

LHC-ATLAS実験における  
 $W/Z$ 粒子との随伴生成からの  
 $H \rightarrow WW \rightarrow l\nu l\nu$ 過程を用いた  
ヒッグス粒子の探索

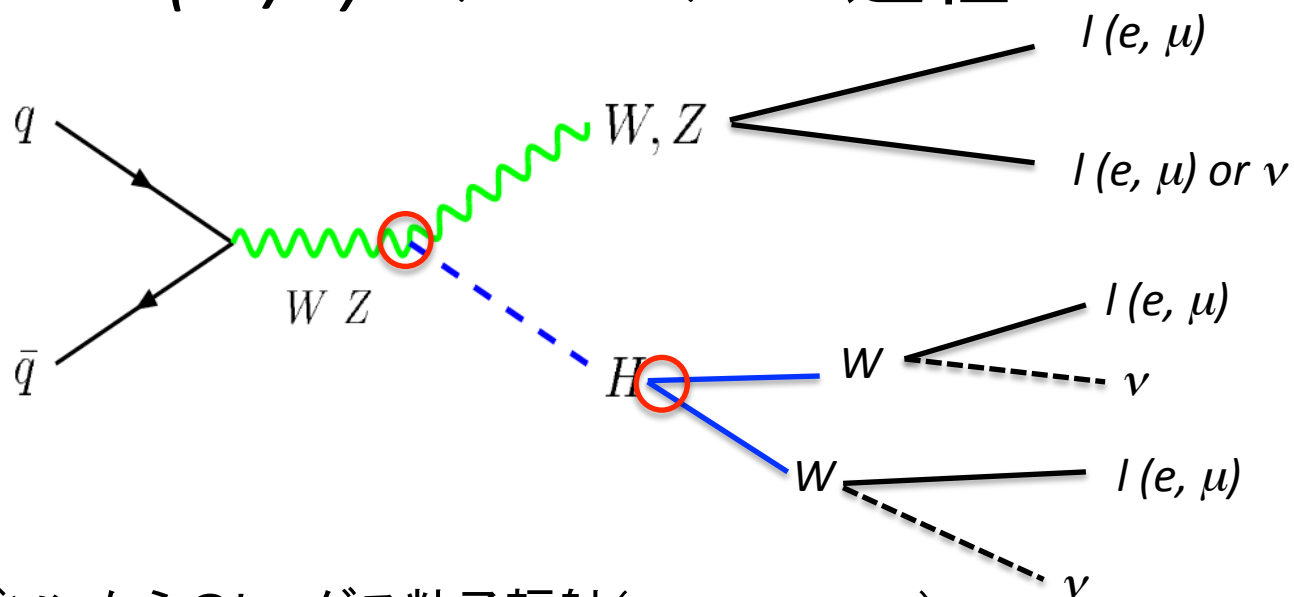
久保田隆至、Elisabetta Barberio, Pere Rados, Joel Smith  
(メルボルン大学)  
他 ATLAS Collaboration

日本物理学会秋季大会@高知大学  
2013年9月21日

# アウトライン

- 2012年のデータ(8TeV, 20.7 fb<sup>-1</sup>)を用いた解析の概要
  - EPS-HEP 2013で報告
  - CONF Note (<http://cds.cern.ch/record/1562933>)
- Contents
  - ヒッグス粒子のW/Z随伴生成
  - WH解析
  - ZH解析
  - (W/Z)H解析結果

# $(W/Z)H \rightarrow WW \rightarrow l\nu/l\nu$ 過程

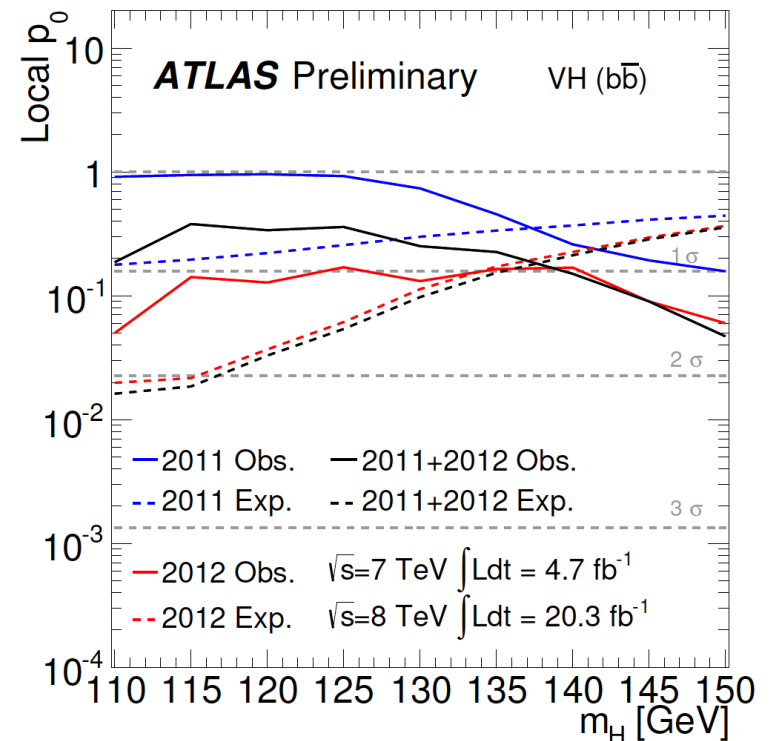
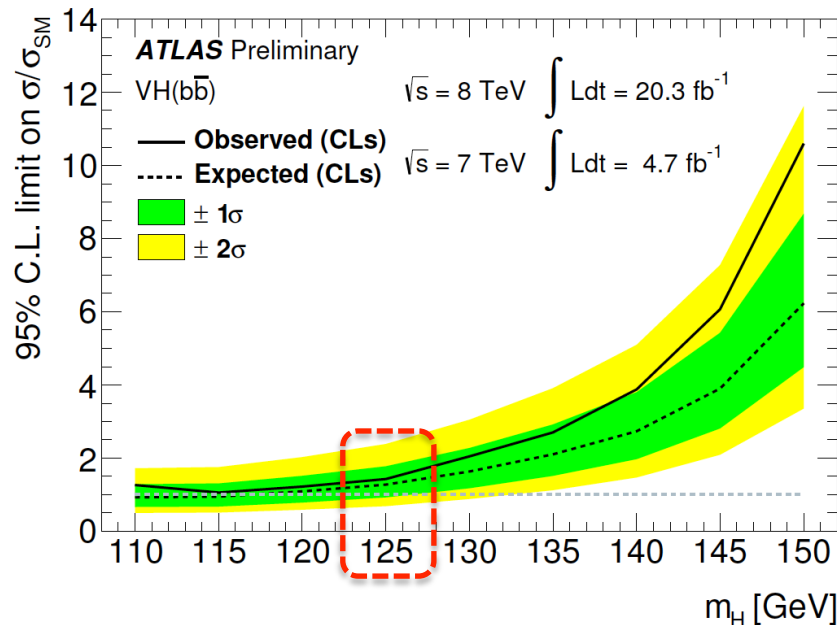


- ゲージボソンからのヒッグス粒子放射 ( $m_H = 125 \text{ GeV}$ )
  - $\sigma(WH) = 0.705 \text{ pb}$
  - $\sigma(ZH) = 0.415 \text{ pb}$
- ヒッグス粒子の $WW$ 崩壊
  - 崩壊分岐比: 0.216
- 特徴
  - レプトン数が多い  $\rightarrow$  バックグラウンド少:  $S/N \sim 0.1$  ( $WH$ ),  $0.3$  ( $ZH$ )
  - ヒッグス粒子とゲージボソンの結合に感度
    - 特に $WH$ はヒッグスとのみ2箇所結合  $\rightarrow$  アノマリに感度が高い

20fb<sup>-1</sup>で $WH$ が $\sim 25$ 事象、 $ZH$ が4事象

# (W/Z)H過程探索状況

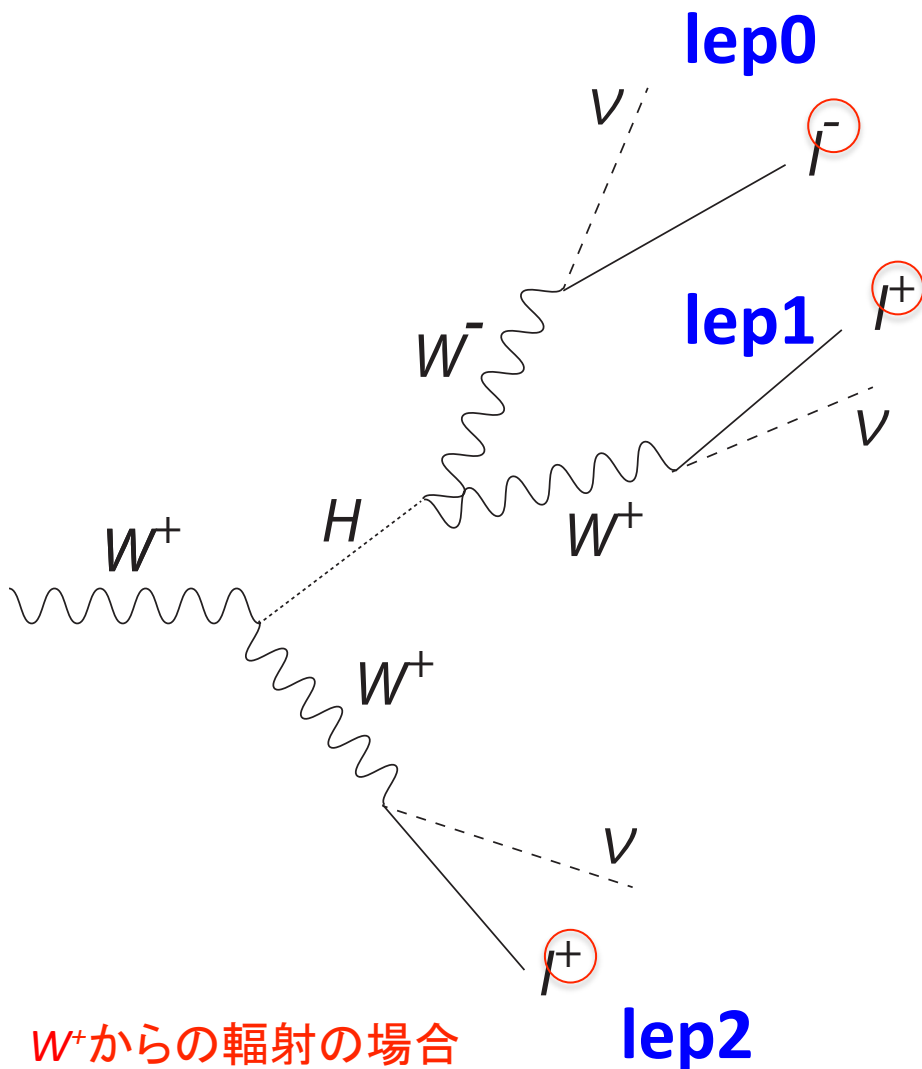
- 単独では“未発見”
- ATLAS実験の $H \rightarrow b\bar{b}$ モードでの探索 (ATLAS-CONF-2013-079)
  - $m_H = 125$  GeV近傍での排除が間近
  - 今後は複数崩壊モードのcombinedが重要



