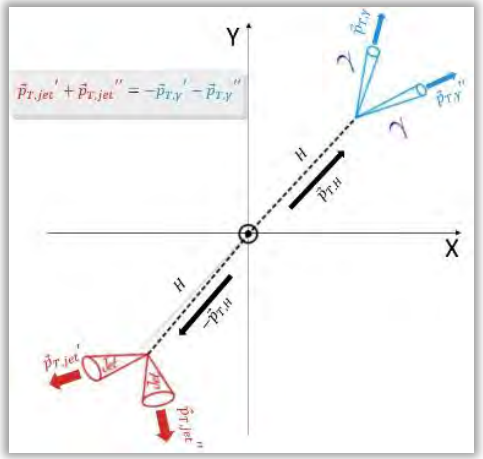
$m_{\gamma\gamma}$分布を信号＋背景事象でfit

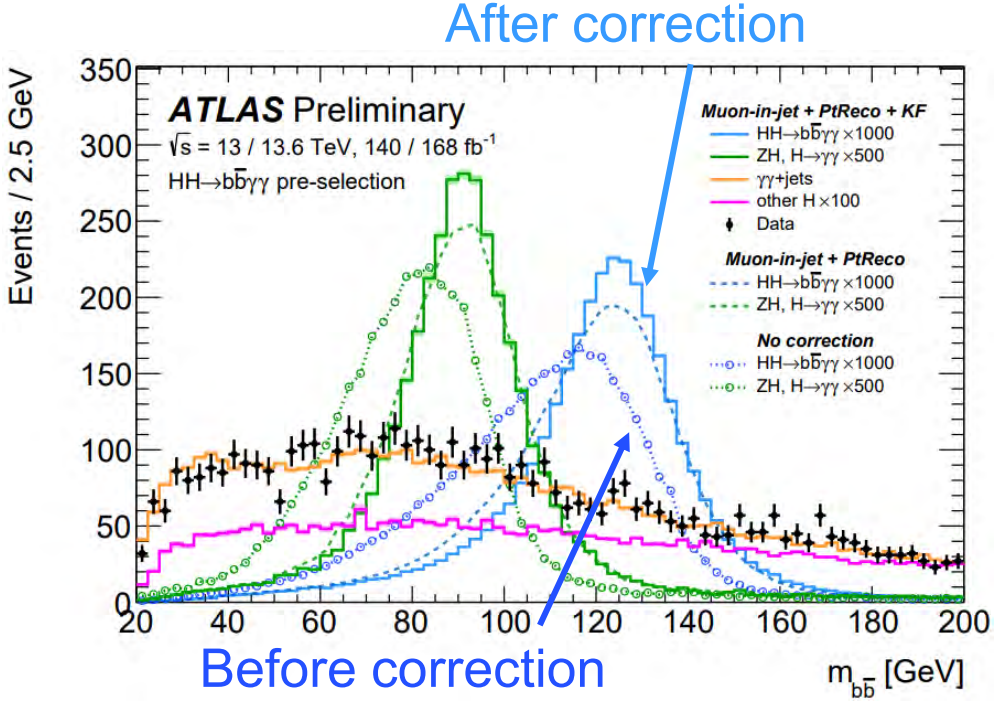


Kinematic fit algorithmの導入 NEW

b-ジェットのkinematicsを光子の再構成結果から予測

$$\vec{p}_{T_{jet1}} + \vec{p}_{T_{jet2}} = -\vec{p}_{T_{\gamma 1}} - \vec{p}_{T_{\gamma 2}}$$





