



# Higgs / Exotics まとめ

Higgs - ミューオン湯川結合の測定  
Higgs 粒子の精密測定  
Exotics 新粒子・稀崩壊探索  
ヒッグス対生成 (多分 - スキップ)

奥村恭幸

東京大学・素粒子物理国際研究センター

# 参考

- ICHEP2020 より、YouTube で録画も見られます
  - [https://www.youtube.com/channel/UCOkHQDc9oET5y92G51iM5\\_w/videos](https://www.youtube.com/channel/UCOkHQDc9oET5y92G51iM5_w/videos)
- ATLAS Highlight
  - [https://indico.cern.ch/event/868940/contributions/3905674/attachments/2077990/3501041/ICHEP\\_ATLAS\\_Highlights\\_Jakobs.pdf](https://indico.cern.ch/event/868940/contributions/3905674/attachments/2077990/3501041/ICHEP_ATLAS_Highlights_Jakobs.pdf)
- CMS Highlight
  - [https://indico.cern.ch/event/868940/contributions/3905676/attachments/2084164/3501074/CMS\\_Highlights\\_ICHEP2020\\_V4.pdf](https://indico.cern.ch/event/868940/contributions/3905676/attachments/2084164/3501074/CMS_Highlights_ICHEP2020_V4.pdf)
- Higgs summary
  - [https://indico.cern.ch/event/868940/contributions/3905681/attachments/2084287/3501274/ICHEP2020\\_HiggsPlenary\\_ATLASandCMS\\_DeliveredVersion.pdf](https://indico.cern.ch/event/868940/contributions/3905681/attachments/2084287/3501274/ICHEP2020_HiggsPlenary_ATLASandCMS_DeliveredVersion.pdf)
- Exotics summary
  - [https://indico.cern.ch/event/868940/contributions/3905702/attachments/2084783/3502244/ICHEP\\_2020\\_Cavaliere\\_final.pdf](https://indico.cern.ch/event/868940/contributions/3905702/attachments/2084783/3502244/ICHEP_2020_Cavaliere_final.pdf)
- ATLAS 公開結果まとめ
  - <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/AtlasPublic>
- CMS 公開結果まとめ
  - <http://cms-results.web.cern.ch/cms-results/public-results/publications/CMS/index.html>
  - <http://cms-results.web.cern.ch/cms-results/public-results/preliminary-results/CMS/index.html>

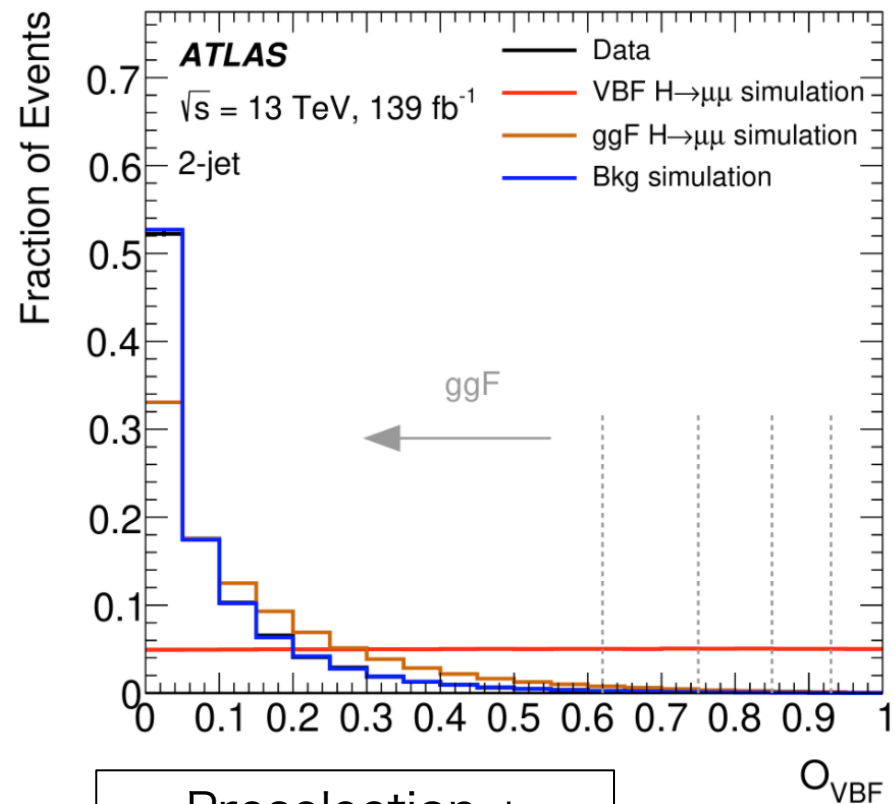
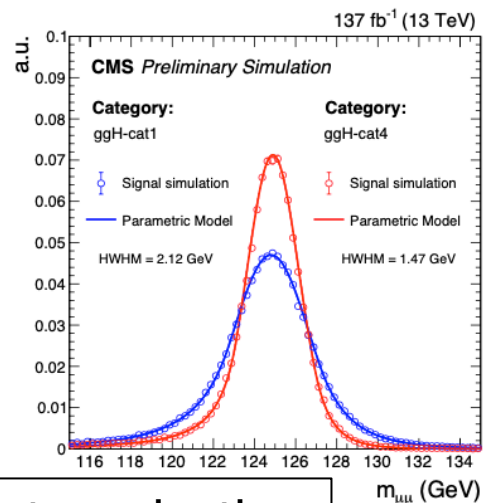
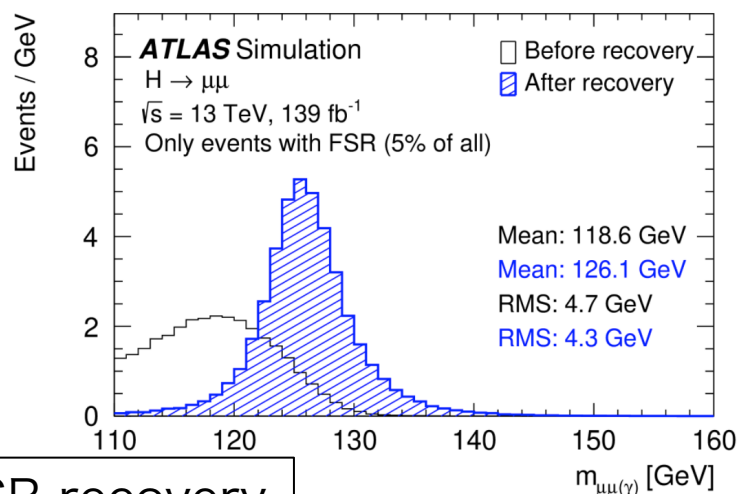
# Higgs - ミューオン湯川結合の測定

## • Higgs - ミューオンとの湯川結合の測定

- LFU を破っている手に入れる変な結合であり、「125 GeV Higgs が第二世代にも、質量に比例して結合するか？」の問いには、実験データでの検証が必要
- $H \rightarrow \mu\mu$  崩壊分岐比で測定できるが、 $BF = 0.022\%$  と低く背景事象が多い。

## • 探索解析の鍵

- Higgs  $\mu\mu$  の質量再構成精度の改善・理解
- S/N がよい信号領域の設計 (特にVBF信号領域は  $Z$ +jets を有効に落とす)



FSR recovery

Categorization

Preselection +  
MVA Categorization

# Higgs - ミューオン湯川結合の測定

## • ATLAS 戦略

### • 20 信号領域

- ttH (b-jet, additional leptons), VH 3領域 (additional leptons), VBF 4領域 (2 additional jets), ggF 12 領域 (0, 1, 2 jet bins)

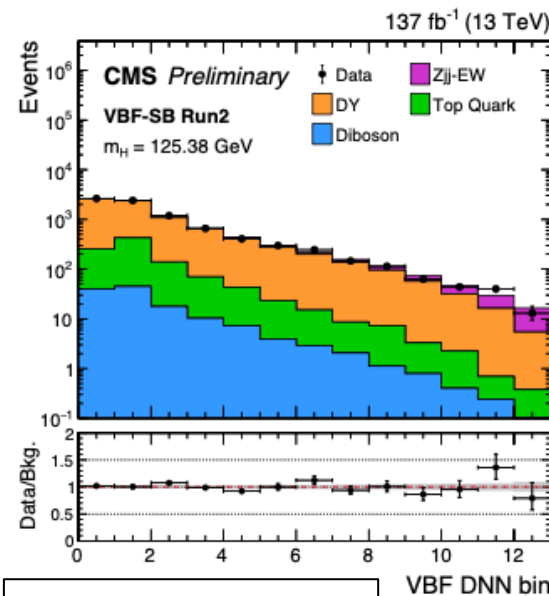
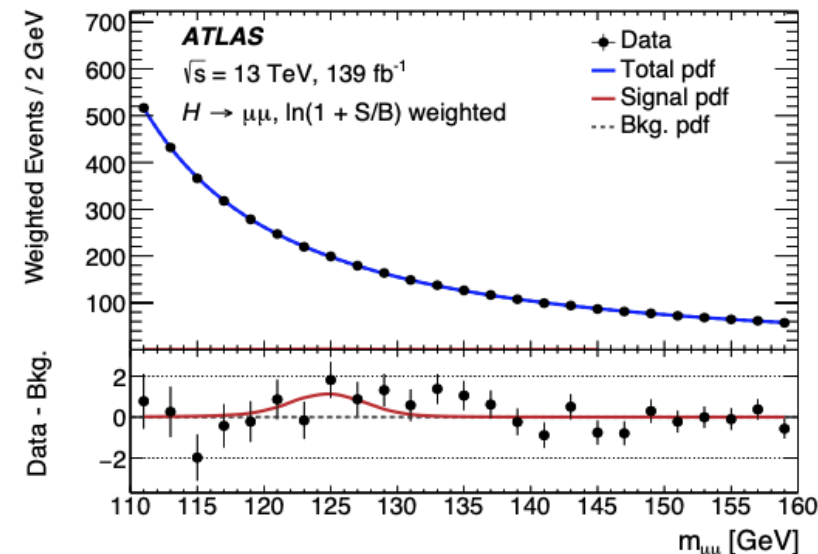
### • 20 不変質量分布を同時フィット

## • CMS 戦略

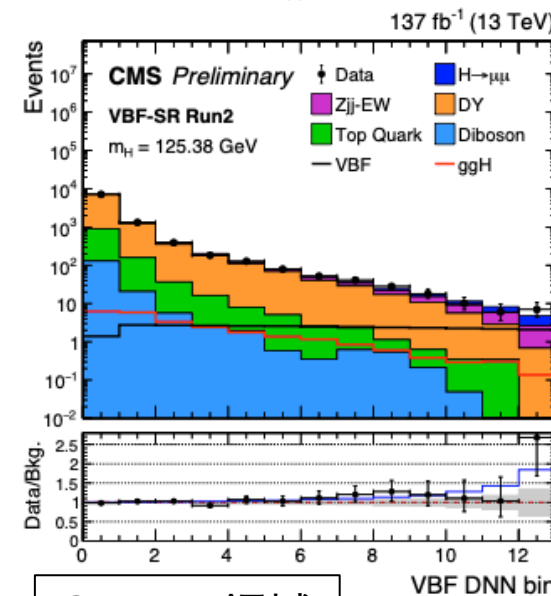
### • VBF DNN 分布

(2016, 2017, 2018):

- $\mu\mu, jj$  系のキネマティクス
- 15 不変質量分布:
  - ggF 5 領域, VH 5 領域, ttH 5 領域



Sideband 領域  
(110-115, 135-150)