# WH解析

$$\Delta R = \sqrt{\eta^2 + \phi^2}$$

# 解析のターミノロジー



$W^+$ からの輻射の場合

lep2

- レプトン番号付け ヒッグス粒子から

- ユニークな電荷: lep0
- lep0に近い( $\Delta R$ ): lep1
- 残りもの: lep2

W粒子から

- イベントカテゴリ
  - OSSF レプトン対を持つ
    - Z-enriched samples
  - OSSF レプトン対を持たない
    - Z-depleted samples

**OSSF (Oppositely Singed Same Flavor)**  
背景事象の種類が異なる→解析も異なる

# 事象選別

- 背景事象
  - 3本の実レプトン:  $W(Z/\gamma^*), ZZ^*, VVV$
  - フェイクレプトンを含む:  $WW, Z+jets, top, b\bar{b}, c\bar{c}, W+jets$
- 事象選別 ggF, VBF解析と同様(若干loose)なレプトン選別
  - 3本のアイソレートレプトン( $p_T > 15$  GeV) [ $bb, cc, W+jets$ ]
    - 一本以上シングルレプトントリガー通過 ( $p_T$  閾値 21(25) GeV for  $\mu(e)$ )
    - 電荷の和 =  $\pm 1$
  - Cut 1: # of jets ( $pt > 25$  GeV) < 2 [ $top$ ]
  - Cut 2: # of  $b$ -jets = 0 [ $top$ ]
  - Cut 3:  $E_{T,Rel}^{miss}$  カット [ $Z+jets, ZZ$ ] ←

近傍 ( $\Delta\phi < 2/\pi$ ) にレプトン又はjet:

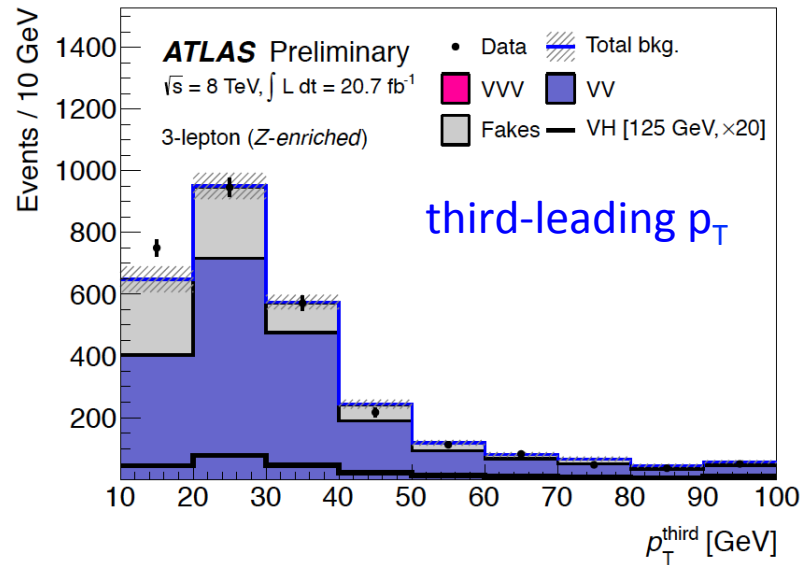
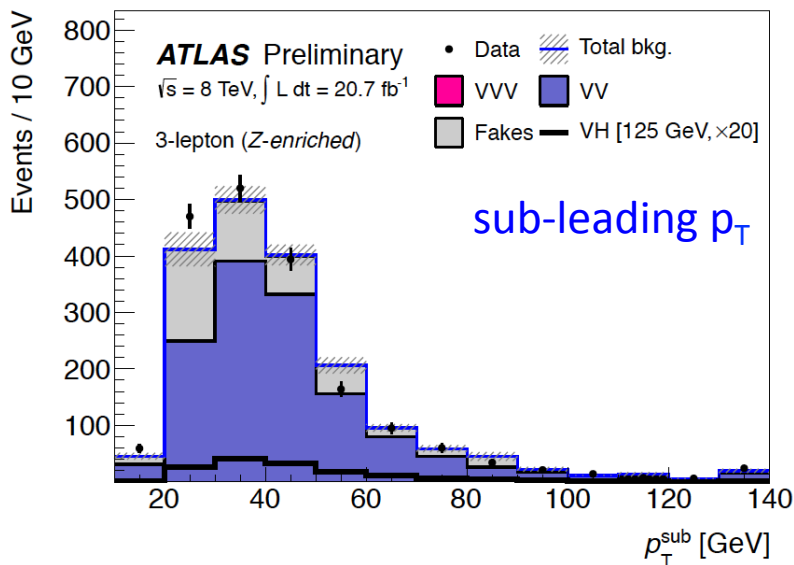
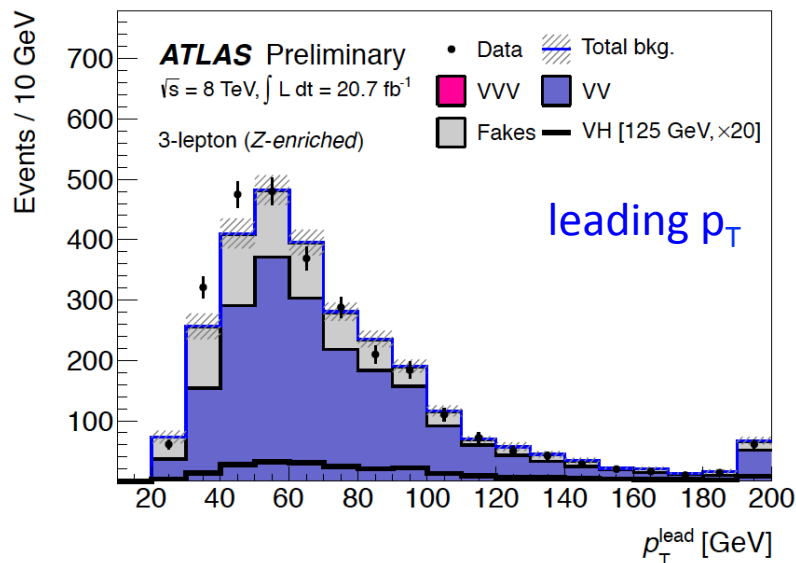
    - $E_{T,Rel}^{miss} = E_T^{miss} \times \sin(\Delta\phi)$

それ以外

    - $E_{T,Rel}^{miss} = E_T^{miss}$
  - > 40 GeV (Z-enriched samples)
  - > 25 GeV (Z-depleted samples)
  - Cut 4: Z mass veto (全OSSFレプトン対で  $|M_{ll} - M_Z| > 25$  GeV) [ $Z+jets, ZZ, WZ$ ]
  - Cut 5: 異電荷レプトン対のmass > 12 GeV [ $W\gamma^*$ ]
  - Cut 6:  $\Delta R(lep0, lep1) < 2.0$  [ $WZ$ ]
  - ggF, VBF解析とのoverlapを除去