m_{bb}の分解能17%向上

事象選別

以下の選別条件をPassしたものを解析に使う

$H \to \gamma\gamma$ 選別条件

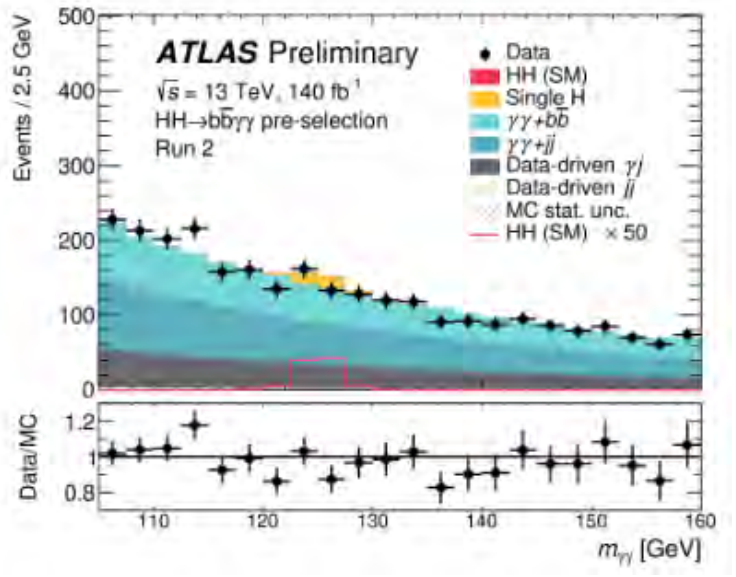
- Diphoton trigger p_T > 35, 25 GeV
- 2 Tight & Isolated photons
- $p_T^{\gamma 1}(p_T^{\gamma 2})$ / $m_{\gamma\gamma}$ > 0.35 (0.25)
- $m_{\gamma\gamma}$ = [105, 160] GeV

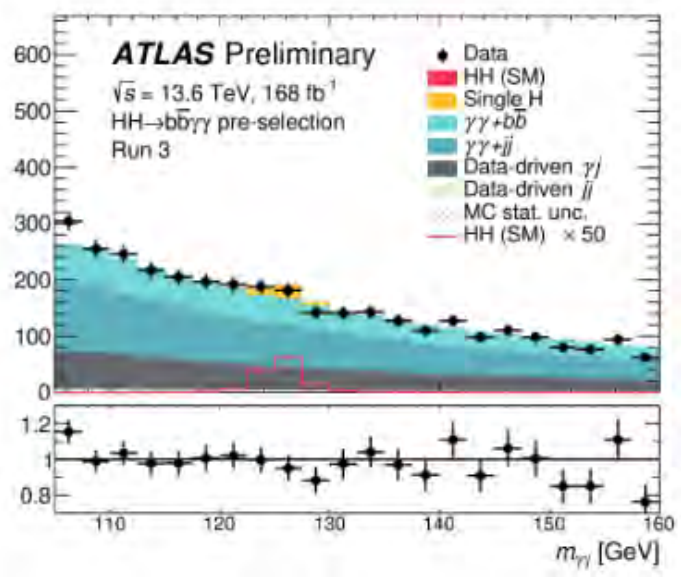
$H \to bb$ 選別条件

- bジェットが2本以上
- NEW @ GN2 bジェット85%効率の閾値

single Higgs (ttH) 背景事象の削減

- レプトン0本
- η < 2.5のジェット6本未満

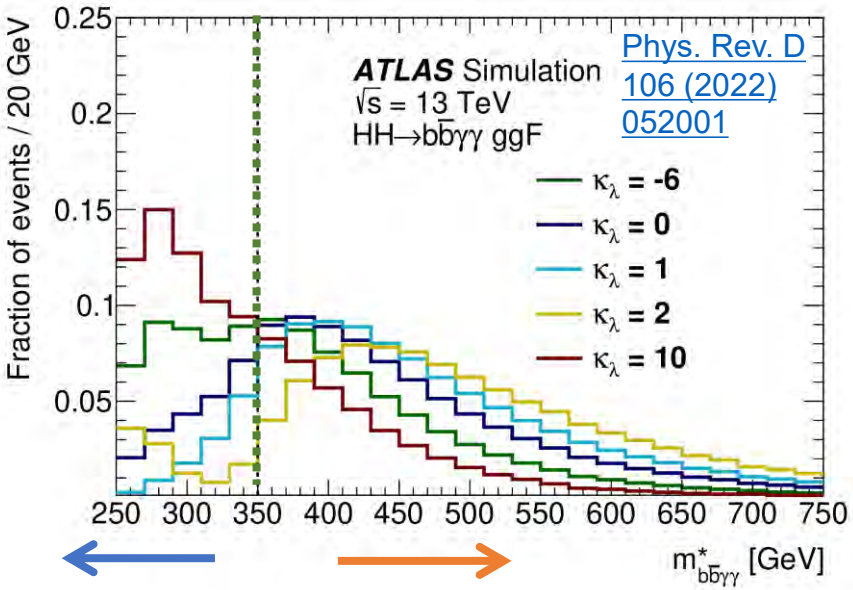




Run 2, Run 3のデータともにシミュレーションサンプルと分布が一致

BDTによる解析領域の分割

2種類のBDT(XGBoost)を訓練 ($m^*_{b\bar{b}\gamma\gamma}$ = 350 GeVで領域を分割)