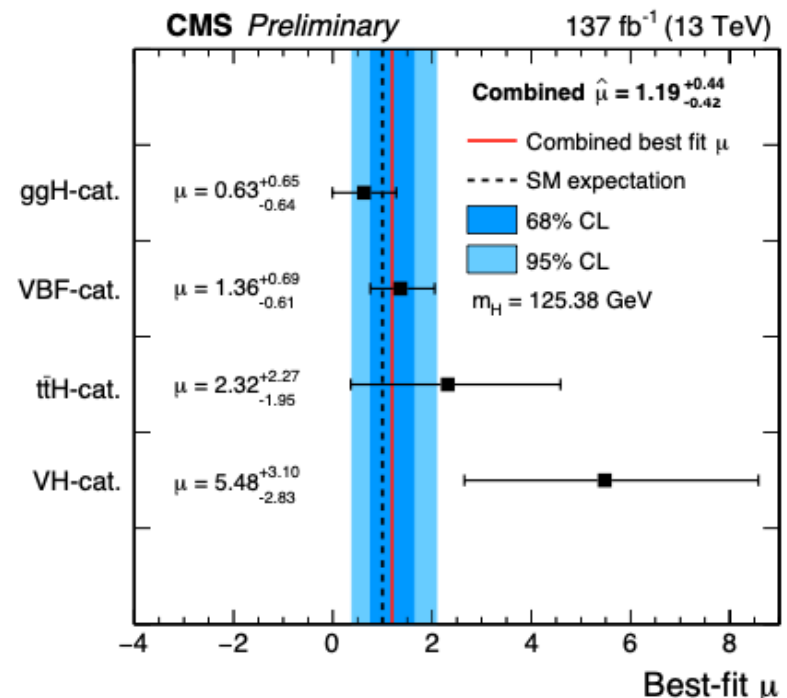
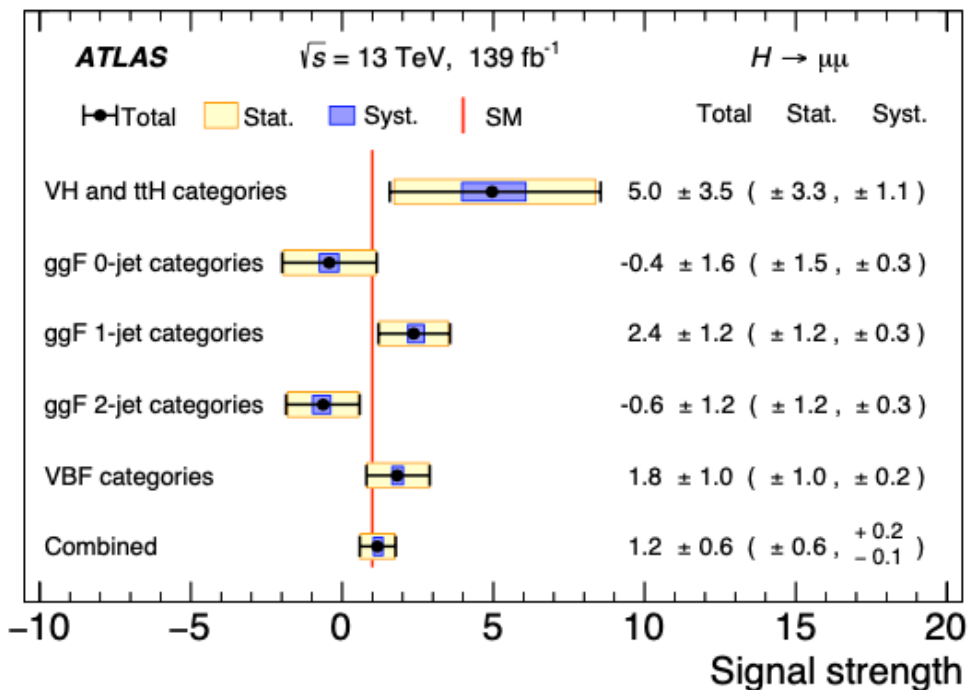


Signal 領域  
(115-135)



# Higgs - ミューオン湯川結合の測定

- ICHEP 2020 の結果
  - ATLAS :  $\mu = 1.2 \pm 0.6$ ,  $2.0\sigma$  (expectation =  $1.7\sigma$ ) for 125.09 GeV Higgs
  - CMS :  $\mu = 1.2 \pm 0.4$ ,  $3.0\sigma$  (expectation =  $2.5\sigma$ ) for 125.38 GeV Higgs
- 生成プロセス (信号領域) ごとの感度順は ATLAS / CMS で同様。
  - VBF ~ ggF (全 jet bins)  $\gg$  VH, ttH
  - ATLAS / CMS の間のメイジャーな違いは mass resolution の違い (2T vs 3.8T)



ミューオンの湯川結合を  $3\sigma$  で確認できたのは LHC Higgs 物理の重要なマイルストーン

# LHC における Higgs の精密測定の手続き

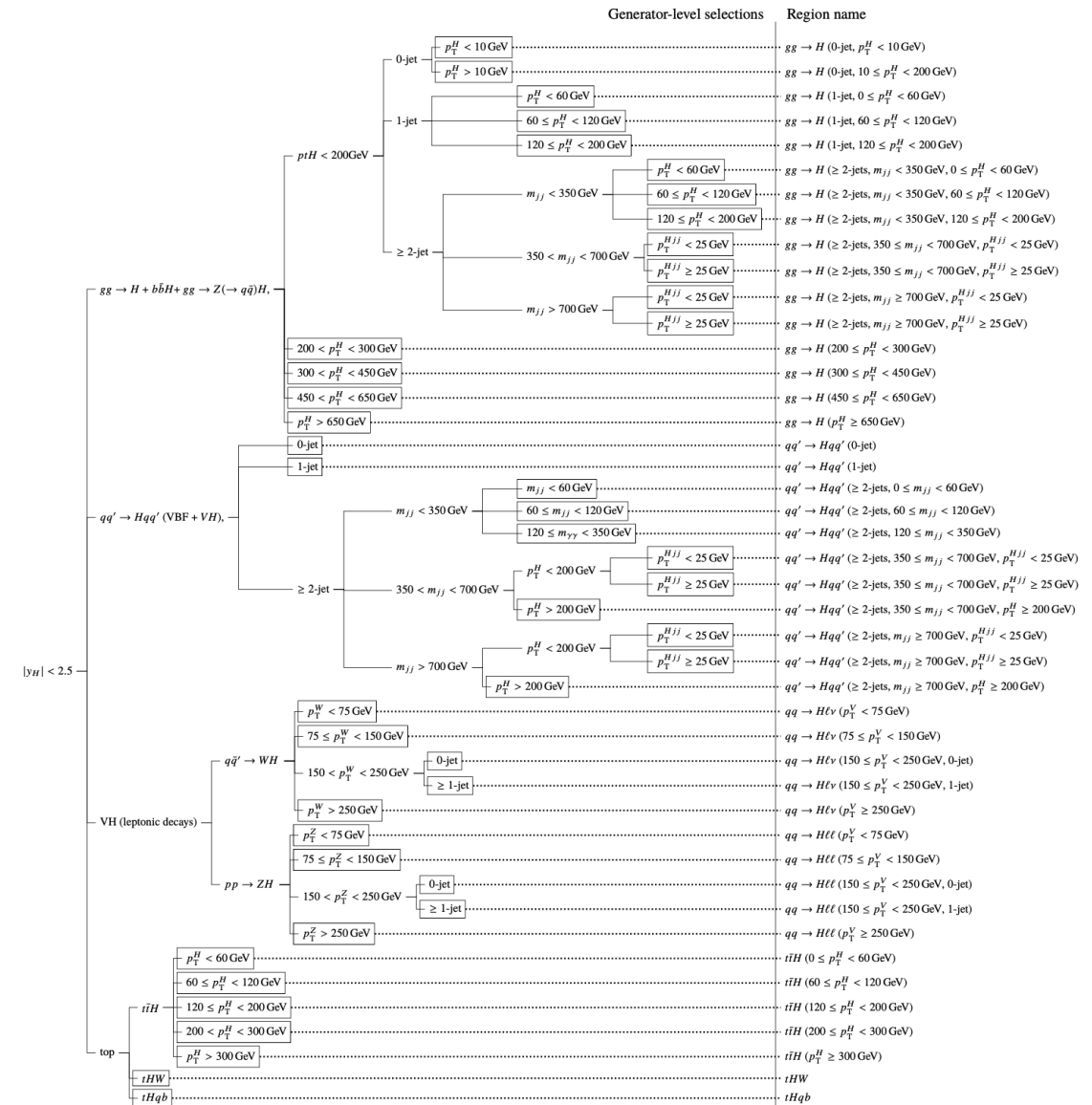
- Simplified Template Cross-Sections (STXS) 測定
  - STXS bin/region ごとの微分断面積測定に対応
- STXS bin/region
  - Higgs の decay process によらず共通化された、Particle-Level で定義されるヒッグス信号のプロダクションの分類
    - 生成プロセス (ggF, VBF, ZH, WH, ttH, ...)
    - トポロジー (0 jet, 1 jet, 2 jets, ...)
    - キネマティクス (Higgs 粒子の  $p_T$ )
  - 新物理の抽出可能性の最大化
  - 信号の理論計算に対する不定性の最小化

# LHC における Higgs の精密測定の手続き

- “STXS Stage 1.2” と呼ばれる binning

- Total 44 bins に分類

- 生成過程 (ggH+bbH, VBF, VH, ttH, tH)
- ジェット本数
- キネマティクス (Higgs  $p_T$ )

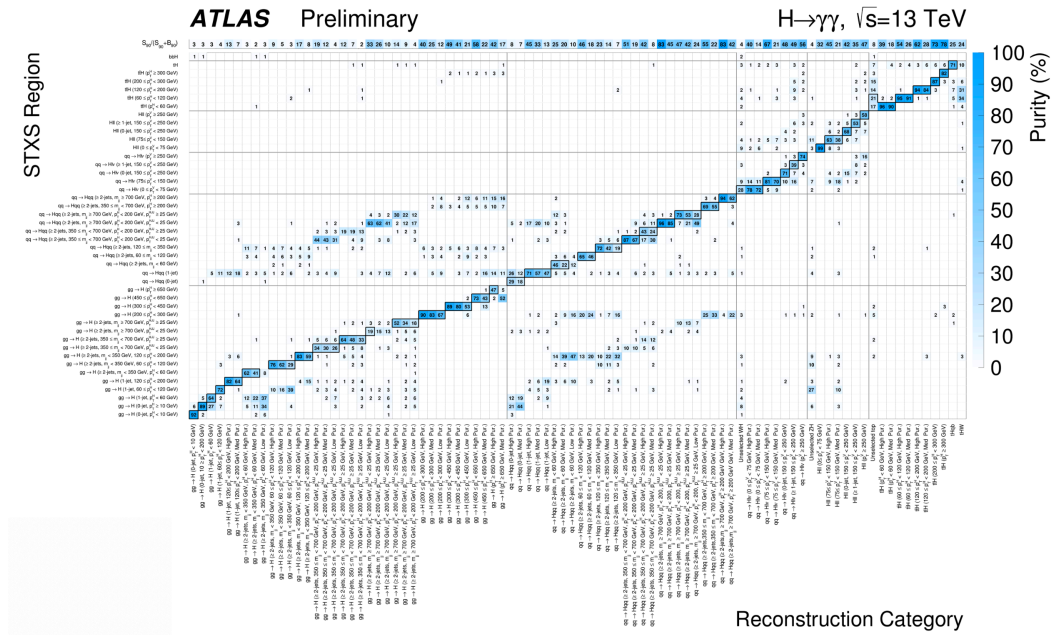


# H → 2γ 精密測定

- H → 2γ 過程の特徴
  - BF (H → 2γ) = 0.2% (参考: BF (H → ZZ → 4l) = 3% × 0.4% = 0.001%)
  - 質量の再構成が高い分解能で可能なチャンネル
  - 高統計な精密測定向けのチャンネル
- イベント選別
  - Diphoton イベント ( $p_{T1} > 0.35m_{\gamma\gamma}$ ,  $p_{T2} > 0.25m_{\gamma\gamma}$ )

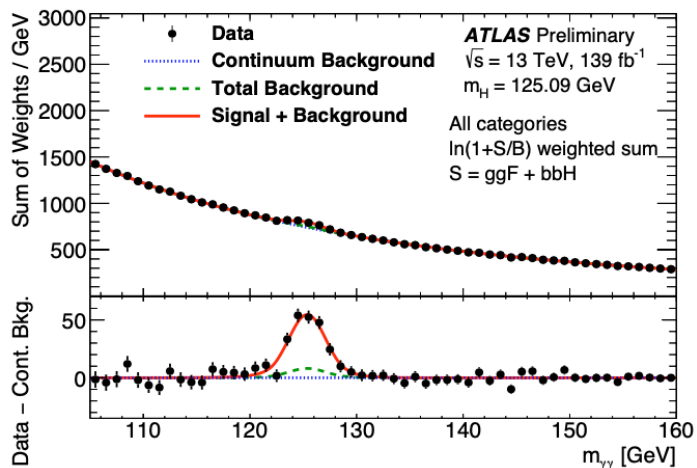
- Event categorization
  - 44 STXS bins (truth)
  - Multiclass BDT で分類
    - 44 イベントクラス (reco)
      - よく 1 対 1 対応している
      - 更に BDT で S/B が異なる複数の領域に分類
    - 88 イベントカテゴリー

Truth 情報による分類 (44)

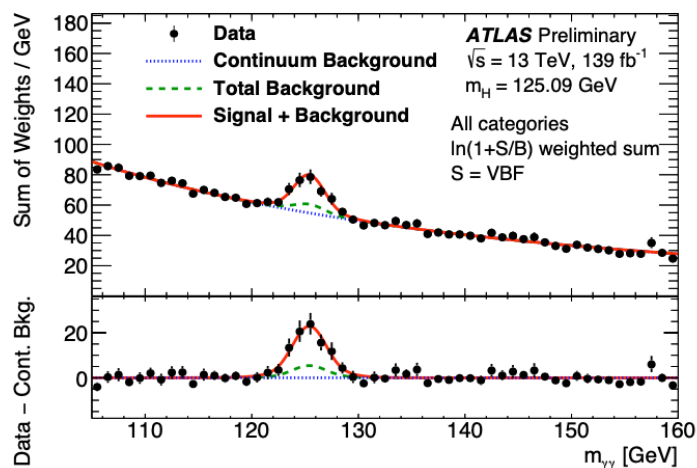


Reconstruction 情報による分類 (88)