# カット変数の分布

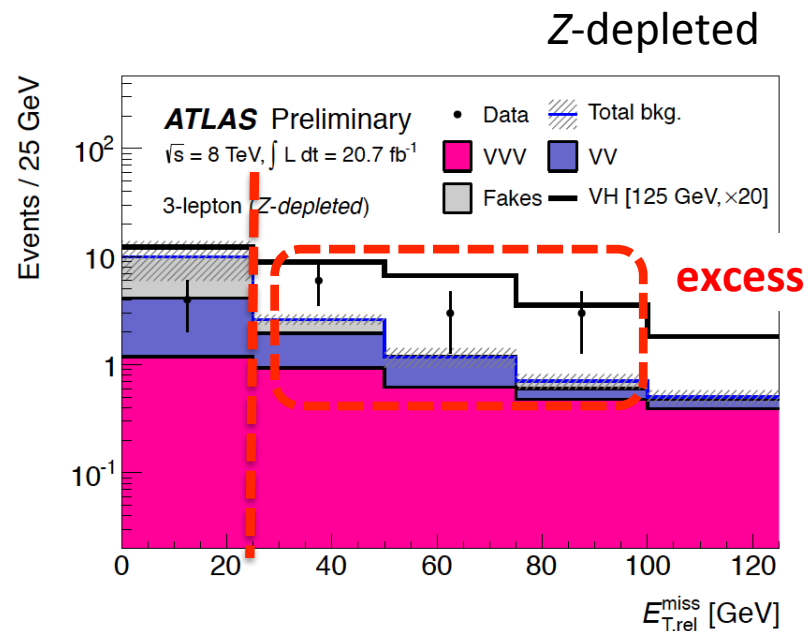
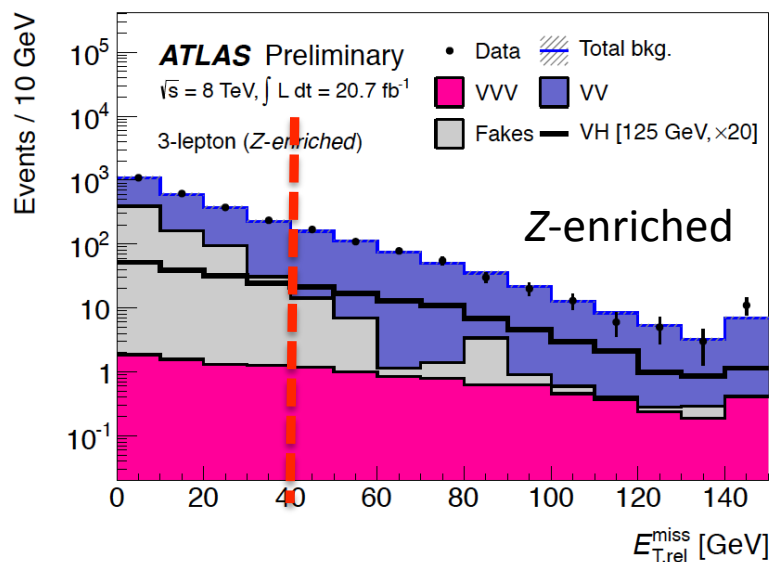
レプトンの $p_T$ 分布  
(3レプトン要求後)





# カット変数の分布

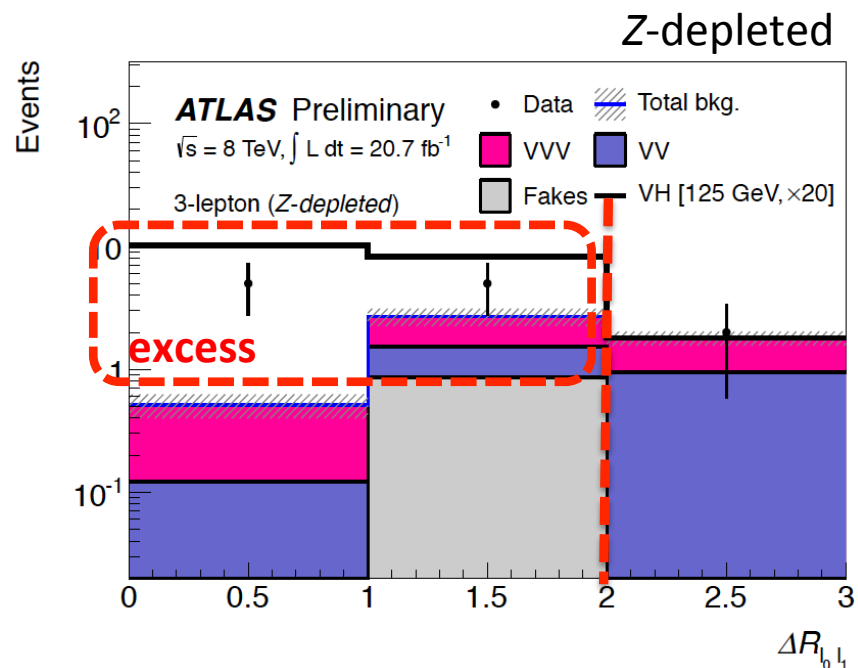
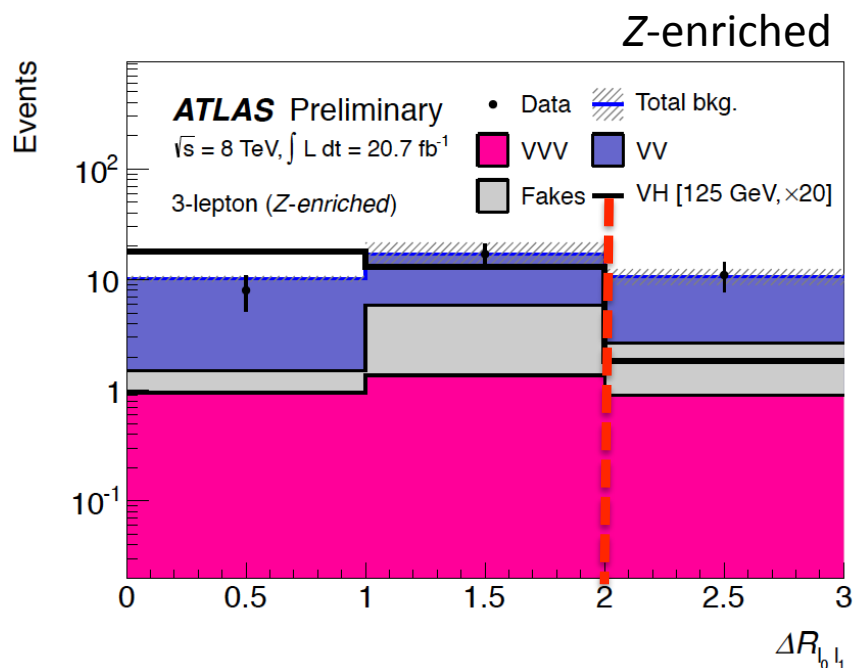
$E_{T,Rel}^{miss}$  分布 ( $E_{T,Rel}^{miss}$  カット前)



- Z-depleted、高い  $E_{T,Rel}^{miss}$  領域に excess

# カット変数の分布

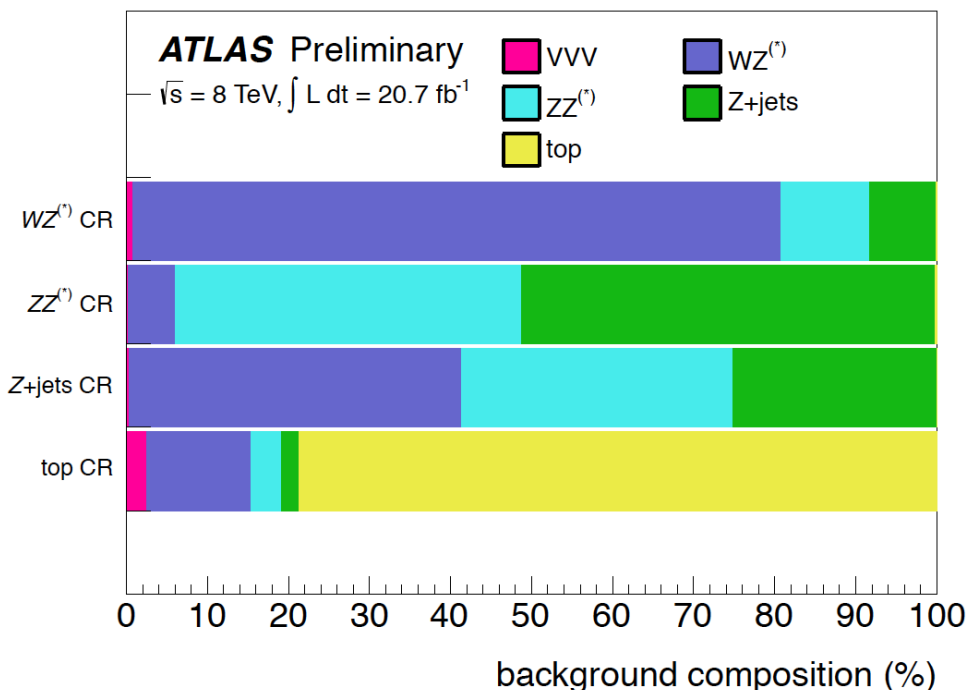
$\Delta R_{ll}$  分布 ( $\Delta R_{ll}$  カット前)



- Z-depleted、signal-likeな $\Delta R_{ll}$ 領域にexcess

# 背景事象の規格化

- MC推定をControl regionの情報で規格化 ( $W(Z/\gamma^*)$ ,  $top$ ,  $Z+jets$ ,  $ZZ^*$ )
- 4つのcontrol regionを定義して同時にフィット



	Data	MC	Data/MC
$WZ^*$ CR	439	$438 \pm 24$	$1.00 \pm 0.07$
$ZZ^*$ CR	244	$210 \pm 40$	$1.15 \pm 0.23$
Z+jets CR	828	$860 \pm 40$	$0.96 \pm 0.06$
Top CR	6	$6.2 \pm 1.1$	$1.0 \pm 0.4$

各CRでのデータ/MC比較(規格化後)

各CRでのバックグラウンド構成

# シグナル領域事象数

$W(Z/\gamma^*), VVV$  が主要な寄与

	Obs.	signal	Total BG	VVV	$W(Z/\gamma^*)$	Z+jets	ZZ	Top
Z-enri.	24	$1.42 \pm 0.06$	$25.7 \pm 4.1$	$2.19 \pm 0.13$	$16.0 \pm 0.57$	$4.05 \pm 3.97$	$2.49 \pm 0.28$	$0.65 \pm 0.24$
Z-dep.	<b>9</b>	$0.76 \pm 0.04$	<b><math>2.71 \pm 0.43</math></b>	$1.45 \pm 0.09$	$0.57 \pm 0.08$	0	$0.10 \pm 0.03$	$0.58 \pm 0.35$