Low mass region
BSMサンプルに感度あり

- ggFHH (kl=5, 10)
- VBFHH (BSM)

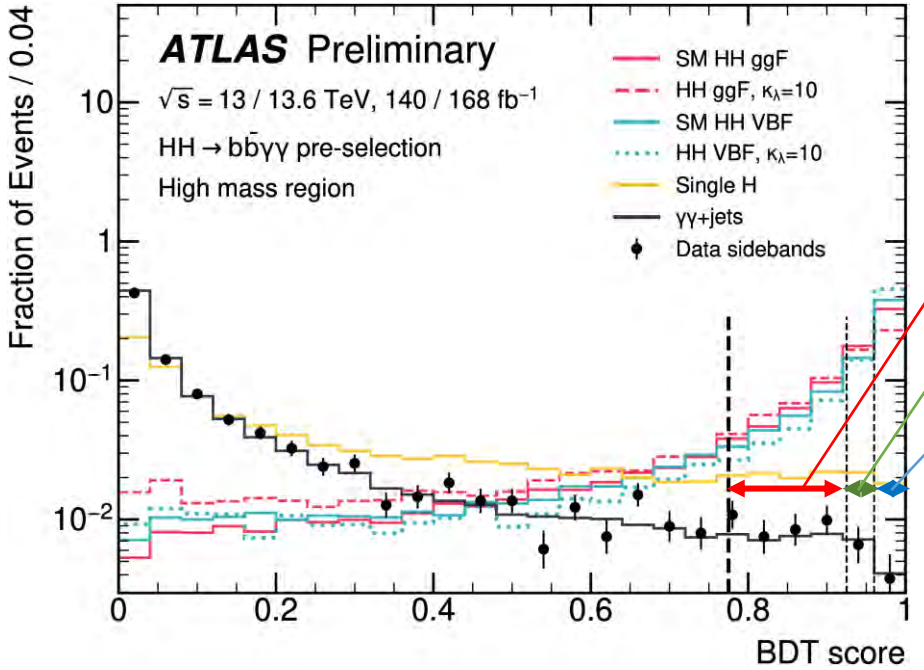
High mass region
SMサンプル用

- ggFHH (kl=1)
- VBFHH (kl=1, BSM)

Trainingの信号入力を各領域で変更

- 4-Fold training
- 入力MCサンプル：
  信号→HHサンプル、背景事象：γγ+jets, single Higgs
- 入力変数： $m_{\gamma\gamma}$に相関のない37変数