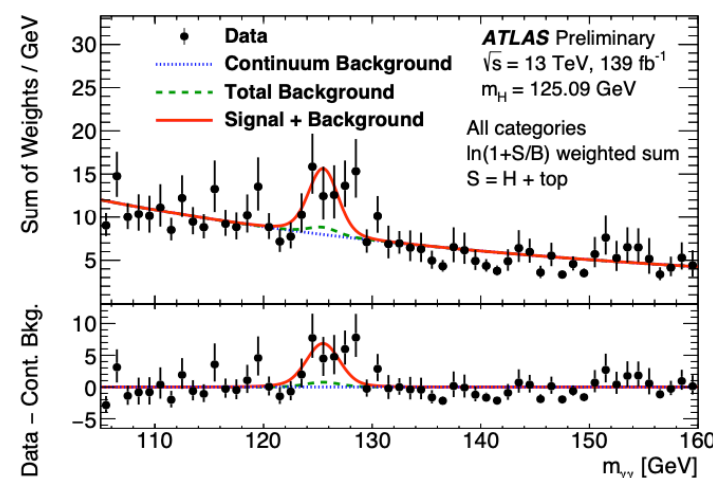
# H → 2γ 精密測定



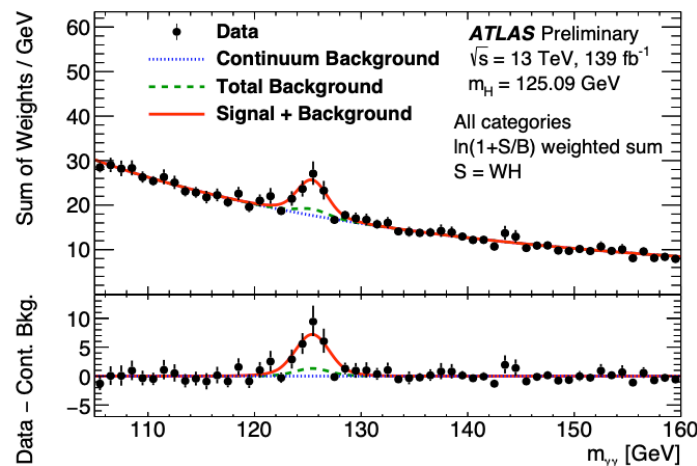
(a)  $ggF + b\bar{b}H$



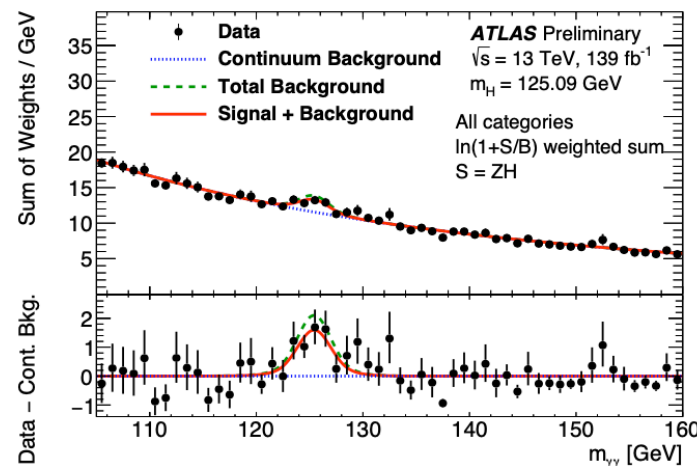
(b) VBF



(e)  $t\bar{t}H + tH$



(c)  $WH$



(d)  $ZH$

• 88 領域同時フィット

• 関数型モデルの選択

• 信号

• DSCB 関数

• バックグラウンド

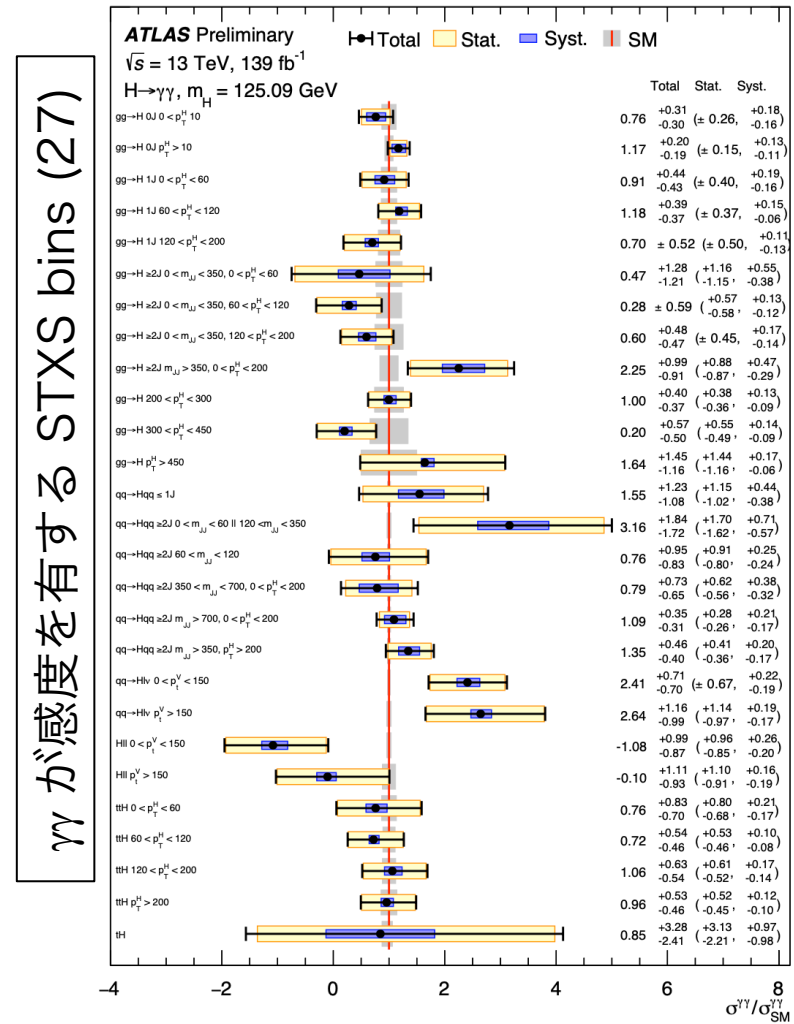
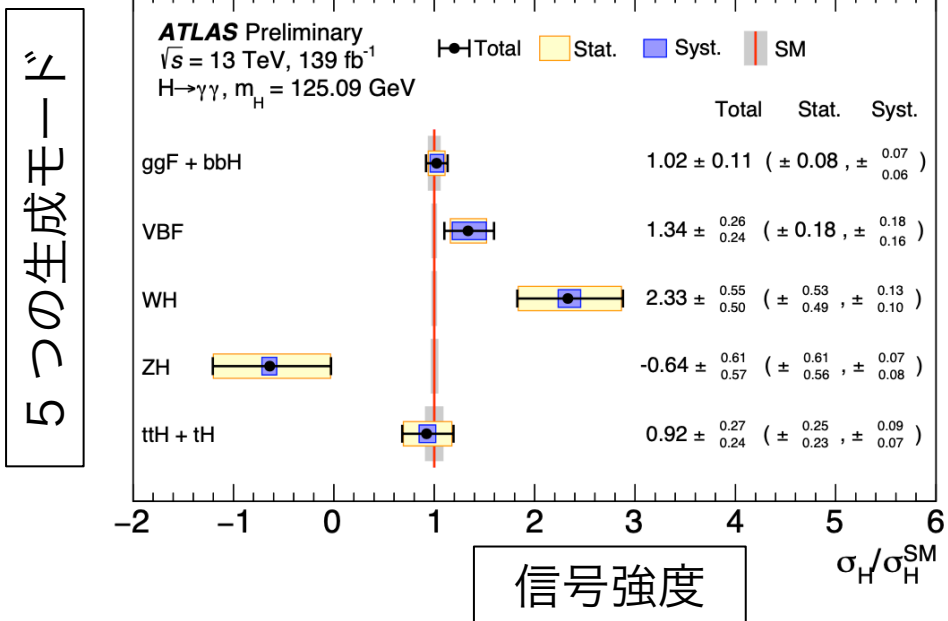
• なめらかな単調減少関数

• “Spurious signal” で不定性を評価

# H → 2γ 精密測定

$$(\sigma \times B_{\gamma\gamma})_{\text{obs}} = 127 \pm 10 \text{ fb} = 127 \pm 7 \text{ (stat.)} \pm 7 \text{ (syst.) fb}$$

- 全断面積測定 (誤差=8%)
- 5つの生成過程のそれぞれの断面積測定
  - Compatibility with the SM prediction = 3% ( $1.9\sigma$ )
  - VH をひとくりにすると 50%
- 27 STXS bins に対する微分断面積測定
  - Compatibility with the SM prediction = 60%

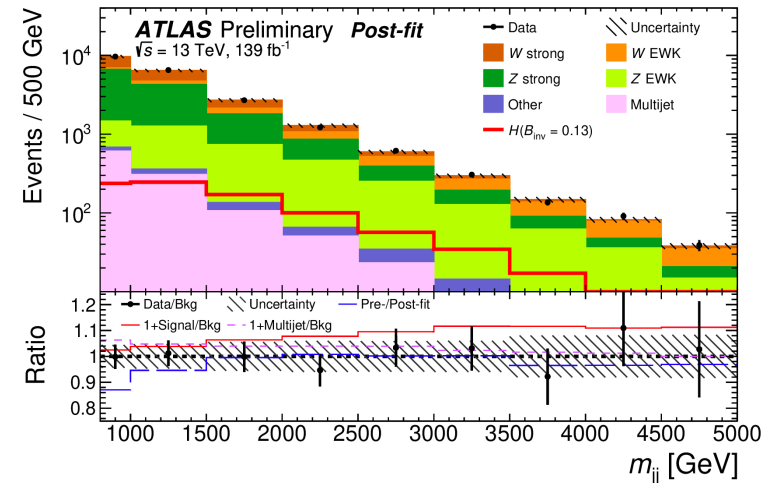
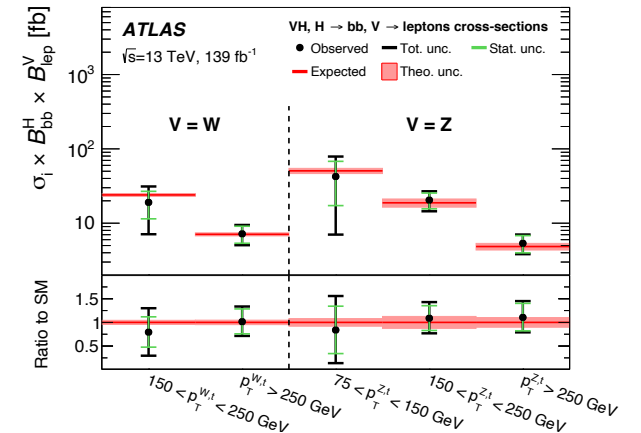
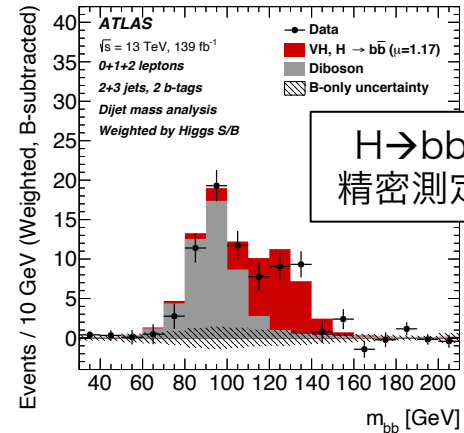




# 結合定数の決定のための global fit

- 7 つの decay channels を使用して global fit
  - $H \rightarrow \mu\mu$  (BR=0.02%) や  $H \rightarrow \text{invisible}$  (BR=0.1%+BSM) の探索を含む

Analysis decay channel	Target Prod. Modes	$\mathcal{L}$ [ $\text{fb}^{-1}$ ]
$H \rightarrow \gamma\gamma$	ggF, VBF, WH, ZH, $t\bar{t}H$ , $tH$	139
$H \rightarrow ZZ^*$	ggF, VBF, WH, ZH, $t\bar{t}H(4\ell)$ $t\bar{t}H$ excl. $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\ell$	139 36.1
$H \rightarrow WW^*$	ggF, VBF $t\bar{t}H$	36.1
$H \rightarrow \tau\tau$	ggF, VBF $t\bar{t}H$	36.1
$H \rightarrow b\bar{b}$	VBF WH, ZH $t\bar{t}H$	24.5 – 30.6 139 36.1
$H \rightarrow \mu\mu$	ggF, VBF, VH, $t\bar{t}H$	139
$H \rightarrow \text{inv}$	VBF	139



$H \rightarrow \text{invisible}$   
探索 (VBF)