\* エラーは統計と測定器由来の系統誤差のみ

Z-depleted信号領域にexcess

# 系統誤差

- 測定系由来
  - Jet関係 (energy scale, resolution, b-tagging efficiency)
  - lepton関係 (energy scale, resolution, efficiency)
  - $E^{\text{miss}}_{\text{T}}$ 関係 (Jet, leptonの不定性を伝搬、pile-up effect)
  - Luminosity (3.6 %)

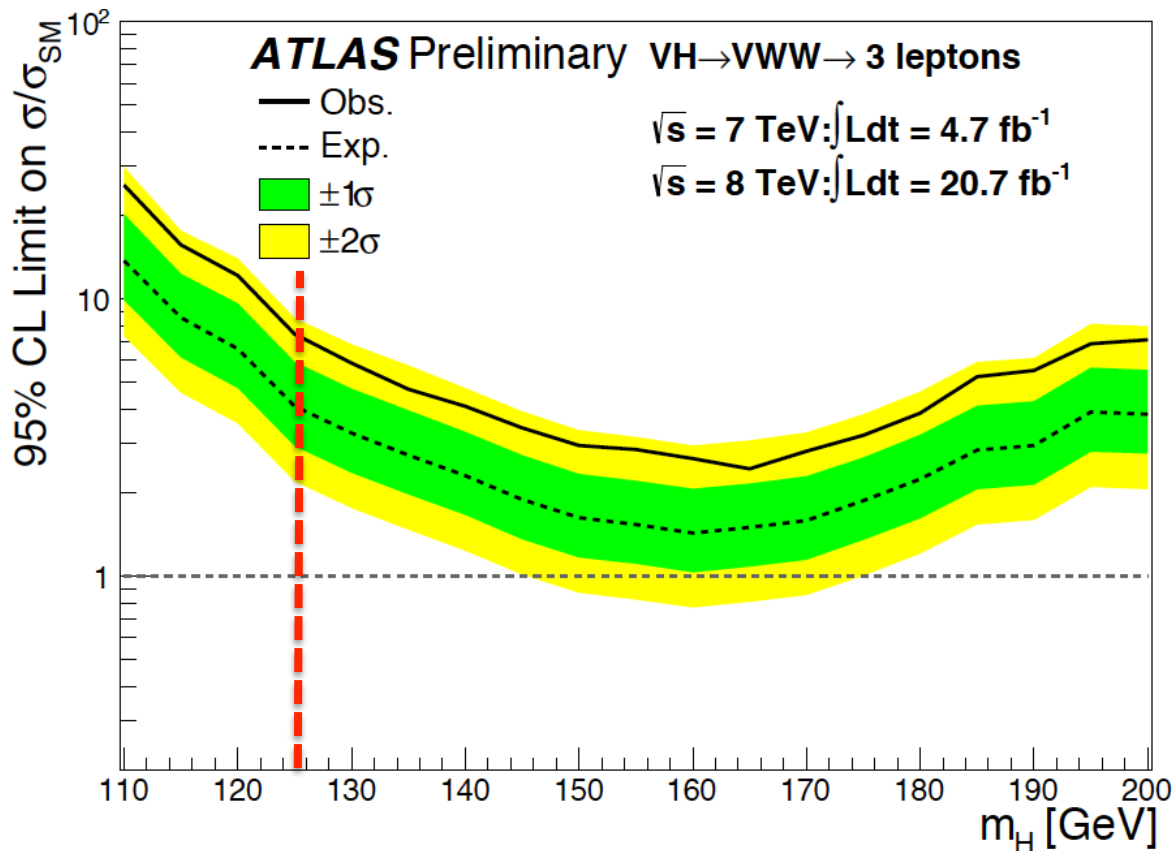
表: 測定系由来の系統誤差 (lumi以外) のまとめ

	$VH$	$VVV$	$W(Z/\gamma^*)$	Z+jets	$ZZ^{(*)}$	Top	Total BG
Z-enriched	3.3 %	4.1 %	3.4 %	4.0 %	10 %	11 %	3.8 %
Z-depleted	3.5 %	3.2 %	6.1 %	0 %	12 %	36 %	7.4 %

- 理論由来
  - シグナル事象の断面積不定性
    - Renormalization & factorization scale < 3 % [arXiv:1307.1347]
    - PDF,  $\alpha_s$  不定性 < 5 %
    - $W$ 粒子の偏極不定性 ( $WH$ ) < 3 % [arXiv:1203.2165]
  - PDF由来のacceptance 不定性: < 10 % (CRを用いない背景事象のみ)
  - $VVV$  k-factor: 50 % 不定性
  - 背景事象の同時フィット:  $WZ$  (4 %), Z+jets (100 %), top (60 %),  $ZZ^{(*)}$  (14 %)

# ヒッグス断面積上限値 ( $WH$ )

- 95 %信頼度での $\sigma/\sigma_{SM}$ の上限値
- CLs using test statistics: profile likelihood  $q_\mu = -2 \ln(\mathcal{L}(\mu, \hat{\theta}_\mu)/\mathcal{L}(\hat{\mu}, \hat{\theta}))$
- 2011年解析 (<http://cdsweb.cern.ch/record/1460390>) もcombined



- Expected: 5.2 @  $m_H = 125 \text{ GeV}$
- excessは $2\sigma$ 以内

# ZH解析

# ZH → ZWW → lllνlν解析

- 背景事象: ZZ\*がほぼ全て
- 4本のアイソレートレプトンを要求し、下記の事象選択

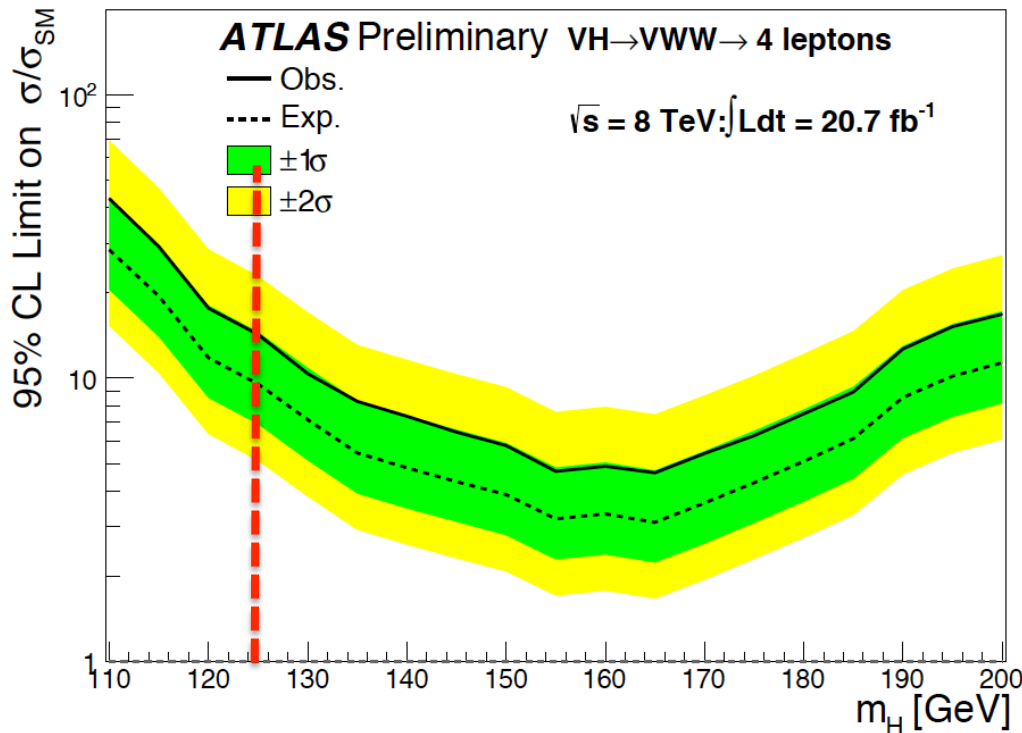
Signal Selections		
Cut		
$E_T^{\text{miss}}$ cut	$E_T^{\text{miss}} > 30 \text{ GeV}$	
$p_T^\ell$ cuts	highest $p_T$ lepton: $p_T > 25 \text{ GeV}$ second highest $p_T$ lepton: $p_T > 20 \text{ GeV}$ third highest $p_T$ lepton: $p_T > 15 \text{ GeV}$ fourth highest $p_T$ lepton: $p_T > 10 \text{ GeV}$	
Jet multiplicity	$N_{\text{jet}} \leq 1$	
$b$ -veto	$N_{b\text{-tag}} = 0$	
Mass cuts	$ m_{\ell_2\ell_3} - m_Z  < 10 \text{ GeV}$ $10 \text{ GeV} < m_{\ell_0\ell_1} < 65 \text{ GeV}$	
Angular cut	$\Delta\phi_{01}^{\text{boost}} < 2.5$	
Channel separation	2SFOS	1SFOS
$p_{T4\ell}$ cut	$p_{T4\ell} > 30 \text{ GeV}$	
$m_{4\ell}$ cut	$m_{4\ell} > 130 \text{ GeV}$	
Overlap removal [6]	remove overlap with $H \rightarrow WW$ analysis	