Training結果に基づいて統計解析の領域を分割



High mass region: 3領域
HM_1
HM_2
HM_3

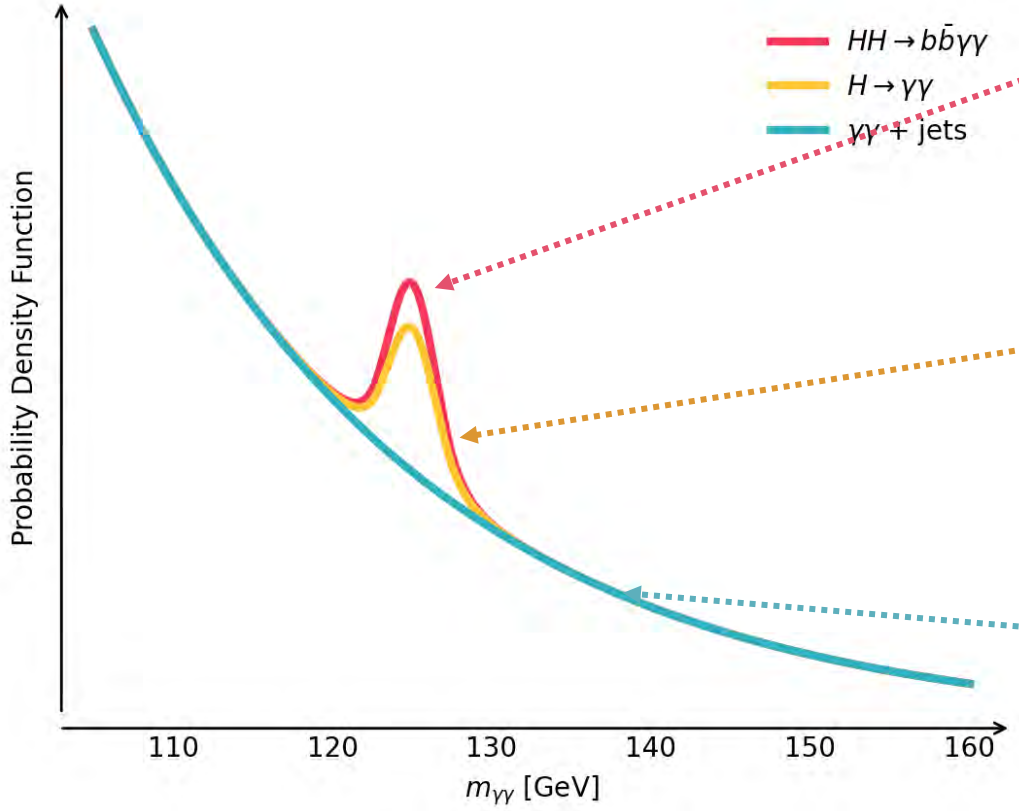
Low mass region: 4領域

統計解析手法

$m_{\gamma\gamma}$ 分布を確率密度関数として最尤法に基づいたフィット

$$N_c = N_c^{HH}(\kappa_\lambda, \kappa_{2V}) + N_c^{H} + N_c^{\gamma\gamma}$$

POI: $\mu = N_c^{HH}(\kappa_\lambda, \kappa_{2V}) / N_c^{HH}(\kappa_\lambda = 1, \kappa_{2V} = 1)$



信号 (ggF HH, VBF HH)

- Double-side crystal ball (DSCB) 関数
- 幅などのパラメーター：シミュレーションサンプルのfitにより決定

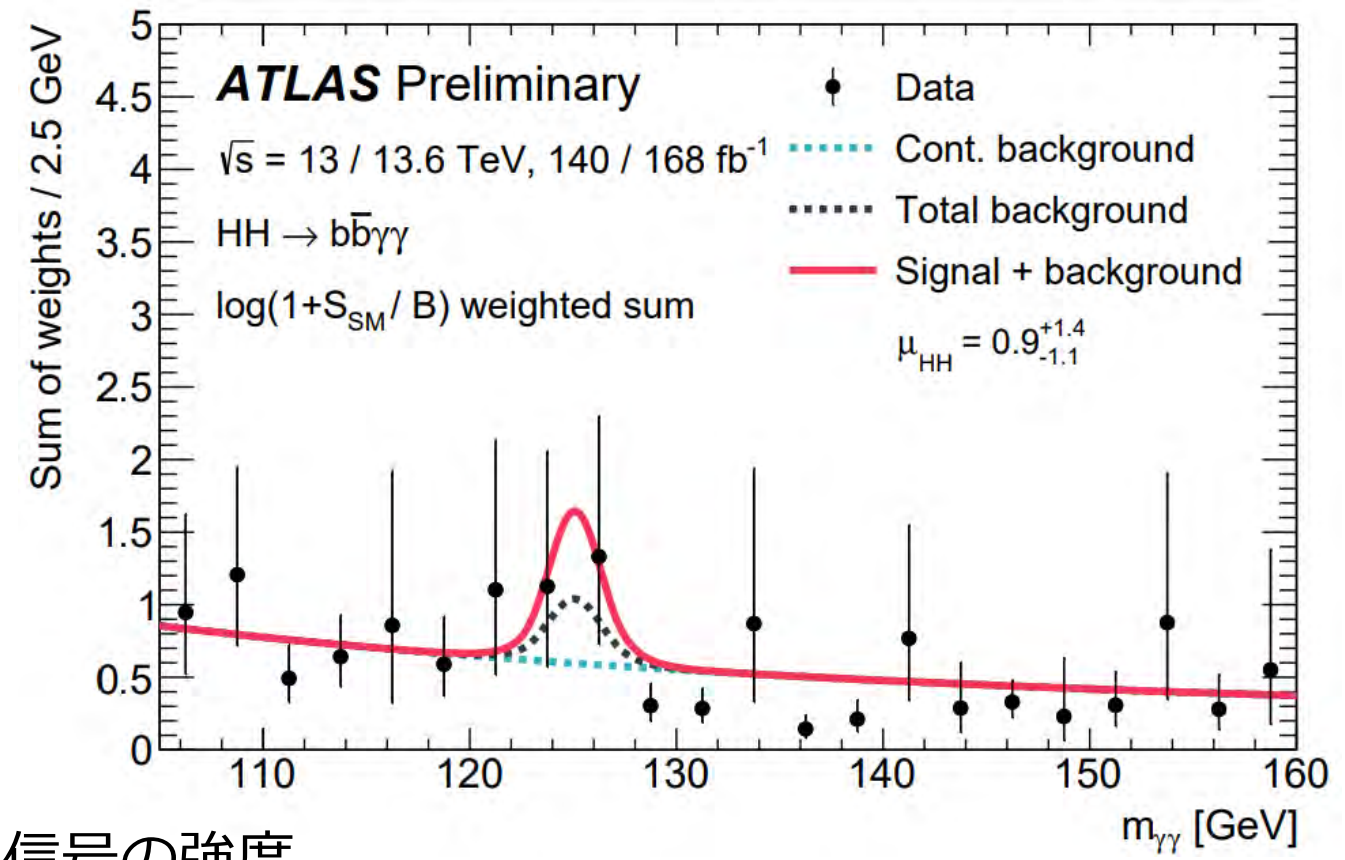
背景事象 (single Higgs)