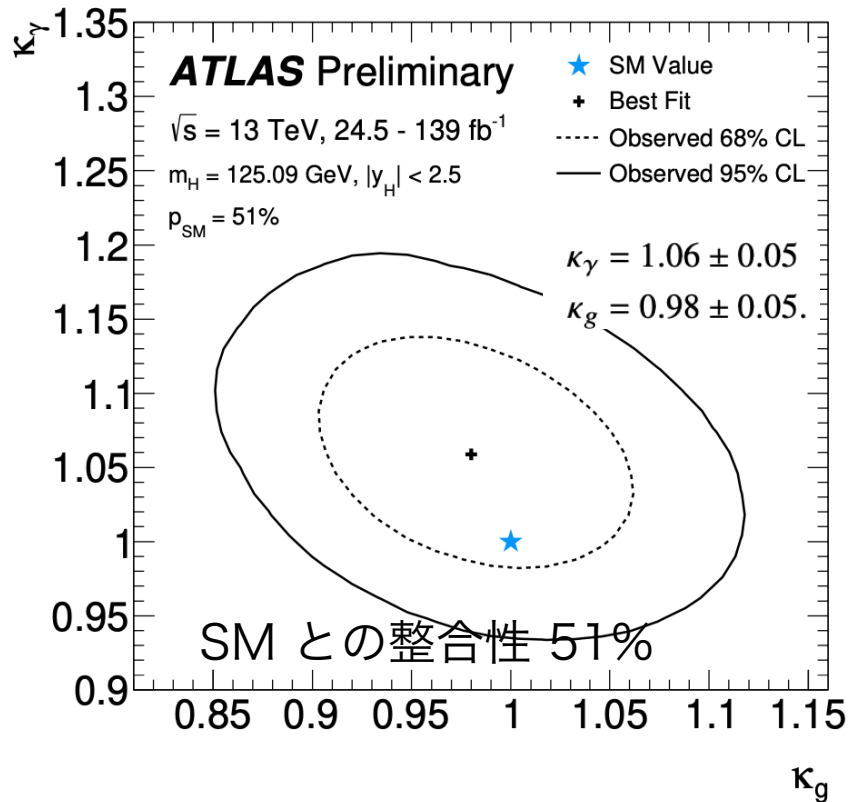


# Coupling modifier

## それぞれの生成x崩壊における全断面積測定を使用

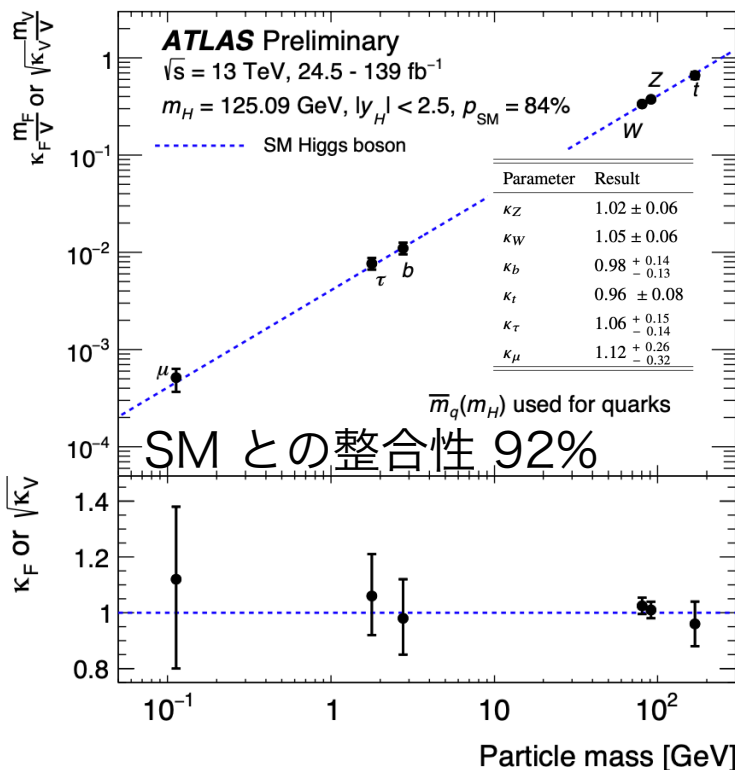
### Probing BSM

Loop を含む “Effective Coupling”  
Hgg, H $\gamma\gamma$  の coupling modifier 測定  
(SM粒子への tree の結合は SM を仮定)



### 標準模型の精査

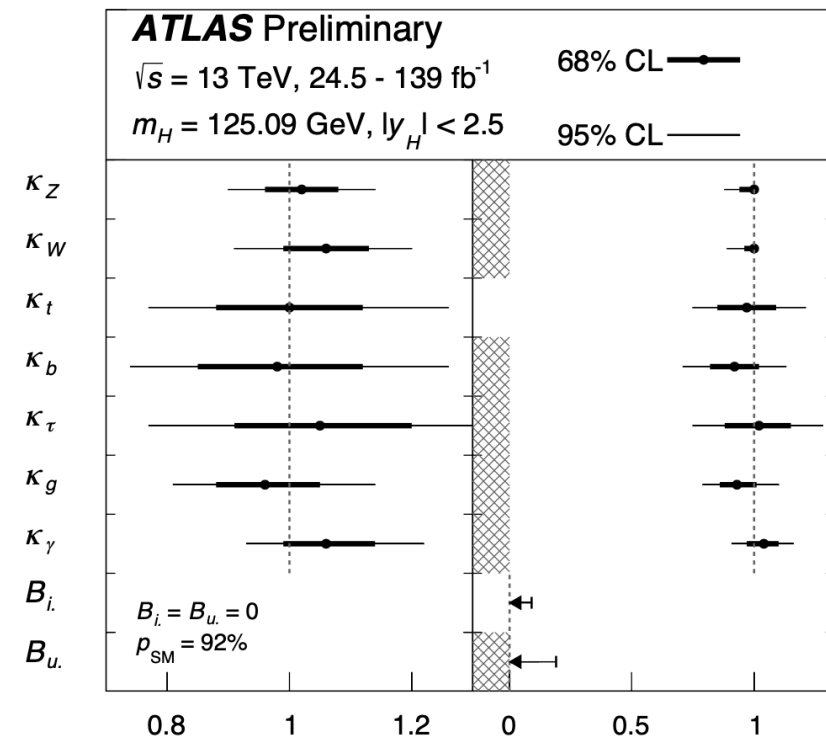
SM 粒子への tree level の結合の調査  
(あらわな BSM BF ( $B_u, B_i$ ) は zero に固定)



### Probing BSM

あらわな BSM BF ( $B_u, B_i$ ) もフロート

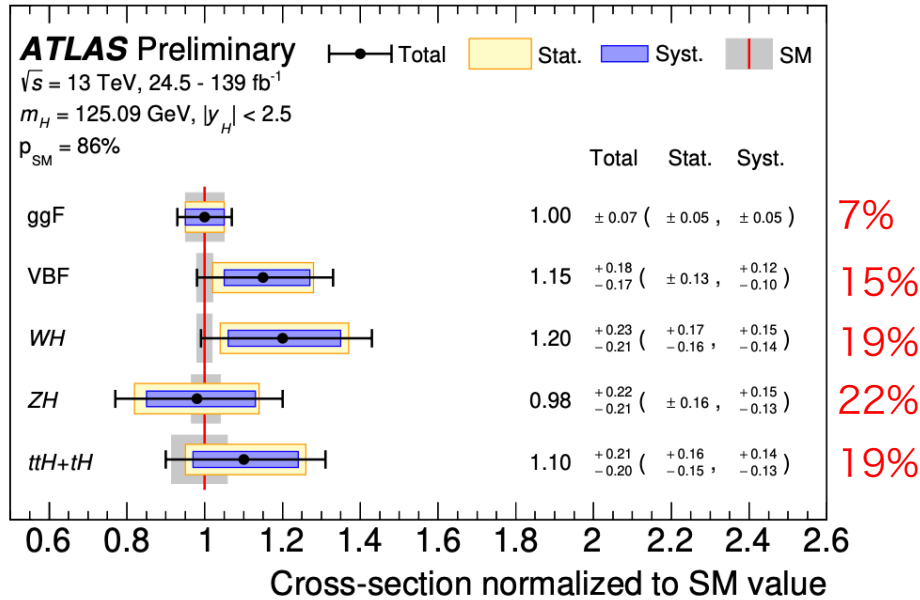
- $B_i$ : 直接制限、
- $B_u$ : 他の BF の SM との整合性より制限



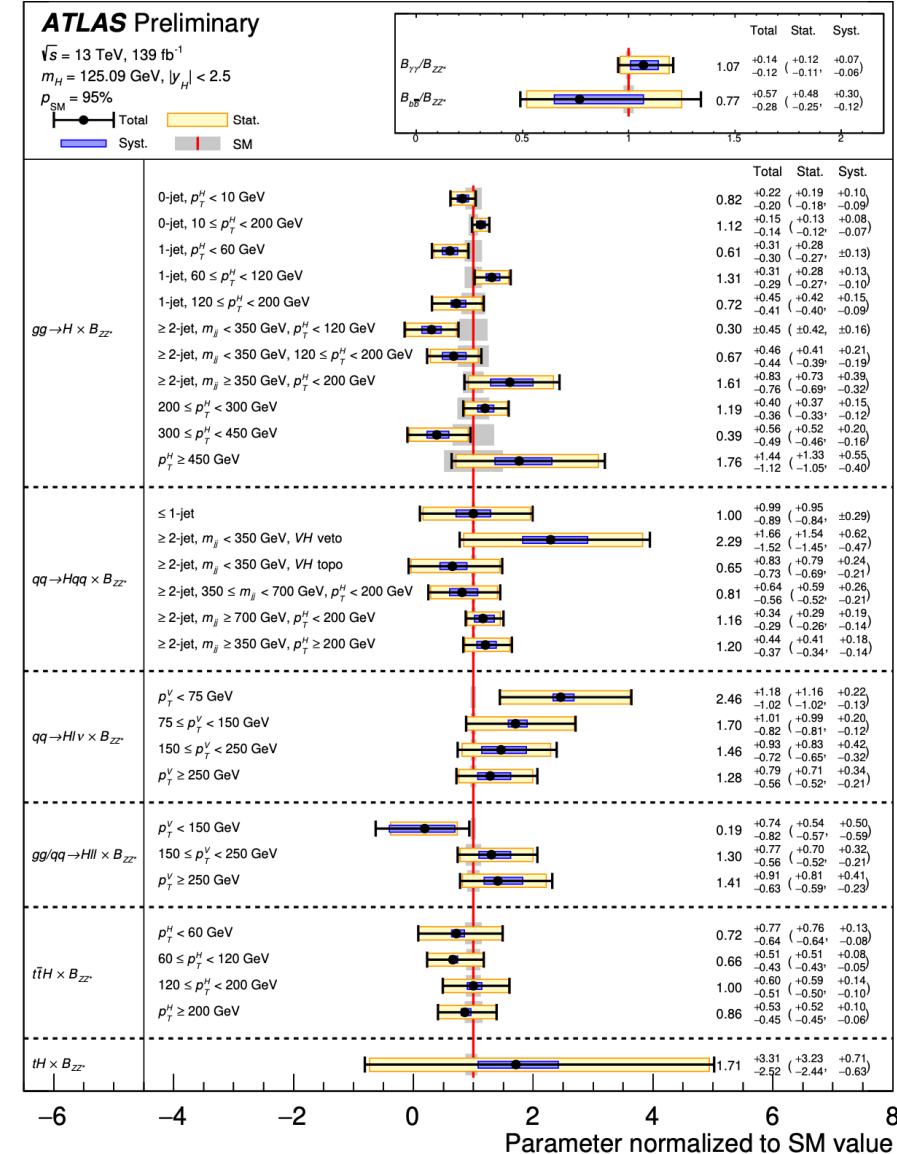
# 断面積測定

- 各生成プロセスの信号強度
  - 主要 5 過程で  $\sim 5 \text{ sigma}$  を達成
  - SM との compatibility = 86%
- STXS 微分断面積
  - 31 自由度での fit
  - 29 (STXS bins) + 2 (BF ratio modifiers)
  - SM との compatibility = 95%

5つの生成モード



感度を有する STXS bins (29) + 2 BF 自由度



# H $\tau\tau$ オペレータの型のテスト (CMS)

## • H $\tau\tau$ オペレータの型がスカラー型か擬スカラー型かの試験

- フェルミオンの運動量とスピンの直交する  
終状態では、スカラーと擬スカラー  
オペレータの間の符号の効果が見える。
- CP odd/even の混合角を  $\text{Pol}$  としてスタディ

$$\bar{L}\phi R + \bar{R}\phi^\dagger L = h(\bar{L}R + \bar{R}L)$$

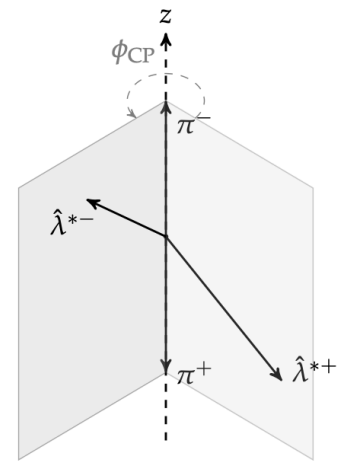
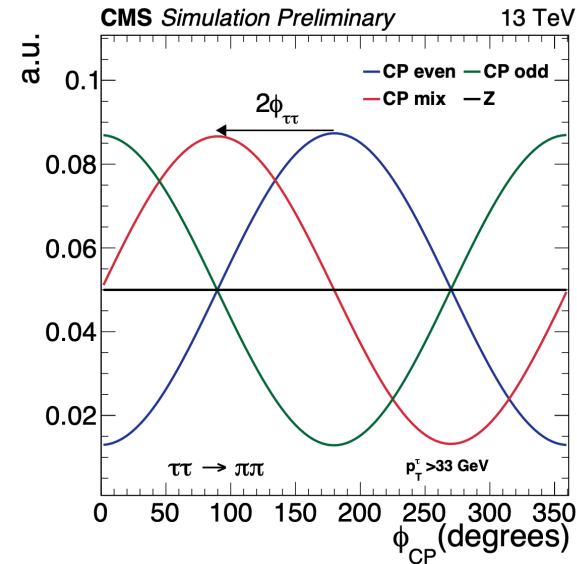
$$\bar{L}\gamma^5\phi R + \bar{R}\gamma^5\phi^\dagger L = h(\bar{L}R - \bar{R}L)$$

$$\Gamma(H \rightarrow f\bar{f}) \propto 1 - s_z\bar{s}_z \pm C s_\perp \bar{s}_\perp$$

$$\mathcal{L}_Y = -\frac{m_\tau H}{v} (\kappa_\tau \bar{\tau}\tau + \tilde{\kappa}_\tau \bar{\tau}i\gamma_5\tau) \quad \tan(\phi_{\tau\tau}) = \frac{\tilde{\kappa}_\tau}{\kappa_\tau}$$