\*  $\Delta\phi_{01}^{\text{boost}}$ : ヒッグス静止系でのヒッグスからのレプトンのopening angle



# ZH → ZWW → lllν/lν 結果

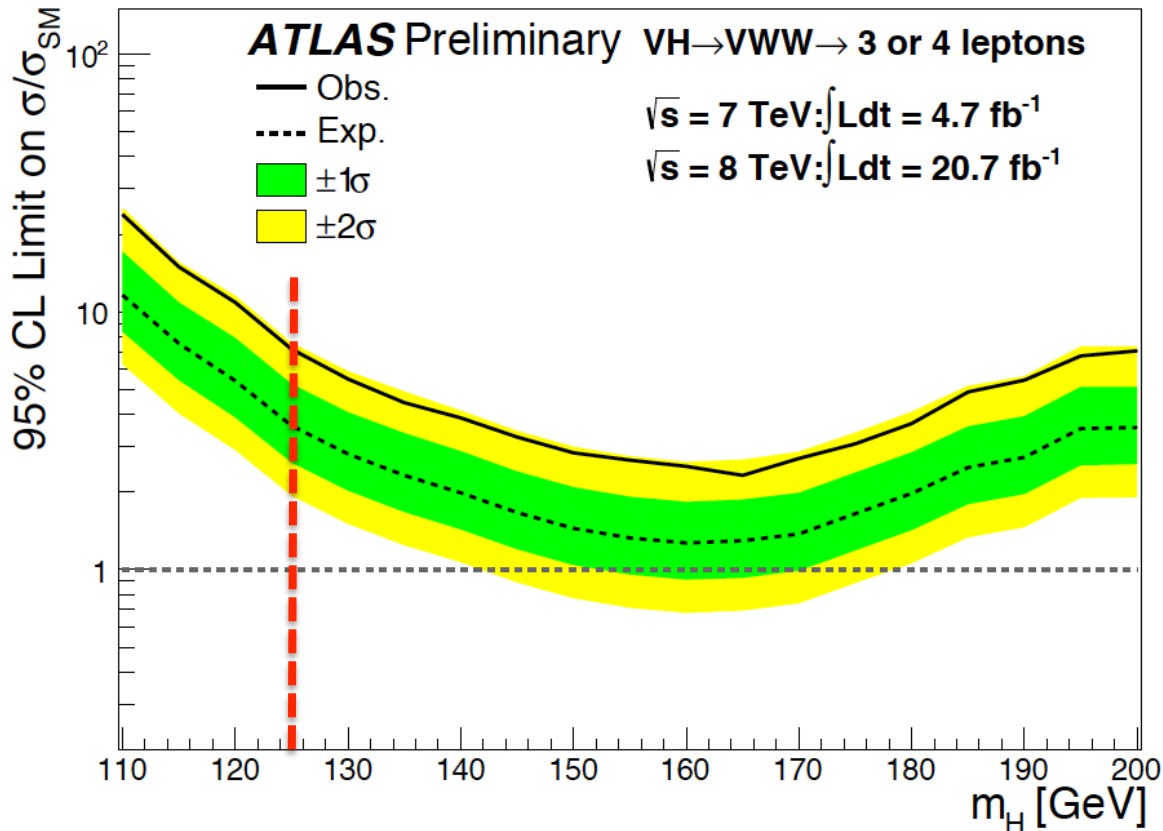
	ZZ	VVV	Fakes	Total Bkg.	VH(125)	Data
4 leptons	164±6	1.89±0.08	8.8±5.8	175±10	0.89±0.04	182
$E_T^{\text{miss}}$ and $p_T$	41.8±1.6	1.65±0.07	7.8±5.3	51.3±5.6	0.71±0.03	55
Jet multiplicity and $b$ -veto	30.8±1.1	1.30±0.06	0.31±0.11	32.5±1.2	0.52±0.02	35
Mass cuts	2.97±0.15	0.22±0.02	0.05±0.03	3.24±0.16	0.41±0.02	2
Angular cut	1.88±0.12	0.20±0.02	0.04±0.02	2.12±0.12	0.39±0.02	2
1 SFOS pair	0.24±0.04	0.08±0.01	0.00±0.01	0.33±0.05	0.19±0.01	2
<u>Overlap removal</u>	<u>0.23±0.04</u>	<u>0.08±0.01</u>	<u>0.00±0.01</u>	<u>0.32±0.05</u>	<u>0.18±0.01</u>	<u>2</u>
2 SFOS pairs	1.64±0.11	0.12±0.01	0.04±0.02	1.79±0.11	0.20±0.01	0
4ℓ system cuts	0.72±0.07	0.11±0.01	0.04±0.02	0.86±0.08	0.18±0.01	0
<u>Overlap removal</u>	<u>0.70±0.07</u>	<u>0.10±0.01</u>	<u>0.04±0.02</u>	<u>0.84±0.08</u>	<u>0.17±0.01</u>	<u>0</u>



- 9.6 @  $m_H = 125 \text{ GeV}$
- 1  $\sigma$  excess

# ヒッグス断面積上限値 : $(W/Z)H$

- $WH \rightarrow WW \rightarrow l\nu l\nu$  ( $25 \text{ fb}^{-1}$ ),  $ZH \rightarrow WW \rightarrow l\nu l\nu$  ( $20.7 \text{ fb}^{-1}$ )



- 3.6 @  $m_H = 125 \text{ GeV}$
- $2\sigma$  excess

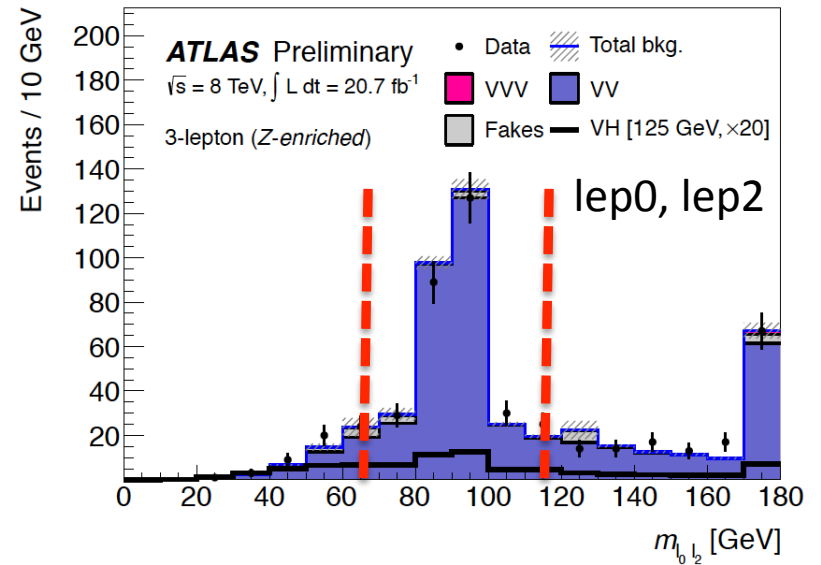
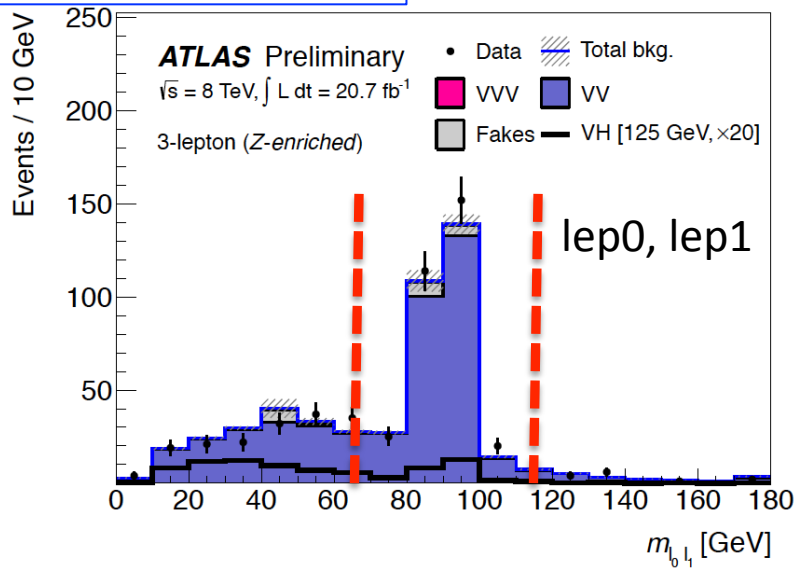
# まとめ

- ATLAS検出器を用いた $(W/Z)H \rightarrow WW \rightarrow l\nu l\nu$ 探索
  - $WH \rightarrow WW \rightarrow l\nu l\nu$  ( $25 \text{ fb}^{-1}$ ),  $ZH \rightarrow WW \rightarrow l\nu l\nu$  ( $20.7 \text{ fb}^{-1}$ )
  - 95 % 断面積上限値: 3.2 expected (@  $m_H = 125 \text{ GeV}$ )
  - データのexcessが見られたが $2\sigma$ 以下
- 現在Run1 paperを準備中
  - 本解析の再最適化、アップデート(多変数解析等)
  - 新しいチャンネルを可能な限り加える
    - $WH \rightarrow (SS) l\nu l\nu + \text{jets}$
    - $WH \rightarrow (OS) l\nu l\nu + 2 \text{ jets}$
    - $ZH \rightarrow ll l\nu + 2 \text{ jets}$
  - 今後は他の $(W/Z)H$ チャンネルとのcombinedも重要

# バックアップ

# WH

$M_{ll}$ 分布( $M_{ll}$ カット前)