- Double-side crystal ball (DSCB) 関数
- パラメーター：シミュレーションサンプルのfitにより決定

背景事象 ($\gamma\gamma$+jets)

- 信号領域 ($m_{\gamma\gamma}$ = [120, 130] GeV) 以外の**データ**を$N_{bkg}\ e^{-\beta m_{\gamma\gamma}}$でフィット

Fit 結果



信号の強度

Observed: $\mu_{HH} = 0.9^{+1.3}_{-1.0}\ (stat)\ ^{+0.6}_{-0.5}\ (\mathrm{syst})$

Expected: $\mu_{HH} = 1.0^{+1.3}_{-1.0}$

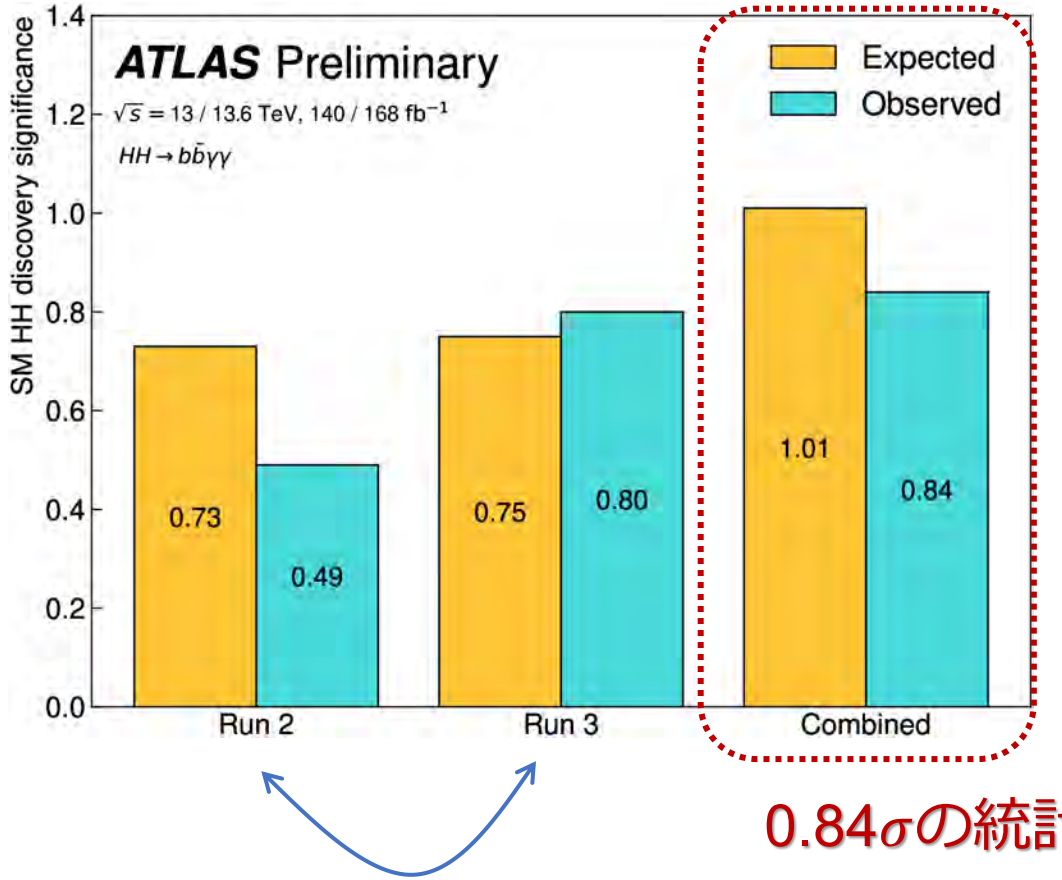
Improved by ~100% from previous analysis !!!