## • H $\rightarrow\tau\tau$ の decay で測定

- 観測量  $\phi_{\text{CP}}$ 
  - それぞれのタウの崩壊生成物が貼る平面を推定し、2つの平面の間の角度差
  - オペレータの型の違いに感度

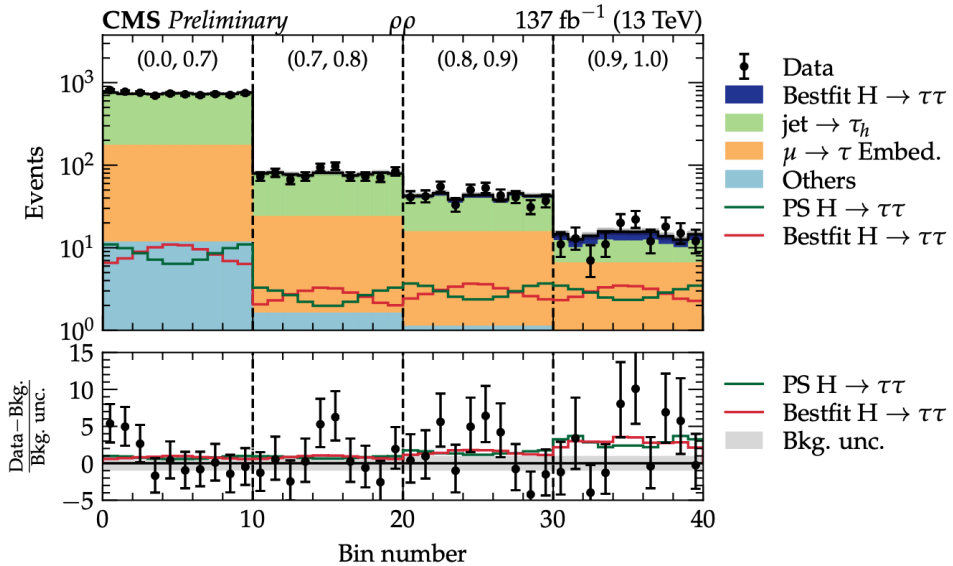


- (もちろん full reconstruction はできないので) 色々な近似でなんとか算出
  - “impact parameter method” “neutral pion method”
  - タウの崩壊過程によってベストなものを使う

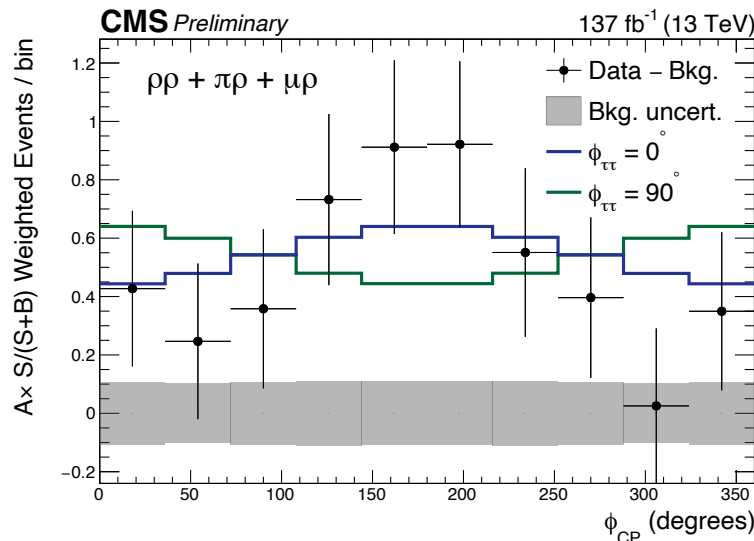
# H $\tau\tau$ オペレータの型のテスト (CMS)

CMS PAS HIG-20-006

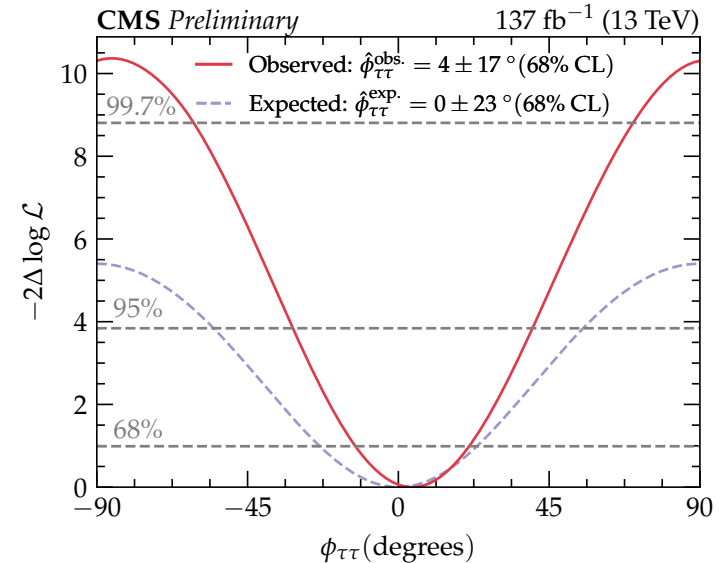
- $\tau_h\tau_\mu$ ,  $\tau_h\tau_h$  を使用
- BDT を用いた categorization
  - 2つのタウの崩壊過程 ( $\mu, \pi^+, \rho \rightarrow \pi^+\pi^0$ ,  $a^1\rho \rightarrow \pi^+\pi^0\pi^0$ ,  $a^3\rho \rightarrow \pi^+\pi^+\pi^-$ ) で場合分け
    - $\phi_{CP}$  の再構成精度が異なる
  - Higgs signals, true tau BG, fake tau BG を区別
- CP odd/even の混合角  $\phi_{\tau\tau}$  を Pol として Likelihood でスキャン
  - 0度 (=CP even only) と無矛盾の結果 (中心値  $\phi_{\tau\tau} = (4 \pm 17(\text{stat}) \pm 2(\text{bin-by-bin}) \pm 1(\text{syst}) \pm 1(\text{theory}))^\circ$ )
  - 3.2 sigma で CP odd 100% 仮設とは矛盾



$\phi_{CP}$  の分布 ( $\rho\rho$  4領域)



$\phi_{CP}$  の分布 (BG差し引き後)



# Leptoquark 探索 (ATLAS)

## Leptoquarks 探索

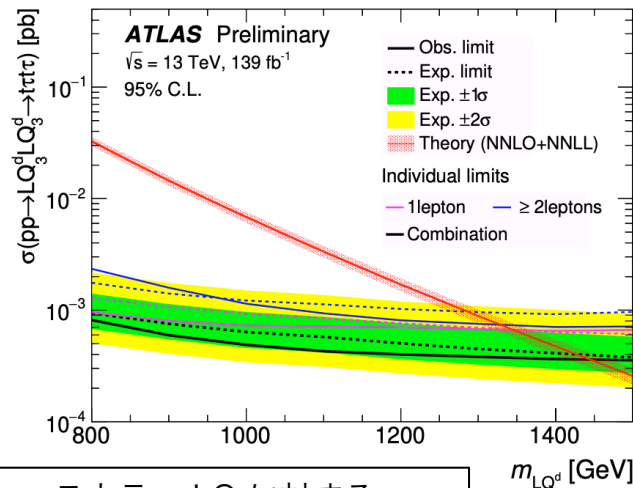
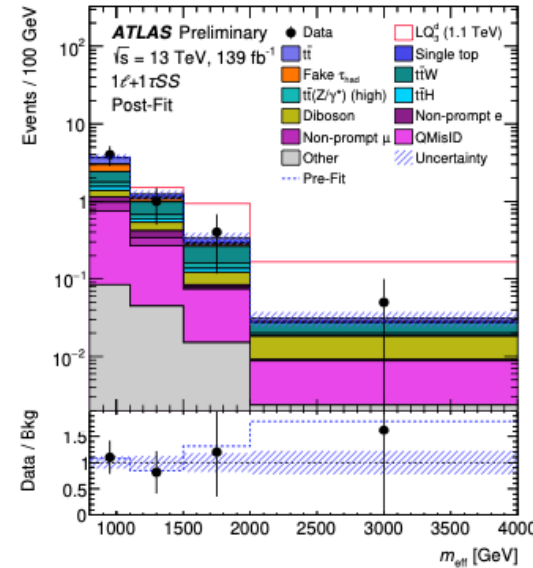
- GUT, LFU violation tests in B-sector
- LQ の対生成を色々な終状態でテスト
  - LQ  $\rightarrow$  ej,  $\mu$ j, et,  $\mu$ t,  $\tau$ t, vt (j=udcsb) の終状態について 139/fb で発表
  - “cross-generation” の結合をもつ LQ 探索も遂行中

## LQ $\rightarrow$ $\tau$ t に注目したスカラー LQ の対生成探索

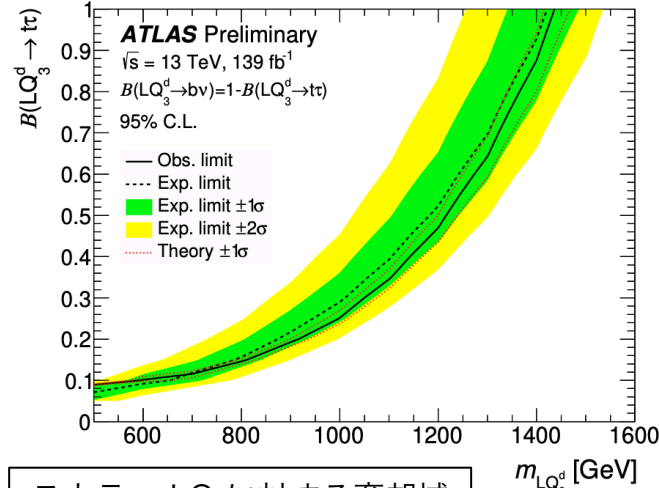
- 22 領域の  $m_{\text{eff}}$  (SR), HT (CR), 1.4 TeV までの LQ を棄却 (B=100%)

## LQ $\rightarrow$ et, $\mu$ t に注目したスカラー LQ の対生成探索

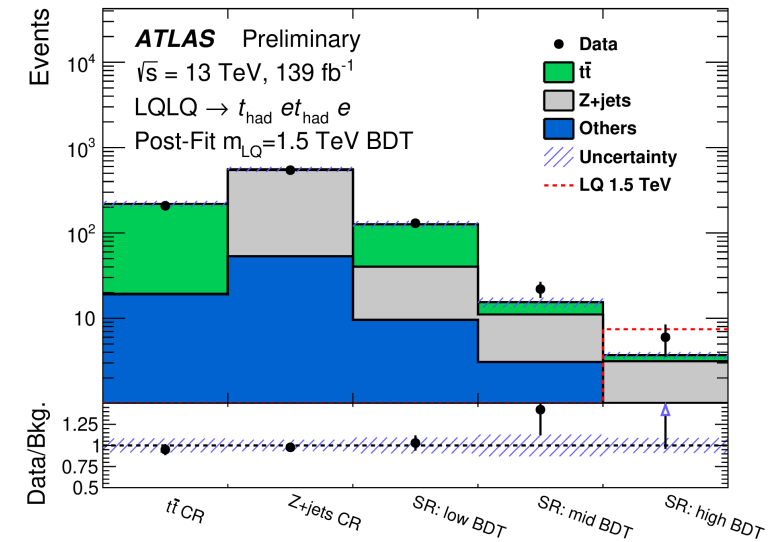
- Boosted top を用いた解析、parameterized BDT を用いた信号抽出
- 1.5 TeV ( $t_e$ ,  $t_\mu$  それぞれで評価), local p-value  $\sim$  10% @ 1.45 TeV (et), 1.6 TeV ( $\mu$ t)



スカラー LQ に対する  
生成断面積上限 (BR=100%)