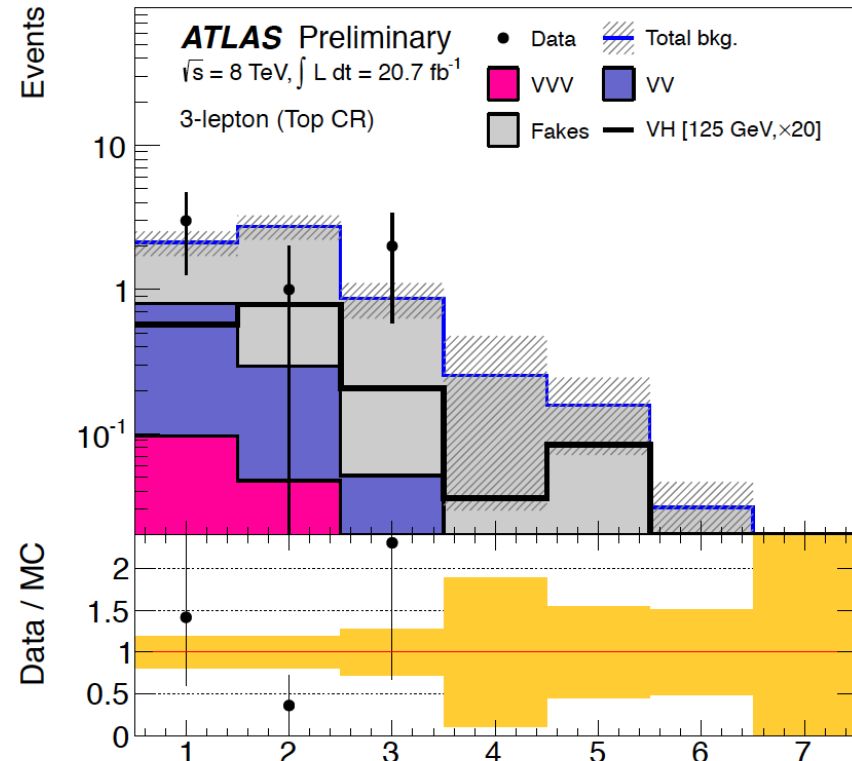
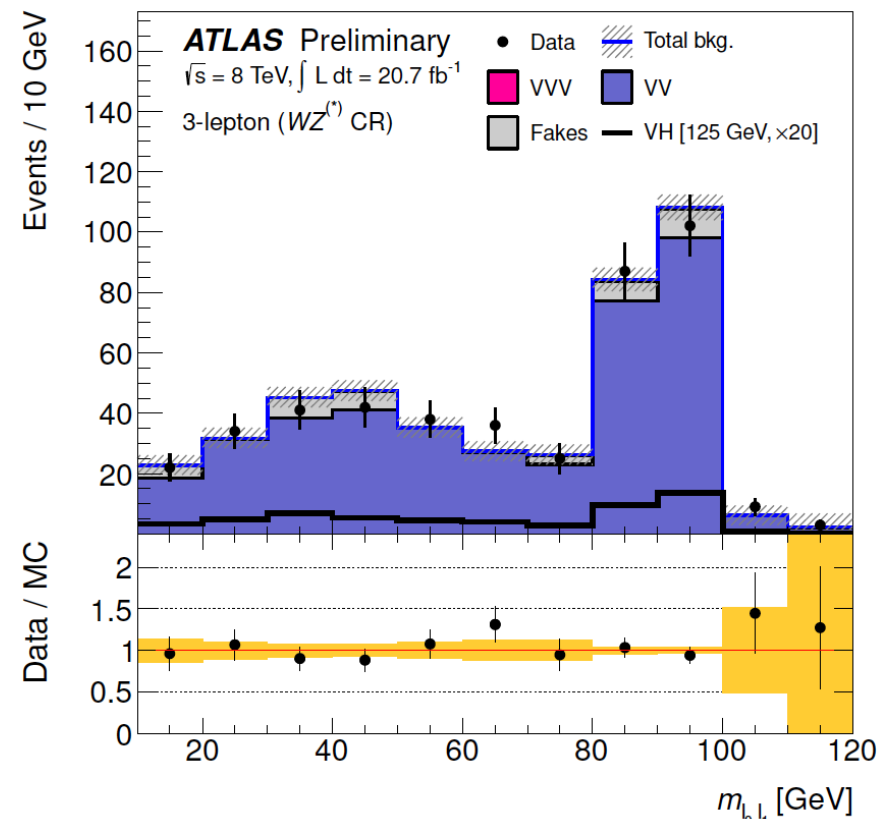
# 背景事象の規格化 ( $WZ, top$ )

$W(Z/\gamma^*)$  CR; Z vetoを反転

top CR: b-taggedジェットを要求

$WZ^{(*)}$ CR defined only for <i>Z-enriched</i>	Cut 1: at most one jet with $p_{T,jet} > 25$ GeV
	Cut 2: no <i>b</i> -tagged jets with $p_T > 25$ GeV
	Cut 3a: $E_{T,rel}^{miss} > 25$ GeV
	Cut 4: Z mass selection
	Cut 5: $m_{\ell\ell,min} > 12$ GeV
	Cut 6: $\Delta R_{lep0,lep1} < 2.0$

Top CR defined only for <i>Z-enriched</i>	Cut 1: at least 1 jet with $p > 25$ GeV
	Cut 2: at least 1 <i>b</i> -tagged jet with $p_T > 25$ GeV
	Cut 3a: $E_{T,rel}^{miss} > 40$ GeV
	Cut 4: Z mass veto
	Cut 5: $m_{\ell\ell,min} > 12$ GeV
	Cut 6: $\Delta R_{lep0,lep1} < 2.0$



# 背景事象の規格化 ( $ZZ^{(*)}$ , $Z+jets$ )

$ZZ^*$  CR;  $E_{T,Rel}^{miss}$  カットを反転

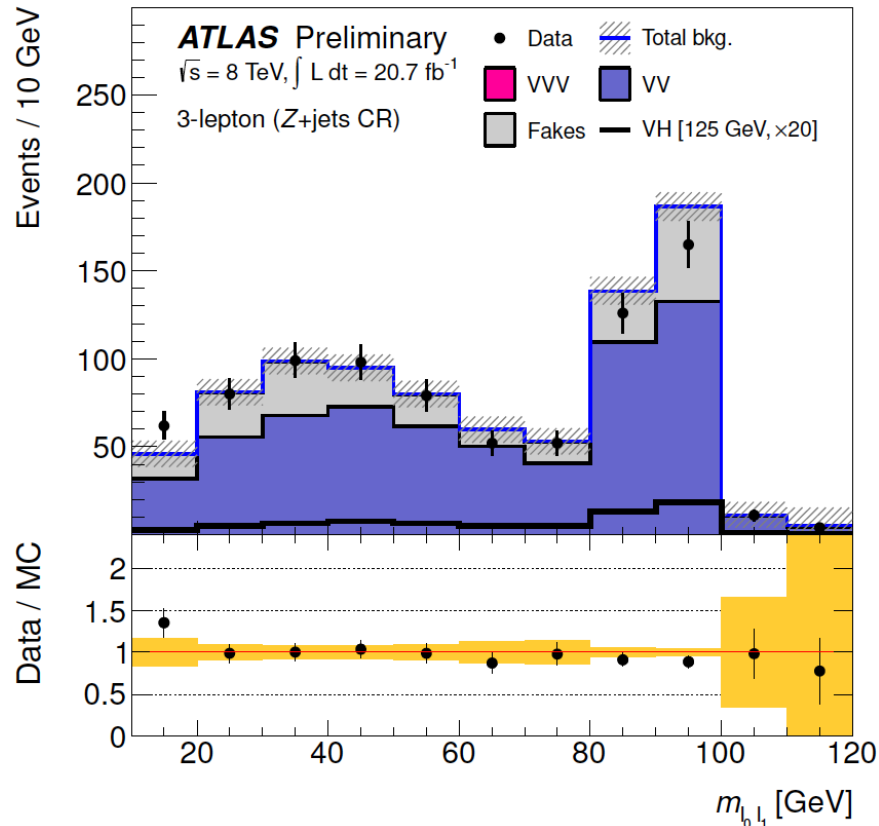
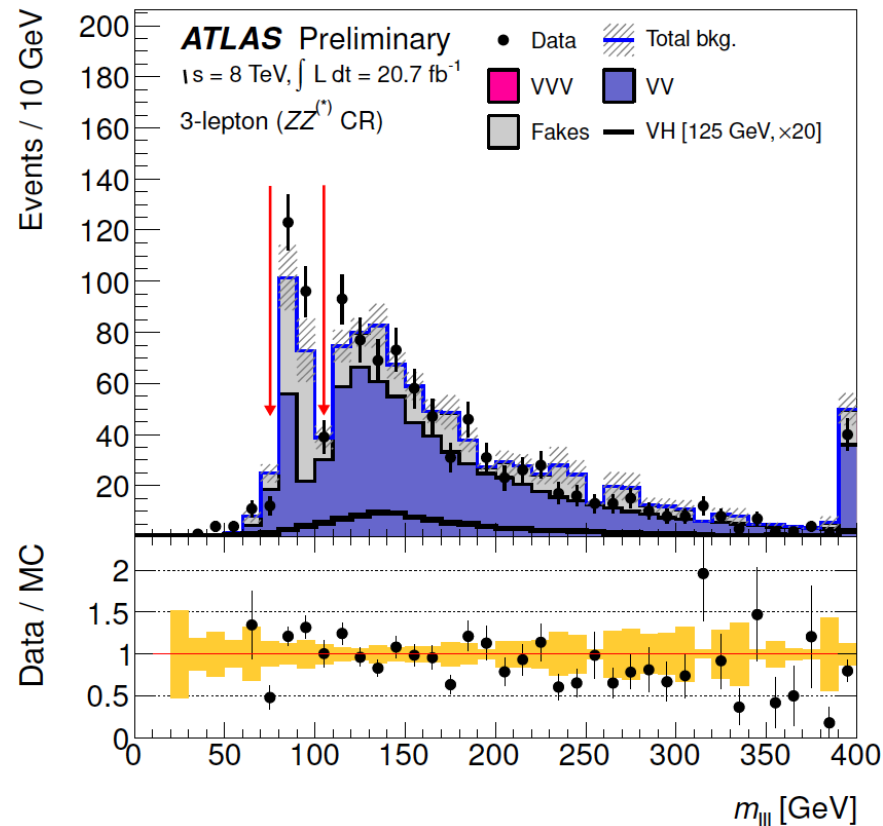
$Z+jets$  CR:  $Z$  veto,  $E_{T,Rel}^{miss}$  を反転