Updates	Improve
Added Run 3 data	**50%**
Kinematic fit	5%
b-tag	20%
Categorization	10％

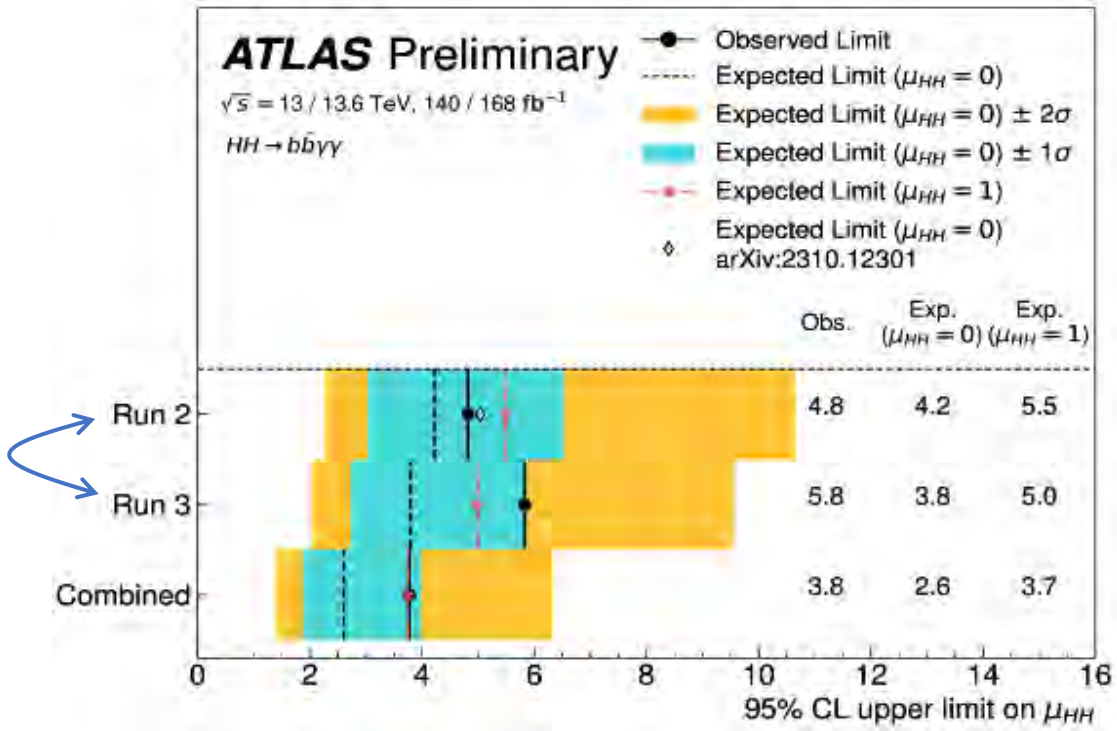
SM仮定にも信号ゼロ仮定にも consistent

発見感度と上限

SM信号に対しての発見感度



信号ゼロ仮定でのμ_{HH}の上限



0.84σの統計的有意度で信号観測

Run 2とRun 3間で似た結果が得られた

信号強度に対するsystematics

Observed: $\mu_{HH} = 0.9^{+1.3}_{-1.0}\,(stat)\,{}^{+0.6}_{-0.5}\,(\mathbf{syst})$

Source of systematic uncertainty	Relative uncertainty [%] Up	Down
Experimental		
Photon energy scale	+20	−30
Photon energy resolution	+13	−6.8
Photon efficiency	+13	−2.5
Jet	+9.6	−6.4
Luminosity	+6.3	−1.1
Theory		
QCD scale + m_{top}, PDF+α_S	+34	−4.5
$\mathcal{B}(H \to \gamma\gamma, b\bar{b})$	+9.9	−2.1
Parton showering model	±15	
Heavy-flavour content	±29	
Background model		
Spurious signal	±6.5	