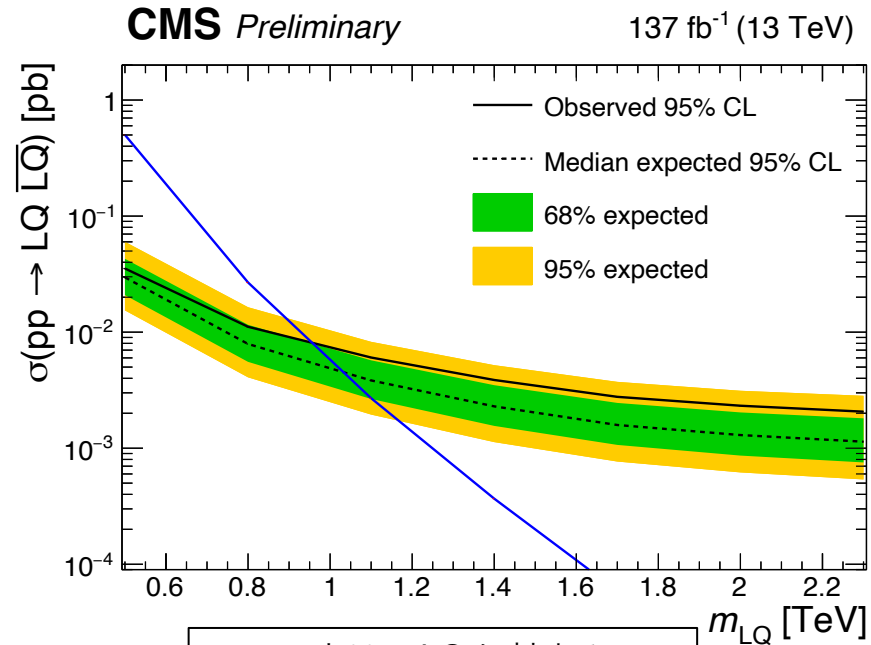
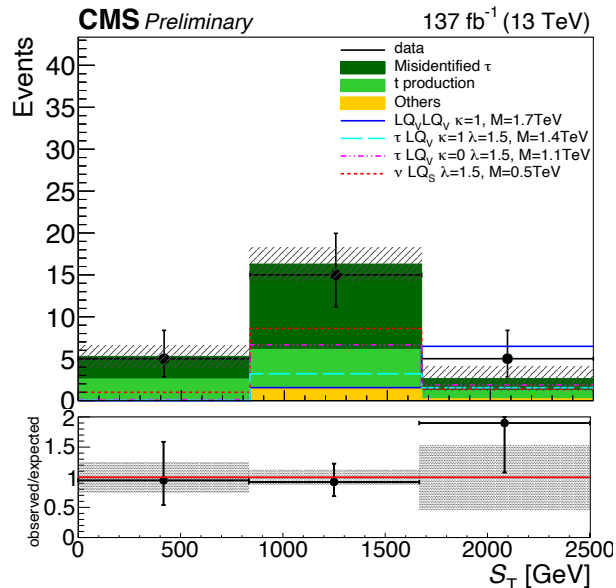
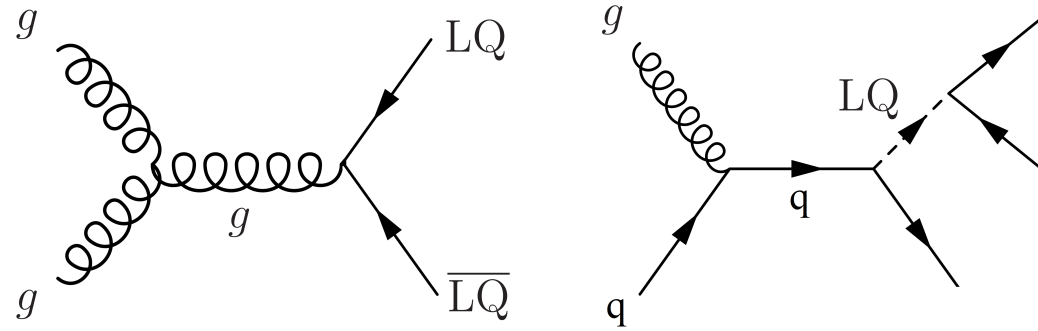
スカラー LQ に対する棄却域  
質量 - 崩壊分岐比



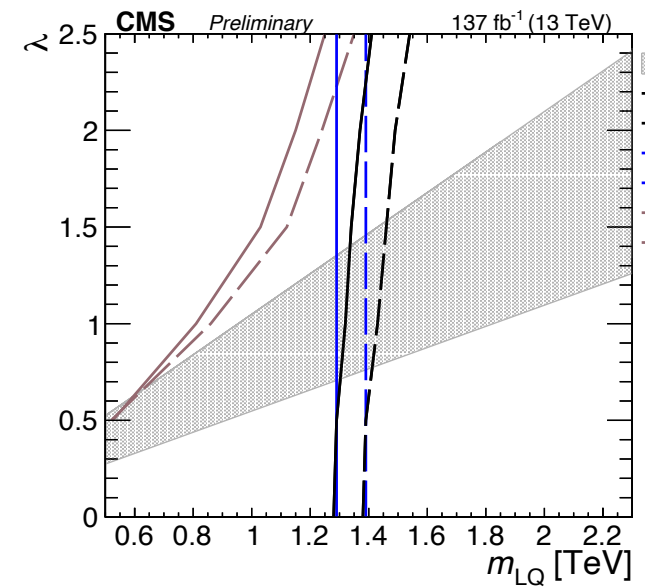
# Leptoquark 探索 (CMS)

## • CMS 3<sup>rd</sup> gen LQ 探索

- $t\nu/b\tau$ ,  $t\tau/b\nu$
- $t\tau\nu(b)$  終状態で探索
  - Single production
  - Pair production
- boosted regime / resolved regime を検査し、広範囲の質量を検査



スカラー LQ に対する  
生成断面積上限 (BR=50%)

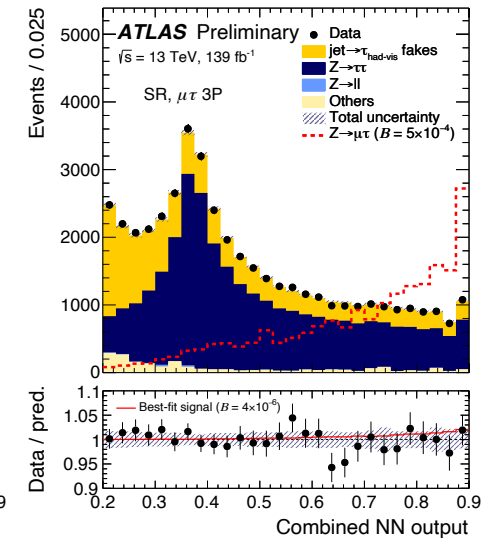
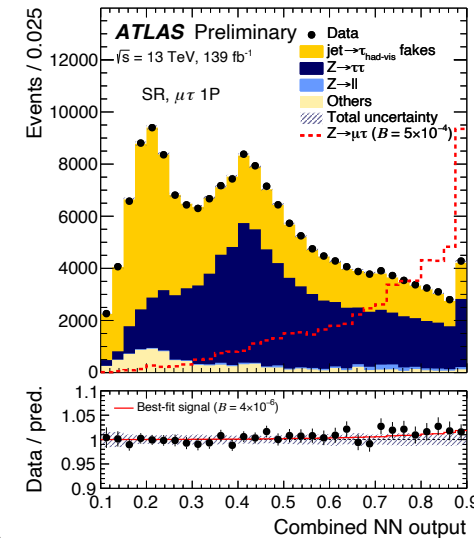
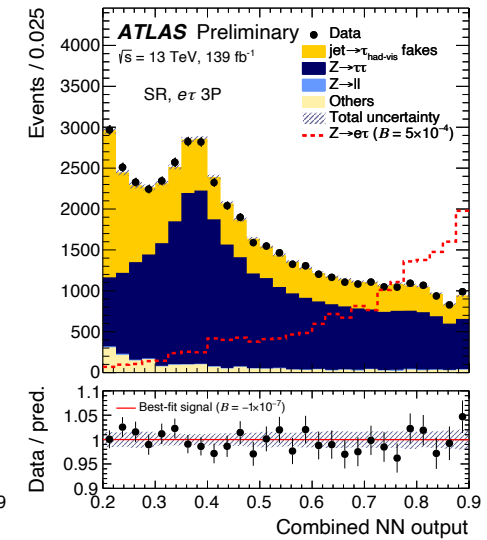
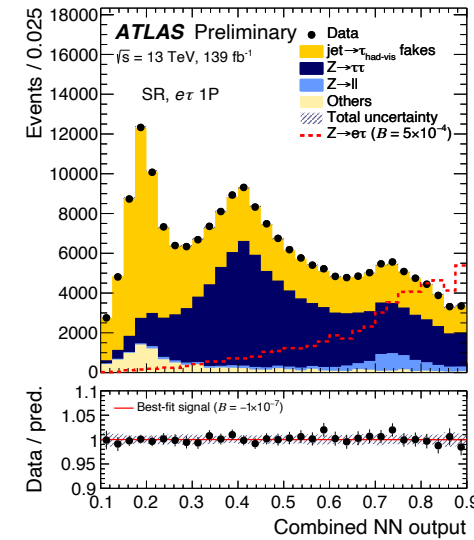


ベクター LQ に対する棄却域  
結合 - LQ 質量 (BR=50%)



# Z の LFV 稀崩壊探索 (ATLAS)

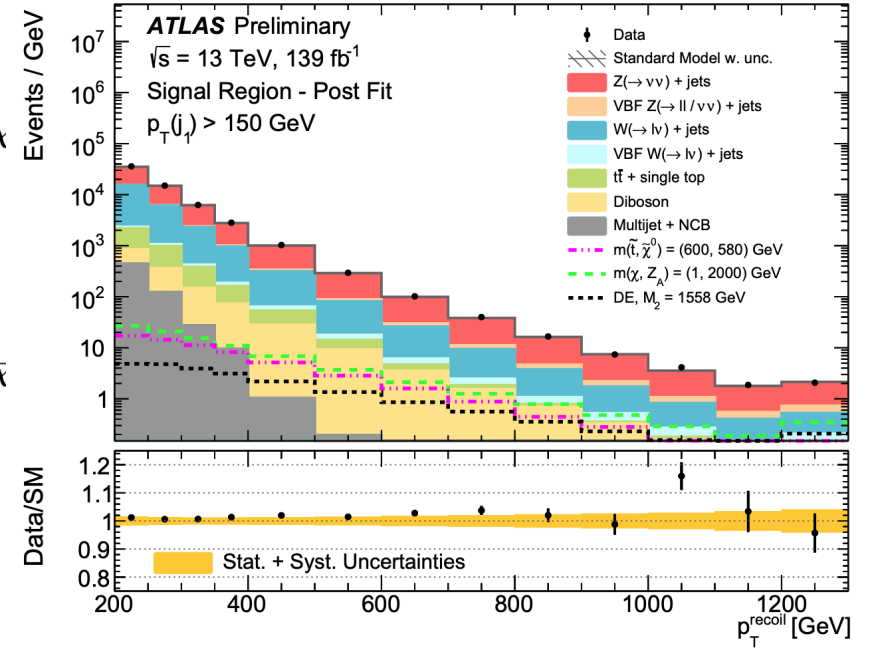
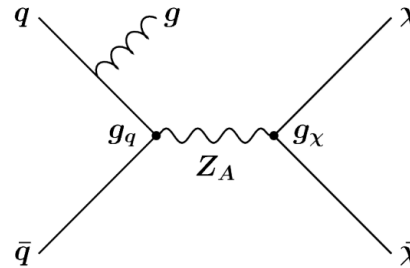
- $Z \rightarrow \tau\mu, \tau e$  探索
  - $Z \rightarrow \tau\tau, W+\text{jets}$  with  $\tau$  fake background
- 5 個の NN で信号を抽出
  - 1P ( $Z \rightarrow \tau\tau, W+\text{jets}$  (fake),  $Z \rightarrow ll$ )
  - 2P ( $Z \rightarrow \tau\tau, W+\text{jets}$  (fake))
  - 一つの Combined NN output を計算
- 同時 fit
  - 1P, 3P NN output, CR ( $Z \rightarrow \tau\tau$ )
- 結果
  - Best fit  $\mathcal{B}(Z \rightarrow e\tau) = (-0.1 \pm 3.5 \text{ (stat)} \pm 2.3 \text{ (syst)}) \times 10^{-6}$
  - $\mathcal{B}(Z \rightarrow \mu\tau) = (4.3 \pm 2.8 \text{ (stat)} \pm 1.6 \text{ (syst)}) \times 10^{-6}$
  - 95% CL exclusion limit:
    - Unpolarized シナリオ
    - $\mathcal{B}(e\tau) < 8.1 \times 10^{-6}$  ( $8.1 \times 10^{-6}$ )
    - $\mathcal{B}(\mu\tau) < 9.9 \times 10^{-6}$  ( $6.2 \times 10^{-6}$ )
    - cf: LEP limit  $\mathcal{B}(e\tau) < 9.8$  (OPAL),  $\mathcal{B}(\mu\tau) < 12$  (DELPHI)