$ZZ^{(*)}$  CR  
defined only for  
 $Z$ -enriched

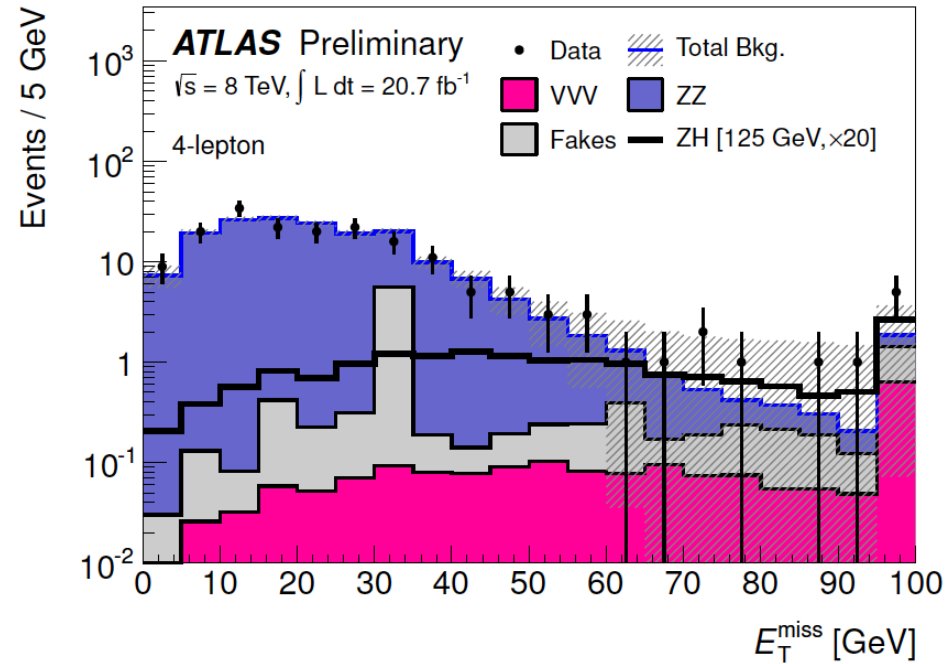
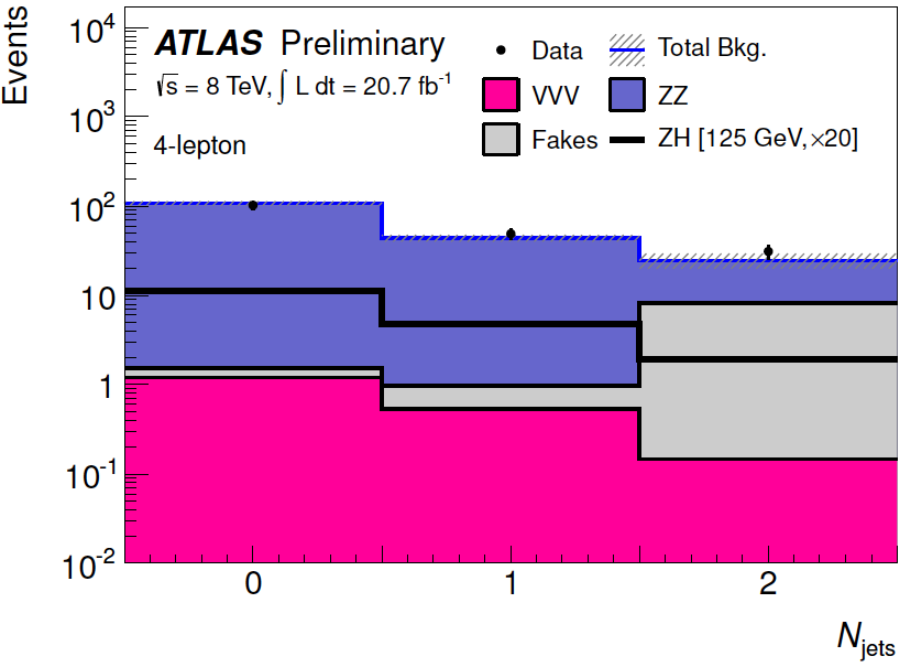
Cut 1: at most one jet with  $p_{T,jet} > 25$  GeV  
Cut 2: no  $b$ -tagged jets with  $p_T > 25$  GeV  
Cut 3a:  $E_{T,rel}^{miss} < 40$  GeV  
Cut 5:  $m_{\ell\ell,min} > 12$  GeV  
Cut 6:  $\Delta R_{lep0,lep1} < 2.0$   
 $|M_{\ell\ell} - M_Z| < 15$  GeV

$Z+jets$  CR  
defined only for  
 $Z$ -enriched

Cut 1: at most one jet with  $p_{T,jet} > 25$  GeV  
Cut 2: no  $b$ -tagged jets with  $p_T > 25$  GeV  
Cut 3a:  $E_{T,rel}^{miss} < 40$  GeV  
Cut 4:  $Z$  mass selection  
Cut 5:  $m_{\ell\ell,min} > 12$  GeV  
Cut 6:  $\Delta R_{lep0,lep1} < 2.0$

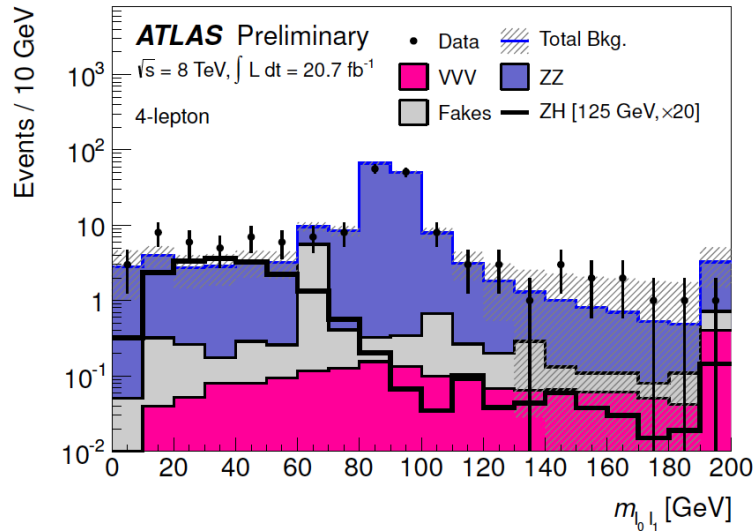


# ZH

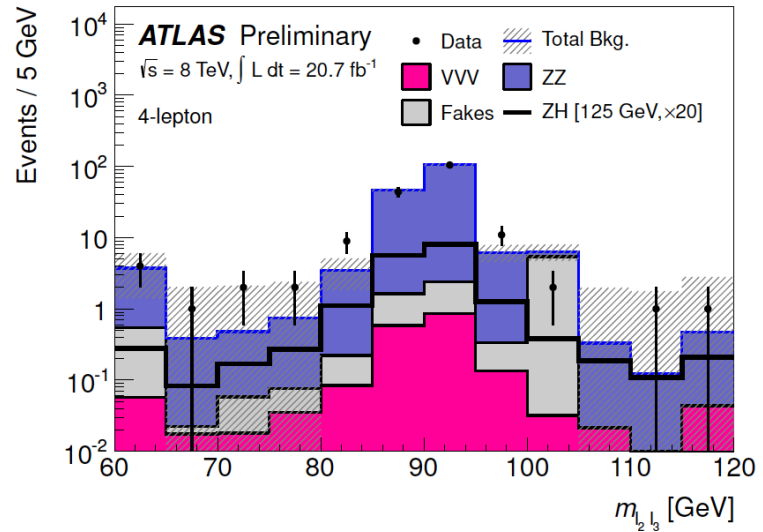




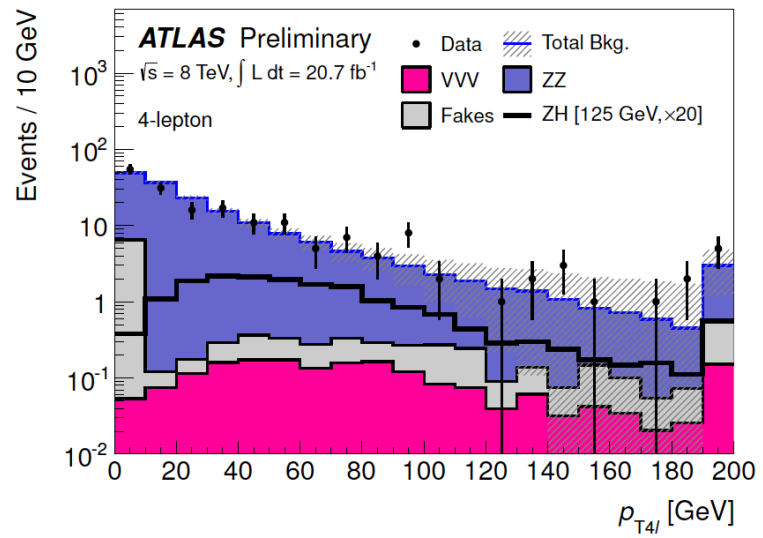
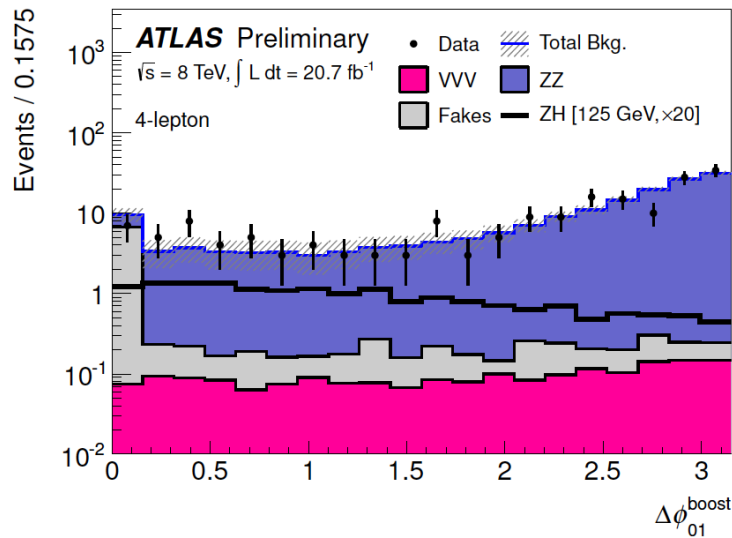
# ZH