調べたいパラメータだけbest-fit valueに設定、その他は自由に動かしてfitすることで評価

較正により見積もった系統誤差を計算に使用

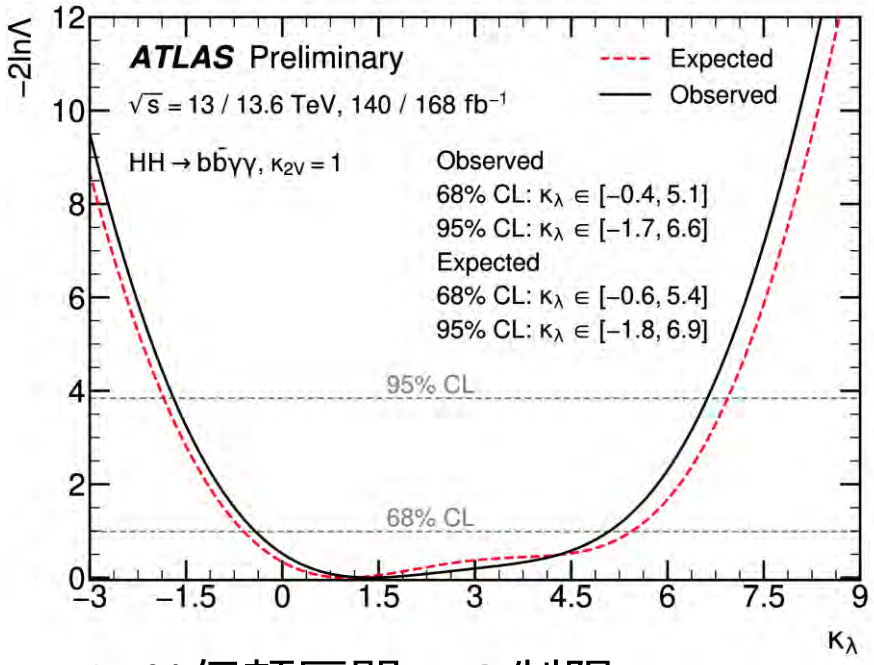
2023,24年データに対する光子トリガー効率に関する誤差は2倍(8%)

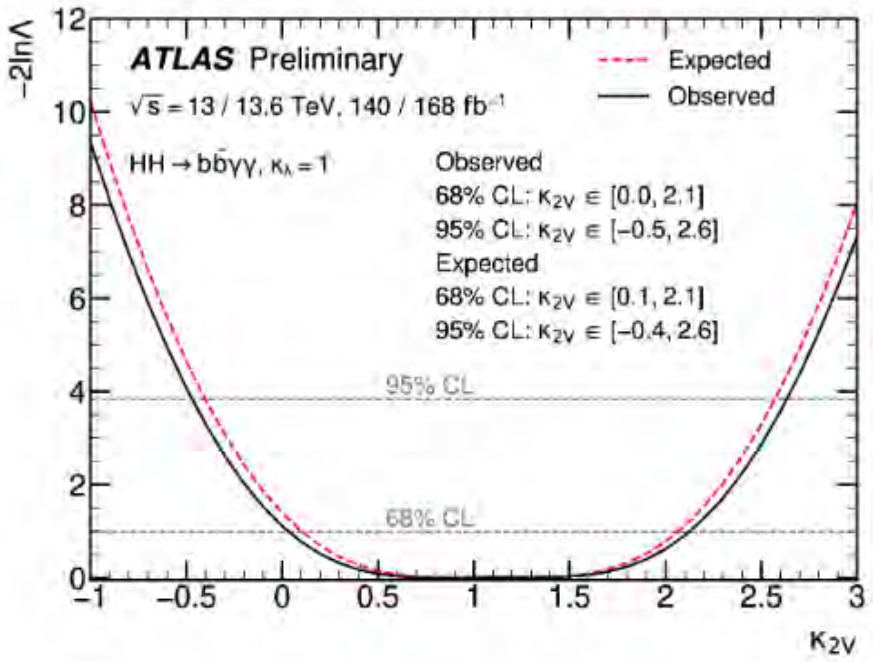
QCD計算の誤差に起因するものが多い

系統誤差は測定よりも理論からくるものの方が支配的

κ_λ, κ_{2V}に対する制限

Likelihood scan





Observedとexpectedで近い結果が得られた

95%信頼区間での制限

	κ_λ	κ_{2V}
Observed	$-1.7 < \kappa_\lambda < 6.6$	$-0.5 < \kappa_{2V} < 2.6$
Expected	$-1.8 < \kappa_\lambda < 6.9$	$-0.4 < \kappa_{2V} < 2.6$