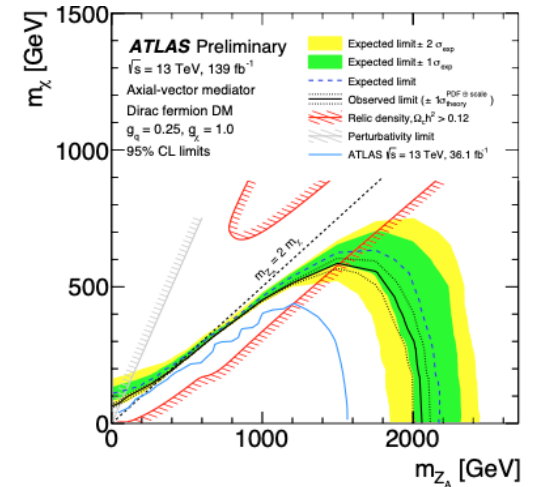


# モノジェット探索

- ISR jets + Missing ET
  - Generic Dark Matter 探索
  - 例: Axial Vector Mediator を通じた DM 対生成
- $Z(\rightarrow \nu\nu) + \text{jets}$  制御
  - Tail まで含めて Error < 5%
  - $Z \rightarrow \ell\ell$  Control region
  - 計算精度の向上:
    - Sherpa 2.2.1 NLO
    - NNLO QCD, NLO EW を参照にした reweight
- Inclusive SR & binned fit
  - Model dependent limit
  - Model independent limit



Selection	$\langle \sigma \rangle_{obs}^{95} [\text{fb}]$
$p_T^{\text{recoil}} > 200 \text{ GeV}$	861
$p_T^{\text{recoil}} > 250 \text{ GeV}$	350
$p_T^{\text{recoil}} > 300 \text{ GeV}$	156
$p_T^{\text{recoil}} > 350 \text{ GeV}$	87
$p_T^{\text{recoil}} > 400 \text{ GeV}$	52
$p_T^{\text{recoil}} > 500 \text{ GeV}$	21
$p_T^{\text{recoil}} > 600 \text{ GeV}$	10
$p_T^{\text{recoil}} > 700 \text{ GeV}$	4.2
$p_T^{\text{recoil}} > 800 \text{ GeV}$	2.1
$p_T^{\text{recoil}} > 900 \text{ GeV}$	1.2
$p_T^{\text{recoil}} > 1000 \text{ GeV}$	1.3
$p_T^{\text{recoil}} > 1100 \text{ GeV}$	0.5
$p_T^{\text{recoil}} > 1200 \text{ GeV}$	0.3

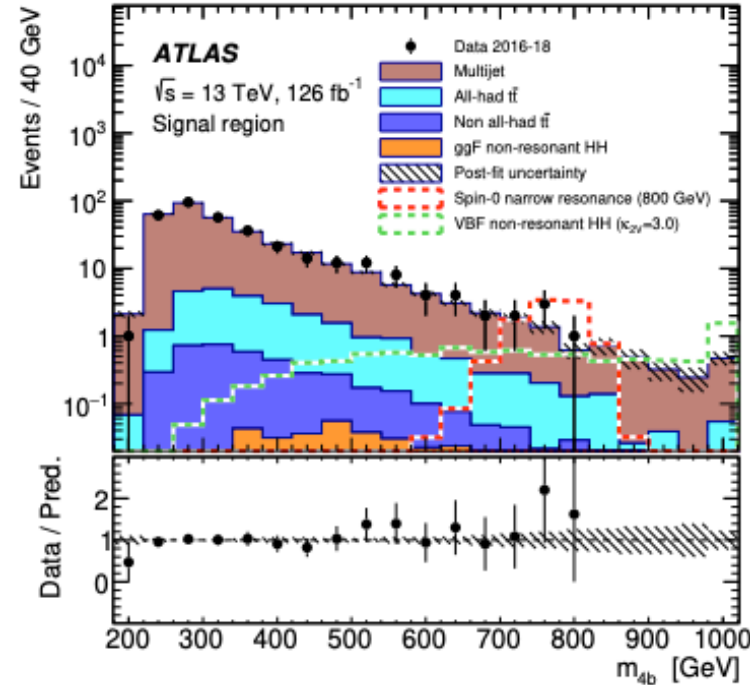
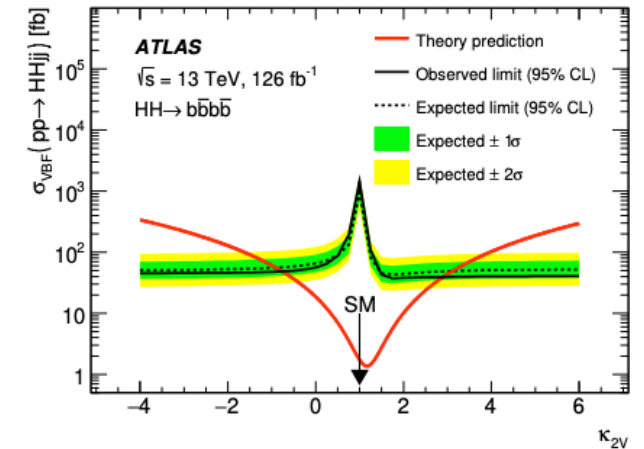
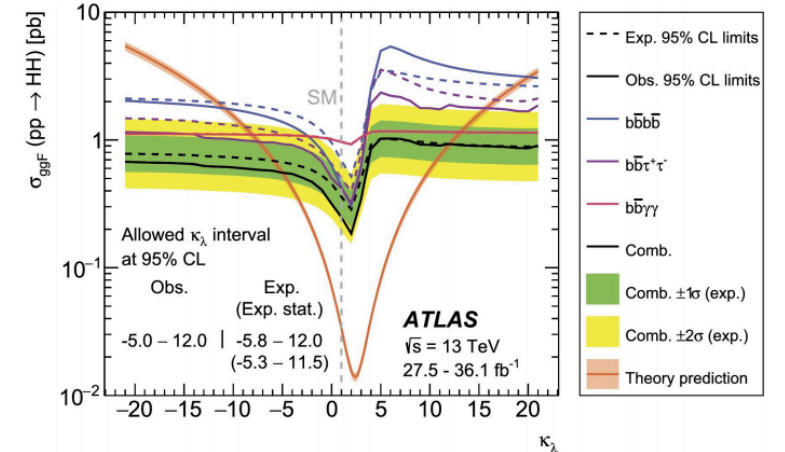
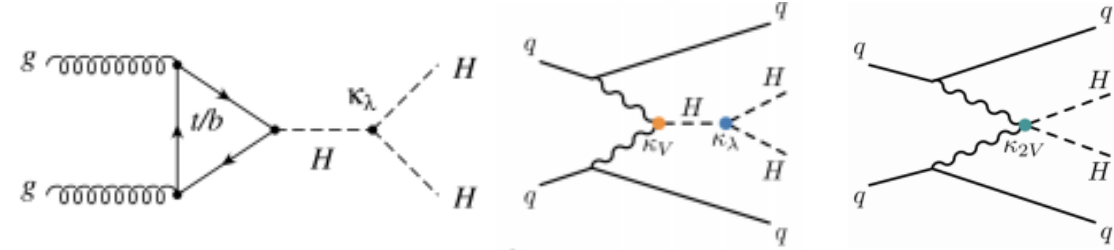


Model independent limit

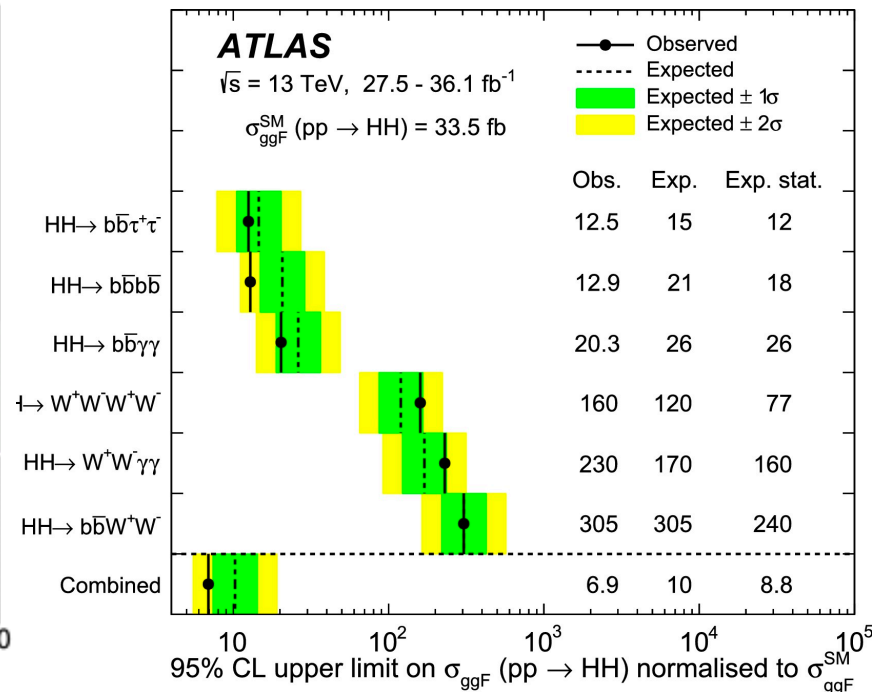
Axial vector mediator

# ヒッグス対生成

- ヒッグス対生成事象探索
  - 標準模型ヒッグス (“non-resonant”)
  - 新共鳴探索 (KK Graviton etc)
- ダイヒッグス系の不変質量スペクトラムを用いて解析



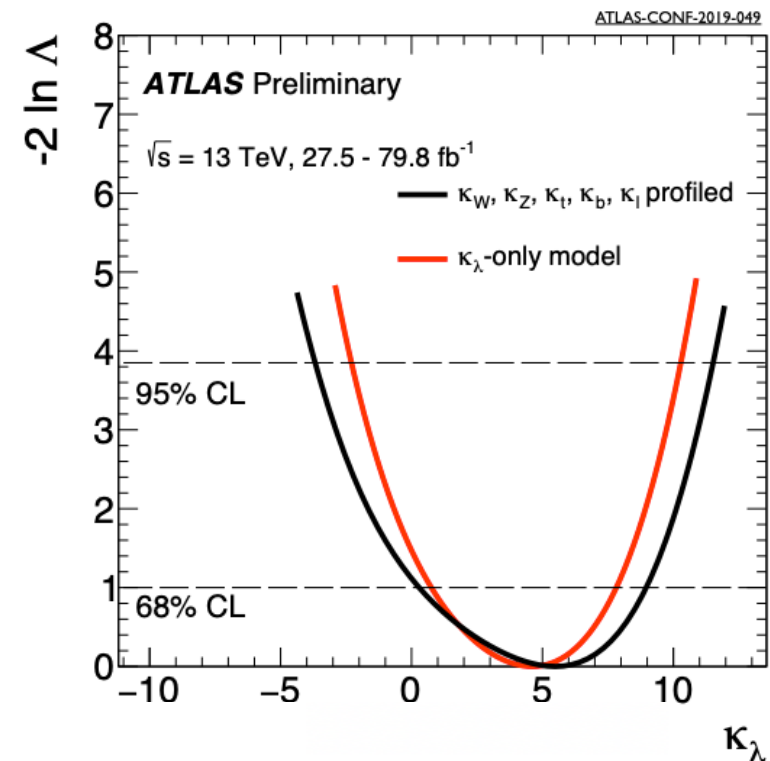
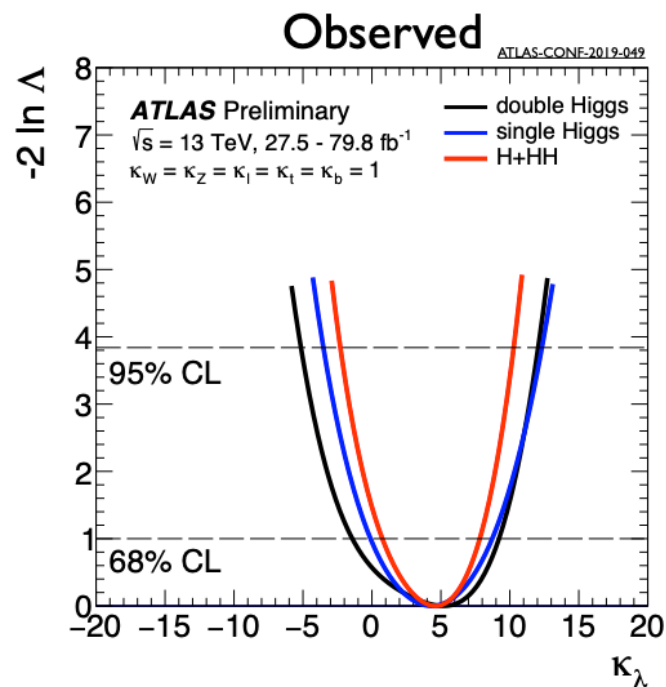
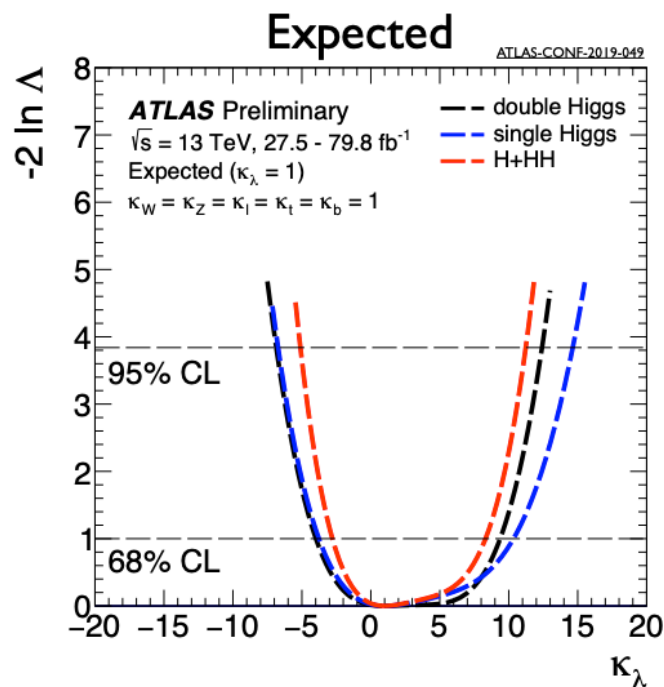
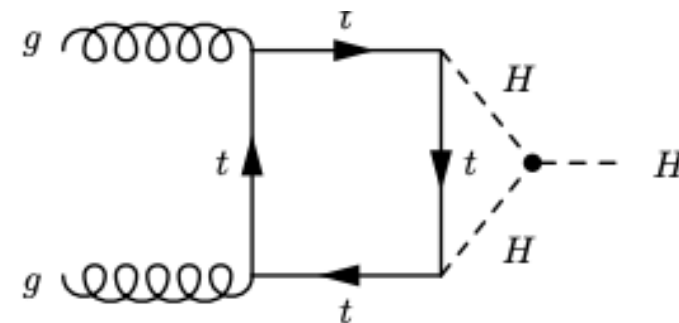
VBF HH (4b) の  $m_{4b}$