(a)

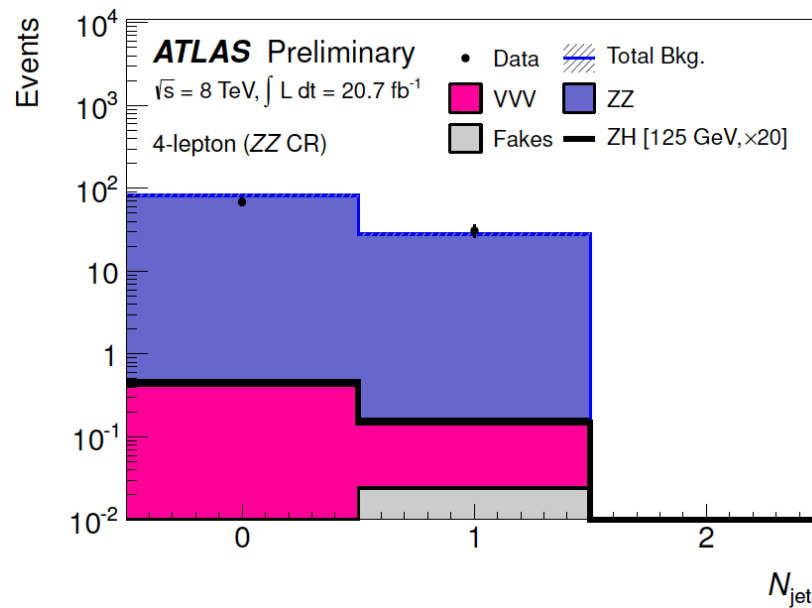
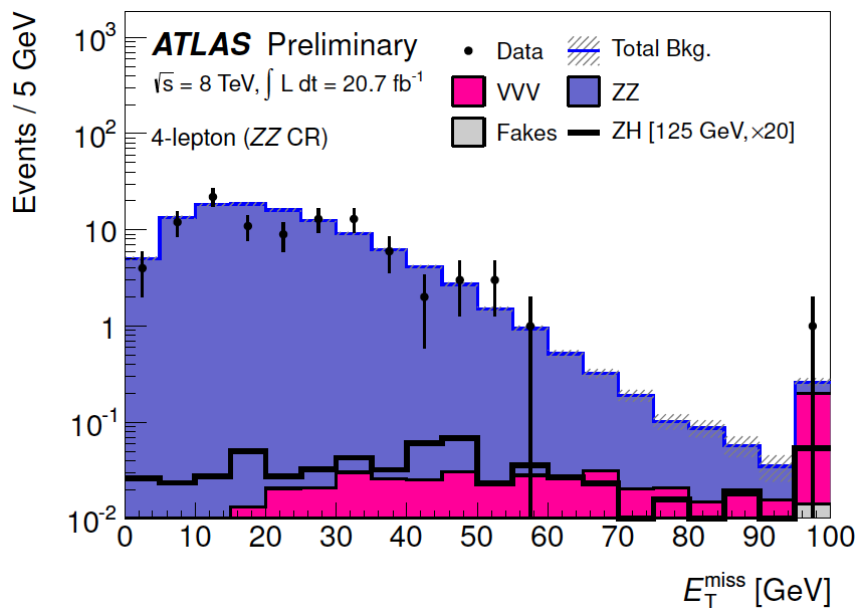


(b)



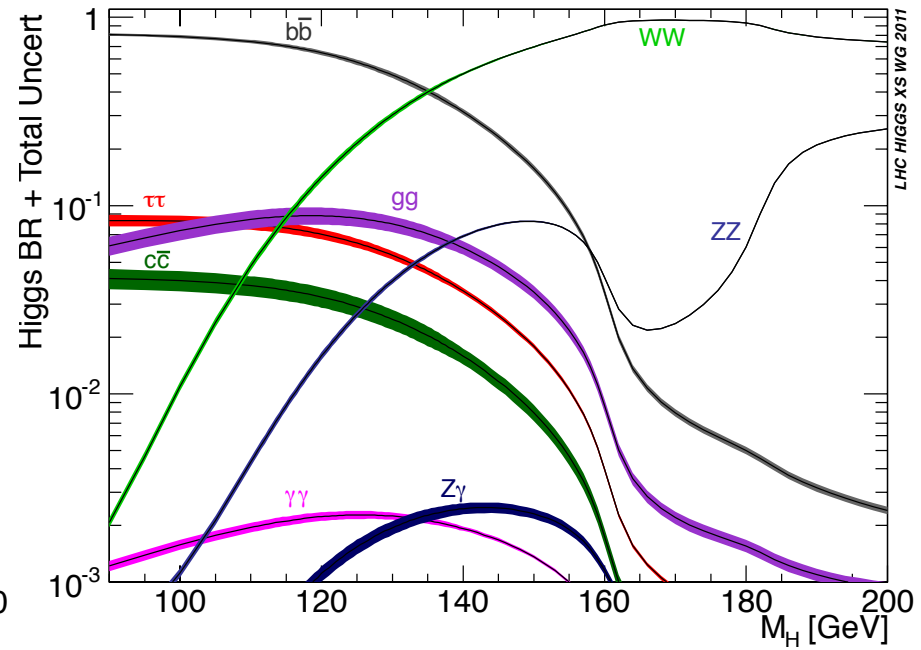
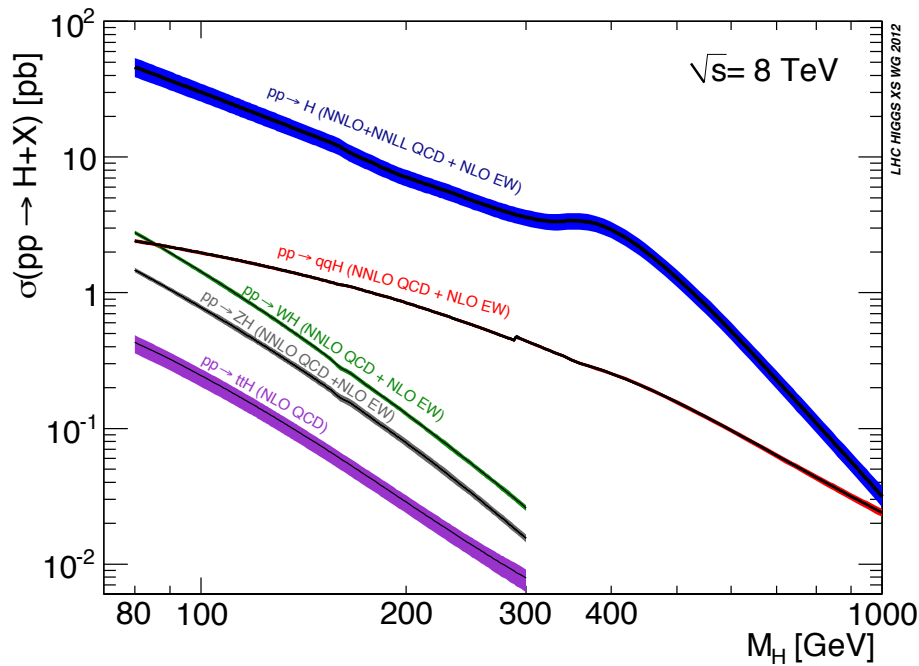
	Selection
ZZ CR	2 SFOS pairs of isolated leptons highest $p_T$ lepton: $p_T > 25$ GeV second highest $p_T$ lepton: $p_T > 20$ GeV third highest $p_T$ lepton: $p_T > 15$ GeV fourth highest $p_T$ lepton: $p_T > 10$ GeV at most one jet with $p_{T,jet} > 25$ GeV no $b$ -tagged jets with $p_T > 25$ GeV $ m_{\ell_2\ell_3} - m_Z  < 10$ GeV $m_{\ell_0\ell_1} > 65$ GeV overlap removal with dilepton analysis

$ZH(ZZ^{(*)})$



	$Z(H \rightarrow WW)$	Data	MC	Data/MC	$ZZ^*$	Top	VVV	$WZ^*$	Z+jets
ZZ CR	$0.03 \pm 0.00$	100	$100.00 \pm 3.19$	$1.00 \pm 0.10$	$99.42 \pm 3.19$	$0.03 \pm 0.02$	$0.55 \pm 0.03$	$0.00 \pm 0.01$	$0.00 \pm 0.01$

# $WH \rightarrow WWW$



[arXiv: 1201.3084]