20% improvement from previous analysis

Contents

0. Introduction

1. Run 2 解析のまとめ

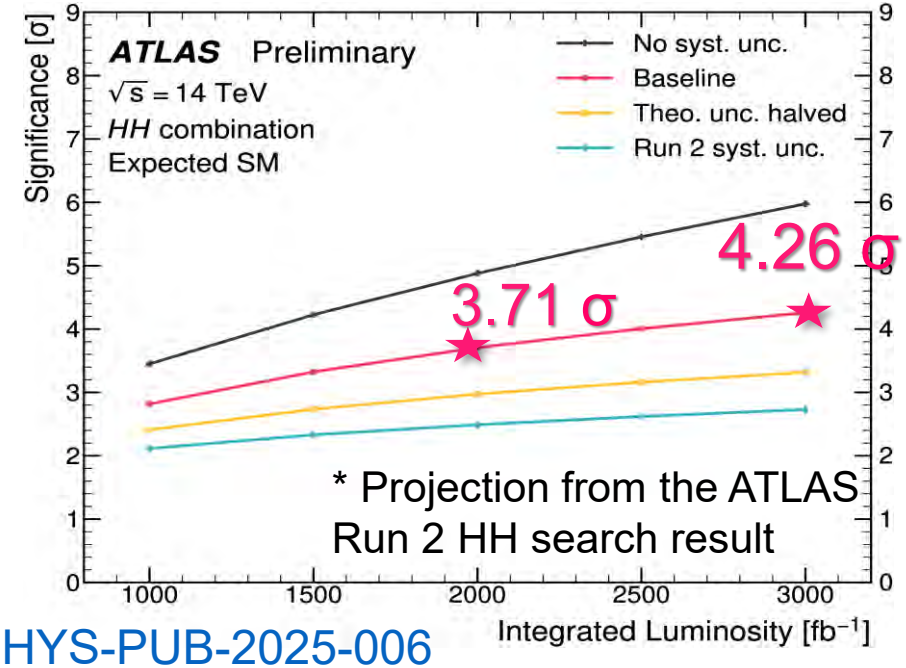
2. Run 2 + partial Run 3 解析の最新結果: $HH \to b\bar{b}\gamma\gamma$

3. **Run 3以降 (HL-LHC) での感度見積もり**

Run 3運転のその後

LHC実験 → 2030年から高輝度LHC (HL-LHC) 実験でのデータ取得を予定

- 重心の衝突エネルギー: 14 TeVに引き上げ
  HH生成断面積が~18%増加 (13 TeVと比較)
- 大幅な感度向上が期待
  - κ_λ 68% constraint [0.58, 1.48] @ 3000 fb^{-1}
  - 信号の統計的有意度も向上



ATL-PHYS-PUB-2025-006

New!! (ATLAS+CMS)

ATL-PHYS-PUB-2025-018

CMS実験の結果も加算すると7.7 σ の
統計的有意度で信号観測が可能に

+ 検出器・解析の改善でさらなる感度向上

- Upgrades for detector
  Inner Tracker, Timing detector, Electronics (muon, calo), Trigger, data acquision system...
- Improvements for analysis
  b-tagging, τ_{had} ID....

まとめ

ヒッグスポテンシャルの理解のために、
ATLAS実験ではヒッグス対生成過程の探索を行っている

Run 2 Done

- ✓ $\mu_{HH} = 0$ の信号の上限: 2.4 obs. (2.9 exp.)
- ✓ κ_λの制限: $\mathbf{-1.2 < \kappa_\lambda < 7.2}$ **(obs.),** $-1.6 < \kappa_\lambda < 7.2$ (exp.)

Run 2 + (partial) Run 3 Ongoing

- ✓ $\boldsymbol{HH \to b\bar{b}\gamma\gamma}$ **channel has been updated with 308 fb^{-1}!**
  - 0.84σ signal was obtained
  - 95% κ_λ constraint: $\mathbf{-1.4 < \kappa_\lambda < 6.6}$ **(obs.),** $-1.8 < \kappa_\lambda < 6.9$ (exp.)
- ✓ Other channels are ongoing

HL-LHC

- ✓ 4.3σ (7.7σ with CMS) まで到達可能

ATLAS public results