HH 全断面積上限値

# 自己結合定数への制限

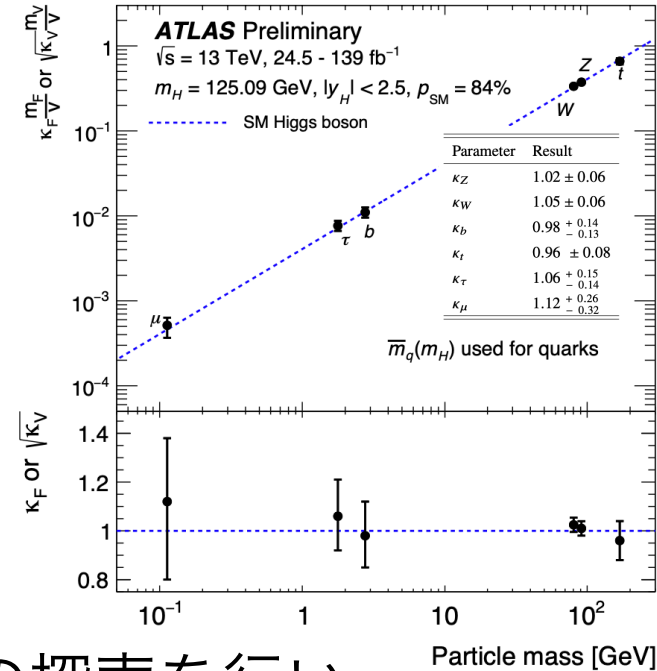
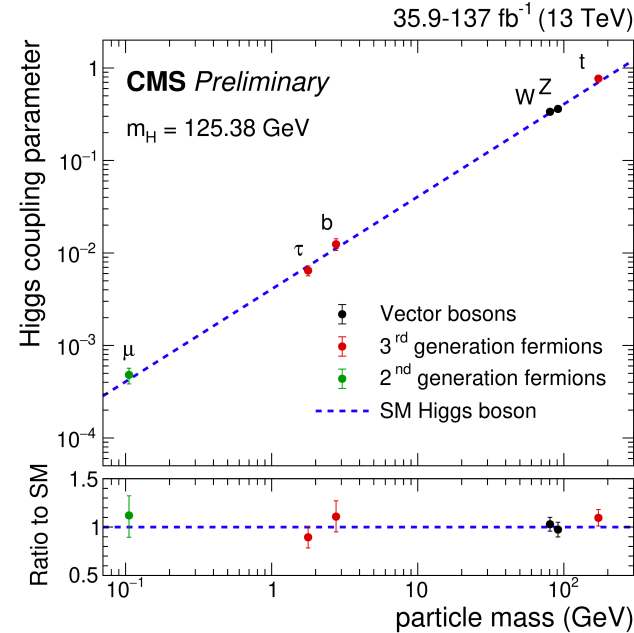
- Higgs pair production 解析と single production 解析を combine
- Kappa framework で、他の coupling modifier と併せた推定



# まとめ

## • Higgs

- 主要な生成過程の観測を達成
- ミューオンへの湯川結合について  $3\sigma$  の有意度で達成
- 統一的なフレームワークで精密測定を精力的に進めています
  - 第二世代結合定数の測定
  - 精密測定 (結合定数)



## • Exotics

- 解析技術の改善や、これまで見られていないチャンネルでの探索を行い、LHC データでの発見の可能性を最大化するよう解析を進行中
  - Leptoquark, Z LFV, Mono jet

一部のみを紹介しています。ICHEP のトークや、ATLAS/CMS の public results を参考にしてください



# 追加資料集

# Tau CP 測定 MVA 入力変数

Table 4: Input variables to the MVA discriminants for the  $\tau_\mu\tau_h$  and  $\tau_h\tau_h$  channel. For all variables only the visible decay products of the  $\tau$  leptons are implied, except for the  $\tau_\mu\tau_h$  and  $\tau_h\tau_h$  mass, for which the SVFIT algorithm is used.

Observable	$\tau_\mu\tau_h$	$\tau_h\tau_h$
$p_T$ of leading $\tau_h$ or $\tau_\mu$	✓	✓
$p_T$ of (trailing) $\tau_h$ for $\tau_\mu\tau_h$ ( $\tau_h\tau_h$ ) channel	✓	×
$p_T$ of visible di- $\tau$	✓	✓
$p_T$ of di- $\tau_h + p_T^{\text{miss}}$	×	✓
$p_T$ of $\mu + \tau_h + p_T^{\text{miss}}$	✓	×
Visible di- $\tau$ mass	✓	✓
$\tau_\mu\tau_h$ or $\tau_h\tau_h$ mass (using SVFIT)	✓	✓
Leading jet $p_T$	✓	✓
Trailing jet $p_T$	✓	×
Jet multiplicity	✓	✓
Dijet invariant mass	✓	✓
Dijet $p_T$	✓	×
Dijet $ \Delta\eta $	✓	×
$p_T^{\text{miss}}$	✓	✓

# H $\rightarrow\mu\mu$ Categorization MVA - 1

- CMS

- VBF DNN:

- 主な入力変数

- Dimuon 系:  $M_{\mu\mu}$ ,  $\sigma(M_{\mu\mu})$ ,  $p_T(\mu\mu)$ ,  $y_{\mu\mu}$ ,  $\phi_{CS}$ ,  $\theta_{CS}$
      - Dijet 系: 3-vector of  $j1, j2$ ,  $M_{jj}$ ,  $\Delta\eta_{jj}$
      - Dimuon 系と Dijet 系の間、Rapidity 相関、 $p_T$  バランス
      - Soft jet の情報 (hadronic jets in the rapidity gap of two jets)

- ATLAS

- VBF BDT:

- 主な入力変数

- Dimuon 系:  $p_T(\mu\mu)$ ,  $y_{\mu\mu}$ ,  $\theta^*$
      - Dijet 系:  $p_T$ ,  $\eta$  of  $j1, j2$ ,  $M_{jj}$ ,  $\Delta\eta_{jj}$ ,  $p_T(jj)$ ,  $y_{jj}$ , Track multiplicity of jets (q/g tagging)
      - Missing ET, HT



# H $\rightarrow\mu\mu$ Categorization MVA - 2

- CMS

- ggH BDT

- 主な入力変数 (VBF とは違い  $M_{\mu\mu}$  と無相関なものを選択)
      - Dimuon 系の情報:  $p_T(\mu\mu)$ ,  $y_{\mu\mu}$ ,  $\phi_{CS}$ ,  $\theta_{CS}$
      - Jet 関係の情報: Leading jet  $p_T$ ,  $\eta$

- ATLAS

- ggH BDT

- 主な入力変数

- Dimuon 系:  $p_T(\mu\mu)$ ,  $y_{\mu\mu}$ ,  $\theta^*$
      - Jet 系:
        - (1-jet bin) leading jet の  $p_T$ ,  $\eta$ ,  $N_{\text{track}}$  + Dimuon システムとの開き角
        - (2-jet bin) VBF と同じ変数

# H → gg の入力変数まとめ

STXS regions	Multi-class BDT	STXS regions	Binary BDT
$gg \rightarrow H$	di-photon $p_T$ and absolute rapidity; di-jet $p_T$ , mass, $\Delta y$ , $\Delta\phi$ , $\Delta\eta$ between the 2 jets; $p_T$ , mass of $\gamma\gamma + j$ and $\gamma\gamma + jj$ , $\Delta y$ , $\Delta\phi$ between $\gamma\gamma$ and $jj$ , minimum $\Delta R$ between jets and photons, mass of the sum of all jets; di-lepton $p_T$ , di-e or di- $\mu$ mass, $E_T^{miss}$ , $p_T$ of lepton + $E_T^{miss}$ ; $p_T$ , $\eta$ , $\phi$ , mass of top candidates; Number of jets, barrel jets ( $ \eta  < 2.5$ ), b-jets and leptons; leading jet $p_T$ , sum $p_T$ of all jets $\sum E^T$ , $E_T^{miss}$ significance; Average interaction per crossing, number of primary vertices	individual STXS regions from $gg \rightarrow H$ or $qq' \rightarrow Hqq'$	Multi-class BDT variables, and $\Delta\phi$ , $\Delta\eta$ between the 2 photons ( $\Delta\phi_{\gamma\gamma}$ , $\Delta\eta_{\gamma\gamma}$ ); Number of electrons and muons; $E_T^{miss}$ , $\sum E^T$ , $E_T^{miss}$ significance, and $E_T^{miss}$ azimuthal angle computed from hardest vertex; $\gamma\gamma \vec{p}_T$ projected to its thrust axis ( $p_{Tt}^{\gamma\gamma}$ ); Half difference between di-photon $\eta$ and sum $\eta$ of leading 2 jets ( $\eta^{Zep}$ ); $\phi_{\gamma\gamma}^* = \tan\left(\frac{\pi -  \Delta\phi_{\gamma\gamma} }{2}\right) \sqrt{1 - \tanh^2\left(\frac{\Delta\eta_{\gamma\gamma}}{2}\right)}$ $\cos\theta_{\gamma\gamma}^* = \left  \frac{(E^{\gamma 1} + p_z^{\gamma 1}) \cdot (E^{\gamma 2} - p_z^{\gamma 2}) - (E^{\gamma 1} - p_z^{\gamma 1}) \cdot (E^{\gamma 2} + p_z^{\gamma 2})}{m_{\gamma\gamma} + \sqrt{(m_{\gamma\gamma} + (p_T^{\gamma\gamma})^2)}} \right $
$qq' \rightarrow Hqq'$			$WH$ STXS regions combined
$qq \rightarrow H\ell\nu$	$ZH$ STXS regions combined	$t\bar{t}H$ STXS regions combined	$E_T^{miss}$ , $E_T^{miss}$ significance, $E_T^{miss}$ azimuthal angle; Top reconstruction BDT scores
$qq \rightarrow H\ell\ell$			$tWH$ , $tHqb$
$t\bar{t}H$			
$tH$			

# • ATLAS diHiggs 探索

Channel	L [fb <sup>-1</sup> ]	Production	Decay	Reference
bbbb	36	ggF	resolved + boosted	<a href="#">JHEP 01 (2019) 030</a>
<b>bbbb</b>	<b>127</b>	<b>VBF</b>	<b>resolved</b>	<a href="#">JHEP 07 (2020) 108</a>
bbWW->bblvqq	36	ggF	resolved + boosted	<a href="#">JHEP 04 (2019) 092</a>
<b>bb(WW/ZZ/ττ)-&gt;bblvlv</b>	<b>139</b>	<b>ggF</b>	<b>resolved</b>	<a href="#">Phys. Lett. B 801 (2020) 135145</a>
bbττ	36	ggF	resolved	<a href="#">Phys. Rev. Lett. 121 (2018) 191801</a>
<b>bbττ</b>	<b>139</b>	<b>ggF</b>	<b>boosted</b>	<a href="#">arXiv:2007.14811</a>
WWWW->lvlv(lvlv / lvqq / qqqq)	36	ggF	resolved	<a href="#">JHEP 05 (2019) 124</a>
bbγγ	36	ggF	resolved	<a href="#">JHEP 11 (2018) 040</a>
γγWW->γγlvjj	36	ggF	resolved	<a href="#">Eur. Phys. J. C 78 (2018) 1007</a>